



Verwertung biogener Abfälle: Rückstände und Schadstoffgehalte

abfall

Impressum

Verwertung biogener Abfälle: Rückstände und Schadstoffgehalte

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: (08 21) 90 71-0
Fax: (08 21) 90 71-55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 33, Heinz Riedel

Redaktion:

LfU, Referat 33, Hildegard Rothe

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Druck:

Eigendruck der Druckerei Bayerisches Landesamt für Umwelt
Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

November 2010

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Untersuchungsprogramm, -methodik	7
2.1	Untersuchungsprogramm	7
2.2	Untersuchungsmethodik	10
3	Ergebnisse und Diskussion	12
3.1	Schwermetalle	12
3.2	Organische Schadstoffe	18
3.2.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	18
3.2.2	Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	18
3.2.3	Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und dl-PCB)	19
3.2.3.1	Indikator-PCB	19
3.2.3.2	dl-PCB	19
3.2.4	Biphenyl	20
3.2.5	Hexachlorbenzol (HCB)	20
3.2.6	Pentachlorphenol (PCP)	20
3.2.7	ortho-Phenylphenol	21
3.2.8	Bisphenol A	24
3.2.9	Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP), Di-isononyl-phthalat (DINP)	24
3.2.9.1	DEHP	24
3.2.9.2	DINP	25
3.2.10	iso-Nonylphenol	25
3.2.11	Zinnorganische Verbindungen	26
3.2.11.1	Monobutylzinn	26
3.2.11.2	Monooktylzinn	26
3.2.11.3	Di-/Tri-/Tetrabutyl-, Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn	26
3.2.12	Galaxolide [®] (HHCB), Tonalide [®] (AHTN)	27
3.2.12.1	HHCB	27
3.2.12.2	AHTN	27
3.2.13	Polybromierte Diphenylether (PBDE)	30

3.2.14	Hexabromcyclododecan (HBCD)	30
3.2.15	Thiabendazol	30
3.2.16	Perfluorierte Tenside (PFT)	31
3.2.16.1	Perfluorooctansäure (PFOA)	31
3.2.16.2	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	31
3.2.16.3	Weitere perfluorierte Tenside	32
3.2.17	Triclosan, Methyl-Triclosan (TCLM)	33
3.2.17.1	Triclosan	33
3.2.17.2	TCLM	33
4	Zusammenfassung und Bewertung	36
5	Danksagung	45
6	Literatur	46

1 Einleitung

Der stofflichen Verwertung biogener Abfälle kommt aus ökologischer und insbesondere abfallwirtschaftlicher Sicht zur Schließung natürlicher Stoffkreisläufe eine hohe Bedeutung zu. Dabei darf die Rückführung der im Bioabfall und Grüngut enthaltenen organischen Substanz und Nährstoffe zu keiner höheren Schadstoffbelastung der Böden führen. D. h., die biogenen Abfälle sind so getrennt zu erfassen, dass diese möglichst gering mit Schadstoffen belastet sind, bzw. so zu behandeln, dass die enthaltenen Schadstoffe möglichst weitgehend eliminiert werden.

Produkte der Kompostierung sind Frisch- und Fertigkomposte, Produkte der Vergärung sind entwässerte und nachkompostierte Gärreste. Künftig wird die „reine“ Kompostierung immer mehr von Vergärungsverfahren mit Nachrotte abgelöst werden. Die Vorteile der Vergärung kommen dann zum Tragen, wenn man aus dem biogenen Abfall sowohl Energie als auch aus der Nachrotte des Gärrests einen hochwertigen, schadstoffarmen Kompost gewinnt.

Damit kommt man dem Ziel einer vollständigen Verwertung (stofflich, energetisch mit optimierter Wärmenutzung) nahe. Die o. g. Produkte aus der stofflichen Verwertung gehen in die Landwirtschaft, in den Garten- und Landschaftsbau, in Erdwerke sowie in die Rekultivierung.

Da sich schadstoffhaltige Chargen bei den angelieferten biogenen Abfallmengen nicht generell ausschließen lassen – eine lückenlose Überprüfung ist aufgrund des (Kosten-)Aufwands nicht umsetzbar –, kommt der Ermittlung der Produktqualität eine wichtige Aufgabe zu. Neben der Eigen- und Fremdüberwachung durch Fachverbände (z. B. Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Fachvereinigung Bayerischer Komposthersteller e. V.) führt das Bayerische Landesamt für Umwelt seit dem Jahr 2000 in mehrjährigen Abständen Beprobungen der Produkte zur Bestimmung der Schadstoffe (Schwermetalle, organische Stoffe) durch. Der Analysenumfang bezüglich Schwermetalle entspricht den gesetzlichen Vorgaben, der bezüglich organischer Schadstoffe wurde laufend erweitert. Damit gewinnt man einen Einblick, ob und in welcher Konzentration diese Spurenschadstoffe im biogenen Abfall vorhanden und im Produkt (Kompost, Gärrest) angereichert sind.

Im Folgenden wird über die Qualität bayerischer Komposte aus Bioabfall- und Grüngutkompostieranlagen sowie von Gärresten aus Bioabfallvergärungs- und landwirtschaftlichen Biogasanlagen berichtet. Gleichzeitig werden Schadstofftrends gegenüber früheren, vergleichbaren Untersuchungen aufgezeigt.

2 Untersuchungsprogramm, -methodik

Der Untersuchungsumfang und die Methodik entsprachen weitestgehend der im Jahr 2006 durchgeführten Untersuchung [1]. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der aktuellen mit früheren Daten [1, 2, 3] bzw. eine Fortschreibung der bestehenden Zeitreihen.

Erweitert wurde das Programm hinsichtlich (i) der Beprobung organischer Dünger wie flüssigen Rückständen aus Bioabfallvergärungsanlagen und Gärresten aus Biogasanlagen sowie (ii) der Aufnahme zusätzlicher organischer Schadstoffe (Di-isononyl-phthalat, Hexabromcyclododecan, acht weitere perfluorierte Tenside).

2.1 Untersuchungsprogramm

Wie im Jahr 2006 wurden bayernweit neben Bioabfall- und Grüngutkomposten auch (feste) Rückstände von Bioabfallvergärungsanlagen (Gärrückstände nach der Nachrotte) beprobt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die gleichen Anlagen ausgewählt wie bei der vorangegangenen Untersuchung; da gegenüber der Untersuchung 2006 eine Bioabfall- und eine Grüngutkompostieranlage ihren Betrieb eingestellt hatten, wurden aktuell je elf Bioabfall- und Grüngutkomposte untersucht. Mit sechs beprobten Bioabfallvergärungsanlagen wurde eine Vergärungsanlage mehr untersucht als im Jahr 2006.

Neu in das Untersuchungsprogramm aufgenommen wurden flüssige Rückstände aus Bioabfallvergärungsanlagen (von zwei der sechs Vergärungsanlagen) sowie Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen: es wurden vier landwirtschaftliche Biogasanlagen, die ausschließlich nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) und Wirtschaftsdünger einsetzen, sowie vier Biogasanlagen, die diese landwirtschaftlichen Substrate zusammen mit Bioabfall, organischen Reststoffen etc. vergären, ausgewählt. Bei den NawaRo-Anlagen setzte eine Anlage ausschließlich pflanzliche Einsatzstoffe (v. a. Mais), die anderen zusätzlich Wirtschaftsdünger ein (je eine Anlage Rinder-, Schweinegülle bzw. Hühnermist).

Die Auswahl der landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

Eine Übersicht über die 36 beprobten Anlagen, deren Einsatzstoffe und Behandlungsverfahren gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Beprobte Anlagen, Einsatzstoffe und Behandlungsverfahren.

Anlagenart	Anzahl	Einsatzstoffe (Anteil in %) ¹⁾	Behandlungsverfahren
Bioabfallkompostierung	11	Bioabfall (37–100) Grüngut (0–63) Filtrationsrückstände	geschlossene, eingehauste und offene (Mieten-)Kompostierung
Grüngutkompostierung	11	Grüngut (100)	offene Mietenkompostierung
Bioabfallvergärung	6	Bioabfall (35–100) überlagerte Lebensmittel (0–54) Speiseabfall (0–11)	mesophile Vergärung (37–43 °C) thermophile Vergärung (50–55 °C)

¹⁾ Angaben laut Anlagenbetreibern

Tab. 1 (Forts.): Beprobte Anlagen, Einsatzstoffe und Behandlungsverfahren.

Anlagenart	Anzahl	Einsatzstoffe (Anteil in %) ¹⁾	Behandlungsverfahren
Landwirtschaftliche Biogasanlagen	4	NawaRo-Anlagen: Mais (30–70) <i>Triticale</i> (0–50) Schweinegülle (0–35) Hühnermist (0–30) Gras (0–25) Roggen (0–15) Rindergülle (0–5)	mesophile Vergärung (40–42 °C)
	4	mit Bioabfallmitvergärung: Bioabfall (0–90) Gülle (0–50) Speiseabfall (0–40) Altbrot (0–10) Eiweiß, Fett (0–10) NawaRo (0–10) sowie Glycerin, Gras, Mais, Pansen und Pferdemist	mesophile Vergärung (38–42 °C) thermophile Vergärung (50–55 °C)

¹⁾ Angaben laut Anlagenbetreibern

Eine Übersicht über die anorganischen und organischen Schadstoffe mit den die jeweilige Analytik durchführenden Untersuchungslabors gibt Tabelle 2.

Änderungen gegenüber dem Parameterumfang des Jahres 2006 ergaben sich durch den Wegfall der Schadstoffklasse lineare Alkylbenzolsulfonate, die bei den letzten Untersuchungen [1, 3] vereinzelt (meist nur in Bioabfallkompostproben) nachgewiesen wurden, sowie durch die Aufnahme der Parameter Di-isononyl-phthalat, Hexabromcyclododecan und acht zusätzlicher perfluorierter Tenside (neben Perfluorooctansäure und -sulfonsäure). Des Weiteren wurde bei der aktuellen Untersuchung auf eine Bestimmung der zinnorganischen Verbindungen in den Grüngutkompostproben verzichtet; bei den vorangegangenen Untersuchungen [1, 3] wurden in dieser Probenart nahezu keine Vertreter dieser Schadstoffklasse gefunden.

Tab. 2: 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
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) <i>Summe 16 Komponenten nach [4]</i>	LfU Josef-Vogl-Technikum, Ref. 33
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F) <i>Summe 17 Kongenere nach [5]</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) <i>Summe PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (di-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), Di-isononyl-phthalat (DINP)	LfU München, Ref. 75

Tab. 2 (Forts.): Untersuchte Schadstoffe und zugehörige Untersuchungslabore.

Schadstoff/-klasse <i>Einzelkomponenten</i>	Untersuchungslabor
iso-Nonylphenol	GALAB Laboratories, Geesthacht
Zinnorganische Verbindungen ^{*)} <i>Mono-/Di-/Tri-/Tetrabutyl-, Mono-/Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn</i>	GALAB Laboratories, Geesthacht
Galaxolide [®] (HHCB), Tonalide [®] (AHTN)	LfU München, Ref. 75
Polybromierte Diphenylether (PBDE) <i>Summe BDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Hexabromcyclododecan (HBCD)	LfU Augsburg, Ref. 74
Thiabendazol	GALAB Laboratories, Geesthacht
Perfluorierte Tenside (PFT) <i>Perfluorooctansäure (PFOA), Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), acht weitere PFT</i>	LfU München, Ref. 75
Triclosan, Methyl-Triclosan (TCLM)	LfU München, Ref. 75

^{*)} analysierte Proben: alle Proben außer Grüngutkomposte

2.2 Untersuchungsmethodik

Die Probenahme für die 28 Feststoff- (je elf Bioabfall- und Grüngutkomposte, sechs feste Bioabfallvergärungsrückstände) und zehn Flüssigproben (zwei flüssige Bioabfallvergärungsrückstände, acht Biogasanlagengärreste) fand im Juli 2009 statt. Sie wurde gemäß den Vorgaben des Methodenbuchs zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. [6] durchgeführt (Mischprobe aus den Haufwerken der jeweiligen Lagerplätze). Beprobte wurden die organischen Dünger, wie sie zur weiteren Verwertung abgegeben werden; die Feststoffe wiesen Körnungsspektren zwischen 0 bis 10 mm und 0 bis 25 mm auf. Nach der Beprobung wurden die Proben bis zur weiteren Aufbereitung am LfU Josef-Vogl-Technikum bei +4 °C aufbewahrt bzw. bei -20 °C eingefroren.

Die Analytik erfolgte in Abhängigkeit des jeweiligen Parameters bzw. der Probenbeschaffenheit teilweise aus der ungetrockneten Originalprobe, teilweise aus der gefriergetrockneten Probe, siehe Tabelle 3. Zur Bestimmung der organischen Schadstoffgehalte in den flüssigen Rückständen wurde für alle Parameter die gefriergetrocknete Probe herangezogen. Die gefriergetrockneten Proben wurden gemahlen (Planeten-Schnellmühle), zur Analytik wurde die ungesiebte Probe eingesetzt.

Die angewandten Analysenverfahren mit den zugehörigen Bestimmungsgrenzen zeigt Tabelle 3.

Tab. 3: Eingesetzte Analysenverfahren und Bestimmungsgrenzen.

Schadstoff/-klasse	Ausgangsmaterial	Extraktionsmittel	Detektion	Bestimmungsgrenze(n) ^{*)}
Schwermetalle				
<i>Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn</i>	ungetrocknet	Königswasser	ICP-MS	0,1–25 mg/(kg TM) ^{*)}
<i>Hg</i>		(Feststoffanalyse)	AAS	0,005 mg/(kg TM)
PAK	gefriergetrocknet	Toluol	GC-MS	0,02–0,09 mg/(kg TM) ^{*)}
PCDD/F	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,01–0,7 ng/(kg TM) ^{*)}
Indikator-PCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,01–0,02 µg/(kg TM) ^{*)}
di-PCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,05–3 ng/(kg TM) ^{*)}
Biphenyl	ungetrocknet ^{**)}	Acetonitril	GC-MS	10 µg/(kg TM)
HCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,01 µg/(kg TM)
PCP	gefriergetrocknet	Na ₂ CO ₃ -Lösung	GC-MS	5 µg/(kg TM)
ortho-Phenylphenol	ungetrocknet ^{**)}	Acetonitril	GC-MS	10 µg/(kg TM)
Bisphenol A	ungetrocknet ^{**)}	Hexan	GC-MS	25 µg/(kg TM)
DEHP, DINP	gefriergetrocknet	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	0,5 mg/(kg TM)
iso-Nonylphenol	ungetrocknet ^{**)}	Hexan	GC-MS	100 µg/(kg TM)
zinnorganische Verbindungen	ungetrocknet ^{**)}	Wasser/Methanol	GC-AED	1 µg Sn/(kg TM)
HHCb, AHTN	gefriergetrocknet	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	3 µg/(kg TM)
PBDE	gefriergetrocknet	n-Hexan/Aceton	GC-MS	0,003–19 µg/(kg TM) ^{*)}
HBCD	gefriergetrocknet	n-Hexan/Aceton	GC-MS	0,2–0,9 µg/(kg TM)
Thiabendazol	ungetrocknet ^{**)}	Acetonitril	LC-MS/MS	10 µg/(kg TM)
PFT	gefriergetrocknet	Methanol	LC-MS	0,5–1 µg/(kg TM)
Triclosan, TCLM	gefriergetrocknet	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	3 µg/(kg TM)

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

^{**)} Analytik der flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände und Biogasanlagengärreste aus gefriergetrockneter Probe

Die Tabelle 4 fasst die ermittelten Trockensubstanzgehalte der untersuchten organischen Dünger und die spezifischen Dichten der flüssigen Rückstände zusammen. Bei den Feststoffproben weisen die Komposte Trockensubstanzgehalte zwischen 50 und 82 Mass.-% auf, während die (festen) Bioabfallvergärungsrückstände mit Werten von 33 bis 67 Mass.-% etwas niedrigere Trockensubstanzgehalte besitzen.

Die Feststoffgehalte der Flüssigproben liegen bei acht von zehn Proben zwischen 5 und 8 Mass.-%; nur je ein (flüssiger) Rückstand aus einer Bioabfallvergärungs- und Biogasanlage haben deutlich höhere Trockensubstanzgehalte von 13 bzw. 20 Mass.-%. Entsprechend den niedrigen Feststoffgehalten weisen die flüssigen Rückstände Dichten um 1 kg/l auf (bei acht von zehn Proben zwischen 0,99 und 1,02 kg/l); die höheren Trockensubstanzgehalte der beiden o. g. Flüssigproben schlagen sich in geringfügig höheren Dichten von 1,04 bzw. 1,07 kg/l nieder.

Tab. 4: Trockensubstanzgehalte und spezifische Dichten (Bereiche) der untersuchten Probenarten; n. b.: nicht bestimmt.

Probenart	Anzahl	Trockensubstanzgehalt [Mass.-%]	Dichte [kg/l]
Bioabfallkompost	11	50,2–81,7	n. b.
Grüngutkompost	11	52,6–79,6	n. b.
Bioabfallvergärungsrückstand, fest	6	32,8–67,3	n. b.
Bioabfallvergärungsrückstand, flüssig	2	5,7–12,7	1,01–1,04
Biogasanlagengärrest	8	5,0–20,0	0,99–1,07

Im Folgenden sind aus Gründen der Vergleichbarkeit alle Schadstoffgehalte (auch der Flüssigproben) auf die Trockenmasse (TM) bezogen (Masseangaben pro kg TM).

Für die Flüssigproben bedeutet dies aufgrund der vorliegenden Trockensubstanzgehalte und Dichten der Proben, dass deren volumenbezogene Schadstoffgehalte (Angaben in [g/l]) um ca. eine Größenordnung niedriger liegen als die auf die Trockenmasse bezogenen Werte.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Analysenergebnisse erfolgte getrennt nach den untersuchten Probenarten, um Aussagen zum Schadstoffgehalt der unterschiedlichen organischen Dünger bzw. zum Behandlungsverfahren zu erhalten.

Im Folgenden werden die aktuellen Schadstoffgehalte in den Komposten und Vergärungsrückständen in Form von Wertebereich (Minimum, Maximum), Median, Mittelwert und Standardabweichung tabellarisch dargestellt und – soweit vorhanden – mit den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen [1, 2, 3] (grau unterlegt) verglichen. Falls einzelne Analysenergebnisse unter der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Analysenverfahrens lagen, werden nur Wertebereich und Median angegeben, bei den beiden flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen nur der Wertebereich.

3.1 Schwermetalle

Die statistischen Daten der ermittelten Schwermetallgehalte der aktuellen sowie der drei vorangegangenen Untersuchungen [1, 2, 3] fassen Tabelle 5 für die untersuchten Komposte (Bioabfall- und Grüngutkomposte) und Tabelle 6 für die Vergärungsrückstände (feste und flüssige Bioabfallvergärungsrückstände, Biogasanlagengärreste) zusammen.

Komposte. Die Bioabfallverordnung [7] fordert für die landwirtschaftliche Verwertung von Bioabfällen hinsichtlich der Schwermetallbelastung die Einhaltung von Grenzwerten (für sieben Schwermetalle sind in Abhängigkeit der Aufbringungsfracht jeweils zwei Grenzwerte angegeben). Verglichen mit diesen Grenzwerten wurden für alle untersuchten Schwermetalle bis auf Kupfer niedrige Gehalte in den Komposten gefunden. Die ermittelten maximalen Konzentrationen liegen bei den Bioabfallkomposten zwischen 27 % (Quecksilber) und 82 % (Nickel), bei den Grüngutkomposten zwischen 48 % (Blei, Chrom) und 66 % (Nickel, Quecksilber) der zugehörigen niedrigeren Grenzwerte (Aufbringungsmenge 30 Mg TM/ha in 3 Jahren).

Für das Schwermetall Kupfer ergibt sich je eine Grenzwertüberschreitung bei beiden Kompostarten (bei jeweils elf untersuchten Proben). Eine Bioabfallkompostprobe liegt knapp (6 %) über dem niedrigeren Grenzwert von 70 mg/(kg TM) [7], während eine Grüngutkompostprobe sogar den höheren Grenzwert von 100 mg/(kg TM) [7] deutlich überschreitet (63 % über dem niedrigeren bzw. 14 % über dem höheren Grenzwert für Kupfer). Allerdings ist dieser hohe Kupfergehalt {114 mg/(kg TM)} im Grüngutkompost als Ausreißer einzustufen, da alle anderen (zehn) Grüngutkompostproben Kupferkonzentrationen zwischen 27 und 45 mg/(kg TM) aufweisen.

Ebenso zeigen sich für alle untersuchten Schwermetalle außer Kupfer keine größeren Unterschiede zwischen der Belastung der Bioabfall- und der Grüngutkomposte. Bei Chrom (beide Mediane unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens), Nickel und Quecksilber haben die beiden Kompostarten nahezu identische Mediane; für Zink weisen die Bioabfall-, für Blei und Cadmium die Grüngutkomposte geringfügig höhere Mediane auf. Als einzige Ausnahme ist bei Kupfer die Belastung in den Bioabfallkomposten deutlich höher (+63 %) als in den Grüngutkomposten.

Ein Vergleich der Mediane der aktuell ermittelten Schwermetallkonzentrationen mit denen aus früheren Untersuchungen [1, 2, 3] zeigt die zeitliche Entwicklung der Schwermetallbelastung in den Komposten in den letzten zehn Jahren. Auffallend hierbei ist die Angleichung der Schwermetallgehalte in Bioabfall- und Grüngutkomposten bei allen untersuchten Schwermetallen außer Kupfer; bei den Bioabfallkomposten ist ein Rückgang der Schwermetallbelastung zu konstatieren, während bei den Grüngutkomposten ein indifferenter Trend zu verzeichnen ist.

Bei den Bioabfallkomposten wurden bei der aktuellen Untersuchung für fünf der sieben untersuchten Schwermetalle die bislang niedrigsten Mediane ermittelt; Ausnahmen bilden die Schwermetalle Chrom (keine Aussage möglich, da Mediane seit der Untersuchung 2002 unter der Bestimmungsgrenze des

Tab. 5: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) in den Bioabfall- und Grüngutkomposten im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2], 2002 [3] und 2006 [1]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallkompost				Grüngutkompost			
	2009	2006	2002	2000	2009	2006	2002	2000
Probenanzahl N	11	12	2×11 ^{*)}	15	11	12	2×11 ^{*)}	5
Blei								
Minimum	17,3	21,7	21,6	27,9	14,9	17,0	17,2	21,2
Median	25,6	37,4	36,9	44,2	28,9	27,0	24,9	23,3
Mittelwert	26,8	36,9	37,3	42,7	27,6	33,6	32,3	25,6
Maximum	37,6	51,4	50,2	69,7	47,9	90,9	82,8	31,3
<i>Standardabweichung</i>	6,7	10,2	8,2	12,6	10,0	19,7	17,4	4,9
Cadmium								
Minimum	0,255	0,259	0,333	0,350	0,271	0,287	0,261	0,250
Median	0,365	0,455	0,414	0,430	0,391	0,383	0,376	0,320
Mittelwert	0,386	0,454	0,426	0,445	0,393	0,393	0,375	0,332
Maximum	0,519	0,826	0,616	0,660	0,524	0,529	0,535	0,440
<i>Standardabweichung</i>	0,079	0,136	0,073	0,082	0,082	0,081	0,062	0,069
Chrom								
Minimum	< 25,0	13,9	18,2	20,4	< 25,0	13,5	15,9	20,0
Median	< 25,0	22,1	23,6	26,2	< 25,0	20,0	22,8	28,0
Mittelwert	n. b.	23,8	26,0	27,2	n. b.	20,7	23,4	26,6
Maximum	36,8	44,7	43,7	41,6	33,5	28,0	38,9	35,6
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	8,1	6,9	6,1	n. b.	4,5	5,5	6,4
Kupfer								
Minimum	37,7	43,4	34,8	39,2	27,0	29,5	25,3	33,1
Median	59,5	59,9	52,5	65,5	36,6	38,9	35,9	34,4
Mittelwert	55,1	69,9	71,5	67,9	43,7	42,4	38,6	39,6
Maximum	74,4	101,6	223,2	130,0	114,1	64,0	72,5	51,8
<i>Standardabweichung</i>	13,7	18,9	46,0	21,6	24,0	12,2	11,7	8,2
Nickel								
Minimum	10,2	9,6	9,1	13,5	< 10,0	8,8	10,3	13,4
Median	12,3	14,4	14,9	16,6	12,5	12,0	15,2	16,8
Mittelwert	14,5	16,1	16,3	18,5	n. b.	13,6	16,2	18,5
Maximum	28,8	29,1	25,8	38,5	23,2	23,0	31,6	30,8
<i>Standardabweichung</i>	5,8	6,1	4,4	6,7	n. b.	4,6	4,9	7,2
Quecksilber								
Minimum	0,096	0,097	0,080	0,140	0,087	0,073	0,080	0,090
Median	0,113	0,126	0,135	0,170	0,111	0,096	0,120	0,130
Mittelwert	0,122	0,133	0,154	0,230	0,153	0,153	0,182	0,124
Maximum	0,187	0,195	0,360	0,980	0,460	0,671	0,700	0,150
<i>Standardabweichung</i>	0,027	0,033	0,064	0,210	0,112	0,168	0,167	0,024
Zink								
Minimum	124	141	139	159	116	108	109	98
Median	146	191	185	175	136	147	141	124
Mittelwert	158	205	191	195	137	159	152	126
Maximum	209	334	360	288	160	249	233	154
<i>Standardabweichung</i>	28	50	46	40	16	43	33	20

^{*)} Sommer- und Winterbeprobung von jeweils elf Bioabfall- und Grüngutkompostieranlagen

Analysenverfahrens) und Kupfer (niedrigster Median im Jahr 2002 [3]: sowohl Median der Sommerbeprobung {55,0 mg/(kg TM)} als auch Median der Winterbeprobung {48,9 mg/(kg TM)} liegen unter dem aktuellen Median). Der deutlichste Rückgang der Belastung ist für die Schwermetalle Blei (–42 % gegenüber dem Jahr 2000), Nickel (–26 %) und Quecksilber (–34 %) zu verzeichnen.

Im Unterschied zu den Bioabfallkomposten zeigen die Grüngutkomposte für die meisten der untersuchten Schwermetalle keinen rückläufigen Trend. Für Blei und Cadmium (– seit dem Jahr 2002 nur noch geringer Anstieg –) sind die ermittelten Mediane die höchsten der bisherigen Untersuchungen;

diese beiden Schwermetalle gingen seit der Untersuchung im Jahr 2000 [2] nach oben (Blei: +24 %; Cadmium: +22 %). Die Ursache für diesen offensichtlichen Trend bleibt unklar, da die veröffentlichten Daten über die Luftbelastung eine andere Situation zeigen [8, 9]. Lediglich die Nickelgehalte in den Grüngutkomposten sind in den letzten Jahren deutlich gesunken (–26 % gegenüber dem Jahr 2000, gleicher Rückgang wie bei den Bioabfallkomposten; niedrigster Median bei der Untersuchung 2006 [1]).

Vergärungsrückstände. Die Vergärungsrückstände weisen ähnliche Schwermetallgehalte wie die Komposte auf. Allerdings treten insgesamt etwas höhere Kupfer- und insbesondere Zinkgehalte auf als bei den Komposten.

Der Bioabfallverordnung [7] unterliegen die Vergärungsrückstände aus Bioabfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Vergärung von Bioabfällen. Diese halten bis auf Kupfer und Zink die Grenzwerte der Bioabfallverordnung für alle Schwermetalle ein. Die ermittelten maximalen Konzentrationen für Blei, Cadmium, Chrom, Nickel und Quecksilber schöpfen die zugehörigen niedrigeren Grenzwerte bei den festen Bioabfallvergärungsrückständen zu 22 bis 59 %, bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen zu 16 bis 85 % und bei den Biogasanlagengärresten zu 10 bis 51 % (untere Prozentangabe: jeweils Quecksilber, obere Prozentangabe: jeweils Nickel) aus. Die Kupfergrenzwerte werden von einem Drittel der festen Bioabfallvergärungsrückstände (zwei Überschreitungen, davon eine des höheren Grenzwerts) sowie von jeweils der Hälfte der flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände (eine des niedrigeren Grenzwerts) und der Biogasanlagengärreste (zwei des niedrigeren Grenzwerts) überschritten. Die zwei Gärrestproben, die den Kupfergrenzwert überschreiten, halten auch die Grenzwerte für Zink nicht ein (zwei Überschreitungen, davon eine des höheren Grenzwerts).

Im Vergleich der Mediane zeigen die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände – sofern man deren Ergebnisse trotz der geringen Anzahl (N=2) an untersuchten Proben verallgemeinern kann – die vergleichsweise höchste Belastung an Cadmium, Chrom, Kupfer und Nickel (aus dem Vergleich der jeweiligen Mediane). Die festen Bioabfallvergärungsrückstände weisen die höchsten Blei- und Quecksilber-, die Biogasanlagengärreste mit den festgestellten Grenzwertüberschreitungen (bei zwei der vier Proben) die höchsten Zinkgehalte auf. Abgesehen von erhöhten Kupfer- und Zinkkonzentrationen sind die Biogasanlagengärreste von allen fünf untersuchten organischen Düngern, die der Bioabfallverordnung unterliegen, am geringsten mit Schwermetallen belastet.

Die Gärreste aus der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen/Wirtschaftsdünger (vgl. Tab. 1) zeigen ähnliche Schwermetallgehalte wie die Gärreste aus der Mitvergärung von Bioabfällen. Höhere Werte sind v. a. bei Kupfer und Zink (bei zwei der vier Proben) festzustellen. Inwieweit diese durch den eingesetzten Hühnermist (Anteil: ca. 30 %) bzw. Rindergülle (ca. 5 %) bedingt sind, bleibt offen.

Tab. 6: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) in den Rückständen aus Bioabfallvergärungs- und Biogasanlagen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchung aus dem Jahr 2006 [1]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmt.

	Bioabfallvergärungsrückstand			Biogasanlagengärrest	
	fest		flüssig	NawaRo	Mitvergärung
Untersuchungsjahr	2009	2006	2009	2009	
Probenanzahl N	6	5	2	4	4
Blei					
Minimum	13,0	4,8	13,3	< 2,5	< 2,5
Median	26,0	26,8	n. b.	< 2,5	3,5
Mittelwert	24,9	22,6	n. b.	< 2,5	n. b.
Maximum	31,8	33,9	26,4	< 2,5	24,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>6,6</i>	<i>11,1</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Cadmium					
Minimum	0,230	0,146	0,531	0,191	0,211
Median	0,341	0,366	n. b.	0,202	0,273
Mittelwert	0,344	0,351	n. b.	0,262	0,292
Maximum	0,433	0,481	0,654	0,453	0,413
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,072</i>	<i>0,132</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,128</i>	<i>0,090</i>
Chrom					
Minimum	< 25,0	16,6	< 25,0	< 25,0	< 25,0
Median	25,5	23,0	n. b.	< 25,0	< 25,0
Mittelwert	n. b.	25,3	n. b.	< 25,0	n. b.
Maximum	29,3	35,8	43,7	< 25,0	33,9
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>8,3</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Kupfer					
Minimum	30,8	24,7	65,2	19,9	27,4
Median	65,6	71,5	n. b.	81,8	68,8
Mittelwert	73,8	70,9	n. b.	92,7	64,9
Maximum	154,7	112,2	81,3	187,3	94,7
<i>Standardabweichung</i>	<i>42,5</i>	<i>33,7</i>	<i>n. b.</i>	<i>71,2</i>	<i>30,2</i>
Nickel					
Minimum	11,3	9,5	15,4	< 10	< 10
Median	13,5	11,5	n. b.	< 10	10,2
Mittelwert	14,6	13,3	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	20,7	19,1	29,8	12,8	18,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>3,9</i>	<i>4,4</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Quecksilber					
Minimum	0,079	0,030	0,095	0,015	0,018
Median	0,119	0,097	n. b.	0,018	0,028
Mittelwert	0,120	0,086	n. b.	0,018	0,037
Maximum	0,151	0,122	0,111	0,020	0,072
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,028</i>	<i>0,040</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,002</i>	<i>0,024</i>
Zink					
Minimum	93	88	214	92	146
Median	166	179	n. b.	305	262
Mittelwert	171	167	n. b.	444	300
Maximum	249	218	285	1.072	530
<i>Standardabweichung</i>	<i>61</i>	<i>53</i>	<i>n. b.</i>	<i>431</i>	<i>173</i>

Zum Lesen der Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.7 bitte diese Seite (Tab. 7) und Seite 23 (Tab. 8) ausklappen.

Tab. 7: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Bioabfall- und Grüngutkomposten im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2], 2002 [3] und 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallkompost				Grüngutkompost			
	2009	2006	2002	2000	2009	2006	2002	2000
Probenanzahl N	11	12	2×11 ^{*)}	15	11	12	2×11 ^{*)}	5
Summe PAK [mg/(kg TM)]								
Minimum	0,98	0,79	1,12	1,41	0,51	0,40	1,02	1,69
Median	2,03	2,31	2,05	3,18	1,62	1,23	1,84	2,32
Mittelwert	2,10	2,69	2,50	3,86	1,65	1,22	2,20	2,32
Maximum	3,58	7,73	5,83	10,20	2,88	2,19	5,90	2,95
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,88</i>	<i>1,95</i>	<i>1,15</i>	<i>2,20</i>	<i>0,66</i>	<i>0,48</i>	<i>1,18</i>	<i>0,51</i>
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TM)]								
Minimum	4,62	3,33	4,36	8,63	3,28	1,22	5,05	3,70
Median	5,50	6,47	7,95	11,30	5,48	3,78	9,24	9,61
Mittelwert	6,26	8,63	9,19	12,46	5,22	4,11	9,09	8,84
Maximum	8,96	32,40	26,07	29,70	7,47	6,99	14,73	12,60
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,61</i>	<i>8,18</i>	<i>4,61</i>	<i>5,40</i>	<i>1,32</i>	<i>1,95</i>	<i>2,90</i>	<i>3,42</i>
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TM)]								
Minimum	10,0	7,4	9,9	15,0	9,0	4,8	16,5	19,0
Median	17,4	22,2	32,2	43,0	14,2	17,2	27,0	29,0
Mittelwert	19,8	21,1	34,7	64,7	28,6	23,1	41,0	31,8
Maximum	64,9	38,3	73,5	196,0	148,9	70,1	178,9	56,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>15,5</i>	<i>9,0</i>	<i>17,3</i>	<i>54,0</i>	<i>40,7</i>	<i>17,9</i>	<i>36,0</i>	<i>14,8</i>
Summe dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]								
Minimum	1,04	0,39	0,95 ^{**)}	n. b.	1,08	0,61	2,15 ^{**)}	n. b.
Median	2,05	2,37	2,61^{**)}	n. b.	2,17	2,17	2,87^{**)}	n. b.
Mittelwert	2,15	2,52	2,87 ^{**)}	n. b.	3,75	2,30	4,22 ^{**)}	n. b.
Maximum	5,25	4,46	5,78 ^{**)}	n. b.	19,11	4,54	14,17 ^{**)}	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,14</i>	<i>1,40</i>	<i>1,34^{**)}</i>	<i>n. b.</i>	<i>5,18</i>	<i>1,29</i>	<i>3,52^{**)}</i>	<i>n. b.</i>
Biphenyl [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 10	< 10	n. b.	31	< 10	< 10	n. b.	24
Median	< 10	< 10	n. b.	79	< 10	< 10	n. b.	45
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	82	< 10	< 10	n. b.	52
Maximum	< 10	17	n. b.	144	< 10	< 10	n. b.	93
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>37</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>29</i>
HCB [µg/(kg TM)]								
Minimum	0,8	0,1	n. b.	< 1,0	0,9	0,7	n. b.	2,0
Median	2,6	1,9	n. b.	4,0	1,7	1,4	n. b.	2,0
Mittelwert	4,4	2,3	n. b.	n. b.	1,7	1,5	n. b.	3,0
Maximum	8,6	7,2	n. b.	13,0	2,9	2,7	n. b.	6,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>3,1</i>	<i>1,9</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,7</i>	<i>0,6</i>	<i>n. b.</i>	<i>1,7</i>
PCP [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 5	< 5	n. b.	4	< 5	< 5	n. b.	1
Median	49	15	n. b.	9	< 5	< 5	n. b.	6
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	14	n. b.	n. b.	n. b.	5
Maximum	540	37	n. b.	41	150	25	n. b.	9
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>11</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>3</i>
ortho-Phenylphenol [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 10	< 10	n. b.	10	< 10	< 10	n. b.	20
Median	< 10	< 10	n. b.	30	< 10	< 10	n. b.	20
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	38	< 10	< 10	n. b.	28
Maximum	< 10	21	n. b.	120	< 10	< 10	n. b.	40
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>28</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>11</i>

^{*)} Sommer- und Winterbeprobung von jeweils elf Bioabfall- und Grüngutkompostieranlagen

^{**)} elf analysierte Proben (Sommerbeprobung)

3.2 Organische Schadstoffe

Bei einigen organischen Schadstoffklassen (PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, PBDE; vgl. Tab. 2) werden die Summengehalte angegeben; bei der Berechnung dieser Summenwerte blieben Einzelkomponenten, deren Gehalte unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens lagen, aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den früheren Untersuchungen unberücksichtigt.

Die folgenden Tabellen 7 bis 12 fassen die Ergebnisse der aktuellen Analysen auf organische Schadstoffe zusammen; zum Vergleich wurden diese Daten den entsprechenden Werten der vorangegangenen Untersuchungen [1, 2, 3] gegenübergestellt.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Ergebnisse der einzelnen „Schadstoffklassen“ erläutert.

3.2.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Komposte. Die Belastung der Bioabfall- und Grüngutkomposte mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen ist (nach wie vor) für organische Schadstoffe vergleichsweise hoch: die Summengehalte für die 16 analysierten PAK liegen in 20 der 22 Proben im einstelligen mg/kg-Bereich und damit deutlich höher als die Konzentrationen der meisten anderen untersuchten organischen Schadstoffe (i. d. R. \leq zweistelliger µg/kg-Bereich). Selbst die Gehalte des als PAK-Leitsubstanz geltenden, kanzerogenen Benzo[a]pyrens in den Komposten liegen noch im zwei- bis dreistelligen µg/kg-Bereich. Wie schon bei den vorangegangenen weisen die Bioabfallkomposte bei der aktuellen Untersuchung leicht höhere Belastungen auf als die Grüngutkomposte; so stammt auch die ermittelte maximale PAK-Konzentration mit 3,58 mg/(kg TM) aus einer Bioabfallkompostprobe.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der PAK-Konzentrationen (anhand der Mediane), so scheinen sich nach leichtem Rückgang die Kompostgehalte in den letzten Jahren auf einem konstanten Niveau eingependelt zu haben: bei den Bioabfallkomposten bei knapp über 2 mg/(kg TM) (–36 % gegenüber dem Jahr 2000), bei den Grüngutkomposten bei ca. 1,5 mg/(kg TM) (–30 %).

Vergärungsrückstände. Insgesamt unterscheiden sich die PAK-Gehalte der Vergärungsrückstände kaum von denen der Komposte. Die Rückstände aus Bioabfallvergärungsanlagen weisen etwas höhere PAK-Belastungen auf als die aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Liegen die Konzentrationen bei den festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen im Wertebereich der Bioabfallkomposte, unterschreiten die Biogasanlagengärreste das Konzentrationsniveau der Grüngutkomposte; hierbei sind die Gärreste von NawaRo-Anlagen etwas geringer mit PAK belastet als die von Mitvergärungsanlagen.

3.2.2 Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)

Komposte. Bioabfall- und Grüngutkomposte weisen bei der aktuellen Untersuchung eine ähnliche Belastung an PCDD/F auf: sowohl die Mediane als auch die Wertebereiche stimmen für die beiden Kompostarten weitgehend überein. Die Konzentrationen in den 22 Proben bewegen sich in einer für organische Schadstoffe relativ engen Bandbreite zwischen 3 und 9 ng I-TEQ/(kg TM); vergleichsweise hohe Gehalte wie bei den vorangegangenen Untersuchungen {bis zu 32 ng I-TEQ/(kg TM) bei Bioabfall-, bis zu 15 ng I-TEQ/(kg TM) bei Grüngutkomposten} traten nicht auf.

Für die Bioabfallkomposte ist ein stetiger Rückgang der PCDD/F-Konzentrationen seit dem Jahr 2000 zu verzeichnen: die Mediane sanken von Untersuchung zu Untersuchung und liegen aktuell bei der Hälfte der Belastung im Jahr 2000 (–51 %). Auch bei den Grüngutkomposten hat sich die PCDD/F-Belastung gegenüber dem Jahr 2000 deutlich verringert (–43 %); allerdings wurden die niedrigsten Werte der Zeitreihe wie bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (vgl. Abschnitt 3.2.1) bei der Untersuchung im Jahr 2006 ermittelt.

Vergärungsrückstände. Die festen und flüssigen Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen zeigen sowohl hinsichtlich Höhe der Mediane als auch hinsichtlich Wertebereiche ähnliche PCDD/F-Konzentrationen wie die Komposte. Um eine Größenordnung geringer ist dagegen die Belastung der Biogasanlagengärreste: die Gehalte in den Gärresten der NawaRo-Anlagen liegen ca. um den Faktor 30, die der Mitvergärungsanlagen um den Faktor 10 unter den Konzentrationen in den Komposten bzw. Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen.

3.2.3 Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und dl-PCB)

Von der Schadstoffgruppe der polychlorierten Biphenyle wurden sowohl die sechs Indikator-PCB als auch die zwölf coplanaren dioxinähnlichen PCB untersucht (vgl. Tab. 2).

3.2.3.1 Indikator-PCB

Komposte. Die Bioabfallkomposte weisen geringfügig höhere Gehalte an Indikator-PCB auf als die Grüngutkomposte. Abgesehen von jeweils einem Ausreißer {Maximalwerte: 65 µg/(kg TM) (Bioabfallkomposte) bzw. 149 µg/(kg TM) (Grüngutkomposte)} liegen die ermittelten Konzentrationen in vergleichsweise kleinen Wertebereichen von 10 bis 21 µg/(kg TM) (Bioabfallkomposte) bzw. 9 bis 33 µg/(kg TM) (Grüngutkomposte).

Die Belastungen an Indikator-PCB sinken seit der Untersuchung im Jahr 2000 bei beiden Kompostarten stetig. Hierbei ist der Konzentrationsrückgang bei den Bioabfallkomposten (Mediane: –60 % gegenüber dem Jahr 2000) stärker ausgeprägt als bei den Grüngutkomposten (–51 %), so dass sich die Indikator-PCB-Gehalte der beiden Kompostarten im Laufe der Jahre immer mehr angeglichen haben.

Vergärungsrückstände. Bezüglich der Indikator-PCB-Belastung der Vergärungsrückstände liegt wie bei den PCDD/F ein deutlicher Unterschied zwischen den Rückständen von Bioabfallvergärungsanlagen und denen von Biogasanlagen vor: die festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände zeigen ähnliche Gehalte wie die Bioabfallkomposte, während die Biogasanlagengärreste durchschnittlich um eine Größenordnung geringere Gehalte aufweisen. Die NawaRo-Gärreste sind um den Faktor 22, die Mitvergärungsgärreste um den Faktor 4 geringer mit Indikator-PCB belastet als die (festen) Bioabfallvergärungsrückstände.

3.2.3.2 dl-PCB

Komposte. Wie bei den PCDD/F unterscheiden sich die Bioabfall- und Grüngutkomposte auch hinsichtlich ihrer Belastung mit dioxinähnlichen PCB kaum voneinander. Abgesehen vom Maximalwert bei den Grüngutkompostproben {19,1 ng WHO-TEQ/(kg TM)} liegen die Konzentrationen in einem relativ engen Bereich von 1,0 bis 5,3 ng WHO-TEQ/(kg TM) (für 21 von 22 Proben).

Daten zu dioxinähnlichen PCB in bayerischen Komposten werden erst seit der Untersuchung im Jahr 2002 erhoben. Seither sind die Gehalte für beide Kompostarten tendenziell leicht rückläufig: für die Bioabfallkomposte um 21 % und für die Grüngutkomposte um 24 %.

Vergärungsrückstände. Die Verhältnisse bei der Belastung der Vergärungsrückstände mit dl-PCB liegen ähnlich wie bei den PCDD/F und Indikator-PCB: die Konzentrationen in den festen und flüssigen Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen sind vergleichbar mit denen in den (Grüngut-)Komposten, die Gärreste der Biogasanlagen sind um eine Größenordnung niedriger belastet. Insbesondere die NawaRo-Gärreste weisen geringe dl-PCB-Gehalte auf (Faktor 23 unter den durchschnittlichen Kompostkonzentrationen), aber auch die Mitvergärungsgärreste bleiben deutlich unter den Kompostgehalten (Faktor 6).

3.2.4 Biphenyl

Komposte. Bei der aktuellen Untersuchung konnte in keiner der 22 Kompostproben Biphenyl bestimmt werden; alle Gehalte liegen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM). Biphenyl dient als Zitrusfruchtfungizid und Formulierungshilfsstoff für Pflanzenschutzmittel.

Da die Komposte bei der Untersuchung im Jahr 2002 nicht auf Biphenyl analysiert wurden, stehen nur Daten für die Jahre 2000, 2006 und 2009 zu Verfügung. Auffallend sind die gegenüber den Jahren 2006 und 2009 vergleichsweise hohen Gehalte (zwei- bis dreistelliger µg/kg-Bereich) in den Kompostproben der Untersuchung aus dem Jahr 2000. Damals wurde die Biphenyl-Analytik von einem anderen Labor durchgeführt; ob die unterschiedlichen Konzentrationsniveaus 2000 gegenüber 2006/2009 darin begründet sind, ist ungeklärt.

Vergärungsrückstände. Für die Biphenyl-Belastung der Vergärungsrückstände zeigt sich gegenüber den Komposten ein anderes Bild. Während bei den festen Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen eine der sechs Proben einen Gehalt über der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens aufweist, ist es bei den flüssigen Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen und den Biogasanlagenrückständen nur eine von zehn Proben (ein NawaRo-Gärrest), deren Gehalt unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens liegt. Dementsprechend ergibt sich für die festen Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen ein mit den Komposten vergleichbares Konzentrationsniveau. Für die weiteren Vergärungsrückstände sind höhere Gehalte festzustellen, die in der Reihenfolge Mitvergärungsgärreste < flüssige Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen < NawaRo-Gärreste ansteigen.

3.2.5 Hexachlorbenzol (HCB)

Komposte. Wie bei den vorangegangenen wurden auch bei der aktuellen Untersuchung in den Bioabfallkomposten etwas höhere Gehalte an HCB – Ausgangsprodukt für die Herstellung chlororganischer Verbindungen, Nebenprodukt bei Verbrennungs- und metallurgischen Prozessen und POP der Stockholmer Konvention [10] – ermittelt als in den Grüngutkomposten. Die Konzentrationen betragen in beiden Kompostarten meist wenige µg/(kg TM) und auch die Maximalgehalte bleiben im einstelligen µg/kg-Bereich.

Die Werte sind bei beiden Kompostarten gegenüber der Untersuchung im Jahr 2006 tendenziell leicht angestiegen, liegen aber dennoch bei den Bioabfallkomposten deutlich (–35 %), bei den Grüngutkomposten knapp (–15 %) unter den Werten der Untersuchung im Jahr 2000 (im Jahr 2002 wurde keine HCB-Analytik durchgeführt).

Vergärungsrückstände. Die HCB-Konzentrationen in den festen und flüssigen Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen bleiben wie bei den Komposten im einstelligen µg/kg-Bereich, sind aber insgesamt etwas höher. Dagegen zeigen die Biogasanlagengärreste um ca. eine Größenordnung niedrigere Gehalte: die Gärreste der NawaRo-Anlagen sind im Vergleich zu den Komposten um den Faktor 10, die der Mitvergärungsanlagen um den Faktor 4 niedriger mit HCB belastet.

3.2.6 Pentachlorphenol (PCP)

Komposte. Die Spannweite der Gehalte an PCP, einem fungiziden und bakteriziden Holzschutzmittel, in den Komposten umfasst zwei Größenordnungen: bei den Bioabfallkomposten reicht sie von unter der Bestimmungsgrenze {5 µg/(kg TM)} bis 540 µg/(kg TM), bei den Grüngutkomposten (nur zwei von elf Proben über der Bestimmungsgrenze) bis 150 µg/(kg TM). Dementsprechend sind die Bioabfallkomposte deutlich (um mindestens eine Größenordnung) stärker mit PCP belastet als die Grüngutkomposte.

Ein Vergleich mit den vorangegangenen Untersuchungen ergibt für die Bioabfallkomposte einen deutlichen Anstieg der Werte (Faktor 5 gegenüber dem Jahr 2000) und für die Grüngutkomposte gleichbleibende Verhältnisse. Gegenüber der Untersuchung im Jahr 2000 sind bei beiden Kompostarten die ermittelten Maximalwerte überproportional angestiegen (Faktor 13 bei den Bioabfall- bzw. 17 bei den Grüngutkomposten).

Vergärungsrückstände. Bezüglich PCP zeigt sich die gleiche Situation wie bei den meisten anderen organischen Schadstoffen: höhere Gehalte in den Bioabfallvergärungsrückständen, geringere in den Biogasanlagengärresten. Die Konzentrationen in den festen Bioabfallvergärungsrückständen liegen zur Hälfte unter der Bestimmungsgrenze von 5 µg/(kg TM), zur Hälfte weisen sie Belastungen wie die Bioabfallkomposte auf; die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände liegen in ihren Gehalten im Bereich der Bioabfallkomposte. Bei den acht Biogasanlagengärresten wurde nur in einer Probe (ein Mitvergärungsgärrest) eine PCP-Konzentration über der Bestimmungsgrenze ermittelt.

3.2.7 ortho-Phenylphenol

Komposte. Ortho-Phenylphenol konnte ebenso wie Biphenyl (vgl. Abschnitt 3.2.4) in den Komposten nicht bestimmt werden; in allen 22 Kompostproben liegen die Gehalte unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM). Ortho-Phenylphenol ist ein Fungizid und wird u. a. zur Konservierung von Zitrusfrüchten eingesetzt.

Auch die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen ähnelt der des Biphenyls: Gehalte im zwei- bis maximal dreistelligen µg/kg-Bereich bei der Untersuchung im Jahr 2000 (gegenüber Biphenyl deutlich geringeres Konzentrationsniveau), nahezu alle Werte unter der Bestimmungsgrenze bei den Untersuchungen in den Jahren 2006 und 2009. Hinsichtlich der Datenlage und der Aussagekraft der vorhandenen Daten (keine Werte für die Untersuchung im Jahr 2002, Wechsel des Analytiklabors von 2000 auf 2006/2009) gilt das für Biphenyl Geschriebene (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Vergärungsrückstände. Wie das Biphenyl zeigt auch das ortho-Phenylphenol bei den Vergärungsrückständen hinsichtlich der organischen Schadstoffbelastung ein eher untypisches Verhalten. Während die festen Bioabfallvergärungsrückstände noch Kompost ähnliche Werte aufweisen (vier von sechs Proben unter der Bestimmungsgrenze, allerdings Maximalwert im dreistelligen µg/kg-Bereich), liegen die Gehalte in den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen und den Biogasanlagengärresten deutlich höher im zwei- und teilweise dreistelligen µg/kg-Bereich (nur eine von zehn Proben (ein Mitvergärungsgärrest) unter der Bestimmungsgrenze). Dementsprechend steigen die Konzentrationsniveaus in der Reihenfolge feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste < NawaRo-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an.

Tab. 8: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Rückständen aus Bioabfallvergärungs- und Biogasanlagen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchung aus dem Jahr 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallvergärungsrückstand			Biogasanlagengärrest	
	fest		flüssig	NawaRo	Mitvergärung
2009		2006	2009		2009
Probenanzahl N	6	5	2	4	4
Summe PAK [mg/(kg TM)]					
Minimum	1,01	0,34	2,35	0,63	0,67
Median	1,97	2,68	n. b.	1,21	1,70
Mittelwert	2,10	2,46	n. b.	1,22	1,59
Maximum	3,43	3,89	2,50	1,83	2,29
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,90</i>	<i>1,30</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,52</i>	<i>0,79</i>
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	3,63	4,82	4,43	0,09	0,31
Median	6,52	6,00	n. b.	0,19	0,60
Mittelwert	6,33	6,61	n. b.	0,18	3,04
Maximum	8,86	10,60	7,19	0,24	10,65
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,87</i>	<i>2,32</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,06</i>	<i>5,08</i>
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	13,1	4,6	17,8	0,59	1,48
Median	18,8	25,6	n. b.	0,86	4,48
Mittelwert	22,5	31,3	n. b.	0,90	6,40
Maximum	39,1	66,5	23,3	1,27	15,16
<i>Standardabweichung</i>	<i>9,7</i>	<i>22,9</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,29</i>	<i>6,02</i>
Summe dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	1,47	0,54	2,04	0,06	0,10
Median	2,18	2,82	n. b.	0,09	0,33
Mittelwert	2,74	3,29	n. b.	0,09	0,75
Maximum	4,83	5,65	2,70	0,11	2,25
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,33</i>	<i>2,00</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,02</i>	<i>1,01</i>
Biphenyl [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	29	< 10	25
Median	< 10	< 10	n. b.	69	32
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	41
Maximum	16	11	61	97	75
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>23</i>
HCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	1,0	0,6	1,7	0,11	0,37
Median	4,2	1,9	n. b.	0,21	0,54
Mittelwert	4,7	2,3	n. b.	0,20	1,30
Maximum	8,8	5,2	4,8	0,29	3,74
<i>Standardabweichung</i>	<i>3,2</i>	<i>1,8</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,09</i>	<i>1,63</i>
PCP [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Median	26	15	n. b.	< 5	< 5
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 5	n. b.
Maximum	52	29	95	< 5	32
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
ortho-Phenylphenol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	92	19	< 10
Median	< 10	11	n. b.	64	49
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	120	n. b.
Maximum	269	293	440	332	123
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>143</i>	<i>n. b.</i>

Tab. 9: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB und AHTN in den Bioabfall- und Grüngutkomposten im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2], 2002 [3] und 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallkompost				Grüngutkompost			
	2009	2006	2002	2000	2009	2006	2002	2000
Probenanzahl N	11	12	11	15	11	12	11	5
Bisphenol A [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	< 25	< 10	< 10	n. b.	< 25	< 10	< 10	n. b.
Median	154	337	105	n. b.	< 25	11	< 10	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	< 25	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	840	990	646	n. b.	< 25	43	59	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
DEHP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	0,9	< 0,05	0,05	< 0,50	1,2	< 0,05	0,01	< 0,50
Median	3,2	1,15	0,15	2,30	2,1	0,20	0,09	2,10
Mittelwert	4,5	n. b.	0,49	n. b.	2,0	n. b.	0,12	n. b.
Maximum	17,0	2,69	2,38	20,90	3,3	0,55	0,25	6,60
<i>Standardabweichung</i>	<i>4,4</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,72</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,7</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,08</i>	<i>n. b.</i>
DINP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.
Median	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	2,4	n. b.	n. b.	n. b.	4,5	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
iso-Nonylphenol [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	< 100	< 50	83	n. b.	< 100	< 50	57	n. b.
Median	170	154	680	n. b.	< 100	< 50	147	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	882	n. b.	n. b.	n. b.	205	n. b.
Maximum	550	331	2.580	n. b.	440	87	772	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>784</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>210</i>	<i>n. b.</i>
Monobutylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	< 1	< 1	< 1	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
Median	2,9	4,3	2,8	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	7,9	8,6	5,8	n. b.	n. b.	6,4	1,8	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Monooktylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	< 1	< 1	< 1	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
Median	< 1	< 1	< 1	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
Maximum	11,0	5,8	15,4	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
HHCB [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	6	< 1	n. b.	n. b.	4	< 1	n. b.	n. b.
Median	21	13,7	n. b.	n. b.	8	1,5	n. b.	n. b.
Mittelwert	21	n. b.	n. b.	n. b.	19	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	45	46,3	n. b.	n. b.	88	5,5	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>11</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>27</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
AHTN [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]								
Minimum	3	3,6	n. b.	n. b.	< 3	< 1	n. b.	n. b.
Median	15	8,7	n. b.	n. b.	9	2,1	n. b.	n. b.
Mittelwert	20	9,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	56	16,1	n. b.	n. b.	24	7,7	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	<i>17</i>	<i>3,8</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>

Zum Lesen der Abschnitte 3.2.1. bis 3.2.7 bitte diese Seite ausklappen (Tab. 8 rückseitig) und zum Lesen der Abschnitte 3.2.8 bis 3.2.12 bitte diese Seite und Seite 28 (Tab. 10) ausklappen.

3.2.8 Bisphenol A

Komposte. Bisphenol A, eine endokrin wirksame Substanz und als Ausgangsprodukt für die Kunststoffherstellung ein Grundstoff der chemischen Industrie, tritt in den untersuchten Bioabfallkompostproben in vergleichsweise hohen Konzentrationen (meist dreistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) auf; die Gehalte liegen für zehn von elf Proben zwischen kleiner der Bestimmungsgrenze ($25 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$) und $272 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$, für eine Probe (Ausreißer) bei $840 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$. Dagegen konnte in den Grüngutkomposten Bisphenol A nicht bestimmt werden; alle elf Proben liegen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von $25 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$. Es ist anzunehmen, dass das Bisphenol A im Bioabfallkompost aus Fehlwürfen im Bioabfall herrührt.

Da Bisphenol A bei der Untersuchung im Jahr 2000 noch nicht zum Parameterumfang gehörte, stehen Daten zu dessen Gehalten in Komposten erst ab dem Jahr 2002 zu Verfügung. In dem betrachteten Untersuchungszeitraum liegt es in den Bioabfallkomposten in großen Bandbreiten (meist zwei Größenordnungen) und i. d. R. im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich vor. In den Grüngutkomposten findet sich Bisphenol A in deutlich geringeren Konzentrationen im unteren zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich (Bereich der Bestimmungsgrenze).

Vergärungsrückstände. Mit Ausnahme der NawaRo-Gärreste zeigt sich bei den Vergärungsrückständen eine ähnliche Situation wie bei den Bioabfallkomposten: insbesondere bei den festen Bioabfallvergärungsrückständen große Bandbreiten der Konzentrationen (zwei Größenordnungen), vergleichsweise hohe Gehalte im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ - bis einstelligen mg/kg -Bereich (drei Proben: zwei feste, ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand). Die Konzentrationen in den NawaRo-Gärresten entsprechen dagegen denen der Grüngutkomposte: alle vier Proben liegen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von $25 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$.

3.2.9 Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP), Di-isononyl-phthalat (DINP)

3.2.9.1 DEHP

Komposte. DEHP, ebenfalls eine endokrin wirksame Substanz und einer der am häufigsten verwendeten Weichmacher (z. B. Einsatz in Weich-PVC), ist derjenige organische Parameter des Untersuchungsumfangs, der in den Komposten und Vergärungsrückständen in den höchsten Konzentrationen (teilweise bis zu zweistellige mg/kg -Werte) gefunden wurde. Der höchste Wert der aktuellen Untersuchung wurde mit $17,0 \text{ mg}/(\text{kg TM})$ in einer Bioabfallkompostprobe ermittelt; mit Ausnahme dieses Ausreißers liegen die DEHP-Gehalte in den Bioabfallkomposten zwischen $0,9$ und $5,9 \text{ mg}/(\text{kg TM})$. In den Grüngutkomposten sind die Konzentrationen etwas niedriger als in den Bioabfallkomposten und streuen gering in einem Wertebereich von $1,2$ bis $3,3 \text{ mg}/(\text{kg TM})$.

Die zeitliche Entwicklung der DEHP-Gehalte in den Komposten ist schwer einzuschätzen, da die Analytik bei den vier Untersuchungen von drei Analysenlabors durchgeführt wurde (2000 | 2002/2006 | 2009). Die Daten zeigen bei beiden Kompostarten sowohl hinsichtlich Medianen als auch Wertebereichen ein übereinstimmendes Muster: hohe Werte im Jahr 2000, deutlich (bis zu eine Größenordnung) niedrigere Werte in den Jahren 2002 und 2006, hohe Werte im Jahr 2009 (vergleichbar mit dem Jahr 2000).

Vergärungsrückstände. Bis auf die NawaRo-Gärreste weisen die Vergärungsrückstände höhere DEHP-Konzentrationen als die Komposte auf: der geringste Gehalt wurde mit $3,7 \text{ mg}/(\text{kg TM})$ in einem festen Bioabfallvergärungsrückstand, die höchsten mit $13,0 \text{ mg}/(\text{kg TM})$ in einem flüssigen Bioabfallvergärungsrückstand und drei (von vier) Mitvergärungsgärresten ermittelt. Dementsprechend ergibt sich für die Mitvergärungsgärreste das höchste Konzentrationsniveau, gefolgt von den beiden Bioabfallvergärungsrückständen. Die NawaRo-Gärreste zeigen ähnliche Konzentrationen wie die Grüngutkomposte.

3.2.9.2 DINP

DINP, ein häufig verwendeter Weichmacher (z. B. Einsatz in Weich-PVC), dessen toxikologische Eigenschaften nicht abschließend geklärt sind, wurde bei der aktuellen Untersuchung neu in den Parameterumfang mit aufgenommen.

Komposte. Bedingt durch die vergleichsweise hohe Bestimmungsgrenze von 0,5 mg/(kg TM) liegen bei den Bioabfallkomposten sechs, bei den Grüngutkomposten neun von jeweils elf Proben unter der Bestimmungsgrenze. Insgesamt zeigen die Bioabfallkomposte etwas höhere Gehalte als die Grüngutkomposte; die Maximalwerte wurden zu 2,4 mg/(kg TM) (Bioabfallkomposte) bzw. 4,5 mg/(kg TM) (Grüngutkomposte; Ausreißer) ermittelt.

Vergärungsrückstände. Von den Vergärungsrückständen haben nur die NawaRo-Gärreste dem (Grüngut-)Kompost vergleichbar geringe Konzentrationen: in keiner der vier Proben konnte DINP bestimmt werden. Bei den weiteren Vergärungsrückständen unterschreitet eine (fester Bioabfallvergärungsrückstand) von zwölf Proben die Bestimmungsgrenze. Maximalwerte liegen mit 11,0 mg/(kg TM) (flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand) bzw. 10,0 mg/(kg TM) (zwei Mitvergärungsgärreste) in vergleichbarer Höhe zum DEHP. Insgesamt ergeben sich in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste ansteigende Konzentrationsniveaus.

3.2.10 iso-Nonylphenol

Komposte. Während bei den Bioabfallkomposten drei Proben unter der Bestimmungsgrenze {100 µg/(kg TM)} für iso-Nonylphenol – eine endokrin wirksame Substanz und Ausgangsprodukt für die Kunststoff- und Tensidherstellung sowie Tensidabbauprodukt – liegen, sind es bei den Grüngutkomposten zehn (von jeweils elf) Proben. Dementsprechend weisen die Bioabfallkomposte insgesamt höhere Gehalte als die Grüngutkomposte auf. Die Konzentrationen in den Bioabfallkomposten nehmen Werte bis zu 550 µg/(kg TM) an, der (Einzel-)Wert von 440 µg/(kg TM) für eine Grüngutkompostprobe ist als Ausreißer einzustufen.

Da iso-Nonylphenol bei der ersten Kompostuntersuchung im Jahr 2000 nicht im Parameterumfang enthalten war, sind Kompostwerte erst ab der Probenahme im Jahr 2002 verfügbar; bei dieser Untersuchung wurden in beiden Kompostarten die höchsten Konzentrationen ermittelt. Bei der vorletzten und der aktuellen Untersuchung liegen die Wertebereiche niedriger, bei den Bioabfallkomposten tendenziell leicht ansteigend gegenüber dem Jahr 2006, bei den Grüngutkomposten vorwiegend unter der Bestimmungsgrenze.

Vergärungsrückstände. Die Vergärungsrückstände sind stärker mit iso-Nonylphenol belastet als die Komposte. Nur eine Probe (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand) liegt in ihren Gehalten unter der Bestimmungsgrenze. Die festen Bioabfallvergärungsrückstände und die Gärreste aus Biogasanlagen (NawaRo- und Mitvergärungsanlagen) weisen ähnliche Konzentrationen auf (in dieser Reihenfolge leicht ansteigend). Vergleichsweise hohe Konzentrationen zeigen die beiden flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände.

3.2.11 Zinnorganische Verbindungen

Bei der aktuellen Untersuchung wurden die Grüngutkompostproben nicht auf die acht zinnorganischen Verbindungen, als Biozide eingesetzte, endokrin wirksame Substanzen, analysiert (vgl. Abschnitt 2.1); von daher liegen bei den Komposten nur Werte für die Bioabfallkomposte vor.

3.2.11.1 Monobutylzinn

(Bioabfall-)Komposte. Die Gehalte im Bioabfallkompost liegen in vier (von elf) Proben unter der Bestimmungsgrenze von $1 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$, in sechs Proben im Bereich von 1 bis $4,2 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$ und in einer Probe (Ausreißer) bei $7,9 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$.

Die Zeitreihe der Monobutylzinn-Gehalte in den Bioabfallkomposten seit dem Jahr 2002 lässt keinen Trend erkennen; die Konzentrationen, sofern überhaupt über der Bestimmungsgrenze, bewegen sich bei allen drei vorliegenden Untersuchungen im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich.

Vergärungsrückstände. In den Vergärungsrückständen wurden höhere Monobutylzinn-Konzentrationen (teilweise im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) ermittelt; nur die NawaRo-Gärreste weisen mit drei (von vier) Proben unter der Bestimmungsgrenze ähnliche Konzentrationsverhältnisse auf wie die Bioabfallkomposte. Die weiteren Vergärungsrückstände verzeichnen in der Reihenfolge feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände ansteigende Gehalte.

3.2.11.2 Monooktylzinn

(Bioabfall-)Komposte. Von den insgesamt acht analysierten zinnorganischen Verbindungen wurden Monobutyl- und Monooktylzinn in den Bioabfallkomposten gefunden; beide Verbindungen treten bei der aktuellen Untersuchung nur gemeinsam auf, wobei das Monooktylzinn etwas höhere Konzentrationen aufweist als das Monobutylzinn. Sechs (von elf) Bioabfallkompostproben weisen Monooktylzinn-Gehalte unter der Bestimmungsgrenze $\{1 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})\}$, vier Proben Konzentrationen zwischen 3,7 und $5,6 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$ und eine Probe einen Gehalt von $11,0 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$ (Ausreißer) auf.

Bei Monooktyl- ist wie bei -butylzinn kein zeitlicher Trend seit der Untersuchung im Jahr 2002 erkennbar; die Mehrzahl der Konzentrationen (und damit auch die Mediane) liegen unter der Bestimmungsgrenze, wenige Werte im einstelligen, vereinzelt auch im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich.

Vergärungsrückstände. Wie bei Monobutyl- sind auch bei Monooktylzinn von den Vergärungsrückständen die NawaRo-Gärreste am geringsten belastet: in keiner der vier Proben konnte es bestimmt werden. Bei den weiteren Vergärungsrückständen wurde Monooktylzinn in der Mehrzahl der Proben gefunden, jedoch in geringeren Konzentrationen als Monobutylzinn; die Gehalte liegen im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich {einzige Ausnahme: ein Mitvergärungsgärrest mit $19,0 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$ (Ausreißer)} und steigen tendenziell in der Reihenfolge feste Bioabfallvergärungsrückstände < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste an.

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

(Bioabfall-)Komposte. Neben Monobutyl- und -oktylzinn sind in den Bioabfallkomposten keine weiteren zinnorganischen Verbindungen bestimmbar; die Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens liegt für alle zinnorganischen Verbindungen bei $1 \mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$.

Vergärungsrückstände. In den festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen finden sich Di-, Tributyl- und Dioktylzinn in jeweils zwei (von sechs bzw. zwei) Proben. Die Dibutylzinn-Werte liegen im zweistelligen, die Tributyl- und Dioktylzinn-Werte im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich; in den flüssigen Rückständen sind die Gehalte für alle drei Verbindungen höher als in den festen. Für Tetrabutylzinn und die beiden zyklischen zinnorganischen Verbindungen wurden in den Bioabfallvergärungsrückständen keine Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze gefunden.

Die beiden Biogasanlagengärreste unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Gehalte an o. g. zinnorganischen Verbindungen deutlich voneinander. Während die NawaRo-Gärreste in einer (von vier) Proben als einzige zinnorganische Verbindung Monobutylzinn enthalten, wurden in den Mitvergärungsgärresten die meisten zinnorganischen Verbindungen mit den höchsten Konzentrationswerten der aktuellen Untersuchung festgestellt. Dibutylzinn liegt (wie Monobutylzinn) in allen vier Proben, Tributyl- und Dioktylzinn (wie Monooktylzinn) in jeweils drei Proben und Tetrabutylzinn in einer Probe vor. Die Gehalte reichen außer bei Tetrabutylzinn bis in den zweistelligen µg/kg-Bereich {maximale Konzentrationen der aktuellen Untersuchung: 29,0 µg Sn/(kg TM) (Dioktylzinn), 27,0 µg Sn/(kg TM) (Dibutylzinn), 24,0 µg Sn/(kg TM) (Tributylzinn)}. Die Gehalte an den beiden zyklischen zinnorganischen Verbindungen liegen wie in den anderen organischen Sekundärrohstoffen auch in den Biogasanlagengärresten unter der Bestimmungsgrenze.

3.2.12 Galaxolide® (HHCb), Tonalide® (AHTN)

3.2.12.1 HHCb

Komposte. Der synthetische Duftstoff HHCb, ein Inhaltsstoff in Wasch- und Reinigungsmitteln und eine endokrin wirksame Substanz, ist in den Bioabfallkomposten in höheren Gehalten enthalten als in den Grüngutkomposten, obwohl diese bei einem deutlich größeren Wertebereich die höheren Einzelkonzentrationen {zwei Ausreißer bei 54 und 88 µg/(kg TM)} aufweisen. Die Gehalte liegen bei den Bioabfallkomposten bis auf zwei Ausnahmen im zweistelligen, bei den Grüngutkomposten i. d. R. im einstelligen µg/kg-Bereich.

Im Vergleich zu der Untersuchung im Jahr 2006 (einzige Vergleichsuntersuchung, allerdings auch anderes Untersuchungslabor) zeigen die Bioabfallkomposte geringfügig ansteigende Konzentrationen (bei nahezu gleichen Wertebereichen), die Grüngutkomposte deutlich höhere Gehalte.

Vergärungsrückstände. Von den vier Vergärungsrückständen liegen die NawaRo-Gärreste mit ihren HHCb-Werten im Bereich der (Bioabfall-)Komposte; alle anderen Vergärungsrückstände weisen deutlich höhere Konzentrationen bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich auf. Die Gehalte steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an.

3.2.12.2 AHTN

Komposte. Auch bezüglich AHTN, des zweiten untersuchten synthetischen Duftstoffs und ebenfalls eine endokrin wirksame Substanz, weisen die Bioabfallkomposte höhere Konzentrationen auf als die Grüngutkomposte; der Unterschied zwischen den beiden Kompostarten ist jedoch geringer ausgeprägt als beim HHCb.

Der Vergleich mit der Untersuchung im Jahr 2006 ergibt für AHTN ähnliche Verhältnisse wie für HHCb: ein geringer Anstieg der Gehalte bei den Bioabfallkomposten sowie ein deutlicherer Anstieg bei den Grüngutkomposten.

Vergärungsrückstände. Die AHTN-Konzentrationen in den Vergärungsrückständen liegen teilweise (NawaRo-Gärreste) unter der Belastung der Grüngutkomposte, teilweise (Mitvergärungsgärreste, flüssige Bioabfallvergärungsrückstände) über den Kompostkonzentrationen; die festen Bioabfallvergärungsrückstände weisen ähnliche Werte auf wie die Bioabfallkomposte. Die Unterschiede in den Gehalten sind allerdings gering; die Werte bewegen sich bei den NawaRo-Gärresten im einstelligen, bei den anderen Vergärungsrückständen größtenteils im zweistelligen µg/kg-Bereich. Es ergibt sich die gleiche Reihenfolge wie bei HHCb: NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände.

Tab. 10: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCb und AHTN in den Rückständen aus Bioabfallvergärungs- und Biogasanlagen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchung aus dem Jahr 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

	Bioabfallvergärungsrückstand			Biogasanlagengärrest	
	fest		flüssig	NawaRo	Mitvergärung
Untersuchungsjahr	2009	2006	2009	2009	
Probenanzahl N	6	5	2	4	4
Bisphenol A [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 25	23	261	< 25	160
Median	401	563	n. b.	< 25	465
Mittelwert	n. b.	1.193	n. b.	< 25	435
Maximum	1.230	2.860	1.290	< 25	648
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>1.276</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>224</i>
DEHP [mg/(kg TM)]					
Minimum	3,7	0,29	3,9	1,5	6,7
Median	7,0	1,76	n. b.	2,7	13,0
Mittelwert	6,7	2,31	n. b.	2,5	11,4
Maximum	8,9	4,75	13,0	2,9	13,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>2,0</i>	<i>1,91</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,6</i>	<i>3,2</i>
DINP [mg/(kg TM)]					
Minimum	< 0,5	n. b.	2,8	< 0,5	4,5
Median	3,8	n. b.	n. b.	< 0,5	8,2
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 0,5	7,7
Maximum	5,9	n. b.	11,0	< 0,5	10,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>2,8</i>
iso-Nonylphenol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 100	< 50	580	120	270
Median	260	324	n. b.	280	310
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	263	348
Maximum	1.500	421	1.100	370	500
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>123</i>	<i>106</i>
Monobutylzinn [µg Sn/(kg TM)]					
Minimum	< 1	3,4	6,6	< 1	1,6
Median	4,0	6,8	n. b.	< 1	6,1
Mittelwert	n. b.	10,2	n. b.	n. b.	6,9
Maximum	13,0	19,7	13,0	2,1	14,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>7,7</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>6,0</i>
Monooktylzinn [µg Sn/(kg TM)]					
Minimum	< 1	< 1	3,8	< 1	< 1
Median	3,0	4,8	n. b.	< 1	7,1
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 1	n. b.
Maximum	5,0	10,6	5,1	< 1	19,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
HHCb [µg/(kg TM)]					
Minimum	20	14,7	63	9	30
Median	40	62,2	n. b.	18	78
Mittelwert	54	48,4	n. b.	23	82
Maximum	120	69,8	330	45	140
<i>Standardabweichung</i>	<i>39</i>	<i>25,4</i>	<i>n. b.</i>	<i>16</i>	<i>52</i>
AHTN [µg/(kg TM)]					
Minimum	8	6,1	12	< 3	8
Median	16	9,2	n. b.	5	23
Mittelwert	16	10,0	n. b.	n. b.	23
Maximum	24	16,8	46	7	39
<i>Standardabweichung</i>	<i>6</i>	<i>4,3</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>14</i>

Tab. 11: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Bioabfall- und Grüngutkomposten im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2], 2002 [3] und 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallkompost				Grüngutkompost			
	2009	2006	2002	2000	2009	2006	2002	2000
Probenanzahl N	11	12	11	15	11	12	11	5
Summe PBDE [µg/(kg TM)]								
Minimum	10,7	6,5	n. b.	n. b.	4,2	1,2	n. b.	n. b.
Median	32,8	23,4	n. b.	n. b.	14,9	10,4	n. b.	n. b.
Mittelwert	40,5	26,1	n. b.	n. b.	300,3	12,4	n. b.	n. b.
Maximum	87,9	89,2	n. b.	n. b.	3.170,4	43,8	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	27,4	21,9	n. b.	n. b.	951,9	11,8	n. b.	n. b.
HBCD [µg/(kg TM)]								
Minimum	15,0	n. b.	n. b.	n. b.	8,9	n. b.	n. b.	n. b.
Median	41,2	n. b.	n. b.	n. b.	41,4	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	63,5	n. b.	n. b.	n. b.	156,3	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	277,1	n. b.	n. b.	n. b.	724,7	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	76,1	n. b.	n. b.	n. b.	243,8	n. b.	n. b.	n. b.
Thiabendazol [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 10	< 10	n. b.	< 50	< 10	< 10	n. b.	< 50
Median	< 10	< 10	n. b.	< 50	< 10	< 10	n. b.	< 50
Mittelwert	n. b.	< 10	n. b.	< 50	< 10	< 10	n. b.	< 50
Maximum	35	< 10	n. b.	< 50	< 10	< 10	n. b.	< 50
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PFOA [µg/(kg TM)]								
Minimum	0,6	< 15 ^{*)}	n. b.	n. b.	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.
Median	1,8	< 15^{*)}	n. b.	n. b.	0,7	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	2,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	10,3	< 23 ^{*)}	n. b.	n. b.	21,0	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	2,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PFOS [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 0,5	< 15 ^{*)}	n. b.	n. b.	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.
Median	0,7	< 15^{*)}	n. b.	n. b.	< 0,5	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	14,0	< 23 ^{*)}	n. b.	n. b.	2,2	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Triclosan [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 3	< 3 ^{*)}	n. b.	n. b.	< 3	n. b.	n. b.	n. b.
Median	4	< 3^{*)}	n. b.	n. b.	< 3	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	11	6 ^{*)}	n. b.	n. b.	25	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
TCLM [µg/(kg TM)]								
Minimum	< 3	< 3 ^{*)}	n. b.	n. b.	< 3	n. b.	n. b.	n. b.
Median	< 3	< 3^{*)}	n. b.	n. b.	< 3	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	n. b.	< 3 ^{*)}	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	5	< 3 ^{*)}	n. b.	n. b.	9	n. b.	n. b.	n. b.
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

^{*)} drei analysierte Proben

Zum Lesen der Abschnitte 3.2.8 bis 3.2.12 bitte diese Seite ausklappen (Tab. 10 rückseitig) und zum Lesen der Abschnitte 3.2.13 bis 3.2.17 bitte diese Seite und Seite 35 (Tab. 12 rückseitig) ausklappen.

3.2.13 Polybromierte Diphenylether (PBDE)

Komposte. Die Gehalte an PBDE (Summe von acht analysierten Kongeneren, vgl. Tab. 2), die z. B. in Kunststoffen und Textilien als Flammenschutzmittel eingesetzt werden (insbesondere der decabromierte Diphenylether BDE 209), liegen in den Bioabfallkomposten (zweistelliger µg/kg-Bereich) höher als in den Grüngutkomposten (ein- bis zweistelliger µg/kg-Bereich). Bei den Grüngutkomposten fällt ein Ausreißer im mg/kg-Bereich {3,17 mg/(kg TM)} auf (bedingt durch einen sehr hohen BDE 209-Gehalt), während die anderen zehn Proben Konzentrationen unter 25 µg/(kg TM) aufweisen.

Insgesamt sind die PBDE-Konzentrationen gegenüber der Untersuchung im Jahr 2006 bei beiden Kompostarten leicht angestiegen, während sich die Wertebereiche (mit Ausnahme des Ausreißers bei den Grüngutkomposten) kaum veränderten.

Vergärungsrückstände. Die Vergärungsrückstände lassen sich hinsichtlich deren Belastung mit PBDE in zwei Gruppen einteilen: die (festen und flüssigen) Rückstände von Bioabfallvergärungsanlagen mit den insgesamt höchsten und die Gärreste von Biogasanlagen mit den insgesamt geringsten Gehalten der aktuellen Untersuchung. Die PBDE-Konzentrationen in den Bioabfallvergärungsrückständen liegen im zweistelligen µg/kg-Bereich über den Werten der Bioabfallkomposte. Die Gärreste weisen mit einer Ausnahme {ein Mitvergärungsgärrest: 79,5 µg/(kg TM), Ausreißer} vergleichsweise niedrige Gehalte auf: die NawaRo-Gärreste um 1 µg/(kg TM) und die Mitvergärungsgärreste (mit Ausnahme des Ausreißers) im einstelligen µg/kg-Bereich.

3.2.14 Hexabromcyclododecan (HBCD)

Eines der weltweit meisteingesetzten bromierten Flammenschutzmittel ist Hexabromcyclododecan (HBCD), das vor allem in Dämmmaterialien und Textilien Anwendung findet. Die Substanz ist schwer abbaubar und weist stark bioakkumulierende und ökotoxische Eigenschaften auf. Sie wurde bei der aktuellen Untersuchung neu in den Parameterumfang mit aufgenommen.

Komposte. Bioabfall- und Grüngutkomposte zeigen ähnliche HBCD-Gehalte im i. d. R. zweistelligen µg/kg-Bereich. Allerdings treten bei beiden Kompostarten auch Proben mit deutlich höheren Konzentrationen bis teilweise weit in den dreistelligen µg/kg-Bereich auf (Bioabfall-: zwei, Grüngutkomposte: drei von jeweils elf Proben). Hieraus resultiert insbesondere bei den Grüngutkomposten eine sehr große Wertespanne über zwei Größenordnungen.

Vergärungsrückstände. Auch bei den Vergärungsrückständen sind Ausreißer (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand, ein NawaRo-Gärrest) zu verzeichnen, die ähnlich große Wertebereiche wie bei den Komposten bedingen. Abgesehen von diesen beiden Maximalwerten liegen die Gehalte für die (festen und flüssigen) Bioabfallvergärungsrückstände und die Mitvergärungsgärreste im zweistelligen, für die NawaRo-Gärreste im einstelligen µg/kg-Bereich und darunter {zwei NawaRo-Gärreste unter der Bestimmungsgrenze von 0,7 bzw. 0,9 µg/(kg TM)}. Die Konzentrationen steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste (mit den Komposten vergleichbare Gehalte) < feste Bioabfallvergärungsrückstände an.

3.2.15 Thiabendazol

Komposte. Die Gehalte an Thiabendazol, einem Zitrusfungizid, liegen in den Kompostproben meist unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM). Bei drei (von elf) Bioabfallkomposten wurden Werte über der Bestimmungsgrenze gefunden (zweistelliger µg/kg-Bereich), bei den Grüngutkomposten überschritt keine Probe diese Konzentration.

Diese Ergebnisse spiegeln in etwa auch die Verhältnisse der vorangegangenen Untersuchungen wider, bei denen keine Kompostprobe einen Gehalt über der Bestimmungsgrenze aufwies.

Vergärungsrückstände. Von den Vergärungsrückständen zeigen nur die NawaRo-Gärreste mit den Komposten vergleichbare Konzentrationen (alle vier Proben unter der Bestimmungsgrenze). Die anderen Vergärungsrückstände weisen Gehalte im zweistelligen, teilweise (ein fester, beide flüssige Bioabfallvergärungsrückstände) bis in den dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf. In der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände ~ Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände steigen die Konzentrationen an.

3.2.16 Perfluorierte Tenside (PFT)

Die Gehalte an PFT, Einsatzstoffe bei der Oberflächenbehandlung (z. B. bei Textilien und Lederartikeln), Papierveredlung und in der Spezialchemie (z. B. bei der Fluorpolymerherstellung), wurden erstmals bei der Kompostuntersuchung 2006 bestimmt; aus Kostengründen (Analytik: Fremdvergabe) wurden (neben einem Papierfaserkompost) drei Bioabfallkomposte und ein (fester) Bioabfallvergärungsrückstand auf Perfluoroctan- (PFOA) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) untersucht.

Bei der aktuellen Untersuchung wurden alle 38 Proben auf PFOA, PFOS und acht weitere perfluorierte Tenside analysiert. Bei den zehn Flüssigproben (zwei flüssige Bioabfallvergärungsrückstände, acht Biogasanlagengärreste) kam es zu matrixbedingten Störungen: in diesen Proben waren (i) die Bestimmungsgrenze für die Einzelkomponenten erhöht {1 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$ gegenüber 0,5 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$ bei den Feststoffproben} sowie (ii) der Gehalt an Perfluorhexansäure (PFHxA) bzw. (iii) in einem Mitvergärungsgärrest die Gehalte aller Einzelkomponenten nicht bestimmbar.

3.2.16.1 Perfluoroctansäure (PFOA)

Komposte. Während PFOA in allen Bioabfallkomposten gefunden wurde, liegen die Gehalte in den Grüngutkomposten bei knapp der Hälfte der Proben (fünf Proben) unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 0,5 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$. Beide Kompostarten weisen für zehn (von elf) Proben ähnliche Wertebereiche bis knapp über 3 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$ sowie einen Ausreißer im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich (Bioabfall- < Grüngutkomposte) auf. Insgesamt wurden jedoch in den Bioabfallkomposten höhere Konzentrationen ermittelt als in den Grüngutkomposten.

Über den zeitlichen Trend der PFOA-Gehalte in den Komposten lässt sich keine Aussage treffen. Bei der Untersuchung im Jahr 2006 wurden drei Bioabfallkomposte analysiert; zum anderen waren die damaligen Bestimmungsgrenzen – je nach Trockensubstanzgehalt der Proben – um den Faktor 30 bzw. 46 höher. Sie lagen damit im Bereich des maximalen Kompostanalysewerts (Grüngut) der aktuellen Untersuchung.

Vergärungsrückstände. Bei den Vergärungsrückständen unterscheiden sich die Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen in ihren PFOA-Gehalten deutlich von den Gärresten der Biogasanlagen. Bei den Bioabfallvergärungsrückständen liegt eine (von acht) Proben unter der Bestimmungsgrenze; die restlichen Proben weisen Konzentrationen im Bereich der Bioabfallkomposte (feste Bioabfallvergärungsrückstände) bzw. etwas höhere (flüssige Bioabfallvergärungsrückstände) auf; Ausreißer treten keine auf. Dagegen findet sich in den sieben auswertbaren Gärrestproben (vier NawaRo-, drei Mitvergärungsgärreste) bis auf jeweils eine Ausnahme kein PFOA. Der einzige Messwert der NawaRo-Gärreste ist mit 32 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$ die höchste PFOA-Belastung der Untersuchung 2009; die Probe stammt von der Anlage, die Schweinegülle (Anteil 35 %) mitvergärt.

3.2.16.2 Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)

Komposte. Bei PFOS ist die Situation bei den Komposten in etwa analog PFOA. Die Konzentrationswerte sind etwas niedriger. So kommt PFOS in den Bioabfallkomposten häufiger als in den Grüngutkomposten vor: bei den Bioabfallkomposten in neun, bei den Grüngutkomposten in vier (von jeweils elf) Proben. Auch die Wertebereiche der beiden Kompostarten stimmen weitgehend überein: die Mehrzahl der Kompostproben (neun Bioabfall-, zehn Grüngutkomposte) enthält PFOS in Konzentrationen bis zu 1 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$. Die Bioabfallkomposte weisen zwei Ausreißer mit Werten von 6 bzw. 14 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$ sowie insgesamt leicht höhere Gehalte auf als die Grüngutkomposte.

Die Düngemittelverordnung [11] enthält als einzigen Grenzwert für organische Schadstoffe in organischen Sekundärrohstoffen einen Summenwert für PFOA und PFOS von 0,1 mg/(kg TM). Ab einem Summengehalt von 0,05 mg/(kg TM) besteht für die Charge Kennzeichnungspflicht. Beide Werte werden bei der aktuellen Untersuchung von allen Kompostproben deutlich unterschritten; die Bioabfallkomposte schöpfen den Grenzwert zu maximal 16 % aus, die Grüngutkomposte zu maximal 23 %.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der PFOS-Gehalte in den Komposten gilt das Gleiche wie bei PFOA (vgl. Abschnitt 3.2.16.1): aufgrund der geringen Anzahl der im Jahr 2006 untersuchten Proben (drei Bioabfallkomposte) und der aus heutiger Sicht unzureichenden Bestimmungsgrenzen sind diesbezüglich keine Aussagen möglich.

Vergärungsrückstände. Auch bei den Vergärungsrückständen liegen hinsichtlich der PFOS-Gehalte ähnliche Verhältnisse vor wie bei PFOA. In den Rückständen der Bioabfallvergärungsanlagen findet sich PFOS in sechs (von acht) Proben in Gehalten über den Bestimmungsgrenzen von 0,5 µg/(kg TM) (für die festen Bioabfallvergärungsrückstände) bzw. 1 µg/(kg TM) (für die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände); der Wertebereich liegt im einstelligen µg/kg-Bereich {für sieben Proben: bis knapp über 3 µg/(kg TM); ein Ausreißer (fester Bioabfallvergärungsrückstand): 8,8 µg/(kg TM)}. Dagegen ist in allen sieben auswertbaren Gärrestproben der Biogasanlagen kein PFOS bestimmbar.

Der Grenzwert der Düngemittelverordnung [11] von 0,1 mg/(kg TM) für die Summe aus PFOA und PFOS wird von den untersuchten Vergärungsrückständen sicher eingehalten; der maximale Summengehalt erreicht 12 % des Grenzwerts (fester Bioabfallvergärungsrückstand).

3.2.16.3 Weitere perfluorierte Tenside

Neben PFOA und PFOS wurden die Gehalte acht weiterer perfluorierter Tenside in den Kompostproben und Vergärungsrückständen bestimmt:

- 6 Perfluorcarbonsäuren {Perfluorhexan- (PFHxA; nur in Feststoffproben analysierbar, s. o.), -heptan- (PFHpA), -nonan- (PFNA), -decan- (PFDA), -undecan- (PFUnA) und -dodecansäure (PFDoA)}
- 2 Perfluorsulfonsäuren {Perfluorbutan- (PFBS) und -hexansulfonsäure (PFHxS)}.

Komposte. Wie PFOA und PFOS sind auch die anderen PFT in den Bioabfallkomposten häufiger vertreten als in den Grüngutkomposten. Bei den Bioabfallkomposten konnte in acht (von elf) Proben mindestens eine der acht Einzelkomponenten bestimmt werden {Bestimmungsgrenze: 0,5 µg/(kg TM)}; (nach PFOA und PFOS) am häufigsten wurden PFDA (in allen acht Proben) und PFHxA (in sechs Proben) gefunden. Bei den Grüngutkomposten trifft dies auf eine (von elf) Proben zu (mit sieben der acht PFT). PFHxS fehlt in beiden Kompostarten, PFUnA zusätzlich in den Bioabfallkomposten. Die Konzentrationen liegen meist im unteren einstelligen µg/kg-Bereich, in zwei Fällen (Bioabfall-: für PFHxA; Grüngutkomposte: für PFDA) bei 10 µg/(kg TM). Proben mit „erhöhten“ PFOA-Gehalten weisen meist mehrere PFT in ebenfalls (vergleichsweise) höheren Konzentrationen auf.

Vergärungsrückstände. Bei den Vergärungsrückständen sind in den festen Bioabfallvergärungsrückständen die meisten Vertreter der o. g. PFT zu finden. Fünf (von sechs) Proben enthalten eine oder mehrere Einzelkomponenten {Bestimmungsgrenze: 0,5 µg/(kg TM)}; in einer Probe konnten (neben PFOA und PFOS) sieben PFT bestimmt werden. PFDA ist in allen o. g. fünf Proben enthalten, PFDoA konnte in den festen Bioabfallvergärungsrückständen nicht nachgewiesen werden. Die Konzentrationen der sieben PFT liegen im unteren einstelligen µg/kg-Bereich.

In den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen ist von den acht PFT nur PFDA bestimmbar {Bestimmungsgrenze: 1 µg/(kg TM)}; es kommt in beiden Proben im unteren einstelligen µg/kg-Bereich vor. In den Gärresten von Biogasanlagen wurden PFT (außer PFOA und PFOS) in den NawaRo-Gärresten gefunden; die Gehalte in den Mitvergärungsgärresten liegen unter der Bestimmungsgrenze von 1 µg/(kg TM). Einzige PFT-Komponente ist PFNA, das in allen vier NawaRo-Gärresten in Konzentrationen bis 26 µg/(kg TM) vorkommt.

3.2.17 Triclosan, Methyl-Triclosan (TCLM)

3.2.17.1 Triclosan

Komposte. Bei den Bioabfallkomposten ist Triclosan, ein in kosmetischen, pharmazeutischen und Haushaltsprodukten weitverbreitetes Desinfektionsmittel, in acht (von elf) Proben in Gehalten über der Bestimmungsgrenze von 3 µg/(kg TM) enthalten; es kommt in Konzentrationen bis 11 µg/(kg TM) vor. In den (elf) Grüngutkomposten ist Triclosan in einer Probe bestimmbar; der ermittelte Gehalt liegt bei 25 µg/(kg TM).

Zur zeitlichen Entwicklung der Triclosan-Belastung der Komposte kann keine Aussage gemacht werden, da es erst seit dem Jahr 2006 zum Parameterumfang gehört und bei dieser Untersuchung nur drei Proben (drei Bioabfallkomposte) auf diesen Schadstoff analysiert wurden.

Vergärungsrückstände. Die Vergärungsrückstände zeigen bis auf die untersuchten NawaRo-Gärreste höhere Triclosan-Konzentrationen als die Komposte. Bei den Bioabfallvergärungsrückständen liegt in einer (von acht) Proben (fester Rückstand) ein Gehalt unter der Bestimmungsgrenze {3 µg/(kg TM)} vor; die anderen sieben Proben weisen Konzentrationen bis 60 µg/(kg TM) (fester Bioabfallvergärungsrückstand) auf. Die beiden Gärrestarten aus Biogasanlagen zeigen hinsichtlich Triclosan ein unterschiedliches Verhalten: während alle vier NawaRo-Gärreste unter der Bestimmungsgrenze liegen, ergaben die Mitvergärungsgärreste mit Gehalten bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich die höchsten Triclosan-Werte der aktuellen Untersuchung. Die Konzentrationen in den Vergärungsrückständen steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste.

3.2.17.2 TCLM

Komposte. Im Unterschied zum Triclosan ist TCLM, ein relativ stabiles Abbauprodukt von Triclosan, in den Bioabfallkomposten seltener zu finden als in den Grüngutkomposten. Während bei den Bioabfallkomposten drei Proben in ihren Gehalten über der Bestimmungsgrenze von 3 µg/(kg TM) liegen, sind es bei den Grüngutkomposten fünf (von jeweils elf) Proben. Die ermittelten Konzentrationen bleiben bei beiden Kompostarten im einstelligen µg/kg-Bereich und damit unter den Triclosan-Gehalten; dabei weisen die Grüngutkomposte höhere Werte auf als die Bioabfallkomposte.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der TCLM-Konzentrationen in den Komposten ist keine Aussage möglich (vgl. Abschnitt 3.2.17.1).

Vergärungsrückstände. Auch in den Vergärungsrückständen liegt TCLM in geringeren Konzentrationen vor als Triclosan; im Vergleich zu den Komposten weisen lediglich die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände höhere TCLM-Gehalte auf. Bei den festen Bioabfallvergärungsrückständen und den Gärresten aus Biogasanlagen liegen entweder alle Proben unter der Bestimmungsgrenze {3 µg/(kg TM)} (NawaRo-Gärreste) oder die Konzentrationen reichen in einzelnen Proben bis 4 µg/(kg TM) (feste Bioabfallvergärungsrückstände, Mitvergärungsgärreste). Dagegen zeigen die beiden flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände mit Gehalten bis in den zweistelligen µg/kg-Bereich die höchsten TCLM-Konzentrationen der aktuellen Untersuchung.

Tab. 12: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Rückständen aus Bioabfallvergärungs- und Biogasanlagen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchung aus dem Jahr 2006 [1]; n. b.: nicht bestimmt.

Untersuchungsjahr	Bioabfallvergärungsrückstand			Biogasanlagengärrest	
	fest	2006	flüssig	NawaRo	Mitvergärung
2009	2009	2009	2009	2009	2009
Probenanzahl N	6	5	2	4	4
Summe PBDE [µg/(kg TM)]					
Minimum	36,7	17,9	52,1	0,7	5,3
Median	53,5	26,3	n. b.	1,1	7,8
Mittelwert	52,2	28,0	n. b.	1,1	25,1
Maximum	66,3	41,4	54,2	1,5	79,5
<i>Standardabweichung</i>	<i>12,1</i>	<i>10,2</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,4</i>	<i>36,3</i>
HBCD [µg/(kg TM)]					
Minimum	42,9	n. b.	10,5	< 0,7	14,2
Median	53,1	n. b.	n. b.	3,1	39,2
Mittelwert	165,6	n. b.	n. b.	n. b.	37,5
Maximum	729,1	n. b.	25,9	42,9	57,4
<i>Standardabweichung</i>	<i>276,3</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>22,7</i>
Thiabendazol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	138	< 10	< 10
Median	31	< 10	n. b.	< 10	33
Mittelwert	n. b.	< 10	n. b.	< 10	n. b.
Maximum	220	< 10	216	< 10	73
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
PFOA [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 0,5	n. b.	2,2	< 1,0	< 1,0 ^{*)}
Median	1,2	< 18^{*)}	n. b.	< 1,0	< 1,0^{*)}
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	3,4	n. b.	4,2	32,0	2,6 ^{**)}
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
PFOS [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 0,5	n. b.	1,0	< 1,0	< 1,0 ^{*)}
Median	1,3	< 18^{*)}	n. b.	< 1,0	< 1,0^{*)}
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 1,0	< 1,0 ^{*)}
Maximum	8,8	n. b.	1,6	< 1,0	< 1,0 ^{*)}
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>< 1,0</i>	<i>n. b.</i>
Triclosan [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	n. b.	13	< 3	6
Median	9	n. b.	n. b.	< 3	73
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 3	75
Maximum	60	n. b.	48	< 3	150
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>60</i>
TCLM [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	n. b.	8	< 3	< 3
Median	3	n. b.	n. b.	< 3	< 3
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 3	n. b.
Maximum	4	n. b.	13	< 3	4
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>

^{*)} eine analysierte Probe
^{**)} drei auswertbare Proben

4 Zusammenfassung und Bewertung

Bei der vierten Untersuchungskampagne zur Bestimmung der Schadstoffbelastung organischer Dünger beprobte das Bayerische Landesamt für Umwelt im Sommer 2009

- jeweils elf Bioabfall- und Grüngutkomposte,
- acht Rückstände aus sechs Bioabfallvergärungsanlagen (sechs Fest-, zwei Flüssigproben) und
- acht Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen (von jeweils vier NawaRo- und Bioabfallmitvergärungsanlagen).

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen drei Untersuchungen [1, 2, 3] wurden – soweit möglich – die gleichen Kompostierungs- und Bioabfallvergärungsanlagen beprobt wie in den Jahren 2000, 2002 und 2006. Flüssige Bioabfallvergärungsrückstände (von zwei Anlagen) und die Gärreste der Biogasanlagen wurden erstmals in das Programm mit aufgenommen. In einer der vier NawaRo-Biogasanlagen werden ausschließlich pflanzliche Ausgangssubstrate, in den anderen zusätzlich Gülle oder Mist eingesetzt.

Neben den sieben Schwermetallen der BioAbfV [7] wurden die 38 Proben auf diverse organische Schadstoffe untersucht:

- | | |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| • polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe | Produkt unvollständiger Verbrennung, kanzerogen |
| • polychlorierte Dibenzodioxine/-furane | Nebenprodukt thermischer Prozesse, persistent, toxisch |
| • polychlorierte Biphenyle | Wärmeträger, Isolierflüssigkeit, Weichmacher, persistent, toxisch |
| • Biphenyl | Fungizid, Formulierungshilfsstoff, möglicherweise kanzerogen |
| • Hexachlorbenzol | Ausgangsprodukt für Chlorverbindungen, Nebenprodukt thermischer Prozesse, persistent |
| • Pentachlorphenol | Fungizid (Holzschutzmittel) |
| • ortho-Phenylphenol | Fungizid (Lebensmittelkonservierung) |
| • Bisphenol A | Ausgangsstoff für Kunststoffherstellung, endokrin wirksam |
| • Di-(2-ethylhexyl)-, Di-isononyl-phthalat | Weichmacher für Kunststoffe, endokrin wirksam |
| • iso-Nonylphenol | Ausgangsstoff für Kunststoff- und Tensidherstellung, endokrin wirksam |
| • zinnorganische Verbindungen | Biozide (Antifouling), endokrin wirksam |
| • Galaxolide [®] , Tonalide [®] | Synthetische Duftstoffe, endokrin wirksam |
| • polybromierte Diphenylether, Hexabromcyclododecan | Flammschutzmittel, persistent |
| • Thiabendazol | Fungizid |
| • perfluorierte Tenside | oberflächenaktive Substanzen, persistent |
| • Triclosan, Methyl-Triclosan | Desinfektionsmittel |

Zum Lesen der Abschnitte 3.2.13 bis 3.2.17 bitte diese Seite ausklappen (Tab. 12 rückseitig).

Damit wurde der Untersuchungsumfang gegenüber der Untersuchung 2006 um die Schadstoffe Di-isononyl-phthalat, Hexabromcyclododecan und acht perfluorierte Tenside erweitert.

Im Folgenden werden zu den einzelnen Schadstoff(klass)en die zugehörigen Wertebereiche (teilweise gerundet), unterteilt für Komposte und Vergärungsrückstände, angegeben.

<u>Schwermetalle</u> in [mg/(kg TM)]	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Blei</i>	15–48	< 2,5–32	< 2,5
<i>Cadmium</i>	0,25–0,52	0,19–0,65	0,19–0,45
<i>Chrom</i>	< 25–37	< 25–44	< 25
<i>Nickel</i>	< 10–29	< 10–30	< 10–13
<i>Quecksilber</i>	0,09–0,46	0,02–0,15	0,02

Die o. g. fünf Schwermetalle unterschreiten die niedrigeren Grenzwerte der BioAbfV [7], die bis auf die NawaRo-Gärreste einschlägig ist. Die Gehalte in den (i. d. R. höher belasteten) Bioabfallkomposten sind tendenziell rückläufig, die in den (geringer belasteten) Grüngutkomposten eher leicht ansteigend, so dass sich die Schwermetallkonzentrationen in den beiden Kompostarten angleichen. Die Vergärungsrückstände weisen ähnliche Schwermetallgehalte auf wie die Komposte.

<i>Kupfer</i>	27–110	20–190	20–190
<i>Zink</i>	120–210	90–1.100	90–1.100

Für die Schwermetalle Kupfer und Zink wurden Überschreitungen der Grenzwerte der BioAbfV [7] festgestellt: für Kupfer in den Komposten und Vergärungsrückständen, für Zink in den Vergärungsrückständen. Drei Mal wurden die höheren Grenzwerte überschritten: je ein Mal (Cu) bei den Grüngutkomposten und festen Bioabfallvergärungsrückständen, ein Mal (Zn) bei den Mitvergärungsgärresten. Gegenüber früheren Untersuchungen bleiben in den Komposten die Kupfergehalte nahezu unverändert; die Entwicklung der Zinkwerte ist diesbezüglich uneinheitlich: in den Bioabfallkomposten eher ab- und in den Grüngutkomposten eher zunehmend.

In den NawaRo-Gärresten, für die kein Schwermetallgrenzwert besteht, treten etwas höhere Konzentrationen auf als in den Komposten.

<u>Organische Schadstoffe</u>	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</i> in [mg/(kg TM)]	0,5–3,6	0,6–3,4	0,6–1,8

Die ermittelten Konzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen weisen unter den organischen Schadstoffen mit den Phthalaten die höchsten Werte der aktuellen Untersuchung auf. Bei den Komposten scheinen sich die Gehalte in den letzten Jahren im unteren einstelligen mg/kg-Bereich einzupendeln. Komposte und Vergärungsrückstände unterscheiden sich in ihren Gehalten kaum voneinander.

<u>Organische Schadstoffe</u> (Fortsetzung)	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)</i> in [ng I-TEQ/(kg TM)]	3,3–9,0	0,1–11	0,1–0,2

Einen relativ engen Wertebereich weisen die PCDD/F-Konzentrationen der Komposte auf; die Gehalte sind in Bioabfall- und Grüngutkomposten nahezu identisch und liegen bei beiden Kompostarten deutlich niedriger als bei der ersten Untersuchung im Jahr 2000. Bei den Vergärungsrückständen entsprechen die Konzentrationen in den Bioabfallvergärungsrückständen den Komposten, während die Gehalte in den Gärresten aus allen Biogasanlagen bis auf eine Ausnahme (Bioabfallmitvergärung) um mindestens eine Größenordnung niedriger sind.

<i>Polychlorierte Biphenyle</i> (Σ PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) ^{*)} in [μ g/(kg TM)]	9–150	0,6–39	0,6–1,3
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	--------	---------

<i>Polychlorierte Biphenyle</i> (Σ PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189) ^{**)} in [ng WHO-TEQ/(kg TM)]	1–19	0,1–4,8	0,1
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------	---------	-----

^{*)} Indikator-PCB ^{**)} dioxin-like PCB

Für die Indikator-PCB gilt Ähnliches wie für die PCDD/F: bei den Komposten ein relativ schmaler Wertekorridor (abgesehen von zwei Ausreißern) sowie ein deutlicher Rückgang der Gehalte seit der Untersuchung im Jahr 2000, bei den Vergärungsrückständen niedrigere Konzentrationen in den Gärresten aus Biogasanlagen (insbesondere NawaRo-Gärresten) als in den Bioabfallvergärungsrückständen (vergleichbar Bioabfallkomposte).

Auch bei den dl-PCB liegen ähnliche Verhältnisse wie bei den PCDD/F vor: bei den Komposten ein relativ enger Bereich (abgesehen von einem Ausreißer), vergleichbare Konzentrationen in Bioabfall- und Grüngutkomposten sowie leicht rückläufige Gehalte gegenüber der Untersuchung im Jahr 2002. Bei den Vergärungsrückständen sind in den Bioabfallvergärungsrückständen ähnliche Konzentrationen wie in den Komposten sowie in den Gärresten aus Biogasanlagen (insbesondere NawaRo-Gärresten) um eine Größenordnung niedrigere Gehalte zu finden.

<i>Biphenyl</i> in [μ g/(kg TM)]	< 10	< 10–97	< 10–97
---------------------------------------	------	---------	---------

Die Biphenylgehalte liegen in allen Kompostproben und in fast allen festen Bioabfallvergärungsrückständen unter der Bestimmungsgrenze. Die weiteren Vergärungsrückstände weisen Konzentrationen im zweistelligen μ g/kg-Bereich auf (Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < NawaRo-Gärreste), eventuell begründet in der Anwendung von Biphenyl als Formulierungshilfsstoff für Pflanzenschutzmittel.

<u>Organische Schadstoffe</u> (Fortsetzung)	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Hexachlorbenzol (HCB)</i> in [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	0,8–8,6	0,1–8,8	0,1–0,3

Die Gehalte an Hexachlorbenzol betragen in den Komposten meist wenige $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$; gegenüber den Werten der Untersuchung im Jahr 2000 zeigen sie eine (für die Grüngutkomposte leicht) abnehmende Tendenz. In den Bioabfallvergärungsrückständen sind die Konzentrationen etwas höher als in den Komposten, bleiben aber für alle Proben im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich. Die Gärreste der Biogasanlagen (insbesondere der NawaRo-Anlagen) weisen niedrigere Gehalte auf als die Komposte.

<i>Pentachlorphenol (PCP)</i> in [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 5–540	< 5–95	< 5
----------------------------------------------------------------------	---------	--------	-----

Pentachlorphenol weist in den Komposten eine relativ große Konzentrationsspanne (zwei Größenordnungen) auf; auffallend sind die im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen hohen Maximalwerte. Die Bioabfallkomposte sind stärker mit PCP belastet als die Grüngutkomposte, in den Bioabfallkomposten steigen die Gehalte gegenüber dem Jahr 2000 deutlich an. Die Bioabfallvergärungsrückstände zeigen Konzentrationen in der Größenordnung der Bioabfallkomposte, bei den Gärresten von Biogasanlagen wurde bei einer Anlage ein Gehalt über der Bestimmungsgrenze festgestellt.

<i>ortho-Phenylphenol</i> in [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10	< 10–440	19–330
------------------------------------------------------------------	------	----------	--------

Die Verhältnisse bei ortho-Phenylphenol ähneln denen bei Biphenyl: die Konzentrationen liegen in allen Kompostproben und in den meisten festen Bioabfallvergärungsrückständen unter der Bestimmungsgrenze. Die weiteren Vergärungsrückstände weisen Gehalte im zwei- bis dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf (Mitvergärungsgärreste < NawaRo-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände).

<i>Bisphenol A</i> in [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 25–840	< 25–1.300	< 25
--------------------------------------------------------	----------	------------	------

Während Bisphenol A in den Bioabfallkomposten und in den Vergärungsrückständen (außer NawaRo-Gärresten) in relativ hohen Konzentrationen {meist dreistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ - bis in den einstelligen mg/kg -Bereich (insbesondere bei den Bioabfallvergärungsrückständen)} auftritt, konnte es in den Grüngutkomposten und NawaRo-Gärresten nicht bestimmt werden.

<i>Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)</i> in [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]	0,9–17	1,5–13	1,5–3
----------------------------------------------------------------------------	--------	--------	-------

Von allen untersuchten organischen Schadstoffen ist DEHP der Parameter mit den höchsten Konzentrationen der aktuellen Untersuchung; die Maximalwerte reichen bis in den zweistelligen mg/kg -Bereich (ein Bioabfallkompost, ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand, drei Mitvergärungsgärreste). In den Komposten bewegen sich die Gehalte vorwiegend im einstelligen mg/kg -Bereich, in den Bioabfallkomposten sind die Werte gegenüber den Grüngutkomposten etwas erhöht. Die Vergärungsrückstände weisen bis auf die NawaRo-Gärreste (ähnliche Werte wie die Grüngutkomposte) höhere DEHP-Konzentrationen auf als die Komposte.

<u>Organische Schadstoffe</u> (Fortsetzung)	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Di-isononyl-phthalat (DINP)</i> in [mg/(kg TM)]	< 0,5–4,5	< 0,5–11	< 0,5

Ebenfalls hohe Gehalte (insbesondere in den Vergärungsrückständen) zeigt DINP: auch für diesen Parameter wurden zweistellige mg/kg-Werte festgestellt (ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand, zwei Mitvergärungsgärreste). Im Vergleich zu DEHP sind die Komposte geringer belastet: bei den Bioabfallkomposten liegen über die Hälfte, bei den Grüngutkomposten fast alle Proben unter der (vergleichsweise hohen) Bestimmungsgrenze. Während bei den Vergärungsrückständen die Bioabfallvergärungsrückstände und die Mitvergärungsgärreste hohe Konzentrationen aufweisen, entsprechen die NawaRo-Gärreste den Grüngutkomposten (Gehalte kleiner Bestimmungsgrenze).

<i>iso-Nonylphenol</i> in [µg/(kg TM)]	< 100–550	< 100–1.500	120–370
----------------------------------------	-----------	-------------	---------

Die Komposte enthalten weniger iso-Nonylphenol als die Vergärungsrückstände, wobei die Bioabfallkomposte insgesamt höhere Konzentrationen aufweisen als die Grüngutkomposte (nur eine Probe über der Bestimmungsgrenze). Für beide Kompostarten sind die Gehalte seit der Untersuchung 2002 rückläufig. In nahezu allen Vergärungsrückständen liegen die Konzentrationen im dreistelligen µg/kg-Bereich, teilweise sind auch Gehalte im einstelligen mg/kg-Bereich festzustellen (ein fester und ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand).

Zinnorganische Verbindungen in [µg Sn/(kg TM)]

<i>Monobutylzinn</i>	< 1–7,9	< 1–14	< 1–2,1
<i>Monooktylzinn</i>	< 1–11	< 1–19	< 1

Monobutyl- und -oktylzinn sind die einzigen zinnorganischen Verbindungen, die in den Bioabfallkomposten gefunden wurden; Grüngutkomposte wurden nicht auf diese Schadstoffklasse untersucht. Die Konzentrationen bewegen sich – wie schon bei den vorangegangenen Untersuchungen – teilweise unter der Bestimmungsgrenze, teilweise im einstelligen µg/kg-Bereich; eine Probe der (Bioabfall-)Komposte liegt im zweistelligen µg/kg-Bereich (Monooktylzinn). Von den Vergärungsrückständen sind die NawaRo-Gärreste am geringsten belastet: die Gehalte liegen meist unter der Bestimmungsgrenze. Die weiteren Vergärungsrückstände weisen höhere Konzentrationen (teilweise zweistelliger µg/kg-Bereich) bzw. Häufigkeiten (in 83 % bzw. 75 % aller Vergärungsrückstände) auf als die Bioabfallkomposte bzw. NawaRo-Gärreste.

Höher alkylierte zinnorganische Verbindungen kommen nur in den Vergärungsrückständen (außer NawaRo-Gärresten) vor: Di-, Tri-, Tetrabutyl- und Dioktylzinn. Insbesondere in den Mitvergärungsgärresten sind diese Verbindungen in hohen Konzentrationen (Di-, Tributyl-, Dioktylzinn: bis zweistelliger µg/kg-Bereich) und Häufigkeiten (Dibutylzinn: in allen Mitvergärungsgärresten) anzutreffen.

Die beiden zyklischen zinnorganischen Verbindungen Tricyclohexyl- und Triphenylzinn wurden in keiner Probe gefunden.

<u>Organische Schadstoffe</u> (Fortsetzung)	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Galaxolide</i> [®] (HHCB) in [µg/(kg TM)]	4–88	9–330	9–45

Die Bioabfallkomposte weisen i. d. R. höhere HHCB-Gehalte (meist im zweistelligen µg/kg-Bereich) auf als die Grüngutkomposte (meist im einstelligen µg/kg-Bereich). Die NawaRo-Gärreste zeigen Konzentrationen im Bereich der Bioabfallkomposte, alle anderen Vergärungsrückstände sind deutlich höher belastet (Gehalte bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich).

<i>Tonalide</i> [®] (AHTN) in [µg/(kg TM)]	< 3–56	< 3–46	< 3–7
--------------------------------------------------------	--------	--------	-------

Die Konzentrationen von AHTN in den einzelnen Proben verlaufen ähnlich HHCB: bei den Bioabfallkomposten sind höhere Gehalte als bei den Grüngutkomposten festzustellen, bei den Vergärungsrückständen steigen die Werte in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungsgärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen organischen Düngern sind jedoch geringer ausgeprägt, die Konzentrationen – insbesondere bei den Vergärungsrückständen – niedriger (NawaRo-Gärreste: einstelliger, andere Dünger: bis zweistelliger µg/kg-Bereich) als beim HHCB.

<i>Polybromierte Diphenylether</i> (PBDE) in [µg/(kg TM)]	4–3.200	0,7–80	0,7–1,5
--------------------------------------------------------------	---------	--------	---------

Ausreißer bedingt (ein Grüngutkompost im mg/kg-Bereich) weisen die Komposte bezüglich PBDE einen sehr großen Wertebereich über drei Größenordnungen auf. Bis auf den Ausreißer liegen die Gehalte in den Bioabfallkomposten (zweistelliger µg/kg-Bereich) höher als in den Grüngutkomposten (ein- bis zweistelliger µg/kg-Bereich). Bei den Vergärungsrückständen sind die Gärreste von Biogasanlagen niedriger, die Rückstände von Bioabfallvergärungsanlagen höher mit PBDE belastet als die Komposte.

<i>Hexabromcyclododecan</i> (HBCD) in [µg/(kg TM)]	9–720	< 0,7–730	< 0,7–43
-------------------------------------------------------	-------	-----------	----------

HBCD liegt in beiden Kompostarten in ähnlichen Konzentrationen (meist zweistelliger µg/kg-Bereich) vor; einzelne Proben sind allerdings deutlich stärker belastet. Aufgrund zweier Ausreißer (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand, ein NawaRo-Gärrest) streuen die HBCD-Gehalte in den Vergärungsrückständen über drei Größenordnungen; abgesehen von diesen beiden Maximalwerten weisen die NawaRo-Gärreste Werte bis in den einstelligen, die anderen Vergärungsrückstände bis in den zweistelligen µg/kg-Bereich auf.

<i>Thiabendazol</i> in [µg/(kg TM)]	< 10–35	< 10–220	< 10
-------------------------------------	---------	----------	------

Die Thiabendazol-Gehalte im Kompost liegen – wie schon bei den vorangegangenen Untersuchungen – unter der Bestimmungsgrenze (mit Ausnahme dreier Bioabfallkomposte). Die NawaRo-Gärreste zeigen Kompost ähnliche Konzentrationen, die anderen Vergärungsrückstände Gehalte im zwei- bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich.

<u>Organische Schadstoffe</u> <u>(Fortsetzung)</u>	<u>Komposte</u>	<u>Vergärungsrückstände</u>	
		insgesamt	NawaRo
<i>Perfluorierte Tenside (PFT) in [µg/(kg TM)]</i>			
<i>Perfluorooctansäure (PFOA)</i>	< 0,5–21	< 0,5–32	< 1–32
<i>Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)</i>	< 0,5–14	< 0,5–8,8	< 1

Von allen zehn untersuchten perfluorierten Tensiden wurden PFOA und PFOS am häufigsten in den organischen Düngern gefunden. Beide PFT verhalten sich ähnlich, PFOA ist meist in etwas höheren Konzentrationen (und Häufigkeiten) enthalten als PFOS. In den Komposten liegen die Werte abgesehen von drei Ausreißern im unteren einstelligen µg/kg-Bereich, in den Bioabfallkomposten etwas höher als in den Grüngutkomposten. Der Grenzwert der Düngemittelverordnung [11] für die Summe aus PFOA und PFOS {0,1 mg/(kg TM)} wird von allen Kompostproben deutlich unterschritten. Bei den Vergärungsrückständen unterscheiden sich die Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen signifikant von den Gärresten der Biogasanlagen: während in den Bioabfallvergärungsrückständen Gehalte wie in den Bioabfallkomposten oder etwas höher (einestelliger µg/kg-Bereich) gefunden wurden, sind in den Biogasanlagengärresten bis auf einen Ausreißer (PFOA im zweistelligen µg/kg-Bereich) PFOA und PFOS nicht zu finden. Auch die Vergärungsrückstände halten den Grenzwert [11] für die Summe aus PFOA und PFOS sicher ein.

Neben PFOA und PFOS konnten Perfluordecan- (PFDA) und -hexansäure (PFHxA; nur in den Feststoffproben analysierbar, da es in den Flüssigproben zu matrixbedingten Störungen kam) am häufigsten in den organischen Düngern bestimmt werden. In den Komposten liegen die Gehalte wie bei PFOA und PFOS meist im unteren einstelligen µg/kg-Bereich, in den Bioabfallkomposten eher höher als in den Grüngutkomposten. Proben mit „erhöhten“ PFOA-Konzentrationen weisen meist mehrere PFT in ebenfalls (vergleichsweise) höheren Gehalten auf. Bei den Vergärungsrückständen sind in den festen Bioabfallvergärungsrückständen die meisten Vertreter der PFT zu finden (im unteren einstelligen µg/kg-Bereich). In den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen konnte (neben PFOA und PFOS) nur PFDA (im unteren einstelligen µg/kg-Bereich), in den NawaRo-Gärresten nur Perfluoronansäure (im ein- bis zweistelligen µg/kg-Bereich) bestimmt werden; die Gehalte in den Mitvergärungsgärresten liegen (bis auf einen PFOA-Wert) unter der Bestimmungsgrenze.

<i>Triclosan in [µg/(kg TM)]</i>	< 3–25	< 3–150	< 3
----------------------------------	--------	---------	-----

Triclosan ist in den Bioabfallkomposten in der Mehrzahl der Proben im meist einstelligen µg/kg-Bereich enthalten; in den Grüngutkomposten kommt es in einer Probe vor, allerdings mit der höchsten in den Komposten ermittelten Konzentration. Bei den Vergärungsrückständen liegen bis auf die untersuchten NawaRo-Gärreste höhere Triclosan-Gehalte vor als bei den Komposten. Die Bioabfallvergärungsrückstände und die Mitvergärungsgärreste weisen Konzentrationen bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich auf, in den NawaRo-Gärresten ist Triclosan nicht bestimmbar.

<i>Methyl-Triclosan (TCLM) in [µg/(kg TM)]</i>	< 3–9	< 3–13	< 3
------------------------------------------------	-------	--------	-----

Die Gehalte an TCLM in den Komposten liegen im einstelligen µg/kg-Bereich unter den Triclosan-Werten, in den Bioabfallkomposten niedriger als in den Grüngutkomposten. TCLM ist auch in die Vergärungsrückständen in geringeren Konzentrationen als Triclosan vorhanden; die festen Bioabfallvergärungsrückstände und die Gärreste von Biogasanlagen weisen Gehalte unter oder nahe der Be-

stimmungsgrenze und damit unter den Kompostwerten auf. Lediglich die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände zeigen Werte bis in den zweistelligen µg/kg-Bereich.

Nachstehendes Tableau zeigt die Untersuchungsergebnisse der Komposte und Vergärungsrückstände im Überblick. Dazu wurden die Medianwerte mit dem maximalen Median des jeweiligen Parameters normiert. Der resultierende Wertebereich $0 < x \leq 1$ wurde in vier äquidistante Bereiche unterteilt:

- $0 < x \leq 0,25$, gekennzeichnet mit +
- $0,25 < x \leq 0,5$, gekennzeichnet mit ++
- $0,5 < x \leq 0,75$, gekennzeichnet mit +++
- $0,75 < x \leq 1$, gekennzeichnet mit ++++

In dem Dünger, in dem der maximale Median ($x = 1$) auftrat, wurden die Pluszeichen fett dargestellt. Bei Medianen, die unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, wurden diese in Klammern gesetzt.

Schwermetalle / Organische Schadstoffe	Bioabfall- kompost	Grüngut- kompost	Bioabfallvergärungs- rückstand	NawaRo-Gärrest	Mitvergärungs- gärrest
Blei	++++	++++	++++	(+)	+
Cadmium	++++	++++	++++	+++	+++
Chrom	(++++)	(++++)	++++	(++++)	(++++)
Kupfer	+++	++	++++	++++	++++
Nickel	++++	++++	++++	(+++)	++++
Quecksilber	++++	++++	++++	+	+
Zink	++	++	+++	++++	++++
PAK	++++	++++	++++	+++	++++
PCDD/F	++++	++++	++++	+	+
PCB	++++	++++	++++	+	+
dl-PCB	++++	++++	++++	+	+
Biphenyl	(+)	(+)	(+)	++++	++
HCB	+++	++	++++	+	+
PCP	++++	(+)	+++	(+)	(+)
ortho-Phenylphenol	(+)	(+)	(+)	++++	++++
Bisphenol A	++	(+)	++++	(+)	++++
DEHP	+	+	+++	+	++++
DINP	(+)	(+)	++	(+)	++++
iso-Nonylphenol	+++	(++)	++++	+++	++++
Monobutylzinn	++	n. b.	+++	(+)	++++
Monooktylzinn	(+)	n. b.	++	(+)	++++
HHCB	++	+	+++	+	++++
AHTN	+++	++	+++	+	++++
PBDE	+++	++	++++	+	+
HBCD	++++	++++	++++	+	+++
Thiabendazol	(++)	(++)	++++	(++)	++++
PFOA	++++	++	+++	(+++)	(+++)
PFOS	+++	(++)	++++	(++++)	(++++)
Triclosan	+	(+)	+	(+)	++++
TCLM	(++++)	(++++)	++++	(+++)	(+++)

Zusammenfassend belegt die Untersuchung 2009 der bayerischen Komposte und Vergärungsrückstände, dass

- fast alle untersuchten Schadstoffe – in Übereinstimmung mit [12] – mit Ausnahme von einzelnen zinnorganischen Verbindungen und perfluorierten Tensiden gefunden wurden,
- die Schadstoffgehalte mit Ausnahme von Kupfer, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, Di-(2-ethylhexyl)- und Di-isononyl-phthalat meist niedrig sind (i. d. R. Schwermetallkonzentrationen im mg/kg-Bereich, Gehalte an organischen Schadstoffen im µg/kg-Bereich),
- die Konzentrationen insbesondere der organischen Schadstoffe teilweise stark variieren,
- die Bioabfallkomposte in ihren Schadstoffkonzentrationen meist über den Grüngutkomposten liegen,
- die Bioabfallvergärungsrückstände und die Mitvergärungsgärreste meist höhere Schadstoffgehalte als die NawaRo-Gärreste aufweisen,
- die Schadstoffbelastungen gegenüber den vorangegangenen Untersuchungen der Jahre 2000, 2002 und 2006 insbesondere bei den Bioabfallkomposten tendenziell rückläufig und die Fortschritte des bayerischen Grundsatzes „Qualität vor Quantität“ erkennbar sind.

5 Danksagung

Unser verbindlicher Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, das die Durchführung der Untersuchungen finanziert und dadurch die Weiterführung vorangegangener Kompostanalysen aus den Jahren 2000, 2002 und 2006 ermöglicht hat. Ebenso danken wir den Betreibern der Kompostierungs-, Bioabfallvergärungs- und Biogasanlagen, die offen für unser Anliegen waren und uns bei der Probenahme tatkräftig unterstützten.

Zu guter Letzt danken wir Frau Christa Müller (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Freising-Weihenstephan) für die Auswahl der NawaRo-Biogasanlagen und ihre Anregungen sowie den Kollegen der Referate 72, 74 und 75 für die Durchführung der umfangreichen und aufwändigen Analytik.

Ohne die Mitwirkung der genannten Personen und Institutionen wäre die Untersuchung in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

6 Literatur

- [1] ANONYM:
Schadstoffgehalte von Komposten und Vergärungsrückständen.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007
ISBN 978-3-940009-46-3
- [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] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY:
EPA Test Methods: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method 610.
Environmental Monitoring and Support Laboratory, Cincinnati OH 45268, USA, 1982
- [5] ANONYM:
Klärschlammverordnung (AbfKlärV). Vom 15. April 1992.
BGBl. I (1992) 21, S. 912–934.
Zuletzt geändert durch Artikel 19 des Gesetzes zur Neuregelung des Rechts des Naturschutzes und der Landschaftspflege vom 29. Juli 2009.
BGBl. I (2009) 51, S. 2542–2579.
- [6] ANONYM:
Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate.
5. Auflage.
Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Köln, 2006
ISBN 3-939790-00-1, ISSN 1863-1045
- [7] ANONYM:
Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). Vom 21. September 1998.
BGBl. I (2009) 65, S. 2955–2981.
Zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung zur Vereinfachung der abfallrechtlichen Überwachung vom 20. Oktober 2006.
BGBl. I (2006) 48, S. 2298–2333.
- [8] ANONYM:
Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990. Emissionsentwicklung 1990 – 2008. Schwermetalle.
http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/archiv/EM_Entwicklung_in_D_Trendtabelle_HM_v1.0_submission.xls.zip

- [9] ANONYM:
Trends. Zeitreihe 1996-2008 der Schwermetalle im Gesamtstaub.
http://www.lfu.bayern.de/themenuebergreifend/fachinformationen/umweltmonitoring_schwermetalle/trends/index.htm
- [10] ANONYM:
Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (Stockholmer Konvention).
http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_en.pdf
- [11] ANONYM:
Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV). Vom 16. Dezember 2008.
BGBl. I (2008) 60, S. 2524–2581.
Zuletzt geändert durch Artikel 1 der Ersten Verordnung zur Änderung der Düngemittelverordnung. Vom 14. Dezember 2009.
BGBl. I (2009) 80, S. 3905–3907.
- [12] KUPPER, T.; BRÄNDLI, R.C.; BUCHELI, T.D.; STÄMPFLI, C.; ZENNEGG, M.; BERGER, U.; EDDER, P.; POHL, M.; NIANG, F.; IOZZA, S.; MÜLLER, J.; SCHAFFNER, C.; SCHMID, P.; HUBER, S.; ORTELLI, D.; BECKER-VAN SLOOTEN, K.; MAYER, J.; BACHMANN, H.-J.; STADELMANN, F.X.; TARRADELLAS, J.:
Organic pollutants in compost and digestate: occurrence, fate and impacts. In: Fuchs, J.G.; Kupper, T.; Tamm, L.; Schenk, K. (Eds.): Compost and digestate: sustainability, benefits, impacts for the environment and for plant production. Proceedings of the international congress CODIS 2008, February 27–29, 2008, Solothurn, Switzerland.
Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Frick (CH), 2008
ISBN 978-3-03736-016-3

