



**Verwertung biogener Abfälle:
Rückstände, Schadstoffgehalte
und Hygieneparameter**

abfall



Verwertung biogener Abfälle: Rückstände, Schadstoffgehalte und Hygieneparameter

Impressum

Verwertung biogener Abfälle: Rückstände, Schadstoffgehalte und Hygieneparameter

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (BayLfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 33, Clemens Marb, Heinz Riedel

Redaktion:

LfU, Referat 33, Clemens Marb, Heinz Riedel

Stand:

September 2015

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Untersuchungsprogramm, -methodik	6
2.1	Untersuchungsprogramm	6
2.2	Untersuchungsmethodik	9
2.3	Anforderungen an die Behandlungsprodukte	10
3	Ergebnisse und Diskussion	13
3.1	Summenparameter, Nährstoffe	13
3.2	Schwermetalle	15
3.2.1	Schwermetalle nach BioAbfV	15
3.2.2	Weitere Schwermetalle	19
3.3	Organische Schadstoffe	21
3.3.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	22
3.3.2	Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	23
3.3.3	Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und dl-PCB)	24
3.3.3.1	Indikator-PCB	24
3.3.3.2	Dioxinähnliche (dl-)PCB	24
3.3.4	Biphenyl	25
3.3.5	Hexachlorbenzol (HCB)	26
3.3.6	Pentachlorphenol (PCP)	26
3.3.7	Ortho-Phenylphenol	27
3.3.8	Bisphenol A	32
3.3.9	Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP), Di-isononyl-phthalat (DINP)	32
3.3.9.1	Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	32
3.3.9.2	Di-isononyl-phthalat (DINP)	33
3.3.10	Iso-Nonylphenol	33
3.3.11	Zinnorganische Verbindungen	34
3.3.11.1	Monobutylzinn	34
3.3.11.2	Monooktylzinn	34
3.3.11.3	Di-/Tri-/Tetrabutyl-, Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn	35

3.3.12	Galaxolide® (HHCB), Tonalide® (AHTN), Iso-E-Super® (OTNE)	35
3.3.12.1	Galaxolide® (HHCB)	35
3.3.12.2	Tonalide® (AHTN)	36
3.3.12.3	Iso-E-Super® (OTNE)	36
3.3.13	Polybromierte Diphenylether (PBDE)	41
3.3.14	Hexabromcyclododecan (HBCD)	41
3.3.15	Thiabendazol	42
3.3.16	Perfluorierte Tenside (PFT)	42
3.3.17	Triclosan, Methyl-Triclosan (TCLM)	43
3.3.17.1	Triclosan	43
3.3.17.2	Methyl-Triclosan (TCLM)	43
3.3.18	Weitere polybromierte Flammschutzmittel	48
3.4	Umwelthygienische Parameter	50
3.4.1	Keimfähige Samen, austriebsfähige Pflanzenteile	50
3.4.2	Salmonellen	50
3.4.3	Aerobe Gesamtbakterienzahl	50
3.4.4	Fäkalcoliforme Bakterien	51
3.4.5	Enterokokken	51
3.5	Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft	52
3.5.1	Atmungsaktivität	52
3.5.2	Gasbildungspotenzial	53
4	Zusammenfassung und Bewertung	55
	Danksagung	67
	Literatur	68

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht setzt die im Jahr 2000 begonnene Untersuchungsreihe¹ über Schadstoffgehalte in Fertigkomposten und Gärprodukten (seit dem Jahr 2006) mit den Ausgangsmaterialien Bioabfall und Grüngutabfall fort.

Ein wichtiger Aspekt bei der Planung der Beprobungskampagnen 2013/14 war, wieder dieselben Anlagen/-standorte in die Untersuchung einzubeziehen.

Die Ergebnisse ergänzen die Eigen- und Fremdüberwachungen der Fachverbände (zum Beispiel Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Fachvereinigung bayerischer Komposthersteller e. V.). Nicht nur die gesetzlich geforderten Parameter wurden bestimmt, sondern die Produkte auch auf eine Vielzahl organischer Schadstoffe analysiert.

In das Untersuchungsdesign fanden erstmals die Parameter Seuchen- und Phytohygiene sowie Ende der Abfalleigenschaft Eingang, um auch hierzu eindeutige Aussagen treffen zu können.

Durch den Vergleich mit früheren Untersuchungen ist es möglich, Aussagen über den zeitlichen Trend der Schadstoffbelastung zu machen. Ebenso lässt sich anhand der Daten belegen, inwieweit manche Schadstoffe schon Eingang in den Kompostierungs-/Vergärungspfad gefunden haben.

¹ Sämtliche Untersuchungen wurden dankenswerterweise vom Bayerischen Umweltministerium gefördert.

2 Untersuchungsprogramm, -methodik

Der Untersuchungsumfang und die Methodik entsprachen weitestgehend der im Jahr 2009 durchgeführten Studie [1]. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der aktuellen zu früheren Ergebnissen [1-4] und eine Fortschreibung der bestehenden Zeitreihen.

Komposte und Gärprodukte werden in der Regel zur Bodenverbesserung und als Düngemittel eingesetzt. Das heißt, neben den Bestimmungen des Abfallrechts [5, 6] sind auch die Bestimmungen des Düngemittelrechts zu beachten. Mit der Aufnahme zusätzlicher Schwermetalle wurde den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) [7] Rechnung getragen. Ebenso wurde das Programm um einige anorganische (Summen-)Parameter, organische Schadstoffe, umwelthygienische Parameter und Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft (vergleiche Vorschlag des Joint Research Centres [8]) erweitert, um ein noch umfassenderes Bild zu bekommen.

2.1 Untersuchungsprogramm

Bei der aktuellen Untersuchung wurden die gleichen Behandlungsprodukte/-rückstände wie bei der vorangegangenen im Jahr 2009 [1] beprobt:

- Bioabfall- und Grüngutkomposte (Fertigkomposte),
- feste und flüssige Vergärungsrückstände aus (Bio-)Abfallbehandlungsanlagen sowie
- Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen (NawaRo-, Mitvergärungsanlagen).

Es wurden die gleichen Anlagen wie bei der Untersuchung 2009 ausgewählt; eine Anlage konnte nicht beprobt werden, da die (bisherige) Bioabfallkompostieranlage seit längerer Zeit außer Betrieb war und sich die neue Bioabfallvergärungsanlage noch in der Inbetriebnahmephase befand. Insgesamt resultiert eine nahezu gleiche Probenanzahl wie im Jahr 2009. Gegenüber damals haben einige Betreiber das Behandlungsverfahren (Vergärung statt Kompostierung) oder Inputmaterial {nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)/Wirtschaftsdünger statt landwirtschaftliche Substrate mit Bioabfall/organischen Reststoffen etc. (Mitvergärung)} umgestellt.

Tab. 1: Probenumfang der vorliegenden Studie im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]

Probenart	Konsistenz	Abfall- erfassung	Untersuchungsjahr				
			2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Komposte							
• Bioabfall	fest	Getrennt	7	11	12	11 (2×)	15
• Grüngut	fest		10	11	12	11 (2×)	5
Gärprodukte							
– Vergärungsrückstände							
• Bioabfall	fest	Getrennt	9	6	5	–	–
• Grüngut	fest		1	–	–	–	–
• Bioabfall	flüssig		4	2	–	–	–
– Biogasgärreste							
• NawaRo	flüssig	–	5	4	–	–	–
• Mitvergärung	flüssig	–	3	4	–	–	–
Summe			39	38	29	44	20

Eine Übersicht über den Probenumfang der aktuellen und der bisherigen Untersuchungen gibt Tab. 1. In der vorliegenden Studie wurden in Bezug auf den Anlagenbestand (Stand 31.12.2013 [9], S. 53f.; [10]) in Bayern 12 % der Bioabfall-, 3,9 % der Grüngutkompostieranlagen, 50 % der Bioabfall-, 25 % der Grüngutvergärungsanlagen sowie 0,34 % der landwirtschaftlichen Biogasanlagen beprobt.

Beprobte wurden die stabilisierten, hygienisierten Komposte und Gärprodukte, wie sie zum Beispiel im Landschaftsbau oder in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Eine Ausnahme bildeten die festen Vergärungsrückstände, die direkt nach der anaeroben Vergärungsstufe vor der abschließenden aeroben Nachrotte (Stabilisierungs-, teilweise auch Hygienisierungsstufe) beprobt wurden. Für eine ordnungsgemäße aerobe Nachrotte werden die Vergärungsrückstände mit circa der doppelten Masse (tendenziell unbelasteterem) Strukturmaterial (zum Beispiel Baum- und Strauchschnitt, Landschaftspflegematerial) versetzt, was hinsichtlich der Schadstoffgehalte aufgrund des „Verdünnungseffektes“ zu einer Erniedrigung der Belastung führt. Insofern stellen die ermittelten Werte der festen Vergärungsrückstände eine worst-case-Betrachtung dar.

Einen Überblick über die 35 beprobten Anlagen, deren Einsatzstoffe und Behandlungsverfahren zeigt Tab. 2. Von den 5 NawaRo-Anlagen setzen zwei Anlagen ausschließlich pflanzliche Einsatzstoffe (vor allem Mais und Gras), die anderen drei zusätzlich Wirtschaftsdünger ein (je eine Anlage Rindergülle/-mist, Schweinegülle/-mist sowie Hühnermist/Rindergülle).

Tab. 2: Beprobte Anlagen, Einsatzstoffe und Behandlungsverfahren

Anlagenart	Anzahl	Einsatzstoffe	Anteil [Mass.-%] ¹⁾	Behandlungsverfahren, -temperatur ¹⁾
Bioabfallkompostierung	7	Bioabfall Grüngut Brauereireste	30–100 0–60 0–6	geschlossene, eingehauste und offene (Mieten-)Kompostierung 55–65 °C
Grüngutkompostierung	10	Grüngut	100	offene Mietenkomp. 55–65 °C
Vergärung	9	Bioabfallvergärungsanlagen: Bioabfall überlagerte Lebensmittel Grüngut Küchen-/Kantinenabfall Gras-/Maissilage Marktabfall	54–100 0–40 0–25 0–6 0–3 0–3	mesophile Vergärung thermophile Vergärung 37–50 °C 50–60 °C
	1	Grüngutvergärungsanlage: Grüngut	100	thermophile Vergärung 52 °C
Landwirtschaftliche Biogasanlagen	5	NawaRo-Anlagen: Mais/-silage Gras Rindergülle/-mist Gras/Ganzpflanzen-/Maissilage Hühnermist Roggen/Gerste Schweinegülle Schweinemist Zuckerrüben	30–67 0–40 0–36 0–33 0–33 0–30 0–20 0–15 0–4	mesophile Vergärung 40–50 °C
	3	mit Bioabfallmitvergärung: Fettabscheider/Flotate Schweinegülle Küchen-/Kantinenabfall Grassilage Mais NawaRo Pansen Ganzpflanzensilage Altbrot	0–60 0–50 5–40 0–30 0–30 0–10 0–10 0–5 0–3	mesophile Vergärung thermophile Vergärung 40–48 °C 53 °C

¹⁾ Angaben laut Anlagenbetreiber

Tab. 3: Parameterumfang der vorliegenden Studie im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4], siehe auch Tab. 4

Parameter	Untersuchungsjahr				
	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Trockensubstanz	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾
Glühverlust	✓ ¹⁾				
Salzgehalt	✓ ²⁾				
Nährstoffe (N _{ges} , P _{ges})	✓ ¹⁾				
Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn) laut BioAbfV [6]	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾
Weitere Schwermetalle (Sb, As, Ba, Co, Mo, Se, Ag, Tl, U)	✓ ¹⁾				
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ³⁾
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ³⁾
Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ³⁾
Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) ^{†)}	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	
Biphenyl	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾		✓ ³⁾
Hexachlorbenzol (HCB)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾		✓ ³⁾
Pentachlorphenol (PCP)	✓ ⁴⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾		✓ ³⁾
Ortho-Phenylphenol	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾		✓ ³⁾
Bisphenol A	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	
Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ³⁾
Di-isononyl-phthalat (DINP)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁴⁾		
Iso-Nonylphenol	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	
Zinnorganische Verbindungen	✓ ^{4) *)}	✓ ^{4) *)}	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	
Galaxolide [®] , 1,3,4,6,7,8-Hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethyl-cyclopenta-γ-2-benzopyran (HHCB)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁴⁾		
Tonalide [®] , 7-Acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-tetralin (AHTN)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁴⁾		
Iso-E-Super [®] , 1-(1,2,3,4,5,6,7,8-Octahydro-2,3,8,8-tetramethyl-2-naphthalenyl)-ethanon (OTNE)	✓ ¹⁾				
Polybromierte Diphenylether (PBDE)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	
Hexabromcyclododecan (HBCD)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾			
Thiabendazol	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾	✓ ⁴⁾		✓ ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA)	✓ ⁵⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁶⁾		
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	✓ ⁵⁾	✓ ¹⁾	✓ ⁶⁾		
Weitere perfluorierte Tenside (PFT)	✓ ⁵⁾	✓ ¹⁾			
Triclosan (TCL)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾		
Methyl-Triclosan (TCLM)	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾		
Weitere polybromierte Flammschutzmittel (FSM)	✓ ¹⁾				
Keimfähige Samen, austriebsfähige Pflanzenteile	✓ ²⁾				
Salmonellen	✓ ²⁾				
Aerobe Gesamtbakterienzahl	✓ ²⁾				
Fäkalcoliforme Bakterien	✓ ²⁾				
Enterokokken	✓ ²⁾				
Atmungsaktivität	✓ ^{2) **)}				
Gasbildungspotenzial	✓ ^{2) ***)}				

†) dl: dioxin-like

Untersuchungslabor: ¹⁾ Bayerisches Landesamt für Umwelt(schutz)
²⁾ bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg
³⁾ Ökometric GmbH, Bayreuth

⁴⁾ GALAB Laboratories, Hamburg
⁵⁾ Eurofins Institut Jäger GmbH, Tübingen
⁶⁾ SGS Institut Fresenius, Bayreuth

Analysierte Proben: ^{*)} alle Proben außer Grüngutkomposte und -vergärungsrückstand
<sup>**) Bioabfall-, Grüngutkomposte
^{***) Vergärungsrückstände, Biogasgärreste}</sup>

Die Tab. 3 gibt eine Übersicht über den Parameterumfang der aktuellen im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen (inklusive Angabe der die jeweilige Analytik durchführenden Untersuchungslabors). Die Einzelkomponenten der in Tab. 3 zu Klassen zusammengefassten Schadstoffe sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Einzelkomponenten der untersuchten organischen Schadstoffklassen

Schadstoffklasse	Einzelkomponenten
PAK	Summe 16 Komponenten nach [11, 12]
PCDD/F	Summe 17 Kongenere nach [13, 14]
Indikator-PCB	Summe PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180
dl-PCB	Summe PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189
Zinnorganische Verbindungen	Mono-/Di-/Tri-/Tetra-butyl-, Mono-/Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn
PBDE	Summe PBDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209
Weitere PFT	Perfluorhexan-, -heptan-, -nonan-, -n-decan-, -n-undecan-, -dodecan-säure, Perfluorbutan-, -hexansulfonsäure
Weitere polybromierte FSM	Hexabrombenzol, Pentabrommethylbenzol, Pentabromtoluol, Tetrabrom-p-xylo, Decabromdiphenylethan, 1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan

Änderungen gegenüber dem Parameterumfang des Jahres 2009 ergaben sich durch die Aufnahme

- anorganischer (Summen-)Parameter (Glühverlust, Salzgehalt, Nährstoffe: Stickstoff, Phosphor),
- zusätzlicher Schwermetalle (Antimon, Arsen, Barium, Kobalt, Molybdän, Selen, Silber, Thallium, Uran),
- zusätzlicher organischer Schadstoffe (Iso-E-Super[®], 6 weitere polybromierte Flammschutzmittel),
- seuchen- und phytohygienischer sowie weiterer mikrobiologischer Parameter (keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile, Salmonellen, aerobe Gesamtbakterienzahl, fäkalcoliforme Bakterien, Enterokokken) und
- von Parametern zum Ende der Abfalleigenschaft (Atmungsaktivität von Komposten, Gasbildungspotenzial von Vergärungsrückständen/Gärresten).

2.2 Untersuchungsmethodik

Die Probenahmen für die 27 Feststoff- (7 Bioabfall- und 10 Grüngutkomposte, 10 feste Vergärungsrückstände) und 12 Flüssigproben (4 flüssige Bioabfallvergärungsrückstände, 8 Biogasgärreste) fanden im Zeitraum November 2013 bis Januar 2014 statt. Sie erfolgten gemäß den Vorgaben des Methodenbuchs zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. [15] (unter anderem Berücksichtigung der mikrobiologischen Anforderungen; Feststoffproben: Mischprobe aus den Haufwerken der jeweiligen Lagerplätze). Beprobte wurden die organischen Dünger, wie sie zur weiteren Verwertung abgegeben werden (Ausnahme: feste Vergärungsrückstände); die Feststoffe wiesen Körnungsspektren zwischen 0 bis 8 mm und 0 bis 25 mm (ein Grüngutkompost: 0 bis 40 mm) auf. Unmittelbar nach der Beprobung wurden die Proben auf +4 °C gekühlt (gekühlter, thermostatisierter Transport) und am BayLfU Josef-Vogl-Technikum bis zur weiteren Aufbereitung bei +4 °C aufbewahrt (zum Beispiel für die Bestimmung der umwelthygienischen Parameter sowie der Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft) oder bei –20 °C eingefroren (bei Gefriertrocknung für die anschließende chemische Analytik).

Die Bestimmung der umwelthygienischen Parameter sowie der Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft erfolgte an den ungetrockneten Originalproben, die chemische Analytik an den gefriergetrock-

neten Proben. Die gefriergetrockneten Proben wurden gemahlen (Planeten-Kugelmühle), zur Analytik wurde die ungesiebte Probe eingesetzt.

Die zur Bestimmung der Schadstoffgehalte angewandten chemischen Analysenverfahren mit den sich ergebenden Bestimmungsgrenzen zeigt Tab. 5.

Tab. 5: Eingesetzte Analysenverfahren und Bestimmungsgrenzen

Parameter	Analysenverfahren		Bestimmungsgrenze(n) ¹⁾
	Extraktion(smittel) / Oxidation	Detektion	
Stickstoff	Oxidation	WLD	0,1 %
Phosphor	Königswasser	ICP-OES	0,01 %
Schwermetalle nach BioAbfV [6]			
Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn	Königswasser	ICP-MS	0,1–25 mg/(kg TM) ¹⁾
Hg	Oxidation	AAS	0,002 mg/(kg TM)
Weitere Schwermetalle (Sb, As, Ba, Co, Mo, Se, Ag, Tl, U)	Königswasser	ICP-MS	0,05–50 mg/(kg TM) ¹⁾
PAK	Toluol	GC-MS	0,03–0,09 mg/(kg TM) ¹⁾
PCDD/F	Toluol	GC-HRMS	0,01–0,24 ng/(kg TM) ¹⁾
Indikator-PCB	Toluol	GC-HRMS	0,01–0,02 µg/(kg TM) ¹⁾
dl-PCB	Toluol	GC-HRMS	0,02–0,1 ng/(kg TM) ¹⁾
Biphenyl	Acetonitril	GC-MS	10 µg/(kg TM)
HCB	Toluol	GC-HRMS	0,01 µg/(kg TM)
PCP	Na ₂ CO ₃ -Lösung	GC-MS	10 µg/(kg TM)
Ortho-Phenylphenol	Acetonitril	GC-MS	10 µg/(kg TM)
Bisphenol A	Hexan	GC-MS	10 µg/(kg TM)
DEHP, DINP	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	0,5 mg/(kg TM)
Iso-Nonylphenol	Hexan	GC-MS	100 µg/(kg TM)
Zinnorganische Verbindungen	Wasser/Methanol	GC-AED	1 µg Sn/(kg TM)
HHCB, AHTN, OTNE	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	3 µg/(kg TM)
Thiabendazol	Acetonitril	LC-MS/MS	10 µg/(kg TM)
PBDE	n-Hexan/Aceton	GC-MS	0,0001 µg/(kg TM) ¹⁾
HBCD	n-Hexan/Aceton	GC-MS	0,01 µg/(kg TM) ¹⁾
PFOA, PFOS, weitere PFT	Methanol	LC-MS	2–3 µg/(kg TM) ¹⁾
TCL, TCLM	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	3 µg/(kg TM)
Weitere polybromierte FSM	n-Hexan/Aceton	GC-MS	0,0002–0,02 µg/(kg TM) ¹⁾

¹⁾ in Abhängigkeit der untersuchten Einzelkomponente

2.3 Anforderungen an die Behandlungsprodukte

Gesetzliche und weitere einschlägige Anforderungen an die Behandlungsprodukte hinsichtlich ihrer Schadstoffbelastung sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Komposte und Vergärungsrückstände (fest, flüssig) aus Bioabfall-/Grüngutvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, in denen Bioabfälle mitvergoren werden, unterliegen der Bioabfallverordnung BioAbfV (2012) [6]. Für Gärprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) gilt diese Aussage nicht.

Die Vorgaben der BioAbfV (1998) [16] wurden der geänderten Entsorgungssituation – Steigerung des Bioabfallaufkommens infolge der zunehmenden Getrennt-Erfassung, neben den Kompostierverfahren etablierten sich Vergärungsverfahren zur Erzeugung von Biogas auf dem Markt – nicht mehr in vollem

Umfang gerecht; auch die Praxiserfahrungen sowie neue und geänderte Vorschriften (zum Beispiel DüMV [7]) und die Erkenntnisse zur seuchen- und phytohygienischen Unbedenklichkeit von Bioabfällen bei Vergärungsprozessen erforderten eine Neufassung der Bioabfallverordnung insbesondere in den Anhängen als auch im verfügenden Teil.

Die BioAbfV regelt die stoffliche Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Sie fordert hinsichtlich der Schadstoffbelastung die Einhaltung von Grenzwerten für sieben Schwermetalle (Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink; mit jeweils zwei Grenzwerten in Abhängigkeit der Aufbringungsfracht).

Die „Gütesicherung Kompost“ (RAL-Gütezeichen 251) der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. [17] hat die höheren Schwermetallgrenzwerte der Bioabfallverordnung als Richtwerte in ihre Qualitätsüberwachung übernommen.

Tab. 6: Anforderungen an Komposte und Gärprodukte hinsichtlich ihrer Schadstoffbelastung; Werte in mg/(kg TM), soweit nicht anders angegeben; n. n.: nicht nachweisbar

Schadstoff	BioAbfV [6]		DüMV [7]		Qualitäts„siegel“		EU End-of-Waste [8]
	30 Mg TM/ (ha × 3a) ¹⁾	20 Mg TM/ (ha × 3a) ¹⁾	Kenn- zeichnung	Grenzwert	FBK [18]	EU Öko-V [19]	
Blei	100	150	100	150	75	45	120
Cadmium	1	1,5	1,0	1,5	0,75	0,7	1,5
Chrom	70	100	300	–	70	70	100
Chrom(VI)	–	–	1,2	2	–	n. n.	–
Kupfer	70	100	–	900 ²⁾	70	70	200
Nickel	35	50	40	80	25	25	50
Quecksilber	0,7	1	0,5	1,0	0,7	0,4	1
Zink	300	400	–	5.000 ²⁾	200	200	600
Arsen	–	–	20	40	–	–	–
Thallium	–	–	0,5	1,0	–	–	–
Σ PAK	–	–	–	–	–	–	6
Σ PCDD/F, dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]	–	–	–	30 Grünland: 8	–	–	–
PFOA + PFOS	–	–	0,05	0,1	–	–	–

¹⁾ Aufbringungsfracht

²⁾ Höchstgehalt

Die Düngemittelverordnung (DüMV) [7] regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Sie gibt Kennzeichnungs- und Grenzwerte für sieben Schwermetalle {Blei, Cadmium, Chrom(VI), Nickel, Quecksilber, Arsen, Thallium} sowie Höchstgehalte für die beiden Spurennährstoffe Kupfer und Zink vor. Hinsichtlich der Belastung mit organischen Schadstoffen nennt die DüMV [7] Grenzwerte für die Summe polychlorierte Dibenzodioxine/-furan und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (gelten nicht für NawaRo-Biogasgärreste) sowie einen Kennzeichnungs- und einen Grenzwert für perfluorierte Tenside (Summe Perfluorooctansäure und Perfluorooctansulfonsäure). Für Stoffe, die der Bioabfallverordnung [6] unterliegen, sind die dort genannten Anforderungen zu erfüllen; Vorschriften der DüMV [7] bleiben hiervon unberührt.

Die Fachvereinigung Bayerischer Komposthersteller e. V. (FBK) [18] fordert in ihren Güte- und Prüfbestimmungen („Qualitätszeichen Kompost“) die Einhaltung von Richtwerten für die sieben Schwermetalle der Bioabfallverordnung [6], die teilweise (Blei, Cadmium, Nickel, Zink) unter den niedrigeren Grenzwerten der Bioabfallverordnung liegen.

Hinsichtlich der Schwermetallbelastung (sieben Schwermetalle der BioAbV [6]) stellt die EU Öko-Verordnung 889/2008 [19] die höchsten Qualitätsanforderungen an Komposte.

Das Joint Research Centre der Europäischen Kommission schlägt als Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft von Komposten und Vergärungsrückständen neben vielen anderen Parametern (Mindestgehalt an organischem Material, Stabilitätseigenschaften, Pathogene, keimfähige Samen/austriebsfähige Pflanzenteile, makroskopische Verunreinigungen) auch Höchstgehalte für diverse Schadstoffe vor [8]. Der Vorschlag enthält neben Werten für die sieben Schwermetalle der BioAbV [6] eine Obergrenze für den Gehalt an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (Summe 16 Komponenten nach [11, 12]).

Gesetzliche und weitere einschlägige Anforderungen an die Behandlungsprodukte hinsichtlich umwelthygienischer Parameter (Phyto- und Seuchenhygiene) und Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Tab. 7: Anforderungen an Komposte und Gärprodukte hinsichtlich umwelthygienischer Parameter und Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft; KBE: Kolonie bildende Einheit; FS: Frischsubstanz; oTM: organische Trockenmasse

Parameter	Bioabfallverordnung [6]	Vollzugshinweise [20, 21]	EU End-of-Waste [8]
Keimfähige Samen, austriebsfähige Pflanzenteile	2 pro l	2 pro l	2 pro l
Salmonellen	0 in 50 g	0 in 50 g	0 in 25 g
Aerobe Gesamtbakterienzahl [KBE/(g FS)]	–	$5 \cdot 10^8$ ¹⁾	–
Fäkalcoliforme Bakterien [KBE/(g FS)]	–	$5 \cdot 10^3$ ¹⁾	1.000
Enterokokken [KBE/(g FS)]	–	$5 \cdot 10^3$ ¹⁾²⁾	–
Sauerstoffaufnahme [mmol O ₂ /(kg oTM × h)]	–	–	25 ³⁾ / 50 ²⁾
Gasbildungspotenzial [l/(g oTM)]	–	–	0,25 ²⁾

¹⁾ Richtwert

²⁾ Gärprodukte

³⁾ Komposte

Die Bioabfallverordnung [6] beschränkt zur Einhaltung der Phytohygiene die Anzahl an keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen in den Behandlungsprodukten. Hinsichtlich der seuchenhygienischen Eigenschaften fordert sie die vollständige Abwesenheit von Salmonellenkeimen in 50 g untersuchtem Material.

Weitergehende Anforderungen zu seuchen- und phytohygienischen Prüfungen sind in den Hinweisen zum Vollzug der Bioabfallverordnung (1998) [20] enthalten und wurden mit der Neufassung der BioAbV 2012 [6] in [21] fortgeschrieben. Bei Anlagen ohne eine direkte Prozessprüfung wird eine erweiterte mikrobiologische Untersuchung der Behandlungsprodukte auf die Parameter aerobe Gesamtbakterienzahl bei 37 °C, fäkalcoliforme Bakterien (*E. coli*) und Enterokokken (lediglich für Gärprodukte) mit Einhaltung vorgegebener Richtwerte gefordert.

Der Vorschlag des Joint Research Centres zum Ende der Abfalleigenschaft von Komposten und Vergärungsrückständen [8] sieht auch Stabilitätskriterien vor. Diesbezüglich werden unter anderem Anforderungen hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme sowie des Gasbildungspotenzials (lediglich für Vergärungsrückstände) formuliert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Analysenergebnisse erfolgte getrennt nach den untersuchten Probenarten, um Aussagen zum (Schadstoff-)Gehalt der unterschiedlichen organischen Dünger beziehungsweise zum Behandlungsverfahren zu erhalten.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind alle (Schadstoff-)Gehalte (auch der Flüssigproben) auf Trockenmasse (TM) bezogen (Masseangabe pro kg TM). Ausnahmen bilden die Parameter Trockensubstanz und Salzgehalt (siehe Abschn. 3.1 beziehungsweise Tab. 8) sowie die Parameter zur Umwelthygiene (siehe Abschn. 3.4 beziehungsweise Tab. 27) und zum Ende der Abfalleigenschaft (siehe Abschn. 3.5 beziehungsweise Tab. 29). Für die Flüssigproben bedeutet dies aufgrund der vorliegenden Trockensubstanzgehalte (zwischen 6,6 und 24,2 Mass.-%) und Rohdichten der Proben (zwischen 920 und 1.080 g/l), dass deren volumenbezogene (Schadstoff-)Gehalte (Masseangaben pro l Originalsubstanz) um circa eine Größenordnung niedriger liegen als die auf die Trockenmasse bezogenen Werte.

Im Folgenden werden die aktuellen (Schadstoff-)Gehalte 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 [1-4] (grau unterlegt) verglichen. Falls einzelne Analysenergebnisse unter der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Analysenverfahrens lagen, werden lediglich Wertebereich und Median angegeben.

3.1 Summenparameter, Nährstoffe

Die Tab. 8 fasst die ermittelten Summenparameter (Trockensubstanz, Glühverlust, Salzgehalt) und Nährstoffgehalte (Gesamtstickstoff, -phosphor) der untersuchten organischen Dünger zusammen.

Bei den Feststoffproben weisen die Komposte Trockensubstanzgehalte zwischen 45,5 und 73,4 Mass.-% auf (ein Grüngutkompost: 36,4 Mass.-%), während die festen Vergärungsrückstände mit Werten von 28,1 bis 40,9 Mass.-% deutlich niedrigere Trockensubstanzgehalte besitzen. Die Feststoffgehalte der flüssigen Gärprodukte liegen bei 10 von 12 Proben zwischen 6,6 und 11,3 Mass.-%; zwei flüssige Bioabfallvergärungsrückstände heben sich mit Trockensubstanzgehalten von 16,7 sowie 24,2 Mass.-% ab und sind als Ausreißer einzustufen².

Der Glühverlust als Maß für den Gehalt an organischer Substanz in der Trockenmasse liegt bei den Komposten in einem typischen Bereich – laut [15] 24–51 Mass.-% – zwischen 23,8 und 40,5 Mass.-% (ein Bioabfallkompost: 47,7 Mass.-%, ein Grüngutkompost: 52,7 Mass.-%). Deutlich höhere Restgehalte an organischer Substanz besitzen die Rückstände aus Vergärungsprozessen: Die Glühverluste der Vergärungsrückstände betragen 41,4 bis 58,7 Mass.-%, die der Biogasgärreste (trotz Verweilzeiten im Fermenter von bis zu 4 Monaten) 58,5 bis 69,0 Mass.-%, ein für flüssige Gärreste durchaus üblicher Wertebereich – laut [22] 43,7 bis 72,5 Mass.-%.

Der Summenparameter Salzgehalt spiegelt den Elektrolytgehalt von Düngern wider und dient damit der Beurteilung der Eignung der Dünger als Mischkomponente für Erden und Substrate. Die untersuchten Feststoffproben weisen deutlich niedrigere Werte als die Flüssigproben auf, Produkte aus Bioabfällen tendenziell höhere als die entsprechenden Grüngut/NawaRo-Produkte. So liegen die Salzgehalte der Komposte mit Werten zwischen 0,92 und 7,87 g KCl/(l FS) (FS: Frischsubstanz) in einem für Komposte typischen Bereich – laut [15] 1,9 bis 8,0 g KCl/(l FS); die festen Vergärungsrückstände

² Hinweis: Werte in Tab. 8 sind mit den Ausreißern berechnet.

Tab. 8: Summenparameter und Nährstoffgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) in den Komposten und Gärprodukten; FS: Frischsubstanz

Behandlungsverfahren	Kompostierung		Vergärung			
Probenart	Fertigkompost		Vergärungsrückstand		Gärprodukt	
Herkunft	Bioabfall	Grüngut	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall	NawaRo	Mitvergärung
Konsistenz	fest		fest	flüssig	flüssig	flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14					
Probenanzahl	7	10	10 ¹⁾	4	5	3
Trockensubstanz [%]						
Minimum	45,5	36,4	28,1	9,0	8,0	6,6
Median	60,4	59,2	33,8	12,9	9,6	6,6
Mittelwert	59,2	57,7	33,8	14,7	9,5	6,8
Maximum	72,7	73,4	40,9	24,2	11,3	7,1
<i>Standardabweichung</i>	8,4	11,1	4,4	7,3	1,3	0,3
Glühverlust [%]						
Minimum	23,8	24,9	41,4	45,2	58,5	64,2
Median	35,2	32,9	51,3	49,0	67,0	64,9
Mittelwert	35,7	34,1	51,2	50,5	65,9	65,7
Maximum	47,7	52,7	58,7	58,7	69,0	68,1
<i>Standardabweichung</i>	7,6	8,1	5,4	5,8	4,3	2,0
Salzgehalt [g KCl/(I FS)]						
Minimum	2,96	0,92	2,69	13,26	10,31	15,81
Median	5,95	2,68	5,51	15,45	12,66	17,81
Mittelwert	6,07	2,56	6,88	16,39	14,41	18,17
Maximum	7,87	4,07	11,85	21,42	22,83	20,90
<i>Standardabweichung</i>	1,76	1,06	3,24	3,52	4,86	2,57
Stickstoff [%]						
Minimum	1,23	1,02	1,72	2,20	2,69	2,98
Median	1,90	1,55	1,98	2,98	3,91	3,99
Mittelwert	1,77	1,56	1,99	3,01	3,87	4,42
Maximum	2,39	1,94	2,44	3,87	4,64	6,27
<i>Standardabweichung</i>	0,38	0,29	0,22	0,71	0,76	1,68
Phosphor [%]						
Minimum	0,31	0,19	0,34	0,51	1,02	1,46
Median	0,41	0,31	0,46	0,64	1,04	2,14
Mittelwert	0,40	0,30	0,52	0,65	1,31	1,94
Maximum	0,51	0,37	0,84	0,81	2,39	2,22
<i>Standardabweichung</i>	0,07	0,07	0,18	0,13	0,60	0,42

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

sind vergleichbar den Bioabfallkomposten. Die flüssigen Gärprodukte weisen höhere, für Gärreste übliche Salzgehalte – laut [22] 9,4 bis 25,4 g KCl/(I FS) – von 10,3 bis 22,8 g KCl/(I FS) auf.

Die Gesamtstickstoff-Gehalte in den Feststoffproben liegen unter den Gehalten in den Flüssigproben. Die untersuchten Bioabfallkomposte und festen Vergärungsrückstände (Wertebereich: 1,23–2,44 Mass.-%) haben tendenziell höhere Stickstoffgehalte als die Grüngutkomposte (1,02–1,94 Mass.-%). Die höchsten Stickstoffgehalte weisen die Biogasgärreste (Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen) mit Werten zwischen 2,69 und 6,27 Mass.-% auf.

Wie beim Gesamtstickstoff steigen die Phosphorgehalte in der Reihenfolge Grüngut- < Bioabfallkomposte, feste < flüssige Vergärungsrückstände < NawaRo- < Mitvergärungs-Biogasgärreste an. Die Werte der Grüngutkomposte liegen zwischen 0,19 und 0,37 Mass.-% (entsprechend 0,42 und 0,85 Mass.-% P₂O₅), die der Bioabfallkomposte und festen Vergärungsrückstände zwischen 0,31 und 0,84 Mass.-% (0,71 und 1,92 Mass.-% P₂O₅). Die Kompostgehalte haben den für Komposte typischen Wertebereich – laut [15] 0,4–1,1 Mass.-% P₂O₅. Die Biogasgärreste erreichen mit Werten zwischen 1,02 und 2,39 Mass.-% (2,34 und 5,47 Mass.-% P₂O₅) die höchsten Phosphorgehalte.

3.2 Schwermetalle

In der vorliegenden Studie wurden die Proben sowohl auf die sieben Schwermetalle der BioAbfV [6] (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn) als auch auf neun weitere Schwermetalle (Sb, As, Ba, Co, Mo, Se, Ag, Tl, U) untersucht. Die Schwermetallgehalte der aktuellen sowie der vier vorangegangenen Untersuchungen [1-4] sind in Tab. 9 bis Tab. 12 (getrennt in Bioabfall-, Grüngutkomposte, Vergärungsrückstände und Biogasgärreste) dargestellt. Die gegenüber den früheren Studien zusätzlichen Schwermetalle zeigt Tab. 13.

3.2.1 Schwermetalle nach BioAbfV [6]

Fertigkomposte. Verglichen mit den unveränderten Grenzwerten der beiden BioAbfV [6, 16] (siehe Tab. 6) wurden für die zugehörigen Schwermetalle niedrige Gehalte in den Komposten gefunden; im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen [1-4] hielten alle Komposte die Grenzwerte ein.

Tab. 9: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) nach BioAbfV [6] in den Bioabfallkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Bioabfallkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	7	11	12	2×11 ¹⁾	15
Blei					
Minimum	18,8	17,3	21,7	21,6	27,9
Median	24,3	25,6	37,4	36,9	44,2
Mittelwert	27,7	26,8	36,9	37,3	42,7
Maximum	44,9	37,6	51,4	50,2	69,7
<i>Standardabweichung</i>	8,4	6,7	10,2	8,2	12,6
Cadmium					
Minimum	0,322	0,255	0,259	0,333	0,350
Median	0,430	0,365	0,455	0,414	0,430
Mittelwert	0,426	0,386	0,454	0,426	0,445
Maximum	0,540	0,519	0,826	0,616	0,660
<i>Standardabweichung</i>	0,077	0,079	0,136	0,073	0,082
Chrom					
Minimum	17,4	< 25,0	13,9	18,2	20,4
Median	22,8	< 25,0	22,1	23,6	26,2
Mittelwert	23,9	n. b.	23,8	26,0	27,2
Maximum	34,3	36,8	44,7	43,7	41,6
<i>Standardabweichung</i>	5,8	n. b.	8,1	6,9	6,1
Kupfer					
Minimum	35,9	37,7	43,4	34,8	39,2
Median	50,1	59,5	59,9	52,5	65,5
Mittelwert	49,7	55,1	69,9	71,5	67,9
Maximum	60,8	74,4	101,6	223,2	130,0
<i>Standardabweichung</i>	8,3	13,7	18,9	46,0	21,6
Nickel					
Minimum	10,4	10,2	9,6	9,1	13,5
Median	13,1	12,3	14,4	14,9	16,6
Mittelwert	16,4	14,5	16,1	16,3	18,5
Maximum	27,6	28,8	29,1	25,8	38,5
<i>Standardabweichung</i>	7,0	5,8	6,1	4,4	6,7
Quecksilber					
Minimum	0,057	0,096	0,097	0,080	0,140
Median	0,085	0,113	0,126	0,135	0,170
Mittelwert	0,091	0,122	0,133	0,154	0,230
Maximum	0,153	0,187	0,195	0,360	0,980
<i>Standardabweichung</i>	0,030	0,027	0,033	0,064	0,210
Zink					
Minimum	140	124	141	139	159
Median	154	146	191	185	175
Mittelwert	163	158	205	191	195
Maximum	205	209	334	360	288
<i>Standardabweichung</i>	23	28	50	46	40

¹⁾ Sommer- und Winterbeprobung von 11 Bioabfallkompostieranlagen

Die ermittelten maximalen Konzentrationen liegen bei den Bioabfallkomposten zwischen 22 % (Quecksilber) und 87 % (Kupfer), bei den Grüngutkomposten zwischen 47 % (Blei) und 95 % (Quecksilber; Ausreißer) der zugehörigen niedrigeren Grenzwerte (Aufbringungsmenge 30 Mg TM/ha in drei Jahren).

Ebenso zeigen sich für alle Schwermetalle der BioAbfV [6] außer Kupfer keine größeren Unterschiede zwischen der Belastung der Bioabfall- (siehe Tab. 9) und der Grüngutkomposte (siehe Tab. 10). Bei Chrom und Zink haben die beiden Kompostarten nahezu identische Mediane; für Cadmium weisen die Bioabfall-, für Blei, Nickel und Quecksilber die Grüngutkomposte geringfügig höhere Mediane auf. Als einzige Ausnahme ist bei Kupfer die Belastung in den Bioabfallkomposten deutlich höher (+39 %) als in den Grüngutkomposten.

Tab. 10: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) nach BioAbfV [6] in den Grüngutkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Grüngutkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	10	11	12	2×11 ¹⁾	5
Blei					
Minimum	< 15,0	14,9	17,0	17,2	21,2
Median	26,9	28,9	27,0	24,9	23,3
Mittelwert	n. b.	27,6	33,6	32,3	25,6
Maximum	46,7	47,9	90,9	82,8	31,3
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>10,0</i>	<i>19,7</i>	<i>17,4</i>	<i>4,9</i>
Cadmium					
Minimum	0,208	0,271	0,287	0,261	0,250
Median	0,393	0,391	0,383	0,376	0,320
Mittelwert	0,389	0,393	0,393	0,375	0,332
Maximum	0,544	0,524	0,529	0,535	0,440
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,091</i>	<i>0,082</i>	<i>0,081</i>	<i>0,062</i>	<i>0,069</i>
Chrom					
Minimum	< 10,0	< 25,0	13,5	15,9	20,0
Median	21,7	< 25,0	20,0	22,8	28,0
Mittelwert	n. b.	n. b.	20,7	23,4	26,6
Maximum	38,2	33,5	28,0	38,9	35,6
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>4,5</i>	<i>5,5</i>	<i>6,4</i>
Kupfer					
Minimum	22,2	27,0	29,5	25,3	33,1
Median	36,2	36,6	38,9	35,9	34,4
Mittelwert	37,1	43,7	42,4	38,6	39,6
Maximum	51,0	114,1	64,0	72,5	51,8
<i>Standardabweichung</i>	<i>7,5</i>	<i>24,0</i>	<i>12,2</i>	<i>11,7</i>	<i>8,2</i>
Nickel					
Minimum	7,2	< 10,0	8,8	10,3	13,4
Median	14,1	12,5	12,0	15,2	16,8
Mittelwert	16,1	n. b.	13,6	16,2	18,5
Maximum	28,1	23,2	23,0	31,6	30,8
<i>Standardabweichung</i>	<i>7,0</i>	<i>n. b.</i>	<i>4,6</i>	<i>4,9</i>	<i>7,2</i>
Quecksilber					
Minimum	0,063	0,087	0,073	0,080	0,090
Median	0,094	0,111	0,096	0,120	0,130
Mittelwert	0,154	0,153	0,153	0,182	0,124
Maximum	0,666	0,460	0,671	0,700	0,150
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,183</i>	<i>0,112</i>	<i>0,168</i>	<i>0,167</i>	<i>0,024</i>
Zink					
Minimum	107	116	108	109	98
Median	157	136	147	141	124
Mittelwert	153	137	159	152	126
Maximum	193	160	249	233	154
<i>Standardabweichung</i>	<i>24</i>	<i>16</i>	<i>43</i>	<i>33</i>	<i>20</i>

¹⁾ Sommer- und Winterbeprobung von 11 Grüngutkompostieranlagen

Ein Vergleich der Mediane der aktuell ermittelten Schwermetallkonzentrationen mit denen früherer Untersuchungen [1-4] zeigt die zeitliche Entwicklung der Schwermetallbelastung in den Komposten der letzten 14 Jahre. Auffallend ist die Angleichung der Schwermetallgehalte in Bioabfall- und Grüngutkomposten bei nahezu allen Schwermetallen der BioAbfV [6] (bei Kupfer lediglich teilweise); bei den Bioabfallkomposten ist tendenziell ein Rückgang der Schwermetallbelastung festzustellen, während bei den Grüngutkomposten kein eindeutiger Trend auszumachen ist.

Bei den Bioabfallkomposten wurden bei der aktuellen Untersuchung für Blei, Kupfer und Quecksilber die bislang niedrigsten Mediane ermittelt. Der deutlichste Rückgang der Belastung ist für die Schwermetalle Blei (-45 % gegenüber dem Jahr 2000) und Quecksilber (-50 %) festzustellen.

Im Unterschied zu den Bioabfallkomposten zeigen die Grüngutkomposte für die meisten Schwermetalle der BioAbfV [6] keinen rückläufigen Trend. Für Cadmium und Zink sind die ermittelten Mediane die höchsten der bisherigen Untersuchungen; diese beiden Schwermetalle gingen seit der Untersuchung im Jahr 2000 am deutlichsten nach oben (Cadmium: +23 %, wobei seit dem Jahr 2002 ein nur noch geringer Anstieg zu verzeichnen ist; Zink: +27 %). Lediglich die Chrom- und Quecksilbergehalte in den Grüngutkomposten sind in den letzten Jahren nennenswert gesunken (gegenüber dem Jahr 2000 Chrom: -23 %, Quecksilber: -28 %).

Gärprodukte. Die Gärprodukte besitzen Schwermetallgehalte in ähnlichen Wertebereichen wie die Komposte. Allerdings sind insgesamt etwas höhere Kupfer- und Zinkgehalte als bei den Komposten festzustellen.

Die Gärprodukte halten die Grenzwerte der BioAbfV [6] (siehe Tab. 6) für alle Schwermetalle bis auf Kupfer und Zink ein. Die ermittelten maximalen Konzentrationen für Blei, Cadmium, Chrom, Nickel und Quecksilber schöpfen die zugehörigen niedrigeren Grenzwerte [6] bei den festen Vergärungsrückständen zu 15 (Quecksilber) bis 80 % (Blei), bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen zu 21 (Quecksilber) bis 83 % (Nickel) und bei den Mitvergärungs-Biogasgärresten zu 4 (Quecksilber) bis 40 % (Cadmium) aus.

Ein fester und zwei flüssige Bioabfallvergärungsrückstände überschreiten den niedrigeren, ein Mitvergärungs-Biogasgärrest den höheren Kupfergrenzwert. Ein fester Bioabfallvergärungsrückstand hält den höheren, ein Mitvergärungs-Biogasgärrest den niedrigeren Zinkgrenzwert nicht ein.

Die Reste aus der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen/Wirtschaftsdüngern (vergleiche Tab. 2) zeigen im Vergleich zu den Kennzeichnungs- und Grenzwerten der DüMV [7] (siehe Tab. 6) geringe Schwermetallbelastungen. Die ermittelten maximalen Schwermetallkonzentrationen liegen zwischen 4 (Quecksilber) und 39 % (Nickel) des zugehörigen Grenzwerts [7]. Bei einer der fünf Proben sind höhere Werte, vor allem bei Kupfer und Zink, festzustellen; inwieweit diese durch den eingesetzten Hühnermist/Rindergülle (Anteil am Biogasanlageninput: > 33 Mass.-%) bedingt sind, bleibt offen.

Im Vergleich der Mediane der vier untersuchten Gärprodukte (siehe Tab. 11 und Tab. 12) haben die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände bis auf Zink die höchste Belastung an allen Schwermetallen der BioAbfV [6]; die höchsten Zinkgehalte weisen die Mitvergärungs-Biogasgärreste auf. Die NawaRo- und mit Einschränkungen auch die Mitvergärungs-Biogasgärreste sind am geringsten mit den in der BioAbfV [6] genannten Schwermetallen belastet; diese Aussage trifft auch zu, wenn man die Komposte in den Vergleich miteinbezieht. Von den zehn festen Vergärungsrückständen weist der Grüngutvergärungsrückstand für die Elemente Chrom, Kupfer, Nickel und Zink niedrigere Gehalte als die neun Bioabfallvergärungsrückstände auf.

Tab. 11: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) nach BioAbfV [6] in den Vergärungsrückständen im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1, 4]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Probenart Herkunft Konsistenz	Vergärungsrückstand				
	Bioabfall/Grüngut		Bioabfall		Bioabfall
	fest		fest		flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	10 ¹⁾	6	5	4	2
Blei					
Minimum	< 15,0	13,0	4,8	< 15,0	13,3
Median	19,4	26,0	26,8	25,2	n. b.
Mittelwert	n. b.	24,9	22,6	n. b.	n. b.
Maximum	79,7	31,8	33,9	30,3	26,4
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>6,6</i>	<i>11,1</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Cadmium					
Minimum	0,187	0,230	0,146	0,481	0,531
Median	0,301	0,341	0,366	0,604	n. b.
Mittelwert	0,291	0,344	0,351	0,611	n. b.
Maximum	0,426	0,433	0,481	0,757	0,654
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,080</i>	<i>0,072</i>	<i>0,132</i>	<i>0,132</i>	<i>n. b.</i>
Chrom					
Minimum	< 10,0	< 25,0	16,6	28,3	< 25,0
Median	21,1	25,5	23,0	33,1	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	25,3	33,4	n. b.
Maximum	31,8	29,3	35,8	39,2	43,7
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>8,3</i>	<i>5,9</i>	<i>n. b.</i>
Kupfer					
Minimum	14,6	30,8	24,7	58,6	65,2
Median	43,9	65,6	71,5	68,3	n. b.
Mittelwert	45,4	73,8	70,9	71,8	n. b.
Maximum	86,8	154,7	112,2	92,0	81,3
<i>Standardabweichung</i>	<i>18,3</i>	<i>42,5</i>	<i>33,7</i>	<i>14,7</i>	<i>n. b.</i>
Nickel					
Minimum	< 5,0	11,3	9,5	16,1	15,4
Median	11,2	13,5	11,5	18,9	n. b.
Mittelwert	n. b.	14,6	13,3	20,8	n. b.
Maximum	19,8	20,7	19,1	29,1	29,8
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>3,9</i>	<i>4,4</i>	<i>5,9</i>	<i>n. b.</i>
Quecksilber					
Minimum	0,030	0,079	0,030	0,073	0,095
Median	0,053	0,119	0,097	0,097	n. b.
Mittelwert	0,059	0,120	0,086	0,103	n. b.
Maximum	0,104	0,151	0,122	0,147	0,111
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,027</i>	<i>0,028</i>	<i>0,040</i>	<i>0,035</i>	<i>n. b.</i>
Zink					
Minimum	77	93	88	215	214
Median	143	166	179	228	n. b.
Mittelwert	179	171	167	241	n. b.
Maximum	545	249	218	293	285
<i>Standardabweichung</i>	<i>134</i>	<i>61</i>	<i>53</i>	<i>36</i>	<i>n. b.</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

Für die vier Gärprodukte gibt es zur Beurteilung des zeitlichen Trends der Schwermetallbelastung Vergleichsdaten seit der Untersuchung 2006 [4] für die festen Bioabfallvergärungsrückstände sowie 2009 [1] für die restlichen Gärprodukte (siehe Tab. 1). Für diese Zeiträume sind bei nahezu allen Gärprodukten und Schwermetallen der BioAbfV [6] abnehmende Gehalte festzustellen. Besonders deutlich ist der Rückgang der Schwermetallbelastung bei den festen Vergärungsrückständen für Kupfer und Quecksilber und bei den NawaRo-Biogasgärresten für Kupfer und Zink.

Tab. 12: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) nach BioAbfV [6] in den Biogasgärresten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1]; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz Herkunft	Biogasgärrest, flüssig			
	NawaRo		Mitvergärung	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	5	4	3	4
Blei				
Minimum	< 15,0	< 2,5	< 15,0	< 2,5
Median	< 15,0	< 2,5	< 15,0	3,5
Mittelwert	< 15,0	< 2,5	< 15,0	n. b.
Maximum	< 15,0	< 2,5	< 15,0	24,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Cadmium				
Minimum	0,131	0,191	0,160	0,211
Median	0,175	0,202	0,214	0,273
Mittelwert	0,200	0,262	0,259	0,292
Maximum	0,318	0,453	0,403	0,413
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,074</i>	<i>0,128</i>	<i>0,127</i>	<i>0,090</i>
Chrom				
Minimum	< 10,0	< 25,0	< 10,0	< 25,0
Median	< 10,0	< 25,0	16,5	< 25,0
Mittelwert	n. b.	< 25,0	n. b.	n. b.
Maximum	24,2	< 25,0	16,7	33,9
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Kupfer				
Minimum	18,5	19,9	32,3	27,4
Median	28,7	81,8	56,5	68,8
Mittelwert	54,0	92,7	64,1	64,9
Maximum	151,6	187,3	103,5	94,7
<i>Standardabweichung</i>	<i>55,4</i>	<i>71,2</i>	<i>36,2</i>	<i>30,2</i>
Nickel				
Minimum	< 5,0	< 10	6,7	< 10
Median	8,3	< 10	10,1	10,2
Mittelwert	n. b.	n. b.	9,7	n. b.
Maximum	31,3	12,8	12,3	18,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>2,8</i>	<i>n. b.</i>
Quecksilber				
Minimum	0,011	0,015	0,021	0,018
Median	0,018	0,018	0,026	0,028
Mittelwert	0,020	0,018	0,026	0,037
Maximum	0,037	0,020	0,030	0,072
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,010</i>	<i>0,002</i>	<i>0,005</i>	<i>0,024</i>
Zink				
Minimum	77	92	158	146
Median	134	305	274	262
Mittelwert	322	444	259	300
Maximum	1.098	1.072	345	530
<i>Standardabweichung</i>	<i>435</i>	<i>431</i>	<i>95</i>	<i>173</i>

3.2.2 Weitere Schwermetalle

Die Gehalte an Antimon, Arsen, Barium, Kobalt, Molybdän, Selen, Silber, Thallium und Uran in Komposten und Gärprodukten wurden erstmals ermittelt (siehe Abschnitt 2.1); die Analysenergebnisse fasst Tab. 13 zusammen.

Fertigkomposte. Für zwei (Arsen, Thallium) dieser neun Schwermetalle gibt die DüMV [7] Kennzeichnungs- und Grenzwerte vor (siehe Tab. 6); diese werden von den Komposten sicher eingehalten. Die ermittelten maximalen Konzentrationen liegen bei beiden Kompostarten bei 17 % (Arsen) und 27 sowie 26 % (Thallium) des zugehörigen Grenzwerts.

Tab. 13: Weitere Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) in den Komposten und Gärprodukten; Werte in mg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Behandlungsverfahren	Kompostierung		Vergärung			
	Fertigkompost		Vergärungsrückstand		Gärprodukt	
Probenart	Fertigkompost		Vergärungsrückstand		Biogasgärrest	
Herkunft	Bioabfall	Grüngut	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall	NawaRo	Mitvergärung
Konsistenz	fest		fest	flüssig	flüssig	flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14					
Probenanzahl	7	10	10 ¹⁾	4	5	3
Antimon						
Minimum	0,479	0,422	< 0,25	0,830	< 0,25	0,454
Median	0,638	0,676	0,525	0,915	< 0,25	0,463
Mittelwert	0,725	0,757	n. b.	0,933	n. b.	0,465
Maximum	1,081	1,234	6,281	1,073	0,356	0,479
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,214</i>	<i>0,264</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,117</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,013</i>
Arsen						
Minimum	3,52	3,62	1,90	4,86	< 1	2,38
Median	4,87	5,10	3,29	6,38	2,14	2,48
Mittelwert	4,97	5,14	3,18	6,39	n. b.	2,54
Maximum	6,73	6,90	4,12	7,93	2,97	2,77
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,26</i>	<i>0,99</i>	<i>0,72</i>	<i>1,32</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,20</i>
Barium						
Minimum	108	69	53	134	< 50	< 50
Median	133	152	124	178	< 50	< 50
Mittelwert	159	152	202	198	n. b.	< 50
Maximum	221	214	729	301	69	< 50
<i>Standardabweichung</i>	<i>47</i>	<i>47</i>	<i>201</i>	<i>73</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Kobalt						
Minimum	3,20	2,34	1,28	3,42	0,96	1,15
Median	3,95	4,97	2,93	4,28	1,42	1,32
Mittelwert	5,36	5,05	3,06	4,33	1,63	1,28
Maximum	12,76	7,91	6,29	5,36	2,98	1,38
<i>Standardabweichung</i>	<i>3,41</i>	<i>1,88</i>	<i>1,38</i>	<i>0,80</i>	<i>0,80</i>	<i>0,12</i>
Molybdän						
Minimum	1,11	0,89	1,01	1,95	2,45	2,46
Median	1,48	1,26	1,55	2,56	2,67	3,06
Mittelwert	1,64	1,52	1,89	2,91	3,35	3,19
Maximum	2,68	2,84	3,21	4,54	5,46	4,04
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,54</i>	<i>0,61</i>	<i>0,87</i>	<i>1,13</i>	<i>1,25</i>	<i>0,80</i>
Selen						
Minimum	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,588	< 0,5	0,658
Median	0,528	0,520	< 0,5	0,755	0,689	1,386
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	0,747	n. b.	1,410
Maximum	0,644	0,587	0,582	0,890	1,466	2,185
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,141</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,764</i>
Silber						
Minimum	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Median	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Mittelwert	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Maximum	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
<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>
Thallium						
Minimum	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Median	0,139	0,134	< 0,1	0,111	< 0,1	< 0,1
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 0,1	n. b.	< 0,1	< 0,1
Maximum	0,271	0,255	< 0,1	0,128	< 0,1	< 0,1
<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>
Uran						
Minimum	0,509	0,392	0,262	0,712	0,074	0,250
Median	0,848	0,753	0,606	0,784	0,186	0,667
Mittelwert	0,932	0,780	0,695	0,838	0,424	0,570
Maximum	2,049	1,243	1,696	1,070	1,516	0,794
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,517</i>	<i>0,232</i>	<i>0,439</i>	<i>0,161</i>	<i>0,614</i>	<i>0,284</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

Die untersuchten Bioabfall- und Grüngutkomposte unterscheiden sich geringfügig in den Schwermetallgehalten. Arsen, Selen und Thallium weisen nahezu identische Mediane auf, Antimon hat geringfügig höhere Werte in den Grüngutkomposten. Barium und Kobalt zeigen höhere Gehalte in den Grüngut-, Molybdän und Uran in den Bioabfallkomposten. Silber konnte in keiner Probe nachgewiesen werden.

Gärprodukte. Tendenziell sind die (flüssigen) Rückstände aus Bioabfall-/Grüngutvergärungsanlagen höher mit den neun Schwermetallen belastet als die Komposte, während die Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen geringere Gehalte aufweisen.

Auch die Gärprodukte halten hinsichtlich ihrer Arsen- und Thalliumgehalte die Grenzwerte der DÜMV [7] sicher ein. Die maximal ermittelten Arsenwerte schöpfen den Grenzwert bis zu 20 %, die Thalliumwerte bis zu 13 % aus.

Unter den Gärprodukten sind die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände am stärksten, die NawaRo-Biogasgärreste am wenigsten belastet (aus dem Vergleich der jeweiligen Mediane); einzige Ausnahmen stellen die beiden Elemente Molybdän und Selen dar, die hohe Gehalte in den Mitvergärungs-Biogasgärresten und niedrige Gehalte in den festen Vergärungsrückständen aufweisen. Bei den zehn festen Vergärungsrückständen zeigt der Grüngutvergärungsrückstand für die Elemente Arsen, Barium, Kobalt und Uran niedrigere Konzentrationen als die neun Bioabfallvergärungsrückstände.

Im Vergleich aller untersuchten Dünger zeigen die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände hinsichtlich der Elemente Antimon, Arsen und Barium die höchsten Belastungen. In den (vor allem NawaRo-) Biogasgärresten liegen die untersuchten Schwermetalle in niedrigeren Konzentrationen vor als in den Komposten und den Rückständen aus Bioabfall-/Grüngutvergärungsanlagen. Ausnahmen bilden die Elemente Molybdän und Selen: Die Mitvergärungs-Biogasgärreste weisen die höchsten Medianwerte auf. Silber wurde bei keinem Gärprodukt nachgewiesen.

3.3 Organische Schadstoffe

Bei organischen Schadstoffklassen werden die Gehalte als ungewichtete (PAK, Indikator-PCB, PBDE) sowie gewichtete Summenwerte (PCDD/F, dl-PCB) angegeben; die Werte einzelner Komponenten/Kongenere werden in der Regel nicht diskutiert. Bei der Berechnung der Summenwerte bleiben Einzelkomponenten, deren Gehalte unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens liegen, aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den früheren Untersuchungen unberücksichtigt.

Die Ergebnisse der aktuellen Analysen auf die organischen Schadstoffe

- polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK),
- polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F),
- polychlorierte Biphenyle (Indikator- und dl-PCB),
- Biphenyl,
- Hexachlorbenzol (HCB),
- Pentachlorphenol (PCP) und
- ortho-Phenylphenol

sind für Bioabfallkomposte in Tab. 14, S. 28, für Grüngutkomposte in Tab. 15, S. 29, für Vergärungsrückstände in Tab. 16, S. 30, und für Biogasgärreste in Tab. 17, S. 31, dargestellt.

In gleicher Weise enthalten die Tab. 18, S. 37 (Bioabfallkomposte), Tab. 19, S. 38 (Grüngutkomposte), Tab. 20, S. 39 (Vergärungsrückstände), und Tab. 21, S. 40 (Biogasgärreste), die Gehalte an

- Bisphenol A,
- Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP),
- Di-isononyl-phthalat (DINP),
- Iso-Nonylphenol,
- Monobutylzinn,
- Monooktylzinn,
- Galaxolide[®] (HHCB),
- Tonalide[®] (AHTN) und
- Iso-E-Super[®] (OTNE)

sowie die Tab. 22, S. 44 (Bioabfallkomposte), Tab. 23, S. 45 (Grüngutkomposte), Tab. 24, S. 46 (Vergärungsrückstände), Tab. 25, S. 47 (Biogasgärreste), die Gehalte an

- polybromierten Diphenylethern (PBDE),
- Hexabromcyclododecan (HBCD),
- Thiabendazol,
- Perfluorooctansäure (PFOA),
- Perfluorooctansulfonsäure (PFOS),
- Triclosan und
- Methyl-Triclosan (TCLM).

Die Werte für

- Hexabrombenzol,
- Pentabrommethylbenzol,
- Pentabromtoluol,
- Tetrabrom-p-xylol,
- Decabromdiphenylethan (DBDPE) und
- 1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan

sind in Tab. 26, S. 49, für die oben genannten Arten von Stoffströmen dargestellt.

Zum Vergleich werden den aktuellen Daten die Werte der vorangegangenen Untersuchungen [1-4] gegenübergestellt.

In den folgenden Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.18 werden die Ergebnisse der einzelnen Schadstoffe/-klassen erläutert.

3.3.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Fertigkomposte. Die Belastung der Bioabfall- und Grüngutkomposte mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen ist nach wie vor vergleichsweise hoch: die Summengehalte für die 16 analysierten PAK liegen in 16 der 17 Proben im einstelligen mg/kg-Bereich und damit deutlich höher als die Konzentrationen der meisten anderen untersuchten organischen Schadstoffe (in der Regel \leq zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich). Selbst die Gehalte des als PAK-Leitsubstanz geltenden, kanzerogenen Benzo[a]pyrens in den Komposten liegen im bis zu dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich. Mit maximal 4,20 mg/(kg TM) wird der vorgeschlagene Richtwert von 6 mg/(kg TM) für das Ende der Abfalleigenschaft von Komposten und Vergärungsrückständen [8] (siehe Tab. 6) unterschritten. Wie schon bei den vorangegangenen Untersuchungen weisen die Bioabfallkomposte leicht höhere Belastungen auf als die Grüngutkomposte.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der PAK-Konzentrationen (anhand der Mediane), so wurden aktuell die nach der ersten Untersuchung vom Jahr 2000 [2] zweithöchsten Belastungen ermittelt. Ursache hierfür kann der Jahresgang der PAK-Immissionen sein. Erstmals wurden im Winterhalbjahr die Anlagen beprobt (Inputmaterial in die Behandlungsanlagen vom Herbst).

Gärprodukte. Insgesamt unterscheiden sich die PAK-Gehalte der Gärprodukte kaum von denen der Komposte. Die Konzentrationen bei den festen Vergärungsrückständen – der Grüngutvergärungsrückstand ist niedriger belastet als die neun Bioabfallvergärungsrückstände – und NawaRo-Biogasgärresten liegen im Wertebereich der Bioabfallkomposte, die der Mitvergärungs-Biogasgärreste im Bereich der Grüngutkomposte. Lediglich die flüssigen Rückstände aus Bioabfallvergärungsanlagen weisen etwas höhere PAK-Belastungen auf; so stammt die ermittelte maximale PAK-Konzentration mit 6,71 mg/(kg TM) von einem flüssigen Bioabfallvergärungsrückstand. Diese Probe und ein NawaRo-Biogasgärrest überschreiten den vorgeschlagenen Richtwert für das Ende der Abfalleigenschaft [8]. Im Unterschied zu den Komposten war Benzo[a]pyren in keinem der 22 Vergärungsrückstände bestimmbar {Bestimmungsgrenze: 0,06 mg/(kg TM)}.

Eine Aussage zur zeitlichen Entwicklung der Belastung der Gärprodukte lässt sich aufgrund der Datenlage am ehesten für die festen Rückstände aus Vergärungsanlagen machen: Für diese Probenart liegen Daten aus den Jahren 2006 [4], 2009 [1] und 2013/14 vor. Innerhalb dieses Untersuchungszeitraums ist kein zeitlicher Trend der PAK-Belastung zu erkennen; die Konzentrationen der aktuellen Untersuchung bewegen sich in einem ähnlichen Bereich wie im Jahr 2006.

3.3.2 Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)

Die DÜMV [7] gibt Grenzwerte für die Summengehalte PCDD/F + dl-PCB vor, basierend auf dem Toxizitätsäquivalent-Schema der WHO aus dem Jahr 2005 [23]. Die diesbezüglichen Auswertungen werden im Unterabschnitt 3.3.3.2 dargestellt.

Fertigkomposte. Bioabfall- und Grüngutkomposte weisen bei der aktuellen Studie ähnlich geringe PCDD/F-Gehalte auf wie bei der vorangegangenen Untersuchung. Der Median der Grüngutkompostgehalte liegt leicht unter dem der Bioabfallkompostgehalte, dafür streuen die Grüngutkompostwerte stärker. Die Konzentrationen in 15 der 17 untersuchten Kompostproben (ohne die beiden „Extremwerte“ der Grüngutkomposte) bewegen sich in einer für organische Schadstoffe engen Bandbreite zwischen 3 und 7 ng I-TEQ/(kg TM); die ermittelte maximale Konzentration liegt mit 8,09 ng I-TEQ/(kg TM) (Grüngutkompostprobe) deutlich unter den Maximalwerten der vorangegangenen Untersuchungen {Bioabfallkomposte: bis zu 32 ng I-TEQ/(kg TM), Grüngutkomposte: bis zu 15 ng I-TEQ/(kg TM)}.

Bei beiden Kompostarten ist ein deutlicher Rückgang der PCDD/F-Konzentrationen seit dem Jahr 2000 [2] zu verzeichnen: Die aktuellen Medianwerte liegen bei der Hälfte der Belastung im Jahr 2000 (Bioabfallkomposte: –51 %, Grüngutkomposte: –54 %). Bei den Grüngutkomposten wurden die niedrigsten Werte der Zeitreihe wie bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (vergleiche Unterabschnitt 3.3.1) im Jahr 2006 [4] ermittelt.

Gärprodukte. Die festen und flüssigen Rückstände aus Vergärungsanlagen zeigen sowohl hinsichtlich der Höhe der Mediane als auch hinsichtlich der Wertebereiche ähnliche PCDD/F-Konzentrationen wie die Komposte. So liegen die Werte der Bioabfallvergärungsrückstände (13 der 14 untersuchten Vergärungsrückstände) zwischen 2,3 und 7,0 ng I-TEQ/(kg TM); der Grüngutvergärungsrückstand unterschreitet mit 0,6 ng I-TEQ/(kg TM) diesen Bereich deutlich. Um eine Größenordnung geringer ist die Belastung der Biogasgärreste: Die Gehalte in den Gärresten der NawaRo-Anlagen {Wertebereich ohne Maximalwert: 0,07 bis 0,12 ng I-TEQ/(kg TM)} liegen circa um den Faktor 50, die der Mitvergärungsanlagen um den Faktor 12 unter den Konzentrationen in den Komposten und Rückständen aus (Bioabfall-)Vergärungsanlagen.

Auch bei den festen Rückständen aus Vergärungsanlagen sind die PCDD/F-Gehalte rückläufig. Gegenüber der Belastung im Jahr 2006 [4] haben sich die Konzentrationen (Median) um 38 % verringert.

3.3.3 Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und dl-PCB)

Von der Schadstoffgruppe der polychlorierten Biphenyle wurden sowohl die sechs Indikator-PCB als auch die zwölf coplanaren dioxinähnlichen (dl-)PCB untersucht (vergleiche Tab. 3 und Tab. 4).

3.3.3.1 Indikator-PCB

Fertigkomposte. Die Bioabfallkomposte weisen geringfügig höhere Gehalte an Indikator-PCB auf als die Grüngutkomposte. Die ermittelten Konzentrationen liegen in für organische Schadstoffgehalte vergleichsweise engen Wertebereichen von 7 bis 29 µg/(kg TM) (Bioabfallkomposte) und 6 bis 19 µg/(kg TM) {Grüngutkomposte; Ausreißer: 28 µg/(kg TM)}.

Die Belastungen an Indikator-PCB sanken seit der Untersuchung im Jahr 2000 [2] bei beiden Kompostarten. Die Medianwerte liegen wie bei den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] in einem schmalen Korridor. Der Konzentrationsrückgang ist bei den Bioabfallkomposten (Mediane: –56 % gegenüber dem Jahr 2000) stärker ausgeprägt als bei den Grüngutkomposten (–48 %), so dass sich die Indikator-PCB-Gehalte der beiden Kompostarten immer mehr angleichen.

Gärprodukte. Bezüglich der Indikator-PCB-Belastung der Gärprodukte liegt wie bei den PCDD/F ein deutlicher Unterschied zwischen den Rückständen aus Vergärungsanlagen und denen aus Biogasanlagen vor: Die festen und flüssigen Vergärungsrückstände zeigen ähnliche, geringfügig niedrigere Gehalte wie die Grüngutkomposte, während die Biogasgärreste durchschnittlich um bis zu eine Größenordnung geringere Gehalte aufweisen. Die NawaRo-Gärreste sind um den Faktor 14, die Mitvergärungs-Gärreste um den Faktor 3 geringer mit Indikator-PCB belastet als die (festen) Vergärungsrückstände. Bei den festen Vergärungsrückständen ist der Grüngutvergärungsrückstand mit 1,84 µg/(kg TM) deutlich niedriger belastet als die neun Bioabfallvergärungsrückstände {7,56 bis 40,4 µg/(kg TM)}.

Der Vergleich der Medianwerte mit den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] ergibt für die festen Vergärungsrückstände einen Rückgang der Belastung mit Indikator-PCB um 49 % gegenüber dem Jahr 2006.

3.3.3.2 Dioxinähnliche (dl-)PCB

Zum Vergleich mit früheren Untersuchungen [1, 3, 4] werden die Gehalte an dl-PCB (gewichteter Summengehalt der zwölf dl-PCB-Kongenere) in der Einheit „Gramm WHO-Toxizitätsäquivalente (1998)“ mit den Toxizitätsäquivalenzfaktoren aus dem Jahr 1998 {WHO-TEQ (1998)} [24] angegeben. Die Summengehalte PCDD/F + dl-PCB (gewichteter Summengehalt der 17 PCDD/F- und 12 dl-PCB-Kongenere) werden in „Gramm WHO-Toxizitätsäquivalente (2005)“ {WHO-TEQ (2005)} [23] dargestellt, um sie mit den Grenzwerten der DöMV [7] vergleichen zu können. Der Unterschied zwischen den beiden Toxizitätsäquivalentberechnungen von 1998 und 2005 liegt in der unterschiedlichen Gewichtung einiger Kongenere bei der Summenbildung.

Fertigkomposte. Wie bei den PCDD/F unterscheiden sich die Bioabfall- und Grüngutkomposte hinsichtlich ihrer Belastung mit dioxinähnlichen PCB kaum. Die Konzentrationen liegen in einem relativ engen Bereich von 0,9 bis 3,1 ng WHO-TEQ/(kg TM).

Daten zu dioxinähnlichen PCB in bayerischen Komposten werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (BayLfU) seit der Untersuchung im Jahr 2002 [3] erhoben. Die Gehalte sind für die Grüngutkomposte tendenziell leicht rückläufig (–30 % gegenüber dem Jahr 2002); für die Bioabfallkomposte ergibt sich im betrachteten Zeitraum keine nennenswerte Veränderung.

Die DüMV [7] gibt Grenzwerte für den Summengehalt PCDD/F + dl-PCB, angegeben in WHO-TEQ (2005) [23], vor (siehe Tab. 6). Die entsprechenden Summengenhalte der Bioabfallkomposte (Werte in den Tabellen nicht dargestellt) liegen bei maximal 7,9 ng WHO-TEQ/(kg TM) und schöpfen zu 26 % den Grenzwert {30 ng WHO-TEQ/(kg TM) [7]} aus. Die Belastung der Grüngutkomposte erreicht maximal 7,3 ng WHO-TEQ/(kg TM) entsprechend 24 % des Grenzwerts. Sämtliche 17 Kompostproben unterschreiten auch den niedrigeren Grenzwert für die Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung {8 ng WHO-TEQ/(kg TM) [7]}.

Gärprodukte. Die Verhältnisse bei der Belastung der Gärprodukte mit dl-PCB liegen ähnlich wie bei den PCDD/F und Indikator-PCB. Die Konzentrationen in den festen (hier: Grüngutvergärungsrückstand geringer belastet als Bioabfallvergärungsrückstände) und flüssigen Rückständen aus Vergärungsanlagen sind vergleichbar mit denen in den (Grüngut-)Komposten, während die Gärreste aus Biogasanlagen um eine Größenordnung niedriger belastet sind. Insbesondere die NawaRo-Gärreste weisen geringe dl-PCB-Gehalte auf (Faktor 25 unter den Medianwerten der Komposte), daneben bleiben auch die Mitvergärungs-Gärreste deutlich unter den Kompostgehalten (Faktor 6).

Ein Vergleich der Mediane der Untersuchungen seit dem Jahr 2006 [4] belegt wie bei den Indikator-PCB einen Rückgang der Belastung fester Vergärungsrückstände mit dl-PCB um 46 % gegenüber dem Jahr 2006.

Die Summengenhalte PCDD/F + dl-PCB liegen für die festen Vergärungsrückstände bei maximal 7,2 ng WHO-TEQ/(kg TM) (24 % des höheren Grenzwerts der DüMV [7]) und für die flüssigen Vergärungsrückstände bei maximal 8,3 ng WHO-TEQ/(kg TM) (28 % des höheren Grenzwerts). Der niedrigere Grenzwert von 8 ng WHO-TEQ/(kg TM) [7] wird von sämtlichen festen Vergärungsrückständen eingehalten, bei den flüssigen Vergärungsrückständen liegt eine Probe über dem Wert. Der Grüngutvergärungsrückstand, deutlich geringer belastet als die neun (festen) Bioabfallvergärungsrückstände, liegt mit 0,77 ng WHO-TEQ/(kg TM) im Wertebereich der NawaRo-Gärreste. Die niedrigen Belastungen der Biogasgärreste spiegeln sich auch in niedrigen Summengenhalten PCDD/F + dl-PCB wider: Die maximalen Werte betragen 1,4 ng WHO-TEQ/(kg TM) für die NawaRo-Gärreste³ und 0,7 ng WHO-TEQ/(kg TM) (2 % des höheren Grenzwerts) für die Mitvergärungs-Gärreste. Nimmt man den niedrigeren Grenzwert von 8 ng WHO-TEQ/(kg TM) [7] als Bewertungsmaßstab, unterschreiten alle acht Biogasgärreste den Wert deutlich.

3.3.4 Biphenyl

Biphenyl dient als Zitrusfruchtfungizid und Formulierungshilfsstoff für Pflanzenschutzmittel.

Die am BayLfU nicht etablierte Biphenyl-Analytik wurde entsprechend den haushaltsrechtlichen Bestimmungen stets an akkreditierte Analysenlabors vergeben. Sie ist im Jahr 2000 von einem anderen Labor als bei der aktuellen sowie den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] durchgeführt worden (vergleiche Tab. 3).

Fertigkomposte. Bei der aktuellen Untersuchung war in keiner der 17 Kompostproben Biphenyl zu finden. Alle Gehalte liegen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM).

Die Biphenyl-Gehalte in den Komposten waren wie bei den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] bis auf wenige Ausnahmen (zwei Bioabfallkomposte der Untersuchung 2006 [4]) unter 10 µg/(kg TM). Im Vergleich erscheinen die hohen Gehalte (zwei- bis dreistelliger µg/kg-Bereich) in

³ Die Grenzwerte für die Summe PCDD/F + dl-PCB der DüMV [7] gelten nicht für Gärreste ohne Bioabfallanteil (NawaRo-Gärreste).

den Kompostproben der Untersuchung aus dem Jahr 2000 [2] als wenig belastbar. Ob die unterschiedlichen Konzentrationsniveaus darin begründet sind, dass die Biphenyl-Analytik des Jahres 2000 von einem anderen Labor als bei der aktuellen sowie den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] durchgeführt worden ist (vergleiche Tab. 3), bleibt offen.

Gärprodukte. Während bei den festen Rückständen der Vergärungsanlagen vier von zehn und bei den flüssigen Rückständen zwei von vier Proben Gehalte über der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens aufweisen, ist es bei den Biogasanlagenrückständen lediglich eine von acht Proben (ein Mitvergärungs-Gärrest). Dementsprechend ergibt sich für die NawaRo-Gärreste ein mit den Komposten vergleichbares Konzentrationsniveau. Für die weiteren Vergärungsrückstände sind tendenziell höhere Gehalte in der Reihenfolge Mitvergärungs-Gärreste < flüssige Rückstände der Bioabfallvergärungsanlagen < feste Rückstände der Vergärungsanlagen festzustellen.

Wie bei den Untersuchungen der Jahre 2006 [4] und 2009 [1] zeigten die festen Vergärungsrückstände bei der Mehrzahl der Proben Gehalte unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens. Die maximale Konzentration liegt bei der aktuellen Untersuchung mit 86 µg/(kg TM) deutlich höher als bei den vorangegangenen.

3.3.5 Hexachlorbenzol (HCB)

Hexachlorbenzol (HCB) ist ein Ausgangsprodukt für die Herstellung chlororganischer Verbindungen, ein Pestizid sowie ein Nebenprodukt bei Verbrennungs- und metallurgischen Prozessen. Als langlebiger organischer Schadstoff wurde es in das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe [25] aufgenommen.

Fertigkomposte. Im Unterschied zu den vorangegangenen wurden bei der aktuellen Untersuchung in den Bioabfallkomposten (geringfügig) niedrigere Gehalte an HCB ermittelt als in den Grüngutkomposten. Die Konzentrationen bleiben bei beiden Kompostarten unter 2 µg/(kg TM).

Damit sind die aktuellen Werte bei beiden Kompostarten die niedrigsten in der vorliegenden Zeitreihe. Die Gehalte liegen bei den Bioabfallkomposten deutlicher (-74 %) als bei den Grüngutkomposten (-41 %) unter den Werten der Untersuchung im Jahr 2000 [2].

Gärprodukte. Die HCB-Konzentrationen in den festen und flüssigen Rückständen der Vergärungsanlagen und in den Mitvergärungs-Gärresten bleiben wie bei den Komposten im unteren einstelligen µg/kg-Bereich; sie sind insgesamt vergleichbar mit den Bioabfallkomposten (flüssige Bioabfallvergärungsrückstände) oder etwas niedriger (feste Vergärungsrückstände, Mitvergärungs-Gärreste). Bei den festen Vergärungsrückständen ist der Grüngutvergärungsrückstand geringer belastet als die neun Bioabfallvergärungsrückstände. Wie bei der Untersuchung im Jahr 2006 [4] zeigen die NawaRo-Gärreste (um den Faktor 3 niedriger belastet als die Grüngutkomposte) die niedrigsten HCB-Gehalte.

Auch bei den festen Vergärungsrückständen sind die aktuellen Werte die niedrigsten der bisherigen Untersuchungen: Sie liegen 60 % unter den Werten der Untersuchung im Jahr 2006 [4].

3.3.6 Pentachlorphenol (PCP)

Pentachlorphenol (PCP) ist ein fungizides und bakterizides Holzschutzmittel und im Stockholmer Übereinkommen [26] gelistet.

Die PCP-Analytik musste bei der aktuellen Untersuchung aus Kapazitätsgründen vergeben werden (vergleiche Tab. 3). Das hatte zur Konsequenz, dass die PCPs mit einer höheren Bestimmungsgrenze als bei den vorangegangenen Untersuchungen analysiert wurden.

Fertigkomposte. Im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen liegen die Gehalte an Pentachlorphenol in allen Proben unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM).

Aus der Tatsache, dass in keiner Kompostprobe ein PCP-Gehalt über der Bestimmungsgrenze war, resultiert ein Konzentrationsrückgang sowohl für die Bioabfall- als auch Grüngutkomposte.

Gärprodukte. Auch bei den Gärprodukten ergeben sich andere PCP-Werte als bei den bisherigen Untersuchungen: Die festen Vergärungsrückstände zeigen Gehalte wie die Komposte {alle Proben unter der Bestimmungsgrenze von 10 µg/(kg TM)}; die vier flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände liegen zur Hälfte unter der Bestimmungsgrenze, zur Hälfte bei etwas über 20 µg/(kg TM). Die höchsten Belastungen weisen die NawaRo-Gärreste auf: vier der fünf Proben haben PCP-Gehalte bis 73 µg/(kg TM), ein Gärrest (Ausreißer) ist mit 342 µg/(kg TM) belastet. Dagegen liegen die Gehalte in den drei Mitvergärungs-Gärresten unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens.

Wie bei den Komposten ist auch bei den festen Vergärungsrückständen ein Rückgang der PCP-Konzentration festzustellen.

3.3.7 Ortho-Phenylphenol

Ortho-Phenylphenol ist ein Fungizid und wird unter anderem zur Konservierung von Zitrusfrüchten eingesetzt.

Fertigkomposte. Ortho-Phenylphenol konnte lediglich in einer Bioabfallkompostprobe bestimmt werden; in 16 (der 17) Kompostproben liegen die Gehalte unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM).

Die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen ähnelt der des Biphenyls (vergleiche Abschnitt 3.3.4): Während bei der Untersuchung im Jahr 2000 [2] die Gehalte im zwei- bis maximal dreistelligen µg/kg-Bereich lagen (gegenüber Biphenyl deutlich geringeres Konzentrationsniveau), befanden sich bei den Folgeuntersuchungen [1, 4] nahezu alle Werte unter der Bestimmungsgrenze.

Hinsichtlich der Aussagekraft der Daten wird auf die im Abschnitt 3.3.4 gemachten Aussagen verwiesen.

Gärprodukte. Während die neun festen und vier flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände ortho-Phenylphenol-Gehalte bis zu 150 µg/(kg TM) aufweisen, liegen der feste Grüngutvergärungsrückstand und alle fünf untersuchten NawaRo-Gärreste unter der Bestimmungsgrenze. Die höchste Belastung zeigen die Mitvergärungs-Gärreste mit Gehalten bis zu 560 µg/(kg TM). Dementsprechend steigen die Konzentrationsniveaus in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste und flüssige (Bioabfall-)Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste an.

Der Vergleich der Medianwerte ergibt für die festen Vergärungsrückstände einen deutlichen Anstieg der Gehalte gegenüber den Untersuchungen in den Jahren 2006 [4] und 2009 [1], wobei sich der ermittelte Maximalwert nahezu halbiert hat.

Tab. 14: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Bioabfallkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Bioabfallkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	7	11	12	2×11 ¹⁾	15
Summe PAK [mg/(kg TM)]					
Minimum	0,85	0,98	0,79	1,12	1,41
Median	2,53	2,03	2,31	2,05	3,18
Mittelwert	2,44	2,10	2,69	2,50	3,86
Maximum	4,20	3,58	7,73	5,83	10,20
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,03</i>	<i>0,88</i>	<i>1,95</i>	<i>1,15</i>	<i>2,20</i>
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	3,68	4,62	3,33	4,36	8,63
Median	5,55	5,50	6,47	7,95	11,30
Mittelwert	5,41	6,26	8,63	9,19	12,46
Maximum	6,90	8,96	32,40	26,07	29,70
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,26</i>	<i>1,61</i>	<i>8,18</i>	<i>4,61</i>	<i>5,40</i>
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	7,0	10,0	7,4	9,9	15,0
Median	18,7	17,4	22,2	32,2	43,0
Mittelwert	17,5	19,8	21,1	34,7	64,7
Maximum	29,1	64,9	38,3	73,5	196,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>8,4</i>	<i>15,5</i>	<i>9,0</i>	<i>17,3</i>	<i>54,0</i>
Summe dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	0,92	1,04	0,39	0,95 ²⁾	–
Median	2,45	2,05	2,37	2,61²⁾	–
Mittelwert	2,04	2,15	2,52	2,87 ²⁾	–
Maximum	3,09	5,25	4,46	5,78 ²⁾	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,79</i>	<i>1,14</i>	<i>1,40</i>	<i>1,34²⁾</i>	–
Biphenyl [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	31
Median	< 10	< 10	< 10	–	79
Mittelwert	< 10	< 10	n. b.	–	82
Maximum	< 10	< 10	17	–	144
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>37</i>
HCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,59	0,8	0,1	–	< 1,0
Median	1,06	2,6	1,9	–	4,0
Mittelwert	1,13	4,4	2,3	–	n. b.
Maximum	1,71	8,6	7,2	–	13,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,41</i>	<i>3,1</i>	<i>1,9</i>	–	<i>n. b.</i>
PCP [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 5	< 5	–	4
Median	< 10	49	15	–	9
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	–	14
Maximum	< 10	540	37	–	41
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>11</i>
Ortho-Phenylphenol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	10
Median	< 10	< 10	< 10	–	30
Mittelwert	n. b.	< 10	n. b.	–	38
Maximum	37	< 10	21	–	120
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>28</i>

¹⁾ Sommer- und Winterbeprobung von 11 Bioabfallkompostieranlagen

²⁾ 11 analysierte Proben (Sommerbeprobung)

Tab. 15: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Grüngutkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Grüngutkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	10	11	12	2×11 ¹⁾	5
Summe PAK [mg/(kg TM)]					
Minimum	1,76	0,51	0,40	1,02	1,69
Median	1,93	1,62	1,23	1,84	2,32
Mittelwert	2,09	1,65	1,22	2,20	2,32
Maximum	3,11	2,88	2,19	5,90	2,95
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,43</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	1,51	3,28	1,22	5,05	3,70
Median	4,38	5,48	3,78	9,24	9,61
Mittelwert	4,49	5,22	4,11	9,09	8,84
Maximum	8,09	7,47	6,99	14,73	12,60
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,74</i>	<i>1,32</i>	<i>1,95</i>	<i>2,90</i>	<i>3,42</i>
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	6,3	9,0	4,8	16,5	19,0
Median	15,0	14,2	17,2	27,0	29,0
Mittelwert	15,5	28,6	23,1	41,0	31,8
Maximum	27,5	148,9	70,1	178,9	56,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>5,9</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	1,11	1,08	0,61	2,15 ²⁾	–
Median	2,00	2,17	2,17	2,87²⁾	–
Mittelwert	2,03	3,75	2,30	4,22 ²⁾	–
Maximum	3,12	19,11	4,54	14,17 ²⁾	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,64</i>	<i>5,18</i>	<i>1,29</i>	<i>3,52²⁾</i>	–
Biphenyl [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	24
Median	< 10	< 10	< 10	–	45
Mittelwert	< 10	< 10	< 10	–	52
Maximum	< 10	< 10	< 10	–	93
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>29</i>
HCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,76	0,9	0,7	–	2,0
Median	1,19	1,7	1,4	–	2,0
Mittelwert	1,19	1,7	1,5	–	3,0
Maximum	1,59	2,9	2,7	–	6,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,31</i>	<i>0,7</i>	<i>0,6</i>	–	<i>1,7</i>
PCP [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 5	< 5	–	1
Median	< 10	< 5	< 5	–	6
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	–	5
Maximum	< 10	150	25	–	9
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>3</i>
Ortho-Phenylphenol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	20
Median	< 10	< 10	< 10	–	20
Mittelwert	< 10	< 10	< 10	–	28
Maximum	< 10	< 10	< 10	–	40
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	<i>11</i>

¹⁾ Sommer- und Winterbeprobung von 11 Grüngutkompostieranlagen

²⁾ 11 analysierte Proben (Sommerbeprobung)

Tab. 16: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Vergärungsrückständen im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1, 4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart	Vergärungsrückstand				
	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall		Bioabfall	
Herkunft	fest	fest		flüssig	
Konsistenz	fest	fest		flüssig	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	10 ¹⁾	6	5	4	2
Summe PAK [mg/(kg TM)]					
Minimum	1,40	1,01	0,34	1,88	2,35
Median	2,49	1,97	2,68	3,14	n. b.
Mittelwert	2,66	2,10	2,46	3,72	n. b.
Maximum	4,43	3,43	3,89	6,71	2,50
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,06</i>	<i>0,90</i>	<i>1,30</i>	<i>2,28</i>	<i>n. b.</i>
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	0,60	3,63	4,82	4,04	4,43
Median	3,74	6,52	6,00	6,08	n. b.
Mittelwert	3,67	6,33	6,61	5,81	n. b.
Maximum	5,74	8,86	10,60	7,02	7,19
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,43</i>	<i>1,87</i>	<i>2,32</i>	<i>1,38</i>	<i>n. b.</i>
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	1,8	13,1	4,6	12,5	17,8
Median	13,1	18,8	25,6	13,3	n. b.
Mittelwert	14,3	22,5	31,3	14,8	n. b.
Maximum	40,4	39,1	66,5	20,0	23,3
<i>Standardabweichung</i>	<i>10,4</i>	<i>9,7</i>	<i>22,9</i>	<i>3,5</i>	<i>n. b.</i>
Summe dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]					
Minimum	0,27	1,47	0,54	1,66	2,04
Median	1,52	2,18	2,82	1,72	n. b.
Mittelwert	1,55	2,74	3,29	1,97	n. b.
Maximum	2,55	4,83	5,65	2,79	2,70
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,73</i>	<i>1,33</i>	<i>2,00</i>	<i>0,55</i>	<i>n. b.</i>
Biphenyl [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	< 10	29
Median	< 10	< 10	< 10	16	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	86	16	11	28	61
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
HCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,41	1,0	0,6	0,60	1,7
Median	0,76	4,2	1,9	1,03	n. b.
Mittelwert	0,99	4,7	2,3	1,23	n. b.
Maximum	2,19	8,8	5,2	2,27	4,8
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,57</i>	<i>3,2</i>	<i>1,8</i>	<i>0,73</i>	<i>n. b.</i>
PCP [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 5	< 5	< 10	< 5
Median	< 10	26	15	16	n. b.
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	< 10	52	29	24	95
<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	< 10	48	92
Median	83	< 10	11	84	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	89	n. b.
Maximum	150	269	293	140	440
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>40</i>	<i>n. b.</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

Tab. 17: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, dl-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Biogasgärresten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz Herkunft	Biogasgärrest, flüssig			
	NawaRo		Mitvergärung	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	5	4	3	4
Summe PAK [mg/(kg TM)]				
Minimum	0,81	0,63	1,34	0,67
Median	2,52	1,21	1,77	1,70
Mittelwert	2,96	1,22	2,60	1,59
Maximum	6,18	1,83	4,69	2,29
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,98</i>	<i>0,52</i>	<i>1,82</i>	<i>0,79</i>
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TM)]				
Minimum	0,07	0,09	0,14	0,31
Median	0,10	0,19	0,41	0,60
Mittelwert	0,30	0,18	0,32	3,04
Maximum	1,14	0,24	0,42	10,65
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,47</i>	<i>0,06</i>	<i>0,16</i>	<i>5,08</i>
Summe Indikator-PCB [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	0,85	0,59	1,76	1,48
Median	0,97	0,86	4,00	4,48
Mittelwert	1,62	0,90	3,77	6,40
Maximum	3,19	1,27	5,55	15,16
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,03</i>	<i>0,29</i>	<i>1,90</i>	<i>6,02</i>
Summe dl-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TM)]				
Minimum	0,02	0,06	0,15	0,10
Median	0,09	0,09	0,38	0,33
Mittelwert	0,14	0,09	0,30	0,75
Maximum	0,41	0,11	0,38	2,25
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,16</i>	<i>0,02</i>	<i>0,13</i>	<i>1,01</i>
Biphenyl [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 10	< 10	< 10	25
Median	< 10	69	< 10	32
Mittelwert	< 10	n. b.	n. b.	41
Maximum	< 10	97	16	75
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>23</i>
HCB [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	0,23	0,11	0,59	0,37
Median	0,39	0,21	0,69	0,54
Mittelwert	0,40	0,20	1,36	1,30
Maximum	0,64	0,29	2,79	3,74
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,15</i>	<i>0,09</i>	<i>1,24</i>	<i>1,63</i>
PCP [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 10	< 5	< 10	< 5
Median	56	< 5	< 10	< 5
Mittelwert	n. b.	< 5	< 10	n. b.
Maximum	342	< 5	< 10	32
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Ortho-Phenylphenol [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 10	19	54	< 10
Median	< 10	64	210	49
Mittelwert	< 10	120	275	n. b.
Maximum	< 10	332	560	123
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>143</i>	<i>259</i>	<i>n. b.</i>

3.3.8 Bisphenol A

Das endokrin wirksame Bisphenol A ist als Ausgangsprodukt für die Kunststoffherstellung ein Grundstoff der chemischen Industrie.

Fertigkomposte. Bisphenol A tritt in den untersuchten Kompostproben sowohl in Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens {10 µg/(kg TM)} als auch im zweistelligen µg/kg-Bereich auf; zwei Proben (ein Bioabfall-, ein Grüngutkompost) weisen Gehalte im unteren dreistelligen µg/kg-Bereich auf. Insgesamt sind die Bioabfallkomposte höher belastet als die Grüngutkomposte, wenn auch der höchste Kompostgehalt (Ausreißer) bei einem Grüngutkompost ermittelt wurde.

Bisphenol A gehörte im Jahr 2000 [2] noch nicht zum Untersuchungsumfang (siehe Tab. 3). Das heißt, die Zeitreihe beginnt erst ab dem Jahr 2002 [3]. Die aktuelle Untersuchung ergibt für die Bioabfallkomposte bislang die niedrigsten Werte (Median, Maximalwert, Bandbreite). Demgegenüber zeigen die Grüngutkomposte keine Abnahme der (insgesamt geringeren) Belastung; der aktuelle Maximalwert ist der höchste Grüngutkompostgehalt der bisherigen Untersuchungen.

Gärprodukte. Mit Ausnahme des festen Grüngutvergärungsrückstands und der NawaRo-Gärreste enthalten die Gärprodukte deutlich (mindestens Faktor 10) mehr Bisphenol A als die Komposte. Insbesondere die festen, aber auch die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände zeigen vergleichsweise hohe Gehalte im dreistelligen µg/kg- bis einstelligen mg/kg-Bereich (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand). Der Grüngutvergärungsrückstand und drei (von fünf) NawaRo-Gärreste liegen unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM), die anderen beiden NawaRo-Gärreste über dem höchsten Kompostgehalt.

Die zeitliche Entwicklung der Bisphenol A-Gehalte in den festen Vergärungsrückständen zeigt einen Rückgang der Belastung von der Untersuchung 2006 [4] auf die Untersuchung 2009 [1] und seither unveränderte Werte; dies betrifft gleichermaßen die Medianwerte und die Maximalgehalte.

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

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

Die endokrin wirksame Substanz DEHP gehört mit zu den am häufigsten verwendeten Weichmachern für Kunststoffe (zum Beispiel Einsatz in Weich-PVC).

Fertigkomposte. Der weit verbreitete Einsatz von DEHP spiegelt sich in hohen Kompostkonzentrationen wider. In den Bioabfallkomposten liegen die DEHP-Gehalte mit Ausnahme der Extremwerte {0,6 und 9,3 mg/(kg TM); jeweils Ausreißer} zwischen 2,1 und 3,5 mg/(kg TM). In den Grüngutkomposten sind die Konzentrationen etwas niedriger als in den Bioabfallkomposten und streuen in einem Wertebereich von 0,6 bis 3,7 mg/(kg TM).

Durch die Vergabe der Analytik ist ein Ergebnisvergleich mitunter schwierig (zum Beispiel unterschiedliche Bestimmungsverfahren, -grenzen). Im Jahr 2000 führte die DEHP-Analytik ein anderes akkreditiertes Labor als in den Jahren 2002 und 2006 durch, während seit dem Jahr 2009 die Untersuchungen am BayLfU stattfanden, vergleiche Tab. 3. Die Daten zeigen bei beiden Kompostarten sowohl hinsichtlich Medianwerten als auch Wertebereichen ein übereinstimmendes Bild: hohe Werte im Jahr 2000 [2], deutlich (bis zu eine Größenordnung) niedrigere Werte in den Jahren 2002 [3] und 2006 [4], hohe Werte in den Jahren 2009 [1] und 2013/14 (vergleichbar mit dem Jahr 2000).

Gärprodukte. Die Gärprodukte weisen höhere DEHP-Konzentrationen auf als die Komposte: Die beiden höchsten Werte der aktuellen Untersuchung wurden mit 16,2 und 23,6 mg/(kg TM) (Ausreißer) in festen Bioabfallvergärungsrückständen ermittelt. Es folgen – ebenfalls im zweistelligen mg/kg-Bereich

– zwei (von vier) flüssige Bioabfallvergärungsrückstände und zwei (von drei) Mitvergärungs-Gärreste. Insgesamt ergibt sich für die Mitvergärungs-Gärreste das höchste Konzentrationsniveau, gefolgt von den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen und den NawaRo-Gärresten. Die festen Vergärungsrückstände zeigen die niedrigsten Konzentrationen, jedoch deutlich höhere als die Bioabfallkomposte.

Für die zeitliche Entwicklung der DEHP-Gehalte in den festen Vergärungsrückständen gilt das Gleiche wie für die Komposte: deutlich {bis zu eine Größenordnung (Minimum)} niedrigere Werte im Jahr 2006 [4], hohe Werte in den Jahren 2009 [1] und 2013/14.

3.3.9.2 Di-isononyl-phthalat (DINP)

DINP ist ein Ersatzprodukt für DEHP und damit ein immer häufiger verwendeter Weichmacher (zum Beispiel Einsatz in Weich-PVC), dessen toxikologische Eigenschaften nicht abschließend geklärt sind.

Fertigkomposte. Bedingt durch die Lage der DINP-Konzentrationen in den Proben in Relation zur Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens {0,5 mg/(kg TM)} sind bei den Bioabfallkomposten drei von sieben, bei den Grüngutkomposten neun von zehn Proben unter der Bestimmungsgrenze. Wie beim DEHP zeigen die Bioabfallkomposte etwas höhere Gehalte als die Grüngutkomposte; die Maximalwerte wurden zu 1,7 (Bioabfallkomposte) sowie 1,6 mg/(kg TM) (Grüngutkomposte; Ausreißer) ermittelt.

Die Daten der DINP-Konzentrationszeitreihe seit dem Jahr 2006 stammen von zwei Analysenlabors (vergleiche Tab. 3). Die Werte im Jahr 2006 [4] sind bei beiden Kompostarten deutlich niedriger als in den Jahren 2009 [1] und 2013/14, die zeitliche Entwicklung der DINP-Gehalte in den Komposten ist wie beim DEHP schwer einzuschätzen.

Gärprodukte. Von den Gärprodukten haben lediglich die NawaRo-Gärreste dem (Grüngut-)Kompost vergleichbar geringe Konzentrationen: Keine der fünf Proben liegt oberhalb der Bestimmungsgrenze {0,5 mg/(kg TM)}. Bei den weiteren Gärprodukten unterschreiten zwei (ein fester Grüngut-, ein fester Bioabfallvergärungsrückstand) von 17 Proben die Bestimmungsgrenze. Die Maximalwerte erreichen 15,0 mg/(kg TM) (Mitvergärungs-Gärrest, Ausreißer) sowie 10,0 mg/(kg TM) (flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand) und sind damit etwas unter den maximalen DEHP-Gehalten. Insgesamt ergeben sich in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < Mitvergärungs-Gärreste, feste Vergärungsrückstände < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände ansteigende Konzentrationsniveaus.

Beim Vergleich der letzten drei DINP-Untersuchungen der festen Vergärungsrückstände liegen die gleichen Verhältnisse wie bei den Komposten vor; es gelten die für die Komposte getroffenen Aussagen.

3.3.10 Iso-Nonylphenol

Die endokrin wirksame Substanz iso-Nonylphenol ist ein Ausgangsprodukt für die Kunststoff- und Tensidherstellung sowie ein Tensidabbauprodukt.

Fertigkomposte. Während bei den untersuchten Bioabfallkomposten vier von sieben Proben unter der Bestimmungsgrenze {100 µg/(kg TM)} für iso-Nonylphenol liegen, sind es bei den Grüngutkomposten neun von zehn Proben. Dementsprechend weisen die Bioabfallkomposte insgesamt geringfügig höhere Gehalte als die Grüngutkomposte auf. Die Konzentrationen in den Bioabfallkomposten nehmen Werte bis zu 160 µg/(kg TM) an, die (einzige) Grüngutkompostprobe über der Bestimmungsgrenze liegt bei 130 µg/(kg TM).

Kompostwerte bezüglich iso-Nonylphenol sind erst ab der Probenahme im Jahr 2002 [3] verfügbar; bei dieser Untersuchung (2002) wurden in beiden Kompostarten die höchsten Konzentrationen ermittelt. Bei der aktuellen Untersuchung liegen die Wertebereiche bei den Bioabfallkomposten am niedrig-

sten, bei den Grüngutkomposten am zweitniedrigsten, so dass sich für beide Kompostarten ein rückläufiger Trend ergibt.

Gärprodukte. Die Gärprodukte sind stärker mit iso-Nonylphenol belastet als die Komposte. Lediglich zwei Proben (ein fester Grüngutvergärungsrückstand, ein NawaRo-Gärrest) liegen in ihren Gehalten unter der Bestimmungsgrenze von 100 µg/(kg TM). Bei den festen Vergärungsrückständen zeigt der Grüngutvergärungsrückstand eine niedrigere Konzentration als die neun Bioabfallvergärungsrückstände. Die Belastungen steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände {maximaler Gehalt bei 1.100 µg/(kg TM)} an.

Wie bei den Komposten sind auch die iso-Nonylphenol-Gehalte in den festen Vergärungsrückständen seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4] rückläufig.

3.3.11 Zinnorganische Verbindungen

Zinnorganische Verbindungen sind endokrin wirksame Substanzen und werden als Biozide eingesetzt. Entsprechend der letzten Untersuchung [1] wurden die Grüngutkompostproben (und der Grüngutvergärungsrückstand) nicht auf zinnorganische Verbindungen analysiert (vergleiche Tab. 3). Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungsergebnisse [3, 4] wurde davon ausgegangen, dass diese Schadstoffe in den Grüngutkomposten nach wie vor von untergeordneter Bedeutung sind. Entsprechend dem Analysengang liegt die Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens für alle zinnorganischen Verbindungen bei 1 µg Sn/(kg TM).

3.3.11.1 Monobutylzinn

(Bioabfall-)Fertigkomposte. Von den insgesamt acht analysierten zinnorganischen Verbindungen wurden in den Bioabfallkomposten Monobutylzinn, Mono- und Dioktylzinn gefunden, davon Monobutylzinn am häufigsten. Die Gehalte liegen in fünf (von sieben) Proben über der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens, der maximale Wert bei 13 µg Sn/(kg TM).

Die Zeitreihe der Monobutylzinn-Gehalte in den Bioabfallkomposten seit dem Jahr 2002 – jeweils vom selben Labor durchgeführt – lässt keinen Trend erkennen. Die Konzentrationen bewegen sich mit Ausnahme des aktuellen Maximalwerts bei allen Untersuchungen im bis zu einstelligen µg/kg-Bereich.

Gärprodukte. Die NawaRo-Gärreste sind mit vier (von fünf) Proben unter der Bestimmungsgrenze geringer mit Monobutylzinn belastet als die Bioabfallkomposte. In den anderen Gärprodukten wurde in allen Proben Monobutylzinn bestimmt, teilweise in höheren Konzentrationen {bis zu 24 µg Sn/(kg TM) (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand)}. Die Gärprodukte verzeichnen in der Reihenfolge NawaRo < Mitvergärungs-Gärreste < flüssige < feste Bioabfallvergärungsrückstände ansteigende Gehalte.

Ein Vergleich der letzten drei Untersuchungen ergibt für die festen Bioabfallvergärungsrückstände die höchste Belastung (Medianwert, Wertebereich, Maximalwert) bei der aktuellen Untersuchung.

3.3.11.2 Monooktylzinn

(Bioabfall-)Fertigkomposte. Monooktylzinn tritt in den Bioabfallkompostproben auf, die auch Monobutylzinn in Gehalten über der Bestimmungsgrenze enthalten. Es liegt in etwas höheren Konzentrationen als die Butylverbindung vor. Drei (von sieben) Bioabfallkompostproben weisen Monooktylzinn-Gehalte unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens, drei Proben Konzentrationen zwischen 15 und 20 µg Sn/(kg TM) auf.

Für Monooktylzinn ergibt die aktuelle Untersuchung die höchste Belastung für Bioabfallkomposte seit der Untersuchung im Jahr 2002 [3]. Zum ersten Mal liegen mehr als die Hälfte der untersuchten Pro-

ben (und damit auch der Medianwert) über der Bestimmungsgrenze, einige Werte im zweistelligen µg/kg-Bereich.

Gärprodukte. Wie bei Monobutyl- sind auch bei Monooktylzinn von den Gärprodukten die NawaRo-Gärreste am geringsten belastet: In keiner der fünf Proben liegen die Werte über der Bestimmungsgrenze. Bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen trifft dies auf eine (von vier) Proben zu. Bei den anderen beiden Gärprodukten liegt Monooktylzinn in über der Hälfte der Proben in Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze vor, bei den festen Bioabfallvergärungsrückständen in geringeren, bei den Mitvergärungs-Gärresten in ähnlichen Konzentrationen wie Monobutylzinn. Die Gehalte bewegen sich im einstelligen µg/kg-Bereich {einzige Ausnahme: ein Mitvergärungs-Gärrest mit 17 µg Sn/(kg TM)} und steigen tendenziell in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < flüssige < feste Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste an.

Die zeitliche Entwicklung der Monooktylzinn-Gehalte in den festen Bioabfallvergärungsrückständen zeigt seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4] kaum Veränderungen.

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

(Bioabfall-)Fertigkomposte. Neben Monobutyl- und -oktylzinn ist in den Bioabfallkomposten als einzige weitere zinnorganische Verbindung Dioktylzinn in einer Probe über der Bestimmungsgrenze enthalten.

Gärprodukte. In den festen Bioabfallvergärungsrückständen finden sich Dibutyl- und -oktylzinn in allen, Tributyl- und -cyclohexylzinn in jeweils einer (von neun) Proben. Die Gehalte erreichen Werte im bis zu zwei- (Di-, Tributylzinn, Dioctylzinn) sowie dreistelligen µg/kg-Bereich {Tricyclohexylzinn; maximale Konzentration der aktuellen Untersuchung: 106 µg Sn/(kg TM)}. Die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände enthalten Dibutyl- (alle Proben) und -oktylzinn (drei von vier Proben) im einstelligen µg/kg-Bereich. Die Tetrabutyl- und Triphenylzinngehalte bleiben in den Bioabfallvergärungsrückständen unter der Bestimmungsgrenze.

Wie bei Monobutyl- und -oktylzinn unterscheiden sich die beiden Biogasgärreste auch hinsichtlich ihrer Gehalte an oben genannten zinnorganischen Verbindungen deutlich voneinander. Während die NawaRo-Gärreste als einzige zinnorganische Verbindungen Mono- und Dibutylzinn in einer (von fünf) Proben enthalten, weisen alle drei Mitvergärungs-Gärreste (neben Monobutyl- und -oktylzinn) Dibutyl- und -oktylzinn auf. Die Konzentrationen reichen bis in den zweistelligen µg/kg-Bereich. Die Gehalte an Tri- und Tetrabutylzinn und den beiden zyklischen zinnorganischen Verbindungen (Tricyclohexyl-, Triphenylzinn) liegen in den Biogasgärresten unter der Bestimmungsgrenze.

3.3.12 Galaxolide® (HHCB), Tonalide® (AHTN), Iso-E-Super® (OTNE)

Die Bestimmungsgrenze des für die drei synthetischen, endokrin wirksamen Duftstoffe Galaxolide® (HHCB), Tonalide® (AHTN), Iso-E-Super® (OTNE) gleichen Analysenverfahrens liegt bei 3 µg/(kg TM). Die Substanzen sind Inhaltsstoffe von Wasch- und Reinigungsmitteln.

3.3.12.1 Galaxolide® (HHCB)

Fertigkomposte. Galaxolide® (HHCB) ist in den Bioabfallkomposten in etwas höheren Konzentrationen enthalten als in den Grüngutkomposten. Die Gehalte liegen bei den Bioabfallkomposten im bis zu zweistelligen µg/kg-Bereich, bei den Grüngutkomposten zur Hälfte unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens und der Rest in der Regel im einstelligen µg/kg-Bereich.

In der Zeitreihe seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4] ist weder bei den Bioabfall- noch den Grüngutkomposten ein Trend der HHCB-Belastung auszumachen (höchste Werte bei der Untersuchung im Jahr 2009 [1]).

Gärprodukte. Von den vier Gärprodukten liegen die NawaRo-Gärreste mit ihren HHCB-Werten im Bereich der Grüngutkomposte {eine Probe unter der Bestimmungsgrenze, andere Proben im einstelligen µg/kg-Bereich}. Die anderen Gärprodukte weisen deutlich höhere Konzentrationen als die (Bioabfall-)Komposte – bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich – auf {maximaler Wert: 225 µg/(kg TM) (ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand)}. Die Gehalte steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste Vergärungsrückstände, Mitvergärungs-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an.

Für die festen Vergärungsrückstände ergibt sich ein leichter Rückgang der HHCB-Konzentrationen seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4].

3.3.12.2 Tonalide® (AHTN)

Fertigkomposte. Die Bioabfallkomposte weisen höhere Tonalide® (AHTN)-Gehalte als die Grüngutkomposte auf; insgesamt sind die Konzentrationen niedriger als bei Galaxolide® (HHCB). Bei den Bioabfallkomposten liegen zwei (von sieben) Proben unter der Bestimmungsgrenze des Analyseverfahrens, die anderen Proben im bis zu zweistelligen µg/kg-Bereich; bei den Grüngutkomposten sind sämtliche Proben unter der Bestimmungsgrenze.

Der Vergleich mit den beiden Untersuchungen seit dem Jahr 2006 ergibt für AHTN eine analoge Aussage wie für HHCB: keine wesentliche Veränderung der Konzentrationen (eventuell Abnahme bei den Bioabfallkomposten) gegenüber dem Jahr 2006 [4], höchste Werte bei der Untersuchung 2009 [1].

Gärprodukte. Die AHTN-Konzentrationen des Grüngutvergärungsrückstands und der NawaRo-Gärreste sind vergleichbar den Grüngutkompostgehalten (alle sechs Proben unter der Bestimmungsgrenze). Die anderen Gärprodukte liegen im Mittel über den (Bioabfall-)Kompostkonzentrationen. Die Unterschiede in den Gehalten sind gering; die Werte bewegen sich größtenteils im zweistelligen µg/kg-Bereich {maximale Konzentration: 30 µg/(kg TM) (ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand)}. Es ergibt sich die gleiche Reihenfolge wie bei HHCB: NawaRo-Gärreste < feste (Bioabfall-)Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste, flüssige Bioabfallvergärungsrückstände.

Seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4] sind für die festen Vergärungsrückstände kaum Veränderungen in der AHTN-Belastung zu verzeichnen.

3.3.12.3 Iso-E-Super® (OTNE)

Fertigkomposte. Iso-E-Super® (OTNE) zeigt bei den Komposten ähnliche Konzentrationsniveaus wie Galaxolide® (HHCB): in den Bioabfallkomposten höhere Gehalte als in den Grüngutkomposten, Werte im bis zu zweistelligen µg/kg-Bereich bei den Bioabfallkomposten, Werte unter der Bestimmungsgrenze des Analyseverfahrens oder im einstelligen µg/kg-Bereich bei den Grüngutkomposten.

Gärprodukte. Wesentlich höhere OTNE-Konzentrationen zeigen dagegen die Gärprodukte: Selbst die in der Regel gering belasteten NawaRo-Gärreste liegen mit Gehalten im zweistelligen µg/kg-Bereich über den (Bioabfall-)Komposten. Die festen und flüssigen (Bioabfall-)Vergärungsrückstände weisen Konzentrationen im zwei- bis dreistelligen, die Mitvergärungs-Gärreste im drei- bis vierstelligen µg/kg-Bereich auf {Maximalwert: 8,2 mg/(kg TM) (Ausreißer)}. Dementsprechend steigen die Gehalte in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste, flüssige (Bioabfall-)Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste an.

Tab. 18: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB, AHTN und OTNE in den Bioabfallkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Bioabfallkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	7	11	12	11	15
Bisphenol A [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 10	< 25	< 10	< 10	–
Median	29	154	337	105	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	–
Maximum	143	840	990	646	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–
DEHP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	0,6	0,9	< 0,05	0,05	< 0,5
Median	2,2	3,2	1,15	0,15	2,3
Mittelwert	3,3	4,5	n. b.	0,49	n. b.
Maximum	9,3	17,0	2,69	2,38	20,9
<i>Standardabweichung</i>	<i>2,8</i>	<i>4,4</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,72</i>	<i>n. b.</i>
DINP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 0,5	< 0,5	< 0,05	–	–
Median	0,5	< 0,5	< 0,05	–	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 0,05	–	–
Maximum	1,7	2,4	< 0,05	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	–
Iso-Nonylphenol [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 100	< 100	< 50	83	–
Median	< 100	170	154	680	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	882	–
Maximum	160	550	331	2.580	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>784</i>	–
Monobutylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 1	< 1	< 1	< 1	–
Median	3,0	2,9	4,3	2,8	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	–
Maximum	13,0	7,9	8,6	5,8	–
<i>Standardabweichung</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	< 1	–
Median	2,8	< 1	< 1	< 1	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	–
Maximum	20,0	11,0	5,8	15,4	–
<i>Standardabweichung</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	5	6	< 1	–	–
Median	10	21	13,7	–	–
Mittelwert	11	21	n. b.	–	–
Maximum	20	45	46,3	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>6</i>	<i>11</i>	<i>n. b.</i>	–	–
AHTN [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 3	3	3,6	–	–
Median	3	15	8,7	–	–
Mittelwert	n. b.	20	9,2	–	–
Maximum	30	56	16,1	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>17</i>	<i>3,8</i>	–	–
OTNE [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	5	–	–	–	–
Median	10	–	–	–	–
Mittelwert	15	–	–	–	–
Maximum	30	–	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>11</i>	–	–	–	–

Tab. 19: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB, AHTN und OTNE in den Grüngutkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Grüngutkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	10	11	12	11	5
Bisphenol A [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 10	< 25	< 10	< 10	–
Median	10	< 25	11	< 10	–
Mittelwert	n. b.	< 25	n. b.	n. b.	–
Maximum	167	< 25	43	59	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–
DEHP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	0,6	1,2	< 0,05	0,01	< 0,5
Median	1,9	2,1	0,20	0,09	2,1
Mittelwert	2,0	2,0	n. b.	0,12	n. b.
Maximum	3,7	3,3	0,55	0,25	6,6
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,9</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	< 0,5	< 0,05	–	–
Median	< 0,5	< 0,5	< 0,05	–	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 0,05	–	–
Maximum	1,6	4,5	< 0,05	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	–
Iso-Nonylphenol [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 100	< 100	< 50	57	–
Median	< 100	< 100	< 50	147	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	205	–
Maximum	130	440	87	772	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>210</i>	–
Monobutylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	–	–	< 1	< 1	–
Median	–	–	< 1	< 1	–
Mittelwert	–	–	n. b.	n. b.	–
Maximum	–	–	6,4	1,8	–
<i>Standardabweichung</i>	–	–	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–
Monooktylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	–	–	< 1	< 1	–
Median	–	–	< 1	< 1	–
Mittelwert	–	–	< 1	< 1	–
Maximum	–	–	< 1	< 1	–
<i>Standardabweichung</i>	–	–	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–
HHCB [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 3	4	< 1	–	–
Median	3	8	1,5	–	–
Mittelwert	n. b.	19	n. b.	–	–
Maximum	10	88	5,5	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>27</i>	<i>n. b.</i>	–	–
AHTN [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 3	< 3	< 1	–	–
Median	< 3	9	2,1	–	–
Mittelwert	< 3	n. b.	n. b.	–	–
Maximum	< 3	24	7,7	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	–	–
OTNE [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]					
Minimum	< 3	–	–	–	–
Median	5	–	–	–	–
Mittelwert	n. b.	–	–	–	–
Maximum	8	–	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	–	–	–	–

Tab. 20: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB, AHTN und OTNE in den Vergärungsrückständen im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1, 4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart	Vergärungsrückstand				
	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall		Bioabfall	
Herkunft	fest	fest		flüssig	
Konsistenz	fest	fest		flüssig	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	10 ¹⁾	6	5	4	2
Bisphenol A [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 25	23	160	261
Median	394	401	563	440	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	1.193	496	n. b.
Maximum	1.030	1.230	2.860	945	1.290
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>1.276</i>	<i>327</i>	<i>n. b.</i>
DEHP [mg/(kg TM)]					
Minimum	3,6	3,7	0,29	2,5	3,9
Median	5,2	7,0	1,76	8,0	n. b.
Mittelwert	8,0	6,7	2,31	7,8	n. b.
Maximum	23,6	8,9	4,75	12,8	13,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>6,6</i>	<i>2,0</i>	<i>1,91</i>	<i>4,9</i>	<i>n. b.</i>
DINP [mg/(kg TM)]					
Minimum	< 0,5	< 0,5	< 0,05	1,0	2,8
Median	2,2	3,8	< 0,05	3,6	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 0,05	4,6	n. b.
Maximum	3,2	5,9	< 0,05	10,0	11,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>3,9</i>	<i>n. b.</i>
iso-Nonylphenol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 100	< 100	< 50	200	580
Median	200	260	324	450	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	550	n. b.
Maximum	650	1.500	421	1.100	1.100
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>387</i>	<i>n. b.</i>
Monobutylzinn [µg Sn/(kg TM)]					
Minimum	8,5 ²⁾	< 1	3,4	4,4	6,6
Median	14,0²⁾	4,0	6,8	8,2	n. b.
Mittelwert	15,1 ²⁾	n. b.	10,2	7,6	n. b.
Maximum	24,0 ²⁾	13,0	19,7	9,6	13,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>5,4²⁾</i>	<i>n. b.</i>	<i>7,7</i>	<i>2,2</i>	<i>n. b.</i>
Monooktylzinn [µg Sn/(kg TM)]					
Minimum	1,4 ²⁾	< 1	< 1	< 1	3,8
Median	5,1²⁾	3,0	4,8	< 1	n. b.
Mittelwert	5,1 ²⁾	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	8,2 ²⁾	5,0	10,6	3,2	5,1
<i>Standardabweichung</i>	<i>2,2²⁾</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
HHCB [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	20	14,7	45	63
Median	43	40	62,2	115	n. b.
Mittelwert	n. b.	54	48,4	125	n. b.
Maximum	90	120	69,8	225	330
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>39</i>	<i>25,4</i>	<i>76</i>	<i>n. b.</i>
AHTN [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	8	6,1	5	12
Median	10	16	9,2	18	n. b.
Mittelwert	n. b.	16	10,0	18	n. b.
Maximum	20	24	16,8	30	46
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>6</i>	<i>4,3</i>	<i>10</i>	<i>n. b.</i>
OTNE [µg/(kg TM)]					
Minimum	15	–	–	55	–
Median	118	–	–	115	–
Mittelwert	178	–	–	314	–
Maximum	545	–	–	970	–
<i>Standardabweichung</i>	<i>175</i>	–	–	<i>439</i>	–

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

²⁾ 9 Bioabfallvergärungsrückstände

Tab. 21: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, DINP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB, AHTN und OTNE in den Biogasgärresten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte[1]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz Herkunft	Biogasgärrest, flüssig			
	NawaRo		Mitvergärung	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	5	4	3	4
Bisphenol A [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 10	< 25	249	160
Median	< 10	< 25	288	465
Mittelwert	n. b.	< 25	354	435
Maximum	391	< 25	524	648
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	149	224
DEHP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	1,9	1,5	3,8	6,7
Median	5,7	2,7	10,4	13,0
Mittelwert	4,6	2,5	8,4	11,4
Maximum	5,9	2,9	11,0	13,0
<i>Standardabweichung</i>	1,7	0,6	4,0	3,2
DINP [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 0,5	< 0,5	1,5	4,5
Median	< 0,5	< 0,5	2,2	8,2
Mittelwert	< 0,5	< 0,5	6,2	7,7
Maximum	< 0,5	< 0,5	15,0	10,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	7,6	2,8
Iso-Nonylphenol [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 100	120	220	270
Median	130	280	290	310
Mittelwert	n. b.	263	270	348
Maximum	220	370	300	500
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	123	44	106
Monobutylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 1	< 1	3,2	1,6
Median	< 1	< 1	5,7	6,1
Mittelwert	n. b.	n. b.	8,0	6,9
Maximum	3,7	2,1	15,0	14,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	6,2	6,0
Monooktylzinn [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 1	< 1	< 1	< 1
Median	< 1	< 1	7,5	7,1
Mittelwert	< 1	< 1	n. b.	n. b.
Maximum	< 1	< 1	17,0	19,0
<i>Standardabweichung</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	< 3	9	15	30
Median	5	18	45	78
Mittelwert	n. b.	23	37	82
Maximum	5	45	50	140
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	16	19	52
AHTN [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	< 3	< 3	5	8
Median	< 3	5	17	23
Mittelwert	< 3	n. b.	14	23
Maximum	< 3	7	20	39
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	8	14
OTNE [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]				
Minimum	20	–	110	–
Median	25	–	420	–
Mittelwert	27	–	2.910	–
Maximum	40	–	8.200	–
<i>Standardabweichung</i>	8	–	4.584	–

3.3.13 Polybromierte Diphenylether (PBDE)

Polybromierte Diphenylether (PBDE) finden insbesondere als Flammschutzmittel in Kunststoffen und Textilien Anwendung. Häufigster Vertreter ist der decabromierte Diphenylether (DecaBDE) 209.

Fertigkomposte. Die Gehalte an PBDE (Summe der acht analysierten Kongenere, siehe Tab. 4) liegen in den Komposten im ein- bis zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich, in den Bioabfallkomposten sind die Werte geringfügig höher als in den Grüngutkomposten.

Insgesamt sind die ermittelten PBDE-Konzentrationen bei beiden Kompostarten die niedrigsten seit der Untersuchung im Jahr 2006 [4], sowohl in Bezug auf die Median- als auch auf die maximalen Werte.

Gärprodukte. Im Vergleich zu den (Bioabfall-)Komposten sind die Gärprodukte (außer NawaRo-Gärreste) ähnlich oder höher belastet. Letzteres trifft vor allem auf die flüssigen Vergärungsrückstände zu. Die NawaRo-Gärreste zeigen mit Werten unter $4 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ die insgesamt geringsten Gehalte.

Wie bei den Komposten sind die PBDE-Konzentrationen bei den (festen und flüssigen) Vergärungsrückständen und den NawaRo-Gärresten die niedrigsten seit den Untersuchungen im Jahr 2006 [4] und 2009 [1]. Dagegen zeigen die Mitvergärungs-Gärreste eine etwas höhere Belastung gegenüber den Werten aus dem Jahr 2009.

3.3.14 Hexabromcyclododecan (HBCD)

Hexabromcyclododecan (HBCD) ist eines der weltweit meisteingesetzten bromierten Flammschutzmittel (Haupteinsatzgebiet: Dämmmaterialien auf Polystyrolbasis) und ein persistenter organischer Schadstoff der Stockholmer Konvention [25].

Fertigkomposte. Die Gehalte an Hexabromcyclododecan (HBCD) weisen in beiden Kompostarten sehr große Wertebereiche auf: Die niedrigsten Konzentrationen liegen im unteren dreistelligen ng/kg -Bereich, die höchsten im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ - (ein Bioabfallkompost) und einstelligen mg/kg -Bereich (ein Grüngutkompost, Ausreißer), wodurch sich der Wertebereich für Grüngutkomposte über vier Größenordnungen erstreckt. Bis auf den Ausreißer sind die Grüngutkomposte im Mittel niedriger belastet als die Bioabfallkomposte.

Im Vergleich zur Untersuchung im Jahr 2009 [1] sind die HBCD-Gehalte in den Bioabfallkomposten leicht, in den Grüngutkomposten deutlich rückläufig.

Gärprodukte. Auch bei den Gärprodukten sind Ausreißer (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand, ein NawaRo-, ein Mitvergärungs-Gärrest) zu verzeichnen, die ähnlich große Wertebereiche {bis zu fünf Größenordnungen (feste Vergärungsrückstände)} wie bei den Komposten bedingen. Abgesehen von diesen Maximalwerten liegen die Gehalte für die (festen und flüssigen) Bioabfallvergärungsrückstände in der Regel im zwei- und unteren dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich, für den festen Grüngutvergärungsrückstand und die NawaRo-Gärreste im zweistelligen ng/kg -Bereich {zwei NawaRo-Gärreste unter der Bestimmungsgrenze von $0,14$ sowie $0,41 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ }, für die Mitvergärungs-Gärreste im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich und darunter. Die Konzentrationen steigen in der Reihenfolge NawaRo- << Mitvergärungs-Gärreste < feste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an.

Gegenüber den Gehalten bei der Untersuchung im Jahr 2009 [1] sind die aktuellen Konzentrationswerte bei den Vergärungsrückständen höher und bei den Biogasgärresten niedriger.

3.3.15 Thiabendazol

Thiabendazol ist ein häufig eingesetztes Zitrusfungizid.

Fertigkomposte. Die Gehalte an Thiabendazol liegen in nahezu allen Kompostproben unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 µg/(kg TM). Lediglich bei einem (von sieben) Bioabfallkomposten wurde ein Gehalt über der Bestimmungsgrenze gefunden (zweistelliger µg/kg-Bereich), bei den Grüngutkomposten überschritt keine Probe diesen Konzentrationswert.

Die Ergebnisse spiegeln die Verhältnisse der vorangegangenen Untersuchungen [1, 2, 4] wider, bei denen lediglich vereinzelte Bioabfallkompostproben Gehalte über der Bestimmungsgrenze aufwiesen (Untersuchung aus dem Jahr 2009 [1]).

Gärprodukte. Von den Gärprodukten zeigen der feste Grüngutvergärungsrückstand und die NawaRo-Gärreste zu den Komposten vergleichbare Konzentrationen (alle sechs Proben unter der Bestimmungsgrenze). Die anderen Vergärungsrückstände weisen Gehalte im zweistelligen, teilweise dreistelligen µg/kg-Bereich auf {ein fester, ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand (Ausreißer), ein Mitvergärungs-Gärrest}. In der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste steigen die Konzentrationen an.

Der Vergleich der Medianwerte der Untersuchungen seit 2006 [1, 4] zeigt einen Anstieg der Thiabendazol-Belastung in den festen Vergärungsrückständen, auch wenn sich der aktuell ermittelte Maximalwert gegenüber der Voruntersuchung [1] nahezu halbiert hat.

3.3.16 Perfluorierte Tenside (PFT)

Perfluorierte Tenside (PFT) werden bei der Oberflächenbehandlung (zum Beispiel bei Textilien und Lederartikeln) und Papierveredlung zur Imprägnierung gegen Feuchtigkeit und Verschmutzung sowie in der Spezialchemie (zum Beispiel bei der Fluorpolymerherstellung) als Emulgatoren eingesetzt.

Hinsichtlich der Belastung mit perfluorierten Tensiden wurden neben Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) die Gehalte von acht weiteren PFT (sechs Perfluorcarbon- und zwei Perfluorsulfonsäuren) in den Kompostproben und Gärprodukten bestimmt:

- Perfluorhexansäure (PFHxA),
- Perfluorheptansäure (PFHpA),
- Perfluorononansäure (PFNA),
- Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) und
- Perfluor-n-decansäure (PFDeA),
- Perfluor-n-undecansäure (PFUnA) und
- Perfluordodecansäure (PFDoA)
- Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS).

Die Bestimmungsgrenzen des Analysenverfahrens lagen für alle Perfluorcarbonsäuren und PFOS bei 2,0 µg/(kg TM) sowie für PFBS und PFHxS bei 3,0 µg/(kg TM).

In einer der 39 Proben wurde eines der zehn analysierten PFT gefunden: Ein Grüngutkompost enthält als einziges perfluoriertes Tensid 2,4 µg/(kg TM) PFOS, alle anderen Proben weisen Gehalte unter den Bestimmungsgrenzen auf. Bei der vorangegangenen Untersuchung im Jahr 2009 [1] wurden teilweise deutlich höhere PFT-Konzentrationen {NawaRo-Gärrest: 32,0 µg/(kg TM) PFOA} ermittelt.

Die DÜMV [7] enthält als Grenzwert für perfluorierte Tenside 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 (siehe Tab. 6). Beide Grenzwerte werden bei der aktuellen Untersuchung von allen Kompostproben und Gärprodukten deutlich unterschritten.

3.3.17 Triclosan, Methyl-Triclosan (TCLM)

3.3.17.1 Triclosan

Triclosan ist als Desinfektionsmittel Bestandteil von kosmetischen, pharmazeutischen und Haushaltsprodukten.

Fertigkomposte. Bei den Bioabfallkomposten ist Triclosan in vier (von sieben) Proben mit Konzentrationen zwischen der Bestimmungsgrenze {3 µg/(kg TM)} und 8 µg/(kg TM) enthalten. In den (zehn) Grüngutkomposten ist Triclosan in keiner Probe bestimmbar.

Zur zeitlichen Entwicklung der Triclosan-Belastung der Komposte stehen Daten seit der letzten Untersuchung im Jahr 2009 [1] (für die Bioabfallkomposte: zusätzlich drei untersuchte Proben aus dem Jahr 2006 [4]) zu Verfügung: Die Konzentrationen bewegen sich unverändert an (Bioabfallkomposte) oder unter (Grüngutkomposte) der oben genannten Bestimmungsgrenze.

Gärprodukte. Die Gärprodukte zeigen bis auf den untersuchten Grüngutvergärungsrückstand und die NawaRo-Gärreste höhere Triclosan-Gehalte als die (Bioabfall-)Komposte. Bei den Bioabfallvergärungsrückständen liegen in allen (13) Proben Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze {3 µg/(kg TM)} vor; die Proben weisen Gehalte bis 25 (feste) sowie 33 µg/(kg TM) (flüssige Bioabfallvergärungsrückstände) auf. Die beiden Gärrestarten (NawaRo, Mitvergärung) aus Biogasanlagen ergeben hinsichtlich Triclosan ein völlig unterschiedliches Bild: Während vier (der fünf) NawaRo-Gärreste unter der Bestimmungsgrenze liegen, ergaben die Mitvergärungs-Gärreste mit Konzentrationen bis in den dreistelligen µg/kg-Bereich die höchsten Triclosan-Werte der aktuellen Untersuchung. Die Konzentrationen in den Gärprodukten steigen in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste < feste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände << Mitvergärungs-Gärreste an.

Insgesamt bestätigen die aktuellen Ergebnisse die Daten der letzten Untersuchung aus dem Jahr 2009 [1].

3.3.17.2 Methyl-Triclosan (TCLM)

Methyl-Triclosan (TCLM) ist ein relativ stabiles Abbauprodukt von Triclosan und wird durch Triclosan haltige Produkte in die Umwelt eingetragen.

Fertigkomposte. Im Unterschied zu Triclosan ist TCLM in den Bioabfallkomposten kaum zu finden: Eine (von sieben) Proben liegt in ihrem Gehalt über der Bestimmungsgrenze von 3 µg/(kg TM), bei den Grüngutkomposten keine (von zehn) Proben.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der TCLM-Konzentrationen in den Komposten ist seit der letzten Untersuchung im Jahr 2009 [1] (Bioabfallkomposte seit 2006 [4]) praktisch keine Veränderung feststellbar.

Gärprodukte. Auch in den Gärprodukten liegt TCLM in geringeren Konzentrationen vor als Triclosan (Ausnahme: NawaRo-Gärreste). Im Vergleich zu den Komposten sind die Gärprodukte geringfügig höher mit TCLM belastet (Ausnahme: feste Vergärungsrückstände, Gehalte vergleichbar Bioabfallkomposte). Bei den festen und flüssigen Vergärungsrückständen liegt mindestens die Hälfte aller Proben unter der oben genannten Bestimmungsgrenze, die Konzentrationen in den übrigen Proben reichen bis 7 µg/(kg TM) (flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand). Bei den Gärresten aus Biogasanlagen zeigt mehr als die Hälfte aller Proben Gehalte über der Bestimmungsgrenze; mit Werten von 10 µg/(kg TM) wurden in beiden Gärrestarten die höchsten TCLM-Konzentrationen ermittelt.

Die Werte liegen insbesondere bei den Gärresten tendenziell geringfügig höher als die Gehalte bei der letzten Untersuchung im Jahr 2009 [1].

Tab. 22: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Bioabfallkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Bioabfallkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	7	11	12	11	15
Summe PBDE [µg/(kg TM)]					
Minimum	5,69	10,7	6,5	–	–
Median	11,85	32,8	23,4	–	–
Mittelwert	12,38	40,5	26,1	–	–
Maximum	26,39	87,9	89,2	–	–
<i>Standardabweichung</i>	7,13	27,4	21,9	–	–
HBCD [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,17	15,0	–	–	–
Median	32,34	41,2	–	–	–
Mittelwert	35,45	63,5	–	–	–
Maximum	115,06	277,1	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	38,83	76,1	–	–	–
Thiabendazol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	< 50
Median	< 10	< 10	< 10	–	< 50
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 10	–	< 50
Maximum	21	35	< 10	–	< 50
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	–	n. b.
PFOA [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	0,6	< 15 ¹⁾	–	–
Median	< 2	1,8	< 15¹⁾	–	–
Mittelwert	< 2	2,5	n. b.	–	–
Maximum	< 2	10,3	< 23 ¹⁾	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	2,8	n. b.	–	–
PFOS [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	< 0,5	< 15 ¹⁾	–	–
Median	< 2	0,7	< 15¹⁾	–	–
Mittelwert	< 2	n. b.	n. b.	–	–
Maximum	< 2	14,0	< 23 ¹⁾	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	–	–
Triclosan [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	< 3 ¹⁾	–	–
Median	3	4	< 3¹⁾	–	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	–	–
Maximum	8	11	6 ¹⁾	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	–	–
TCLM [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	< 3 ¹⁾	–	–
Median	< 3	< 3	< 3¹⁾	–	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 3 ¹⁾	–	–
Maximum	6	5	< 3 ¹⁾	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	–	–

¹⁾ drei analysierte Proben

Tab. 23: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Grüngutkomposten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1-4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz	Grüngutkompost, fest				
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2002 [3]	2000 [2]
Probenanzahl	10	11	12	11	5
Summe PBDE [µg/(kg TM)]					
Minimum	4,33	4,2	1,2	–	–
Median	8,12	14,9	10,4	–	–
Mittelwert	10,11	300,3	12,4	–	–
Maximum	25,70	3.170,4	43,8	–	–
<i>Standardabweichung</i>	5,87	951,9	11,8	–	–
HBCD [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,14	8,9	–	–	–
Median	11,57	41,4	–	–	–
Mittelwert	631,73	156,3	–	–	–
Maximum	6.124,7	724,7	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	1.930,2	243,8	–	–	–
Thiabendazol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	–	< 50
Median	< 10	< 10	< 10	–	< 50
Mittelwert	< 10	< 10	< 10	–	< 50
Maximum	< 10	< 10	< 10	–	< 50
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	–	n. b.
PFOA [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	< 0,5	–	–	–
Median	< 2	0,7	–	–	–
Mittelwert	< 2	n. b.	–	–	–
Maximum	< 2	21,0	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	–	–
PFOS [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	< 0,5	–	–	–
Median	< 2	< 0,5	–	–	–
Mittelwert	n. b.	n. b.	–	–	–
Maximum	2,4	2,2	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	–	–
Triclosan [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	–	–	–
Median	< 3	< 3	–	–	–
Mittelwert	< 3	n. b.	–	–	–
Maximum	< 3	25	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	–	–
TCLM [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	–	–	–
Median	< 3	< 3	–	–	–
Mittelwert	< 3	n. b.	–	–	–
Maximum	< 3	9	–	–	–
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	–	–

Tab. 24: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Vergärungsrückständen im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1, 4]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart	Vergärungsrückstand				
	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall		Bioabfall	
Konsistenz	fest	fest		flüssig	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2006 [4]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	10 ¹⁾	6	5	4	2
Summe PBDE [µg/(kg TM)]					
Minimum	4,01	36,7	17,9	14,70	52,1
Median	13,67	53,5	26,3	24,23	n. b.
Mittelwert	17,30	52,2	28,0	30,34	n. b.
Maximum	46,17	66,3	41,4	58,19	54,2
<i>Standardabweichung</i>	12,44	12,1	10,2	19,49	n. b.
HBCD [µg/(kg TM)]					
Minimum	0,02	42,9	–	91,22	10,5
Median	93,70	53,1	–	107,56	n. b.
Mittelwert	280,32	165,6	–	107,50	n. b.
Maximum	2.071,1	729,1	–	123,66	25,9
<i>Standardabweichung</i>	632,44	276,3	–	15,96	n. b.
Thiabendazol [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 10	< 10	< 10	27	138
Median	45	31	< 10	57	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	< 10	106	n. b.
Maximum	115	220	< 10	283	216
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	119	n. b.
PFOA [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	< 0,5	n. b.	< 2	2,2
Median	< 2	1,2	< 18²⁾	< 2	n. b.
Mittelwert	< 2	n. b.	n. b.	< 2	n. b.
Maximum	< 2	3,4	n. b.	< 2	4,2
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PFOS [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 2	< 0,5	n. b.	< 2	1,0
Median	< 2	1,3	< 18²⁾	< 2	n. b.
Mittelwert	< 2	n. b.	n. b.	< 2	n. b.
Maximum	< 2	8,8	n. b.	< 2	1,6
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Triclosan [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	–	9	13
Median	10	9	–	15	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	–	18	n. b.
Maximum	25	60	–	33	48
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	11	n. b.
TCLM [µg/(kg TM)]					
Minimum	< 3	< 3	–	< 3	8
Median	< 3	3	–	4	n. b.
Mittelwert	n. b.	n. b.	–	n. b.	n. b.
Maximum	6	4	–	7	13
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	–	n. b.	n. b.

1) 9× Bioabfall, 1× Grüngut

2) eine analysierte Probe

Tab. 25: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PBDE, HBCD, Thiabendazol, PFOA, PFOS, Triclosan und TCLM in den Biogasgärresten im Vergleich zu den bisherigen BayLfU-Untersuchungen bayerischer Komposte/Gärprodukte [1]; n. b.: nicht bestimmbar

Probenart/Konsistenz Herkunft	Biogasgärrest, flüssig			
	NawaRo		Mitvergärung	
Untersuchungsjahr	2013/14	2009 [1]	2013/14	2009 [1]
Probenanzahl	5	4	3	4
Summe PBDE [µg/(kg TM)]				
Minimum	0,28	0,7	5,97	5,3
Median	0,74	1,1	13,04	7,8
Mittelwert	1,64	1,1	10,82	25,1
Maximum	3,51	1,5	13,43	79,5
<i>Standardabweichung</i>	1,59	0,4	4,20	36,3
HBCD [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 0,01	< 0,7	0,04	14,2
Median	0,01	3,1	6,39	39,2
Mittelwert	n. b.	n. b.	36,87	37,5
Maximum	28,23	42,9	104,19	57,4
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	58,39	22,7
Thiabendazol [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 10	< 10	< 10	< 10
Median	< 10	< 10	95	33
Mittelwert	< 10	< 10	n. b.	n. b.
Maximum	< 10	< 10	181	73
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PFOA [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0 ¹⁾
Median	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0¹⁾
Mittelwert	< 2	n. b.	< 2	n. b.
Maximum	< 2	32,0	< 2	2,6 ¹⁾
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PFOS [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0 ¹⁾
Median	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0¹⁾
Mittelwert	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0 ¹⁾
Maximum	< 2	< 1,0	< 2	< 1,0 ¹⁾
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	< 1,0	n. b.	n. b.
Triclosan [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 3	< 3	80	6
Median	< 3	< 3	335	73
Mittelwert	n. b.	< 3	328	75
Maximum	3	< 3	570	150
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	245	60
TCLM [µg/(kg TM)]				
Minimum	< 3	< 3	< 3	< 3
Median	8	< 3	10	< 3
Mittelwert	n. b.	< 3	n. b.	n. b.
Maximum	10	< 3	10	4
<i>Standardabweichung</i>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

¹⁾ drei auswertbare Proben

3.3.18 Weitere polybromierte Flammschutzmittel

Folgende sechs polybromierte Flammschutzmittel wurden bei der aktuellen Kompost-/Gärprodukt-Untersuchung neu in den Untersuchungsumfang mit aufgenommen: Hexabrombenzol, Pentabrommethylbenzol, Pentabromtoluol, Tetrabrom-p-xylool, Decabromdiphenylethan (DBDPE) und 1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan. Die Proben der letzten Kompostuntersuchungsreihe [1] wurden dem Vorhaben „Medienübergreifende Umweltanalytik verschiedener persistenter polybromierter Flammschutzmittel“ [27] zur Methodenentwicklung und -validierung zur Verfügung gestellt. Dabei wurden unter anderem die oben genannten Schadstoffe bestimmt. Auf diese Ergebnisse wird im Folgenden Bezug genommen. Die Ergebnisse der aktuellen Analysen sind in Tab. 26 zusammengefasst.

Fertigkomposte. Decabromdiphenylethan (DBDPE), das seit Anfang der 1990er Jahren zunehmend DecaBDE 209 (vergleiche Abschnitt 3.3.13) ersetzt, ist das einzige der oben genannten polybromierten Flammschutzmittel, das in nennenswerten Konzentrationen in den Komposten enthalten ist. Die Gehalte liegen im ein- bis zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich, wobei die Bioabfallkomposte (eher zweistelliger) höhere Belastungen als die Grüngutkomposte (eher einstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) aufweisen. Insgesamt liegen die DBDPE-Konzentrationen bei den Bioabfallkomposten unter, bei den Grüngutkomposten über den Werten der oben genannten Untersuchung [27].

Die anderen fünf polybromierten Flammschutzmittel kommen in den Komposten in geringen Gehalten (teilweise deutlich) unter $0,9 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ vor. Die maximalen Konzentrationen treten bei den Bioabfallkomposten auf und liegen für

- 1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan bei $0,888 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$,
- Tetrabrom-p-xylool bei $0,0695 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$,
- Hexabrombenzol und Pentabromtoluol bei $0,0193 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$,
- Pentabrommethylbenzol bei $0,0008 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$.

Demgegenüber sind die ermittelten Höchstgehalte der Grüngutkomposte geringer.

Gärprodukte. Auch bei den Gärprodukten sticht Decabromdiphenylethan (DBDPE) mit den höchsten Gehalten hervor. Die Konzentrationsbereiche liegen in den festen und flüssigen Vergärungsrückständen sowie den Mitvergärungs-Gärresten mit Werten bis zu 19, 29 sowie $20 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ im Bereich der Komposte, in den NawaRo-Gärresten mit Werten bis zu $3,3 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ deutlich unter den (Grüngut-) Kompostgehalten. Eine Bioabfallvergärungsanlage wies mit $179 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ im festen und $399 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ im flüssigen Rückstand (jeweils Ausreißer; höchste Werte der aktuellen Untersuchung) besonders belastete Vergärungsrückstände auf. Hinsichtlich der Medianwerte ergibt sich folgende Reihenfolge der DBDPE-Gehalte: NawaRo-Gärreste < feste Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste < flüssige Vergärungsrückstände. Gegenüber der oben genannten Untersuchung [27] haben sich die Konzentrationen in den festen Vergärungsrückständen und den Mitvergärungs-Gärresten verringert.

Die Konzentrationen der anderen fünf polybromierten Flammschutzmittel sind in den Gärprodukten (teilweise deutlich) unter $1,7 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$. Die Maximalgehalte betragen für

- 1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan $1,69 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ (flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand),
- Hexabrombenzol $0,224 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ (NawaRo-Gärrest),
- Pentabromtoluol $0,108 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ (Mitvergärungs-Gärrest),
- Tetrabrom-p-xylool $0,0277 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ (fester Vergärungsrückstand),
- Pentabrommethylbenzol $0,0090 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ (flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand).

Damit liegen die Konzentrationsbereiche in der Regel über den in den Komposten ermittelten Bereichen (Ausnahme: Tetrabrom-p-xylool).

Tab. 26: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an weiteren polybromierten Flammschutzmitteln in den Komposten und Gärprodukten; Werte in µg/(kg TM); n. b.: nicht bestimmbar

Behandlungsverfahren	Kompostierung		Vergärung			
	Fertigkompost		Vergärungsrückstand		Biogasgärrest	
Probenart	Bioabfall	Grüngut	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall	NawaRo	Mitvergärung
Konsistenz	fest		fest	flüssig	flüssig	flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14					
Probenanzahl	7	10	10 ¹⁾	4	5	3
Hexabrombenzol						
Minimum	0,0048	< 0,0002	< 0,0002	0,0018	< 0,0002	< 0,0002
Median	0,0097	0,0054	0,0066	0,0094	0,0115	0,0399
Mittelwert	0,0109	n. b.	n. b.	0,0083	n. b.	n. b.
Maximum	0,0193	0,0115	0,0463	0,0125	0,2242	0,1800
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,0060</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,0046</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
Pentabromethylbenzol						
Minimum	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Median	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	0,0008	0,0005	0,0017	0,0090	0,0015	0,0050
<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>
Pentabromtoluol						
Minimum	0,0043	0,0046	0,0011	< 0,0002	< 0,0002	0,0038
Median	0,0093	0,0096	0,0145	0,0106	0,0059	0,0400
Mittelwert	0,0106	0,0091	0,0145	n. b.	n. b.	0,0507
Maximum	0,0193	0,0149	0,0310	0,0245	0,0141	0,1082
<i>Standardabweichung</i>	<i>0,0063</i>	<i>0,0037</i>	<i>0,0088</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,0530</i>
Tetrabrom-p-xylo						
Minimum	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	0,0002
Median	0,0093	< 0,0002	0,0049	0,0071	0,0007	0,0010
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,0021
Maximum	0,0695	0,0042	0,0277	0,0195	0,0023	0,0050
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,0026</i>
Decabromdiphenylethan (DBDPE)						
Minimum	5,86	1,62	4,51	6,84	< 0,02	6,43
Median	9,96	3,81	8,37	18,98	0,56	13,76
Mittelwert	13,05	6,17	27,00	110,84	n. b.	13,33
Maximum	36,11	21,90	179,08	398,56	3,23	19,81
<i>Standardabweichung</i>	<i>10,45</i>	<i>6,33</i>	<i>53,67</i>	<i>192,05</i>	<i>n. b.</i>	<i>6,70</i>
1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan						
Minimum	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,007	< 0,0002	0,008
Median	0,116	0,002	0,004	0,532	< 0,003	0,699
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,483
Maximum	0,888	0,133	0,930	1,688	0,005	0,744
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>0,412</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

3.4 Umwelthygienische Parameter

Phyto- und seuchenhygienische Parameter wurden im Rahmen der BayLfU-Kompost- und Gärproduktuntersuchungen erstmals analysiert. Bestimmt wurden die beiden in der BioAbfV [6] geforderten Parameter keimfähige Samen/austriebsfähige Pflanzenteile und Salmonellen sowie die in den Hinweisen zum Vollzug der Bioabfallverordnung (1998) [20] vorgeschlagenen zusätzlichen Parameter aerobe Gesamtbakterienzahl, fäkalcoliforme Bakterien und Enterokokken⁴. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten sowie zu den drei letztgenannten Untersuchungsparametern in Tab. 27 zusammengefasst.

3.4.1 Keimfähige Samen, austriebsfähige Pflanzenteile

Die BioAbfV [6] fordert im Anhang 2, 4.3.2, hinsichtlich der phytohygienischen Eigenschaften die Einhaltung von maximal zwei keimfähigen Samen oder austriebsfähigen Pflanzenteilen pro Liter Behandlungsprodukt, vergleiche Tab. 7. Diese Anforderung erfüllen alle Komposte und Gärprodukte, was nach [15] zu folgender Einstufung führt: Bei den Komposten wurde bei einem Bioabfallkompost ein Keimling erfasst, bei den Gärprodukten wiesen ein fester Bioabfallvergärungsrückstand zwei und zwei feste Bioabfallvergärungsrückstände einen Keimling (jeweils in drei Liter Probe) auf. Damit sind 38 der 39 Proben „frei von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen“ (maximal 0,5 Keimpflanzen je Liter Prüfsubstrat) und eine Probe „weitgehend frei von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen“ (maximal zwei Keimpflanzen je Liter Prüfsubstrat).

3.4.2 Salmonellen

Hinsichtlich der seuchenhygienischen Anforderungen an die Behandlungsprodukte dürfen laut BioAbfV [6], Anhang 2, 4.2.2, in 50 g untersuchter (hygienisierter) Probe keine Salmonellen nachweisbar sein, vergleiche Tab. 7. Dies ist bei allen 17 Bioabfall- und Grüngutkomposten sowie allen acht NawaRo- und Mitvergärungs-Gärresten der Fall. Bei den festen Vergärungsrückständen war ein Bioabfallvergärungsrückstand Salmonella-positiv, bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen zwei (von vier). Bei dem festen Rückstand handelt es sich aufgrund der Probenahmestelle, vergleiche Abschnitt 2.1, um ein noch nicht hygienisiertes Zwischenprodukt der Bioabfallbehandlung. Die beiden flüssigen Rückstände sind hygienisierte, abgabefertige Behandlungsendprodukte, die die Anforderungen der BioAbfV [6] nicht erfüllen und damit nicht verwertet werden dürfen. Die Betreiber wurden über die Positiv-Befunde schriftlich informiert. Eine Überprüfung des Sachverhalts wurde zugesichert. Da sich beide Betreiber der Güteüberwachung der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Köln, unterworfen haben und bislang keine positiven Befunde aufgetreten waren, handelt es sich um ein singuläres Ereignis mangelnder Hygiene. Es wird innerhalb der Eigen- und Fremdüberwachung abgestellt.

3.4.3 Aerobe Gesamtbakterienzahl

Die Hinweise [20] zum Vollzug der Bioabfallverordnung (1998) [16] (nicht einschlägig für Biogasanlagengärreste aus nachwachsenden Rohstoffen) schlagen eine erweiterte mikrobiologische Untersuchung der Komposte und Gärprodukte bei Anlagen ohne direkte Prozessprüfung vor. Hierbei werden hinsichtlich der Parameter Gesamtbakterienzahl bei 37 °C, „*E. coli*“ (fäkalcoliforme Bakterien) und Enterokokken (lediglich für Gärprodukte) Richtwerte für die Behandlungsprodukte angegeben, vergleiche Tab. 7.

Fertigkomposte. Die aeroben Gesamtbakterienzahlen von Bioabfall- und Grüngutkomposten liegen in der für Komposte üblichen Größenordnung von 10^8 KBE/(g FS) [15] (KBE: Kolonie bildende Einheit) und unterscheiden sich kaum voneinander. Sowohl hinsichtlich Wertebereich als auch Median- und

⁴ Mit der Neufassung der BioAbfV von 1998 [16] in [6] wurden die Hinweise zum Vollzug der BioAbfV [20] in [21] fortgeschrieben.

Mittelwert ähneln sich die beiden Kompostarten. Mit einem maximalen Wert von $4,1 \cdot 10^8$ KBE/(g FS) (ein Grüngutkompost) wird der Richtwert von $5 \cdot 10^8$ KBE/(g FS) [20] von allen Komposten eingehalten.

Gärprodukte. Unterschiedliche aerobe Gesamtbakterienzahlen zeigen die Gärprodukte. Während die festen Vergärungsrückstände Kompost ähnliche Werte aufweisen und damit im für Gärprodukte üblichen Wertebereich von 10^8 KBE/(g FS) [15] liegen, sind die Gehalte der flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände geringfügig und die der Biogasanlagengärreste deutlich niedriger. Mit einem maximalen Wert von $3,7 \cdot 10^8$ KBE/(g FS) (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand) unterschreiten alle Gärprodukte den Richtwert von $5 \cdot 10^8$ KBE/(g FS) [15].

3.4.4 Fäkalcoliforme Bakterien

Fertigkomposte. In ihren Gehalten an fäkalcoliformen Bakterien unterscheiden sich die beiden Kompostarten. Die Bioabfallkomposte sind deutlich geringer belastet als die Grüngutkomposte und halten den Richtwert von $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) [20] sicher ein. Auch neun (von zehn) Grüngutkomposten bleiben mit Werten bis $2,1 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) unter dem Richtwert; ein Grüngutkompost (Ausreißer) überschreitet mit einem Wert von $4,2 \cdot 10^5$ KBE/(g FS) den Richtwert allerdings deutlich. Damit entsprechen bis auf den Ausreißer alle Kompostproben den für Komposte üblichen Gehalten an fäkalcoliformen Bakterien {kleiner $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS)} [15].

Gärprodukte. Größere Unterschiede an fäkalcoliformen Bakterien als bei den Komposten zeigen die Gärprodukte. Die Gehalte der festen Vergärungsrückstände liegen über denen der Grüngutkomposte; zwei (von zehn) Proben überschreiten mit Werten bis zu $8,3 \cdot 10^4$ KBE/(g FS) den Richtwert von $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) [20] – dabei handelt es sich um die Proben der nicht hygienisierten Zwischenprodukte, vergleiche Abschnitt 2.1 –. Deutlich niedrigere Werte als die festen Vergärungsrückstände weisen die NawaRo-Gärreste auf. Die Mitvergärungs-Gärreste und vor allem die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände sind gegenüber den Bioabfallkomposten geringer belastet. Trotzdem überschreitet einer von vier flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen – ein hygienisiertes Behandlungsendprodukt – mit einem Wert von $3,8 \cdot 10^4$ KBE/(g FS) den Richtwert um eine Größenordnung.

3.4.5 Enterokokken

Fertigkomposte. Hinsichtlich Enterokokken sind die Grüngutkomposte stärker belastet als die Bioabfallkomposte, der Unterschied ist deutlich geringer als bei den fäkalcoliformen Bakterien (Faktor 2,2 gegenüber Faktor 50 in Bezug auf die jeweiligen Medianwerte). Mit Gehalten bis zu $2,2 \cdot 10^6$ KBE/(g FS) (ein Bioabfallkompost) erstreckt sich die Schwankungsbreite der Werte bei beiden Kompostarten über mehr als fünf Größenordnungen.

Gärprodukte. Die Gärprodukte zeigen ähnliche (Mitvergärungs-Gärreste) bis deutlich höhere Belastungen (feste Vergärungsrückstände) an Enterokokken als die Komposte. Die höchsten Werte weisen die festen, gefolgt von den flüssigen Vergärungsrückständen auf. Der Richtwert für Vergärungsrückstände (außer NawaRo-Gärreste) [20], gleichzeitig die Obergrenze üblicher Gehalte von Vergärungsrückständen [15], von $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) wird von sechs (von zehn) festen und zwei (von vier) flüssigen Vergärungsrückständen überschritten – drei der sechs festen und beide flüssige Vergärungsrückstände sind hygienisierte Behandlungsendprodukte –. Etwas geringere Gehalte haben die NawaRo-, deutlich geringere die Mitvergärungs-Gärreste. Einer (von drei) Mitvergärungs-Gärresten liegt über dem Richtwert sowie den üblichen Werten für Vergärungsrückstände.

Tab. 27: Aerobe Gesamtbakterienzahl und Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an fäkalcoliformen Bakterien und Enterokokken in den Komposten und Gärprodukten; KBE: Kolonie bildende Einheit; FS: Frischsubstanz

Behandlungsverfahren	Kompostierung		Vergärung			
Probenart	Fertigkompost		Gärprodukt			
Herkunft	Bioabfall	Grüngut	Vergärungsrückstand		Biogasgärrest	
Konsistenz	fest	fest	Bioabfall/Grüngut fest	Bioabfall flüssig	NawaRo flüssig	Mitvergärung flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14					
Probenanzahl	7	10	10 ¹⁾	4	5	3
Aerobe Gesamtbakterienzahl [KBE/(g FS)]						
Minimum	1,8·10 ⁷	6,5·10 ⁶	2,8·10 ⁶	6,4·10 ⁶	4,0·10 ⁵	2,0·10 ⁶
Median	2,7·10⁷	2,6·10⁷	2,0·10⁷	1,2·10⁷	4,9·10⁶	3,7·10⁶
Mittelwert	7,5·10 ⁷	1,0·10 ⁸	8,2·10 ⁷	1,1·10 ⁷	4,5·10 ⁶	1,6·10 ⁷
Maximum	3,6·10 ⁸	4,1·10 ⁸	3,7·10 ⁸	1,5·10 ⁷	9,0·10 ⁶	4,3·10 ⁷
<i>Standardabweichung</i>	<i>1,3·10⁸</i>	<i>1,5·10⁸</i>	<i>1,3·10⁸</i>	<i>3,7·10⁶</i>	<i>4,0·10⁶</i>	<i>2,3·10⁷</i>
Fäkalcoliforme Bakterien [KBE/(g FS)]						
Minimum	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰
Median	8,4·10⁰	4,2·10²	8,3·10²	3,2·10⁰	2,2·10¹	7,7·10⁰
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,3·10 ¹	n. b.
Maximum	2,2·10 ³	4,2·10 ⁵	8,3·10 ⁴	3,8·10 ⁴	2,1·10 ²	8,3·10 ⁰
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>8,8·10¹</i>	<i>n. b.</i>
Enterokokken [KBE/(g FS)]						
Minimum	< 3,2·10 ⁰	3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰	< 3,2·10 ⁰
Median	6,7·10²	1,5·10³	4,7·10⁴	1,9·10⁴	8,4·10³	9,8·10²
Mittelwert	n. b.	1,1·10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Maximum	2,2·10 ⁶	9,9·10 ⁵	2,1·10 ⁶	2,2·10 ⁶	2,2·10 ⁴	9,0·10 ³
<i>Standardabweichung</i>	<i>n. b.</i>	<i>3,1·10⁵</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

3.5 Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft

Auf der Grundlage der Arbeiten des Joint Research Centres [8] werden als Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft von Komposten und Gärprodukten (sowie als Qualitätskriterien für die Behandlungsprodukte) unter anderem diverse Stabilitätskriterien diskutiert. Der Vorschlag enthält zum Beispiel Anforderungen hinsichtlich des Sauerstoffverbrauchs (Atmungsaktivität, Sauerstoffaufnahme) sowie des Gasbildungspotenzials (lediglich für Vergärungsrückstände) und bezieht die diesbezüglichen Werte auf organische Trockenmasse. In der aktuellen Untersuchung wurden bei den beprobten Komposten die Atmungsaktivität und bei den Gärprodukten das Gasbildungspotenzial bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 28 und Tab. 29 zusammengefasst.

3.5.1 Atmungsaktivität

Zur Bewertung der biologischen Aktivität (oder des Gehalts an leicht abbaubarer organischer Substanz) wurde die Atmungsaktivität (Sauerstoffverbrauch in vier Tagen bei 20 °C, bezogen auf die Trockenmasse) beziehungsweise die Sauerstoffaufnahme (Sauerstoffverbrauch, bezogen auf die organische Trockenmasse) der Komposte bestimmt. Entsprechend der Atmungsaktivität lassen sich die Prüfsubstrate den fünf Rottegraden beziehungsweise der Produktbezeichnung Kompostrohstoff, Frisch-, Fertigkompost zuordnen [15].

Fertigkomposte. Die Atmungsaktivität ist bei den Bioabfallkomposten etwas höher als bei den Grüngutkomposten. Bei vergleichbaren Minimalwerten erreicht der Maximalwert der Bioabfallkomposte {39,3 mg O₂/(g TM)} das Doppelte des Maximalwerts der Grüngutkomposte {19,6 mg O₂/(g TM)}. Entsprechend besitzen fünf der sieben Bioabfallkomposte den Rottegrad V (Fertigkompost) und jeweils

ein Bioabfallkompost den Rottegrad IV (Fertigkompost) sowie III (Frischkompost). Demgegenüber sind alle zehn untersuchten Grüngutkomposte Fertigkomposte des Rottegrads V.

Hinsichtlich der auf organische Trockenmasse (oTM) bezogenen Sauerstoffaufnahme zeigen sich im Durchschnitt (Vergleich der Medianwerte) kaum Unterschiede zwischen Bioabfall- und Grüngutkomposten. Aufgrund des gegenüber den Grüngutkomposten höheren Maximalwerts liegt ein Bioabfallkompost mit einem Wert von 26,9 mmol O₂/(kg oTM × h) über der diskutierten Forderung von maximal 25 mmol O₂/(kg oTM × h) für einen vollständig stabilisierten Kompost [8]. Die zehn Grüngutkomposte bleiben mit maximal 15,7 mmol O₂/(kg oTM × h) deutlich unter diesem Wert.

Probenart	Kompost	
	Bioabfall	Grüngut
Konsistenz/Herkunft	fest	
Untersuchungsjahr	2013/14	
Probenanzahl	7	10
Atmungsaktivität [mg O₂/(g TM)]		
Minimum	2,57	1,96
Median	7,69	5,63
Mittelwert	14,09	8,56
Maximum	39,34	19,55
<i>Standardabweichung</i>	<i>13,64</i>	<i>6,17</i>
Sauerstoffaufnahme [mmol O₂/(kg oTM × h)]		
Minimum	2,49	2,32
Median	6,51	6,80
Mittelwert	11,66	7,81
Maximum	26,87	15,72
<i>Standardabweichung</i>	<i>9,20</i>	<i>4,85</i>

Tab. 28:
Sauerstoffverbrauch der Komposte
(jeweils Minimum, Median, Mittelwert,
Maximum, Standardabweichung);
oTM: organische Trockenmasse

3.5.2 Gasbildungspotenzial

Das Gasbildungspotenzial der Gärprodukte wurde über mindestens 28 Tage bei 37 °C bestimmt. Zugleich wurde der Methan-Anteil des gebildeten Biogases ermittelt. Der Wert für das Gasbildungspotenzial wird sowohl bezogen auf Frischsubstanz, Trockenmasse und auf organische Trockenmasse angegeben. Damit wird der Konsistenz und dem Organikgehalt der unterschiedlichen Proben Rechnung getragen und die Aussagekraft der Daten erhöht. Der vorgeschlagene Wert für das Ende der Abfalleigenschaft von [8] bezieht sich auf organische Trockenmasse.

Gärprodukte. Das auf Frischsubstanz bezogene Gasbildungspotenzial liegt bei den festen Vergärungsrückständen deutlich (Faktor 3–4) höher als bei den flüssigen Rückständen und Gärresten. Dies resultiert primär aus den niedrigeren Wassergehalten (beziehungsweise höheren Feststoffgehalten) der festen Vergärungsrückstände.

Bezogen auf Trockenmasse ergeben sich die größten energetisch nutzbaren Potenziale bei den Mitvergärungs-Gärresten, geringere bei den festen Vergärungsrückständen und den NawaRo-Gärresten und die niedrigsten Werte bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen.

Bezieht man das Gasbildungspotenzial auf die organische Trockenmasse, zeigen die festen Vergärungsrückstände und die Mitvergärungs-Gärreste mit Medianwerten von 0,22 l/(g oTM) sowie 0,20 l/(g oTM) die größte (Rest-)Biogasbildung. Die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände und die NawaRo-Gärreste liegen mit Werten von 0,15 l/(g oTM) sowie 0,14 l/(g oTM) circa 30 % niedriger. Der geforderte Maximalwert von 0,25 l/(g oTM) [8] wird von drei (von zehn) festen Vergärungsrückständen, zwei (von fünf) NawaRo- und einem (von drei) Mitvergärungs-Gärresten überschritten.

Der Methan-Anteil im bei 37 °C gebildeten Biogas schwankt zwischen 62,6 Vol.-% und 76,0 Vol.-%. Er ist mit 73,0 Vol.-% (Median) bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen am höchsten, gefolgt von den Mitvergärungs-Gärresten und den festen Vergärungsrückständen mit 70,5 Vol.-% sowie 69,8 Vol.-%. Den geringsten Methan-Anteil weisen mit durchschnittlich 64,2 Vol.-% die NawaRo-Gärreste auf.

Die unterschiedlich berechneten Gasbildungspotenziale und Methan-Anteile belegen, dass sowohl bei der (Bioabfall-)Vergärung als auch der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung ein gewisses Optimierungspotenzial vorhanden ist.

Tab. 29: Gasbildungspotenzial der Gärprodukte und Methan-Anteil des Biogases (jeweils Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung); oTM: organische Trockenmasse; FS: Frischsubstanz

Probenart	Gärprodukt			
	Vergärungsrückstand		Biogasgärrest	
Herkunft	Bioabfall/Grüngut	Bioabfall	NawaRo	Mitvergärung
Konsistenz	fest	flüssig	flüssig	flüssig
Untersuchungsjahr	2013/14			
Probenanzahl	10 ¹⁾	4	5	3
Gasbildungspotenzial [ml/(g FS)]				
Minimum	7,3	3,8	7,5	5,0
Median	33,3	10,2	11,0	8,5
Mittelwert	34,6	10,4	11,8	8,6
Maximum	67,5	17,3	17,4	12,2
<i>Standardabweichung</i>	<i>16,1</i>	<i>5,6</i>	<i>4,5</i>	<i>3,6</i>
Gasbildungspotenzial [ml/(g TM)]				
Minimum	21,5	42,3	77,2	75,1
Median	106,6	70,0	97,2	129,2
Mittelwert	103,6	70,2	129,5	125,4
Maximum	199,8	98,7	201,8	171,8
<i>Standardabweichung</i>	<i>48,0</i>	<i>23,1</i>	<i>62,9</i>	<i>48,4</i>
Gasbildungspotenzial [ml/(g oTM)]				
Minimum	46,1	86,6	112,5	110,4
Median	215,5	148,5	140,9	201,0
Mittelwert	200,2	138,0	196,1	192,0
Maximum	340,2	168,1	306,3	264,7
<i>Standardabweichung</i>	<i>83,6</i>	<i>35,5</i>	<i>93,4</i>	<i>77,5</i>
Methan-Anteil [Vol.-%]				
Minimum	65,0	69,5	62,6	65,4
Median	69,8	73,0	64,2	70,5
Mittelwert	68,6	72,6	65,7	70,6
Maximum	71,4	75,0	70,7	76,0
<i>Standardabweichung</i>	<i>2,7</i>	<i>2,7</i>	<i>3,2</i>	<i>5,3</i>

¹⁾ 9× Bioabfall, 1× Grüngut

4 Zusammenfassung und Bewertung

Bei der fünften Untersuchungskampagne zur Bestimmung der Schadstoffbelastung organischer Dünger beprobte das Bayerische Landesamt für Umwelt im Winter 2013/2014

- sieben Bioabfall- und zehn Grüngutkomposte,
- 14 Rückstände aus neun Bioabfall- und einer Grüngutvergärungsanlage (zehn Fest-, vier Flüssigproben) und
- acht Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen (fünf NawaRo-, drei Bioabfallmitvergärungsanlagen).

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen vier Untersuchungen wurden – soweit möglich – die gleichen Kompostierungs-, Vergärungs- und Biogasanlagen beprobt wie in den Jahren 2000 [2], 2002 [3], 2006 [4] und 2009 [1]. In zwei der fünf NawaRo-Biogasanlagen werden ausschließlich pflanzliche Ausgangssubstrate, in den anderen drei zusätzlich Gülle oder Mist eingesetzt.

Insgesamt wurden die 39 Proben auf folgende Schadstoffe untersucht, wobei die gegenüber der Untersuchung im Jahr 2009 [1] dazugekommenen Stoffe in kursiver Schrift dargestellt sind:

Schwermetalle nach BioAbfV [6]

- Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink

nach DüMV [7]

- *Arsen, Thallium*

Weitere Schwermetalle

- *Antimon, Barium, Kobalt, Molybdän, Selen, Silber, Uran*

Organische Schadstoffe

- 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[®], *Iso-E-Super[®]*: Synthetische Duftstoffe, endokrin wirksam
- Polybromierte Diphenylether, Hexabromcyclododecan, *Hexabrombenzol*, *Pentabrommethylbenzol*, *Pentabromtoluol*, *Tetrabrom-p-xylol*, *Decabromdiphenylethan*, *1,2-Bis[2,4,6-tribromphenoxy]ethan*: Flammenschutzmittel, persistent
- Thiabendazol: Fungizid
- Perfluorierte Tenside: oberflächenaktive Substanzen, persistent
- Triclosan: Desinfektionsmittel
- Methyl-Triclosan: Abbauprodukt von Triclosan

Für ein ganzheitliches Bild wurden auch die

- anorganischen (Summen-)Parameter Glühverlust, Salzgehalt, Nährstoffe: Stickstoff, Phosphor,
- phyto- und seuchenhygienischen sowie weiteren mikrobiologischen Parameter keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile, Salmonellen, aerobe Gesamtbakterienzahl, fäkalcoliforme Bakterien, Enterokokken und
- Parameter zum Ende der Abfalleigenschaft Atmungsaktivität von Komposten sowie Gasbildungspotenzial von Gärprodukten

ermittelt.

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen zu den einzelnen Schadstoff(klass)en und zusätzlichen Parametern werden als Wertebereiche (in der Regel gerundet), unterteilt in Komposte und Gärprodukte, zusammengefasst.

Schwermetalle [mg/(kg TM)]	Grenzwerte BioAbfV [6]		Komposte	Gärprodukte	
				insgesamt	NawaRo
<i>Blei</i>	100	150	< 15–47	< 15–80	< 15
<i>Cadmium</i>	1	1,5	0,21–0,54	0,13–0,76	0,13–0,32
<i>Chrom</i>	70	100	< 10–38	< 10–39	< 10–24
<i>Nickel</i>	35	50	7,2–28	< 5–31	< 5–31
<i>Quecksilber</i>	0,7	1	0,057–0,67	0,011–0,15	0,011–0,037

Die oben genannten fünf Schwermetalle unterschreiten die niedrigeren Grenzwerte der BioAbfV [6], die für die NawaRo-Gärreste nicht einschlägig ist. Die Gehalte in den (bisher höher belasteten) Bioabfallkomposten sind tendenziell rückläufig, die in den (bisher geringer belasteten) Grüngutkomposten in der Regel eher leicht ansteigend, so dass sich die Schwermetallkonzentrationen in den beiden Kompostarten aufeinander zubewegen. Die Gärprodukte weisen ähnlich niedrige Schwermetallgehalte auf wie die Komposte.

<i>Kupfer</i>	70	100	22–61	15–150	19–150
<i>Zink</i>	300	400	110–210	77–1.100	77–1.100

Hinsichtlich der Schwermetalle Kupfer und Zink halten die Komposte inzwischen die Grenzwerte der BioAbfV [6] ein. Bei den Gärprodukten wurden Überschreitungen festgestellt; die höheren Grenzwerte der BioAbfV [6] wurden zwei Mal überschritten: ein Mal (Cu) bei den Mitvergärungs-Gärresten, ein weiteres Mal (Zn) bei den festen Bioabfallvergärungsrückständen. Gegenüber früheren Untersuchungen sind die Gehalte in den Bioabfallkomposten eher abnehmend, in den Grüngutkomposten nahezu unverändert (Cu) oder leicht zunehmend (Zn).

Die Reste aus der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen/Wirtschaftsdüngern sind hinsichtlich der fünf oben genannten Schwermetalle am geringsten belastet. Sie zeigen im Vergleich zu den Grenzwerten der Düngemittelverordnung (DüMV) [7] geringe Schwermetallbelastungen. Für die Schwermetalle Kupfer und Zink treten etwas höhere Konzentrationen auf als in den Komposten.

Schwermetalle [mg/(kg TM)]	Grenzwert DüMV [7][7]	Komposte	Gärprodukte	
			insgesamt	NawaRo
<i>Antimon</i>	–	0,42–1,2	< 0,25–6,3	< 0,25–0,36
<i>Arsen</i>	40	3,5–6,9	< 1–7,9	< 1–3,0
<i>Barium</i>	–	69–220	< 50–730	< 50–69
<i>Kobalt</i>	–	2,3–13	0,96–6,3	0,96–3,0
<i>Molybdän</i>	–	0,89–2,8	1,0–5,5	2,5–5,5
<i>Selen</i>	–	< 0,5–0,64	< 0,5–2,2	< 0,5–1,5
<i>Silber</i>	–	< 1	< 1	< 1
<i>Thallium</i>	1,0	< 0,1–0,27	< 0,1–0,13	< 0,1
<i>Uran</i>	–	0,39–2,0	0,074–1,7	0,074–1,5

Die Gehalte an Antimon, Arsen, Kobalt, Molybdän, Selen, Thallium und Uran bewegen sich im bis zu einstelligen mg/kg-Bereich. Die Arsen- und Thalliumgrenzwerte der DüMV [7] werden von allen Proben sicher eingehalten. Silber konnte in keiner Probe nachgewiesen werden. Hinsichtlich der neun Schwermetalle sind die NawaRo-Gärreste am geringsten belastet.

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
<i>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [mg/(kg TM)]</i>	0,85–4,2	0,81–6,7	0,81–6,2

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

<i>Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F) [ng I-TEQ/(kg TM)]</i>	1,5–8,1	0,07–7,0	0,07–1,1
--	---------	----------	----------

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 Untersuchung im Jahr 2000 [2]. Bei den Gärprodukten entsprechen die Konzentrationen in den Bioabfallvergärungsrückständen denen der Komposte, während die Gehalte in den Gärresten der beprobten landwirtschaftlichen Biogasanlagen bis auf eine Ausnahme (NawaRo-Gärrest) um eine Größenordnung niedriger sind.

<i>Polychlorierte Biphenyle (Σ PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) ⁾ [μg/(kg TM)]</i>	6,3–29	0,85–40	0,85–3,2
---	--------	---------	----------

⁾ Indikator-PCB

Für die Indikator-PCB gilt Ähnliches wie für die PCDD/F: bei den untersuchten Komposten ein relativ schmaler Wertekorridor sowie ein deutlicher Rückgang der Gehalte seit der Untersuchung im Jahr 2000 [2], bei den Gärprodukten niedrigere Konzentrationen in den Gärresten aus Biogasanlagen (insbesondere NawaRo-Gärresten) als in den Bioabfallvergärungsrückständen (vergleichbar Grüngutkomposte).

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
<i>Polychlorierte Biphenyle</i> (Σ PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189) ^{*)} [ng WHO-TEQ/(kg TM)]	0,92–3,1	0,02–2,8	0,02–0,41

^{*)} dioxin-like PCB (dl-PCB)

Auch die dl-PCB Werte ergeben ein ähnliches Bild wie die PCDD/F: bei den Komposten ein relativ enger Bereich, vergleichbare Konzentrationen in Bioabfall- und Grüngutkomposten sowie bei den Grüngutkomposten leicht rückläufige Gehalte gegenüber der Untersuchung im Jahr 2002 [3]. Bei den Gärprodukten 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> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10	< 10–86	< 10
--	------	---------	------

Die Biphenylgehalte liegen in allen Kompostproben, in den meisten festen und flüssigen (Bioabfall-) Vergärungsrückständen sowie in nahezu allen Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Ausnahme: ein Mitvergärungs-Gärrest) unter der Bestimmungsgrenze. Die Gärprodukte über der Bestimmungsgrenze weisen Konzentrationen im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf {Mitvergärungs-Gärrest < flüssige < feste (Bioabfall-)Vergärungsrückstände}.

<i>Hexachlorbenzol (HCB)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	0,59–1,7	0,23–2,8	0,23–0,64
---	----------	----------	-----------

Die Gehalte an Hexachlorbenzol betragen in den Komposten unter 2 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$; gegenüber den Werten der Untersuchung im Jahr 2000 [2] zeigen sie einen (für die Bioabfallkomposte deutlich) abnehmenden Trend. In den festen und flüssigen (Bioabfall-)Vergärungsrückständen sind die Konzentrationen vergleichbar mit denen der Komposte, sie bleiben für alle Proben im unteren einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich. Die Gärreste der landwirtschaftlichen Biogasanlagen (insbesondere der NawaRo-Anlagen) weisen niedrigere Gehalte auf als die Komposte.

<i>Pentachlorphenol (PCP)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10	< 10–340	< 10–340
--	------	----------	----------

Pentachlorphenol liegt in allen Kompostproben in Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze vor. Daraus resultiert ein Rückgang der Belastung sowohl für die Bioabfall- als auch Grüngutkomposte. Die festen Vergärungsrückstände und die Mitvergärungs-Gärreste zeigen ebenfalls Gehalte unter der Bestimmungsgrenze. Dagegen weisen die Hälfte der flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände und die meisten NawaRo-Gärreste Konzentrationen im zweistelligen, ein NawaRo-Gärrest (Ausreißer) im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf.

<i>Ortho-Phenylphenol</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10–37	< 10–560	< 10
--	---------	----------	------

Die Konzentrationen an ortho-Phenylphenol bleiben in nahezu allen untersuchten Kompostproben (Ausnahme: ein Bioabfallkompost) und in allen NawaRo-Gärresten unter der Bestimmungsgrenze. Die festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände weisen Gehalte im zwei- bis unteren dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf. Die höchste Belastung zeigen die Mitvergärungs-Gärreste (bis dreistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich).

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
<i>Bisphenol A</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10–170	< 10–1.000	< 10–390

Bisphenol A tritt in den untersuchten Komposten in Konzentrationen von kleiner Bestimmungsgrenze bis in den unteren dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf. Während die aktuelle Untersuchung für die Bioabfallkomposte die niedrigsten Werte seit dem Jahr 2002 [3] ergibt, zeigen die Grüngutkomposte keine Abnahme der (insgesamt geringeren) Belastung. Mit Ausnahme des festen Grüngutvergärungsrückstands und der NawaRo-Gärreste (größtenteils mit Gehalten unter der Bestimmungsgrenze) sind die Gärprodukte mit Konzentrationen bis in den unteren einstelligen mg/kg -Bereich (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand) deutlich stärker (mindestens Faktor 10) mit Bisphenol A belastet als die Komposte.

<i>Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)</i> [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]	0,6–9,3	1,9–24	1,9–5,9
---	---------	--------	---------

Von allen analysierten organischen Schadstoffen ist DEHP der Parameter mit den höchsten Konzentrationen: Die Maximalwerte reichen bis in den unteren zweistelligen mg/kg -Bereich (je zwei feste und flüssige Bioabfallvergärungsrückstände sowie zwei Mitvergärungs-Gärreste). 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 Gärprodukte weisen höhere DEHP-Konzentrationen auf als die Komposte; die Belastung steigt in der Reihenfolge feste (Bioabfall-)Vergärungsrückstände < NawaRo-Gärreste < flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste.

<i>Di-isononyl-phthalat (DINP)</i> [$\text{mg}/(\text{kg TM})$]	< 0,5–1,7	< 0,5–15	< 0,5
---	-----------	----------	-------

Ebenfalls hohe, aber etwas geringere Maximalgehalte (insbesondere in den Gärprodukten) zeigt DINP: Auch für diesen Parameter wurden zweistellige mg/kg -Werte festgestellt (ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand, ein Mitvergärungs-Gärrest (Ausreißer)). Im Vergleich zu DEHP sind die Komposte allerdings deutlich geringer belastet: Von den Bioabfallkomposten liegen knapp die Hälfte, von den Grüngutkomposten nahezu alle Proben unter der (vergleichsweise hohen) Bestimmungsgrenze. Während bei den Gärprodukten insbesondere die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände hohe Konzentrationen aufweisen, entsprechen die NawaRo-Gärreste mit Gehalten unter der Bestimmungsgrenze den Grüngutkomposten.

<i>Iso-Nonylphenol</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 100–160	< 100–1.100	< 100–220
---	-----------	-------------	-----------

Die Komposte sind weniger mit iso-Nonylphenol belastet als die Gärprodukte, wobei die Bioabfallkomposte (gut die Hälfte aller Proben unter der Bestimmungsgrenze) insgesamt geringfügig höhere Konzentrationen aufweisen als die Grüngutkomposte (nahezu alle Proben unter der Bestimmungsgrenze). Für beide Kompostarten sind die Gehalte seit der Untersuchung im Jahr 2002 [3] rückläufig. In nahezu allen Gärprodukten liegen die Konzentrationen im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich; in einem Fall (ein flüssiger Bioabfallvergärungsrückstand) ist auch ein Gehalt im einstelligen mg/kg -Bereich festzustellen.

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
<i>Zinnorganische Verbindungen</i> [$\mu\text{g Sn}/(\text{kg TM})$]			
<i>Monobutylzinn</i>	< 1–13	< 1–24	< 1–3,7
<i>Monooktylzinn</i>	< 1–20	< 1–17	< 1

Monobutyl- und -oktylzinn sind – neben Dioktylzinn (lediglich in einer Probe knapp über der Bestimmungsgrenze) – die einzigen der acht analysierten zinnorganischen Verbindungen, die in den Bioabfallkomposten gefunden wurden: Monobutylzinn häufiger (71 % der Proben), Monooktylzinn in höheren Konzentrationen. Die Gehalte bewegen sich – wie bei den vorangegangenen Untersuchungen – teilweise unter der Bestimmungsgrenze, teilweise im ein- bis unteren zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich. Grüngutkomposte wurden nicht auf diese Schadstoffklasse untersucht. Von den Gärprodukten sind die NawaRo-Gärreste geringer als die Bioabfallkomposte belastet: Die Konzentrationen an Monobutyl- und -oktylzinn liegen bis auf eine Probe unter der Bestimmungsgrenze. Die anderen Gärprodukte (feste und flüssige Bioabfallvergärungsrückstände, Mitvergärungs-Gärreste) weisen hinsichtlich Monobutyl- und -oktylzinn teilweise höhere Gehalte (zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) und Häufigkeiten (in allen (Monobutylzinn) beziehungsweise 75 % (Monooktylzinn) der Proben) auf als die Bioabfallkomposte und NawaRo-Gärreste.

Die höher alkylierten zinnorganischen Verbindungen Di-, Tributyl- und Tricyclohexylzinn kommen lediglich in den Gärprodukten (außer NawaRo-Gärresten) vor. Insbesondere Dibutyl- und -oktylzinn sind in hohen Konzentrationen (bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) und Häufigkeiten (in allen (Dibutylzinn) beziehungsweise 94 % (Dioktylzinn) der Proben) anzutreffen. Tributyl- und -cyclohexylzinn wurden zwar nur in jeweils einer Probe (feste Vergärungsrückstände) gefunden, die ermittelten Gehalte (zwei- und dreistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) sind jedoch die höchsten Werte der untersuchten zinnorganischen Verbindungen (auch im Vergleich zu früheren Untersuchungen seit 2002 [3, 4, 1]).

Tetrabutylzinn und die aromatische zinnorganische Verbindung Triphenylzinn sind stets unter der Bestimmungsgrenze.

<i>Galaxolide</i> [®] (HHCB) [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 3–20	< 3–230	< 3–5
--	--------	---------	-------

Die Bioabfallkomposte weisen in der Regel höhere HHCB-Gehalte (ein- bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) auf als die Grüngutkomposte (unter der Bestimmungsgrenze bis meist einstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich). Die NawaRo-Gärreste zeigen Konzentrationen im Bereich der Grüngutkomposte, die anderen Gärprodukte sind deutlich (mindestens Faktor 9) höher belastet (Gehalte bis in den dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich).

<i>Tonalide</i> [®] (AHTN) [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 3–30	< 3–30	< 3
--	--------	--------	-----

Die Konzentrationen von AHTN in den einzelnen Probenarten verlaufen ähnlich HHCB: Bei den Bioabfallkomposten sind höhere Gehalte (unter der Bestimmungsgrenze bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) als bei den Grüngutkomposten (unter der Bestimmungsgrenze) festzustellen, bei den Gärprodukten steigen die Werte in der Reihenfolge NawaRo-Gärreste (vergleichbar den Grüngutkompostgehalten) < feste (Bioabfall-)Vergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste, flüssige Bioabfallvergärungsrückstände an. Die Unterschiede zwischen den organischen Düngeprodukten sind jedoch geringer ausgeprägt, die Konzentrationen – insbesondere bei den Gärprodukten – niedriger (NawaRo-Gärreste: unter der Bestimmungsgrenze, andere Dünger: bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) als bei HHCB.

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
<i>Iso-E-Super[®] (OTNE)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 3–30	15–8.200	20–40

Auch OTNE zeigt bei den Komposten ähnliche Konzentrationsverhältnisse wie HHCB: in den Bioabfallkomposten höhere Gehalte (ein- bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) als in den Grüngutkomposten (unter der Bestimmungsgrenze bis einstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich). Wesentlich höhere Konzentrationen als die Komposte weisen die Gärprodukte auf: Die Gehalte steigen von den NawaRo-Gärresten (zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) über die festen und flüssigen (Bioabfall-)Vergärungsrückstände bis zu den Mitvergärungs-Gärresten (drei- bis vierstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) an.

<i>Polybromierte Diphenylether (PBDE)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	4,3–26	0,28–58	0,28–3,5
--	--------	---------	----------

Die PBDE-Gehalte in den Bioabfallkomposten (ein- bis zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) liegen geringfügig höher als in den Grüngutkomposten (vorwiegend einstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich). Bei den Gärprodukten sind die NawaRo-Gärreste über eine Größenordnung niedriger, die Mitvergärungs-Gärreste und die festen (Bioabfall-)Vergärungsrückstände vergleichbar und die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände höher mit PBDE belastet als die Komposte.

<i>Hexabromcyclododecan (HBCD)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	0,14–6.100	< 0,01–2.100	< 0,01–28
---	------------	--------------	-----------

Ausreißer bedingt streuen die Konzentrationen an HBCD sowohl in den Komposten als auch in den Gärprodukten stark (vier beziehungsweise fünf Größenordnungen). Die Bioabfallkomposte weisen höhere Gehalte auf als die Grüngutkomposte. In beiden Kompostarten liegt HBCD in Konzentrationen bis in den zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich vor; zwei Proben (ein Bioabfallkompost im unteren dreistelligen, ein Grüngutkompost im vierstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) sind jedoch deutlich stärker belastet. Abgesehen von zwei weiteren Ausreißern bei den Gärprodukten (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand im vierstelligen, ein NawaRo-Gärrest im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) weisen die NawaRo-Gärreste Konzentrationen unter 0,4 $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$, die anderen Gärprodukte bis in den unteren dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf.

<i>Thiabendazol</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 10–21	< 10–280	< 10
--	---------	----------	------

Die Thiabendazol-Gehalte in den untersuchten Komposten liegen – wie schon bei den vorangegangenen Untersuchungen – unter der Bestimmungsgrenze (mit Ausnahme einer Bioabfallkompostprobe). Die NawaRo-Gärreste zeigen Kompost ähnliche Konzentrationen, die anderen Gärprodukte Gehalte im zwei- bis in den dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich.

<i>Perfluorierte Tenside (PFT)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]			
<i>Perfluorooctansäure (PFOA)</i>	< 2	< 2	< 2
<i>Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)</i>	< 2–2,4	< 2	< 2

Von allen zehn analysierten perfluorierten Tensiden wurde lediglich in einer Probe (Grüngutkompost) als einziges perfluoriertes Tensid PFOS über der Bestimmungsgrenze gefunden. Der Grenzwert und der Wert für die Kennzeichnungspflicht der DüMV [7] für die Summe aus PFOA und PFOS {0,1 beziehungsweise 0,05 $\text{mg}/(\text{kg TM})$ } werden von allen Kompostproben und Gärprodukten deutlich unterschritten.

Organische Schadstoffe	Komposte	Gärprodukte	
		Insgesamt	NawaRo
<i>Triclosan</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 3–8	< 3–570	< 3–3

Triclosan liegt in den Bioabfallkomposten sowohl im einstelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich als auch unter der Bestimmungsgrenze vor; in den Grüngutkomposten kommt es in keiner Probe in Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze vor. Bei den Gärprodukten sind bis auf die untersuchten NawaRo-Gärreste die Triclosan-Gehalte höher als bei den (Bioabfall-)Komposten. Die festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände weisen Konzentrationen im ein- bis zweistelligen, die Mitvergärungs-Gärreste im zwei- bis dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich auf. In den NawaRo-Gärresten ist Triclosan lediglich in einer Probe (Gehalt an der Bestimmungsgrenze) bestimmbar.

<i>Methyl-Triclosan (TCLM)</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	< 3–6	< 3–10	< 3–10
---	-------	--------	--------

Die Konzentrationen von TCLM als Abbauprodukt von Triclosan liegen in den Komposten bis auf eine Probe (ein Bioabfallkompost) unter der Bestimmungsgrenze. TCLM ist in den Gärprodukten (Ausnahme: NawaRo-Gärreste) in geringeren Gehalten als Triclosan vorhanden. Die festen und flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände weisen Konzentrationen unter oder nahe der Bestimmungsgrenze auf. Die Gärreste von landwirtschaftlichen Biogasanlagen (NawaRo, Mitvergärung) zeigen Werte bis in den unteren zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich.

<i>Decabromdiphenylethan</i> [$\mu\text{g}/(\text{kg TM})$]	1,6–36	< 0,02–400	< 0,02–3,2
---	--------	------------	------------

Decabromdiphenylethan (DBDPE) ist das einzige der sechs neu in den Untersuchungsumfang aufgenommenen polybromierten Flammschutzmittel, das in den Komposten und Gärprodukten in Konzentrationen im bis zu zweistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich enthalten ist. Die Bioabfallkomposte (meist zweistelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich) weisen höhere Belastungen auf als die Grüngutkomposte (meist einstelliger $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich). In den festen und flüssigen (Bioabfall-)Vergärungsrückständen sowie den Mitvergärungs-Gärresten liegen die DBDPE-Gehalte im Bereich der Komposte, in den NawaRo-Gärresten deutlich (Faktor 7) unter den (Grüngut-)Kompostkonzentrationen. Der feste und flüssige Rückstand einer Bioabfallvergärungsanlage ist höher belastet (jeweils Ausreißer im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich).

Die fünf weiteren polybromierten Flammschutzmittel sind in Konzentrationen (teilweise deutlich) unter $0,9 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ in den Komposten und $1,7 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ in den Gärprodukten enthalten. Die Bioabfallkomposte sind in der Regel höher belastet als die Grüngutkomposte, die Gärprodukte höher als die (Bioabfall-)Komposte (Ausnahme: Tetrabrom-p-xylo).

Umwelthygienische Parameter	Komposte	Gärprodukte	
		Insgesamt	NawaRo
<i>Keimfähige Samen, austriebsfähige Pflanzenteile [1/(l Substrat)]</i>	0–0,33	0–0,67	0

Hinsichtlich der phytohygienischen Eigenschaften erfüllen alle untersuchten Komposte und Gärprodukte die Anforderung der BioAbfV [6] von maximal zwei keimfähigen Samen oder austriebsfähigen Pflanzenteilen pro Liter Substrat. Bis auf eine Probe (ein fester Bioabfallvergärungsrückstand: 0,67 Keimpflanzen je Liter Substrat) sind alle Proben frei von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen (das heißt maximal 0,5 Keimpflanzen je Liter Substrat).

<i>Salmonellen [1/(50 g Substrat)]</i>	0	0–1	0
--	---	-----	---

Die seuchenhygienische Qualität der Behandlungsprodukte regelt die BioAbfV [6] über die geforderte vollständige Abwesenheit von Salmonellen in 50 g untersuchter Probe. Alle beprobten Komposte und Gärreste aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen (NawaRo, Mitvergärung) halten diese Anforderung ein. Bei zwei (von vier) flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen wurden Salmonellen nachgewiesen, die in den hygienisierten, abgabefertigen Behandlungsendprodukten nicht enthalten sein dürfen. Die beiden Betreiber wurden aufgefordert, diesem Sachverhalt nachzugehen.

<i>Aerobe Gesamtbakterienzahl [KBE/(g FS)]</i>	$6,5 \cdot 10^6 - 4,1 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^5 - 3,7 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^5 - 9,0 \cdot 10^6$
--	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Hinsichtlich der aeroben Gesamtbakterienzahl wird in den Hinweisen [20] zum Vollzug der BioAbfV (1998) [16] ein Richtwert für die Behandlungsprodukte von $5 \cdot 10^8$ KBE/(g FS) genannt. Dieser wird von allen untersuchten Komposten und Gärprodukten eingehalten. Während die Komposte und festen Vergärungsrückstände im üblichen Wertebereich von 10^8 KBE/(g FS) liegen, sind die Gehalte der flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände geringfügig und die der Biogasanlagengärreste deutlich (knapp eine Größenordnung) niedriger.

<i>Fäkalcoliforme Bakterien [KBE/(g FS)]</i>	$< 3,2 - 4,2 \cdot 10^5$	$< 3,2 - 8,3 \cdot 10^4$	3,2–210
--	--------------------------	--------------------------	---------

Der vorgeschlagene Richtwert für fäkalcoliforme Bakterien von $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) [20] wird von einem Grüngutkompost und einem flüssigen Bioabfallvergärungsrückstand (jeweils Ausreißer) überschritten. Für die Gehalte ergibt sich folgende Reihenfolge: flüssige Bioabfallvergärungsrückstände < Mitvergärungs-Gärreste < Bioabfallkomposte < NawaRo-Gärreste < Grüngutkomposte < feste Vergärungsrückstände.

<i>Enterokokken [KBE/(g FS)]</i>	$< 3,2 - 2,2 \cdot 10^6$	$< 3,2 - 2,2 \cdot 10^6$	$< 3,2 - 2,2 \cdot 10^4$
----------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Der Gehalt an Enterokokken in den Behandlungsprodukten schwankt zwischen drei (Mitvergärungs-Gärreste) und sechs Größenordnungen (Bioabfallkomposte, feste und flüssige Vergärungsrückstände). Der lediglich für Gärprodukte (außer NawaRo-Gärreste) angegebene Richtwert von $5 \cdot 10^3$ KBE/(g FS) [20] wird von drei festen, zwei (von vier) flüssigen (Bioabfall-)Vergärungsrückständen und einem Mitvergärungs-Gärrest überschritten.

Parameter Ende der Abfalleigenschaft	Komposte	Gärprodukte	
		insgesamt	NawaRo
Sauerstoffaufnahme [mmol O ₂ /(kg oTM × h)]	2,3–27	–	–

Die in den Komposten bestimmte Sauerstoffaufnahme ist bei Bioabfall- und Grüngutkomposten vergleichbar und bewegt sich im ein- bis zweistelligen mmol/(kg × h)-Bereich. Der Maximalwert (ein Bioabfallkompost) liegt über dem vorgeschlagenen Wert von maximal 25 mmol O₂/(kg oTM × h) für einen vollständig stabilisierten Kompost [8].

Gasbildungspotenzial [l/(g oTM)]	–	0,046–0,34	0,11–0,31
---	---	------------	-----------

Das auf organische Trockenmasse bezogene Gasbildungspotenzial der Gärprodukte liegt im zwei- bis dreistelligen ml/g-Bereich. Es ist bei den flüssigen Bioabfallvergärungsrückständen und NawaRo-Gärresten niedriger als bei den festen Vergärungsrückständen und Mitvergärungs-Gärresten. Das Kriterium von maximal 0,25 l/(g oTM) [8] für das Ende der Abfalleigenschaft wird von drei festen Vergärungsrückständen, zwei NawaRo- und einem Mitvergärungs-Gärrest nicht eingehalten.

Nachstehende Tableaus zeigen die Untersuchungsergebnisse der Komposte und Gärprodukte im Überblick für Schwermetalle und organische Schadstoffe. Dazu wurden die Medianwerte mit dem maximalen Medianwert des jeweiligen Parameters normiert. Der resultierende Wertebereich $0 < x \leq 1$ wurde in vier 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 ++++

Bei dem Behandlungsprodukt, bei dem der maximale Medianwert ($x = 1$) auftritt, sind die vier Pluszeichen fett dargestellt. Bei Medianwerten, die unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen, sind diese in Klammern gesetzt. Diese Darstellung liefert keine Aussage über die absolute Höhe der Belastung der einzelnen Dünger, sondern verdeutlicht die Lage der Konzentrationen im Vergleich zueinander.

	Bioabfall- kompost	Grüngut- kompost	Vergärungsrück- stand (fest)	Bioabfallvergärungs- rückstand (flüssig)	NawaRo- Gärrest	Mitvergärungs- Gärrest
Schwermetalle	Blei	++++	++++	+++	++++	(+++)
	Cadmium	+++	+++	++	++++	++
	Chrom	+++	+++	+++	++++	(++)
	Kupfer	+++	+++	+++	++++	++
	Nickel	+++	+++	+++	++++	++
	Quecksilber	++++	++++	+++	++++	+
	Zink	+++	+++	+++	++++	++
	Arsen	++++	++++	+++	++++	++
	Thallium	++++	++++	(+++)	++++	(+++)
	Antimon	+++	+++	+++	++++	(++)
	Barium	+++	++++	+++	++++	(++)
	Kobalt	++++	++++	+++	++++	++
	Molybdän	++	++	+++	++++	++++
	Selen	++	++	(++)	+++	++
	Silber	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)
	Uran	++++	++++	+++	++++	+

Der Vergleich der auf Trockenmasse bezogenen, normierten Medianwerte zeigt, dass die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände bei nahezu allen Schwermetallen (mit) die höchsten Wertebereiche aufweisen. Bioabfall- und Grüngutkomposte weisen ähnliche Wertebereiche auf. Die NawaRo-Gärreste schneiden in diesem Vergleich bezüglich der Schwermetallbelastung am besten ab.

	Bioabfall- kompost	Grüngut- kompost	Vergärungsrück- stand (fest)	Bioabfallvergärungs- rückstand (flüssig)	NawaRo- Gärrest	Mitvergärungs- Gärrest
Organische Schadstoffe	PAK	++++	+++	++++	++++	+++
	PCDD/F	++++	+++	+++	++++	+
	Indikator-PCB	++++	++++	+++	+++	+
	di-PCB	++++	++++	+++	+++	+
	Biphenyl	(+++)	(+++)	(+++)	++++	(+++)
	HCB	++++	++++	+++	++++	++
	PCP	(+)	(+)	(+)	++	++++
	ortho-Phenylphenol	(+)	(+)	++	++	(+)
	Bisphenol A	+	+	++++	++++	+
	DEHP	+	+	+++	++++	+++
	DINP	+	(+)	+++	++++	(+)
	iso-Nonylphenol	(+)	(+)	++	++++	++
	Monobutylzinn	+	-	++++	+++	(+)
	Monooktylzinn	++	-	+++	(+)	(+)
	HHCb	+	+	++	++++	+
	AHTN	+	+	+++	++++	(+)
	OTNE	+	+	++	++	+
	PBDE	++	++	+++	++++	+
	HBCD	++	+	++++	++++	+
	Thiabendazol	(+)	(+)	++	+++	(+)
	PFOA	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)
	PFOS	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)	(++++)
	Triclosan	+	(+)	+	+	(+)
	TCLM	(++)	(++)	(++)	++	++++
	DBDPE	+++	+	++	++++	+

Bezüglich der organischen Schadstoffe sind die flüssigen Bioabfallvergärungsrückstände bei den meisten Untersuchungsparametern das Behandlungsprodukt mit den höchsten Gehalten. Danach folgen die festen Vergärungsrückstände und die Mitvergärungs-Gärreste, wobei Letztere bei den polychlorierten Schadstoffen PCDD/F, PCB und PCP (vergleichsweise) geringe Konzentrationen aufweisen. Die Bioabfallkomposte sind meist ähnlich oder etwas höher belastet als die Grüngutkomposte. Die niedrigsten Medianwerte (mit Ausnahme PAK, PCP und TCLM) zeigen die NawaRo-Gärreste.

Die Ergebnisse der Untersuchung 2013/2014 der bayerischen Komposte und Gärprodukte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Schwermetalle

- Die Bioabfallkomposte gleichen sich in den Schwermetallgehalten den Grüngutkomposten immer mehr an (Schadstoffentfrachtung). Bei den Grüngutkomposten ist keine Konzentrationsabnahme zu verzeichnen. Die Grenzwerte der BioAbfV [6] werden von den Komposten inzwischen auch für Kupfer und Zink eingehalten.

- Bei den Gärprodukten sind die Vergärungsrückstände aus der Bioabfallbehandlung mit Schwermetallen höher belastet als die Gärreste aus Biogasanlagen, die landwirtschaftliche Produkte und Abfälle verwerten. Im Vergleich der sechs untersuchten Stoffströme weisen die NawaRo-Gärreste für die Mehrzahl der Schwermetalle die niedrigsten Konzentrationen auf.

Organische Schadstoffe

- Die Komposte und Vergärungsrückstände zeigen hinsichtlich PAK, den chlorierten Schadstoffen PCDD/F, PCB und HCB keine allzu gravierenden Unterschiede in der Schadstoffbelastung. Mit Ausnahme der PAK sind die Gärreste aus Biogasanlagen (NawaRo, Mitvergärung) deutlich geringer belastet. Der höhere Grenzwert für die Summe PCDD/F + dl-PCB der DüMV [7] wird von allen Proben, der niedrigere bis auf eine Ausnahme eingehalten.
- PCP ist der einzige organische Schadstoff, der gegenüber den anderen untersuchten Sekundärrohstoffdüngern in den NawaRo-Gärresten in höheren Konzentrationen auftritt.
- Bezüglich Bisphenol A, Weichmachern, künstlichen Duftstoffen und polybromierten Flammschutzmitteln unterscheiden sich die Komposte von den Gärprodukten (Ausnahme: NawaRo-Gärreste) meist durch deutlich geringere Gehalte.
- Das Desinfektionsmittel Triclosan und sein Abbauprodukt TCLM finden sich vor allem in den Mitvergärungs-Gärresten.

Umwelthygienische Parameter

- Hinsichtlich der Phytohygiene waren alle Proben unbedenklich und hielten die Vorgaben der BioAbfV [6] ein.
- Die seuchenhygienischen Anforderungen der BioAbfV [6] wurden von allen Komposten und Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfüllt.

Der bei etlichen Schadstoffen festzustellende Rückgang sowie die Angleichung der Konzentrationen der Bioabfallkomposte an die überwiegend immissionsbedingten Gehalte der Grüngutkomposte belegt die Nachhaltigkeit des bayerischen Grundsatzes „Qualität vor Quantität“ bei der Abfallverwertung. Eine Aussage, die grundsätzlich auch auf die Produkte landwirtschaftlicher Biogasanlagen zutrifft.

Danksagung

Unser verbindlicher Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Vorhabens. Dadurch konnten die Kompostanalysen der Jahre 2000, 2002, 2006 und 2009 fortgeschrieben und erweitert werden. Ebenso danken wir den Betreibern der Kompostierungs-, Vergärungs- und Biogasanlagen, die offen für unser Anliegen waren und uns bei der Probenahme tatkräftig unterstützten.

Insbesondere danken wir den Kolleginnen und Kollegen der Referate 33, 72, 74 und 75 für die Durchführung der Probenahmen und der umfangreichen, aufwendigen Probenvorbereitung und Analytik.

Ohne die engagierte Mitwirkung der genannten Beteiligten wäre eine Untersuchung in diesem Umfang kaum realisierbar gewesen.

Literatur

- [1] ANONYM:
Verwertung biogener Abfälle: Rückstände und Schadstoffgehalte.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2010, 47 S.
- [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, 66 S.
- [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, 99 S.
- [4] ANONYM:
Schadstoffgehalte von Komposten und Vergärungsrückständen.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007, 28 S.
ISBN 978-3-940009-46-3
- [5] ANONYM:
Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts. Vom 24. Februar 2012.
Artikel 1: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).
BGBl. I (2012) 10, S. 212–264.
Zuletzt geändert durch § 44 Abs. 4 des Gesetzes zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen (Tiergesundheitsgesetz – TierGesG) vom 22.05.2013.
BGBl. I (2013) 25, S. 1324–1347.
Berichtigt durch Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen vom 07.10.2013.
BGBl. I (2013) 60, S. 3753
- [6] ANONYM:
Bekanntmachung der Neufassung der Bioabfallverordnung. Vom 4. April 2013.
BGBl. I (2013) 16, S. 658–708.
Zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung zur Fortentwicklung der abfallrechtlichen Überwachung vom 5. Dezember 2013.
BGBl. I (2013) 69, S. 4043–4064
- [7] ANONYM:
Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV). Vom 5. Dezember 2012.
BGBl. I (2012) 58, S. 2482–2544.
Erste Verordnung zur Änderung der Düngemittelverordnung. Vom 27. Mai 2015.
BGBl. I (2015) 21, S. 886–892
- [8] SAVEYN, H.; EDER, P.:
End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. Edited by European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.
Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, 312 S.
<http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC87124.pdf> (abgerufen am 07.11.2014)

- [9] ANONYM:
Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2013. Informationen aus der Abfallwirtschaft.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2014, 100 S.
- [10] ANONYM:
Datenbankauszug „Biogas-Betreiber-Datenbank Bayern“ (BBD). Thema: Biogas in Zahlen – Bayern zum 31.12.2013 (Stand 28.02.2014).
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, München, 2014, 3 S.
http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iba/dateien/bbd_biogasinzahlen_bayern_20131231_stat.pdf
(abgerufen am 07.11.2014)
- [11] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY:
Publication of toxic pollutant list. FRL 849-3.
Federal Register 43 (1978) 21, S. 4108–4109
- [12] OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION AS A SPECIAL EDITOR OF THE FEDERAL REGISTER:
Title 40. Protection of Environment. Parts 400 to 424. Revised as of July 1, 2012. Appendix A to Part 423 – 126 Priority Pollutants.
Washington DC, 2012, S. 653–654
- [13] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION/COMMITTEE ON THE CHALLENGES OF MODERN SOCIETY:
Pilot Study on International Information Exchange on Dioxins and Related Compounds: International Toxicity Equivalency Factor (I-TEF) Method of Risk Assessment for Complex Mixtures of Dioxins and Related Compounds.
NATO/CCMS. Report No. 176, August 1988, 26 S.
- [14] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION/COMMITTEE ON THE CHALLENGES OF MODERN SOCIETY:
Pilot Study on International Information Exchange on Dioxins and Related Compounds: Scientific Basis for the Development of the International Toxicity Equivalency Factor (I-TEF) Method of Risk Assessment for Complex Mixtures of Dioxins and Related Compounds.
NATO/CCMS. Report No. 178, Dezember 1988, 56 S.
- [15] ANONYM:
Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate.
5. Auflage.
Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Köln-Gremberghoven, 2006
- [16] ANONYM:
Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). Vom 21. September 1998.
BGBl. I (1998) 65, S. 2955–2981
- [17] BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E. V. (BGK):
Gütesicherung > Anforderungen an die Endproduktqualität.
Güteanforderungen für Frischkompost.
http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Guetesicherung/GP_FK_2012.pdf
Güteanforderungen für Fertigungskompost.
http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Guetesicherung/GP_K_2012.pdf
Güteanforderungen für Substratkompost.
http://www.kompost.de/fileadmin/docs/guetesicherung/GP_SK.pdf (abgerufen am 05.01.2015)
Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Köln-Gremberghoven

- [18] FACHVEREINIGUNG BAYERISCHER KOMPOSTHERSTELLER E. V. (FBK):
Güte- und Prüfbestimmungen für Kompost. Fassung September 2015. Mit folgenden Anlagen:
Anlage 1: Qualitätskriterien und Güterichtlinien für Komposte,
Anlage 2: Prüfverfahren sowie Prüfungsumfang,
Anlage 3: Merkblatt „Temperaturmessungen an Kompostmieten“,
Anlage 4: Merkblatt „Probenahme von Kompost und Kompostsubstraten“,
Anlage 5: Bestimmung und Bewertung der Pflanzenverträglichkeit von Komposten.
Wolfratshausen, 2015, 11 S. und 5 Anlagen, 22 S.
- [19] ANONYM:
Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle.
ABl. 51 (2008) L 250, S. 1–84
- [20] BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE „HINWEISE ZUM VOLLZUG DER BIOABFV“:
Hinweise zum Vollzug der Bioabfallverordnung. Vom 24. August 2000.
Keine Ortsangabe, 2000, 48 S.
- [21] BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE „HINWEISE ZUM VOLLZUG DER BIOABFV“:
Hinweise zum Vollzug der novellierten Bioabfallverordnung (2012). Vom 07. Januar 2014.
Keine Ortsangabe, 2014, 105 S. und Anhang, 7 S.
- [22] KIRSCH, A.:
Qualitäten und Eigenschaften flüssiger und fester Gärprodukte.
Müll und Abfall 47 (2015) 3, S. 134–136
- [23] VAN DEN BERG, M.; BIRNBAUM, L.; DENISON, M.; DE VITO, M.; FARLAND, W.; FEELEY, M.; FIEDLER, H.; HAKANSSON, H.; HANBERG, A.; HAWS, L.; ROSE, M.; SAFE, S.; SCHRENK, D.; TOHYAMA, C.; TRITSCHER, A.; TUOMISTO, J.; TYSKLIND, M.; WALKER, N.; PETERSON, R.E.:
The 2005 World Health Organization Re-evaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-like Compounds.
Toxicological Sciences 93 (2006) 2, S. 223–241
- [24] VAN DEN BERG, M.; BIRNBAUM, L.; BOSVELD, B.T.C.; BRUNSTRÖM, B.; COOK, P.; FEELEY, M.; GIESY, J.P.; HANBERG, A.; HASEGAWA, R.; KENNEDY, S.W.; KUBIAK, T.; LARSEN, J.C.; VAN LEEUWEN, F.X.R.; LIEM, A.K.D.; NOLT, C.; PETERSON, R.E.; POELLINGER, L.; SAFE, S.; SCHRENK, D.; TILLITT, D.; TYSKLIND, M.; YOUNES, M.; WAERN, F.; ZACHAREWSKI, T.:
Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife.
Environmental Health Perspective 106 (1998) 12, S. 775–792
- [25] THE SECRETARIAT OF THE STOCKHOLM CONVENTION:
Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) as amended in 2009. Text and Annexes.
Châtelaine, Switzerland, 2010, 63 S.
<http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-2009.En.pdf>
(abgerufen am 13.08.2015)
An amendment to Annex A adopted by the Conference of the Parties to the Stockholm convention on Persistent Organic Pollutants at its fifth meeting (Decision SC-5/3).
Châtelaine, Switzerland, undatiert, 2 S.
<http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-A-Amendment-2011.En.pdf> (abgerufen am 13.08.2015)

An amendment to Annex A adopted by the Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants at its sixth meeting (Decision SC-6/13)

Châtelaine, Switzerland, undatiert, 1 S.

<http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-A-Amendment-2013.En.pdf> (abgerufen am 15.09.2015)

[26] United Nations, UNEP:

Report of the Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its seventh meeting, Geneva, 4–15 May 2015. UNEP/POPS/COP.7/36.

23 June 2015, 148 S.

<http://chm.pops.int/TheConvention/ConferenceoftheParties/ReportsandDecisions/tabid/208/ctl/Download/mid/10388/Default.aspx?id=73&ObjID=20857> (abgerufen am 02.09.2015)

[27] ANONYM:

Medienübergreifende Umweltanalytik verschiedener persistenter polybromierter Flammschutzmittel.

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2013, 53 S.

