

Texte

42
08

ISSN
1862-4804

Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen

Umwelt
Bundes
Amt 

Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDEMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 204 33 321
UBA-FB 001193



Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen

von

Dr. Jürgen Reinhold

Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH, Kleinmachnow

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 2.6
Ines Vogel

Dessau-Roßlau, November 2008

14532 Kleinmachnow
Stahnsdorfer Damm 39
Tel.: (49)033203-78242
Fax.: (49)033203-78243
Email: juergen.reinhold@potsdam .de



Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 204 33 321

„Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen“

Auftraggeber: Umweltbundesamt Berlin
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Abschlussbericht

Kleinmachnow, den 31. März 2008

Dr. Jürgen Reinhold
- Projektleiter -

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Reinhold, Jürgen	8. Abschlußdatum 31.03.2008	
	9. Veröffentlichungsdatum	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow	10. UFOPLAN-Nr. 204 33 321	
	11. Seitenzahl 131	
	12. Literaturangaben 73	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau-Roßlau	13. Tabellen und Diagramme 35	
	14. Abbildungen 80	
15. Zusätzliche Angaben keine		
16. Kurzfassung Kupfer ist ein wichtiger industrieller Wirtschaftsfaktor mit einem Gesamtverbrauch von jährlich etwa 1.100.000 t/a in Deutschland, wovon bei mittleren Kupfergehalten von 57,7 mg/kg Kompost-TS etwa 88 t/a mit getrennt gesammelten Bioabfällen erfasst und auf Böden aufgebracht werden. Seit Beginn der Bioabfallbehandlung haben die Kupfergehalte in den Komposten bis 2002 als einziger Schadstoff jährlich um etwa 3,7 % zugenommen. Anhand von ausgewählten Beispielen konnte nachgewiesen werden, dass seit 2002 ein Rückgang der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten eingetreten ist. Mit Unterstützung der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. und ausgewählter Mitgliedsbetriebe wurden über vier Jahre Auswertungen der Daten aus der RAL-Gütesicherung von 378 Bioabfallkompostierungsanlagen, Befragungen in 33 besonders kupferrelevanten Anlagen und prozessbegleitende Materialuntersuchungen in 14 Anlagen durchgeführt. Im Projektverlauf wurden 457 Inputmaterial-, 99 Rottegut- und 181 Kompostproben untersucht. Die Quellen bzw. Ursachen für die Kupfergehalte in Bioabfallkomposten konnten wie folgt abgeleitet werden: Punktuelle bzw. partikuläre Einträge (z.B. Metallteile, kupferbehandelte Teile) sind die bedeutendste Kupferquelle in Bioabfallbehandlungsanlagen. Sie werden während des Rotteprozesses biochemisch umgesetzt und somit erst im Rottefortschritt untersuchungstechnisch nachweisbar. Die Kupfereinträge durch Pflanzenreste und durch deren Anhaftungen an unbelasteten Böden tragen ebenfalls deutlich zur Höhe der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten bei. Regenwassernutzungen aus Dachbereichen mit höheren Kupferanteilen führten bei fast 28 % der Biotonnenabfallkomposte zu um etwa 5 - 6 mg/kg TS erhöhten Kupfergehalten. Bei Einträgen von Böden mit erhöhten Gehalten können sich die Kupfermesswerte in Komposten bis zu 23 mg/kg TS erhöhen. Den größten Einfluss auf die Höhe der Gehalte im Kompost hat die Aufkonzentration an Kupfer während der Bioabfallbehandlung. Durch die Gesamtprozessverluste reichert sich Kupfer im Rottegut an, ohne dass es zu einer Zunahme des Gesamtkupferbestandes in der Produktkette kommt. Bei Biotonnenabfallkomposten konnte eine deutliche saisonale Struktur der Kupfereinträge erkannt werden (erhöhte Werte im Winter). Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für eine Kupferlimitierungsstrategie in Bioabfallkomposten: Öffentlicher Regelungsbedarf: Die Einträge diffuser Kupferquellen aus dem Verkehrsgeschehen sowie aus behandelten Holzelementen in Grün- und Parkabfälle sind vor allem durch Maßnahmen zu Freisetzungsminderungen zu verringern. Friedhofsabfälle sind nur zu verwerten, wenn kupferhaltigen Gebindebestandteile unbedeutend sind. Die Anwendung von Grünkupferpräparaten als fungizides Pflanzenschutzmittel in Hausgärten sollte eingeschränkt werden. Für Bio-		
Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben 204 33 321 Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen		Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow

abfallbehandlungsanlagen, in deren Einsammelgebiet erhöhte Kupfergehalte in den urbanen Böden auftreten, sind die entsprechenden Entscheidungsmöglichkeiten nach BioAbfV zur regionalen Verwertung von Komposten mit bodenbedingt erhöhten Kupfergehalten anzuwenden. Eine aussagekräftige Qualitätsbewertung der stofflichen Verwertung getrennt gesammelter Bioabfälle ist nur durch Untersuchungen in den erzeugten Komposten möglich. Ergebnisse von Inputmaterialuntersuchungen können zu erheblichen Fehlinterpretationen führen.

Kommunale Öffentlichkeitsarbeit: Die begleitende Öffentlichkeitsarbeit sowie stichpunktartige Kontrollen zur Getrenntsammlung von Bioabfällen müssen durch zuständige Stellen kontinuierlich geführt werden, wobei neue Erkenntnisse über potenzielle Schadstoffeinträge zu berücksichtigen sind. Eine auf die Inbetriebnahme einer Bioabfallbehandlungsanlage bezogene Kampagne ist nicht ausreichend. Für Bioabfalleinsammelgebiete mit höheren Kupferanteilen in den Dachbereichen der Wohnbauten sind die Anlagen geeigneter Freisetzungsbarrieresysteme zu empfehlen.

Anlagenbetrieb: Im Allgemeinen sind in Bioabfällen enthaltene Mengen an Kupfer als Grundfracht zu bewerten, auf die in gegebenen Behandlungsanlagen kaum gezielt Einfluss genommen werden kann. Betreiber von Bioabfallbehandlungsanlagen können durch Senkung der Prozessverluste die Kupfergehalte in Komposten reduzieren (etwa 10 mg/kg TS), wenn anstelle von Fertigkomposten Frischkomposte erzeugt werden. Eine Sichtkontrolle der angelieferten Bioabfälle im Eingangsbereich der Bioabfallbehandlungsanlage auf mögliche Kupfereinträge ist praktisch nicht durchführbar. Im Falle erhöhter Kupfergehalte in Kompost sollte neben der absoluten Konzentration auch das Verhältnis von wertgebenden Inhaltsstoffen zu potentiellen Schadstoffen bewertet werden und/oder die tatsächliche Menge an Kupfer, die mit Aufwandmengen nach guter fachlicher Praxis verbunden sind. Die Rückführungen von Prozesswasser und Siebüberlauf-rückständen führen nicht zu relevanten Kupfergehaltserhöhungen in den Komposten.

Forschungsbedarf bei der Bioabfallbehandlung: Die Einträge diffuser Kupferquellen über Gebrauchsgegenstände mit geringer Lebensdauer bzw. Umschlagsfrist in Haushalte sind auf Substitutionsmöglichkeiten zu prüfen. Die Vorbehandlung von getrennt gesammelten Bioabfällen mit dem Ziel der Aushaltung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge sollte hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und ihrer Auswirkungen auf abfallwirtschaftliche Stoffströme unter differenzierten Bedingungen geprüft und bewertet werden.

Neben den Vorsorge- und Gefährdungsbewertungen des Umweltschutzes ist eine Ressourcenbetrachtung zur Exploration urbaner Kupferlagerstätten und damit auch bei Kupfer eine noch stärkere Orientierung auf Kreislaufwirtschaft erforderlich. Dieser Weg ist mit Freisetzungsbarrieresystemen für Kupfer in die Umwelt zu verbinden.

17. Schlagwörter
Bioabfall, Kompostierung, Kupfer, Schadstofflimitierung

18. Preis

19.

20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Cause study and limitation strategies for increasing copper contents in bio-wastes		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Reinhold, Jürgen	8. Report Date 31 March, 2008	
6. Performing Organisation (Name, Address) Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow	9. Publication Date	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 204 33 321	
	11. No. of Pages 131	
	12. No. of Reference 73	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau-Roßlau	13. No. of Tables, Diagrams 35	
	14. No. of Figures 80	
	15. Supplementary Notes none	
16. Abstract With a total consumption of about 1 100 000 t per annum, copper is an important industrial economic factor in Germany. Of this quantity, about 88 t per annum, having mean copper contents of 57.7 mg/kg of compost dry substance, are picked up with separately collected bio-wastes and are then applied to lands. Since bio-waste treatment started, copper contents in composts were the only pollutants to increase by about 3.7 percent yearly until 2002. It could be proved by several examples that a decrease in the copper contents of bio-waste composts has occurred since 2002. Over a period of four years, evaluations of data from the RAL quality assurance systems of 378 bio-waste composting plants, surveys in 33 especially copper relevant plants and material examinations along the workflow were made in 14 plants with the assistance of Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (German association for compost quality assurance). In the course of the project, examinations were made of 457 input material, 99 putrescible matter and 181 compost samples. The sources or causes for the copper contents in bio-waste composts could be explained as follows: Point or particle pollutions (e.g. metal parts, copper-treated parts) are the most significant copper source in bio-waste treatment plants. They are biochemically converted in the biodegradation process and can thus be traced by examination equipment only with the progress of biodegradation. The copper pollutions by plant residues and by their adherence to unpolluted soils also contribute clearly to the degree of copper contents in bio-waste composts. For nearly 28 percent of composts from bio-waste collection bins, the utilization of rainwater from copper roofing surfaces led to a copper content increase by about 5 – 6 mg/kg of dry substance. In case of pollutions from soils with increased content, the copper content values of composts can rise up to 23 mg/kg of dry substance. The level of contents in compost is most largely influenced by the copper fortification during the bio-waste treatment. Due to the overall process losses, copper accumulates in the putrescible matter without causing an increase in the overall copper content in the product chain. A clearly seasonal structure could be identified for bio-waste collection bin composts (higher values in Winter). These results support the following conclusions for a copper limitation strategy for bio-waste composts: Public regulation requirements: The pollution by nonpoint copper sources from traffic areas and from treated wood components in vegetal and park waste have to be primarily reduced by measures of emission reduction. Cemetery wastes shall only be utilized if copper parts in wreaths are negligible. The use of green copper products as fungicide pesticides in gardens should be restricted. For bio-waste treatment plants, in the collection area of which urban soils have higher copper contents, the relevant decision options according to the German biological waste regulations (BioAbfV) on		
Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben 204 33 321 Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen		Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow

the regional utilization of composts with higher copper contents dependent on the soil have to be applied. A sound quality assessment of the material utilization of separately collected bio-wastes is only possible by examining the composts produced. Results of input material examinations can lead to considerable misinterpretations.

Municipal public relations: The accompanying public relations activities as well as random checks concerning the separate collection of bio-wastes have to be continuously undertaken by the competent authorities, taking into account new knowledge about possible pollutions. A campaign related to the launch of a bio-waste treatment plant is not sufficient. For bio-waste collection areas with higher copper contents in the roof areas of residential buildings, the application of suitable emission barrier systems are recommended.

Plant operation: Basically, the quantities of copper contained in bio-wastes must be considered to be bed-load which can hardly be influenced in the existing treatment plants. Operators of bio-waste treatment plants can reduce the copper contents in composts (by about 10 mg/kg of dry substance) by decreasing the process losses if fresh composts are produced instead of ready-made composts. Visual control of the delivered bio-wastes in the entrance area of the treatment plant for possible copper pollutions is virtually impossible. In case of raised copper contents in the compost, in addition to their absolute concentration, the ratio of valuable ingredients to possible pollutants and/or the actual copper quantities that are linked with application ratios according to good practice should be assessed as well. Process water and sieve residue recirculation do not cause relevant increases in the copper contents of composts.

Research requirements for bio-waste treatment: The pollution by nonpoint copper sources in basic commodities with short life span or turnover time in households has to be checked for substitution options. Pretreatment of separately collected bio-wastes with the aim of withstanding point or particle copper pollutions should be checked and assessed regarding its technical feasibility and its impact on waste management material flows under differentiated conditions.

Apart from the environmental protection precaution and hazard assessments, a resource consideration is required for the exploration of urban copper deposits and thus, a much stronger orientation toward recycling management for copper as well. This way has to be linked with barrier systems to prevent the emission of copper into the environment.

17. Keywords

bio-waste, composting, copper, pollutant limitation

18. Price

19.

20.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Glossar	7
1. Einführung	8
1.1 Kupfer als Wirtschaftsfaktor	8
1.2 Stoffströme von Kupfer	11
1.3 Kupfer in Böden	13
1.4 Kupfer in Pflanzen	18
1.5 Beschreibung der Ausgangssituation bei der Bioabfallkompostierung	22
1.6 Regionale Strukturen der Kupfergehalte in Bioabfallkomposten	24
2. Auswertung des Datenbestandes der Bundesgütegemeinschaft Kompost	27
2.1 Trendschätzung der Entwicklung von Kupfergehalten in Bioabfallkompostierungsanlagen	27
2.2 Betroffenheitsanalyse	32
2.3 Statistische Auswertung der Anlagendaten	33
3. Befragungen in kupferrelevanten Bioabfallkompostierungsanlagen	41
3.1 Merkmalsgruppierung der befragten Anlagen	42
3.2 Gruppierung der befragten Anlagen	49
4. Durchführung und Bewertung von Probenahmen und Laboruntersuchungen	49
4.1 Bewertung der Inputmaterialuntersuchungen	50
4.1.1 Biotonnenabfälle	54
4.1.2 Grün- und Parkabfälle	57
4.1.3 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit Literaturangaben	60
4.1.4 Einfluss von Kupferdachelementen auf die Inputmaterialien	67
4.2 Entwicklung der Kupfergehalte in den untersuchten Kompostierungsanlagen	72
4.3 Ableitung der Ursachen für die Kupfergehalte in Komposten	73
4.3.1 Material und Methodik	73
4.3.2 Stoffstrombetrachtungen für Kupfergehalte in Bioabfallkomposten	76
4.3.2.1 Betrachtungen der Anlagengruppen nach Punkt 3.2	76
4.3.2.2 Betrachtungen nach Bioabfallart und Rotteintensität	87
4.3.3 Betrachtungen zum Einfluss von Bodenanhängen der Inputmaterialien auf die Kupfergehalte	95
4.3.4 Betrachtungen zur biochemischen Umwandlung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge beim Kompostierungsprozess	100
4.3.5 Auswirkungen der Rottegutabsiebung und der Prozesswasserrückführung	110
5. Entwicklung von Limitierungsstrategien	112
5.1 Bioabfallrelevante Stoffströme und Eintragsquellen	112
5.2 Reduzierungspotenziale	116
5.2.1 Vermeiden von Kupfereinträgen über die Inputmaterialien	117
5.2.2 Reduzierung der Aufkonzentration von Kupfer durch Prozessverluste	119
5.2.3 Einzelfallbezogene Reduzierungspotenziale	121
6. Zusammenfassung	123
Literatur	129
Anlagenverzeichnis	135

Glossar

BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
UBA	Umweltbundesamt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost
e.V.	eingetragener Verein
FM	Frischmasse (feuchte Originalsubstanz)
TS	Trockensubstanz (Trocknungsrückstand bei 105 °C)
oTS	organische Trockensubstanz (gemessen durch Glühverlust)
mTS	mineralische Trockensubstanz (gemessen durch Aschegehalt)
Cu	Kupfer
Zn	Zink
mg	Milligramm
g	Gramm
kg	Kilogramm
t	Tonne (Megagramm)
mm	Millimeter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
a	Jahr
n	Stichprobenanzahl
p	Irrtumswahrscheinlichkeit nach Gauss-Verteilung
Nr.	Nummer
TW	Trinkwasser
Kfz	Kraftfahrzeuge
PSM	Pflanzenschutzmittel
BDF	Bodendauerbeobachtung
ges.	gesamt

1. Einführung

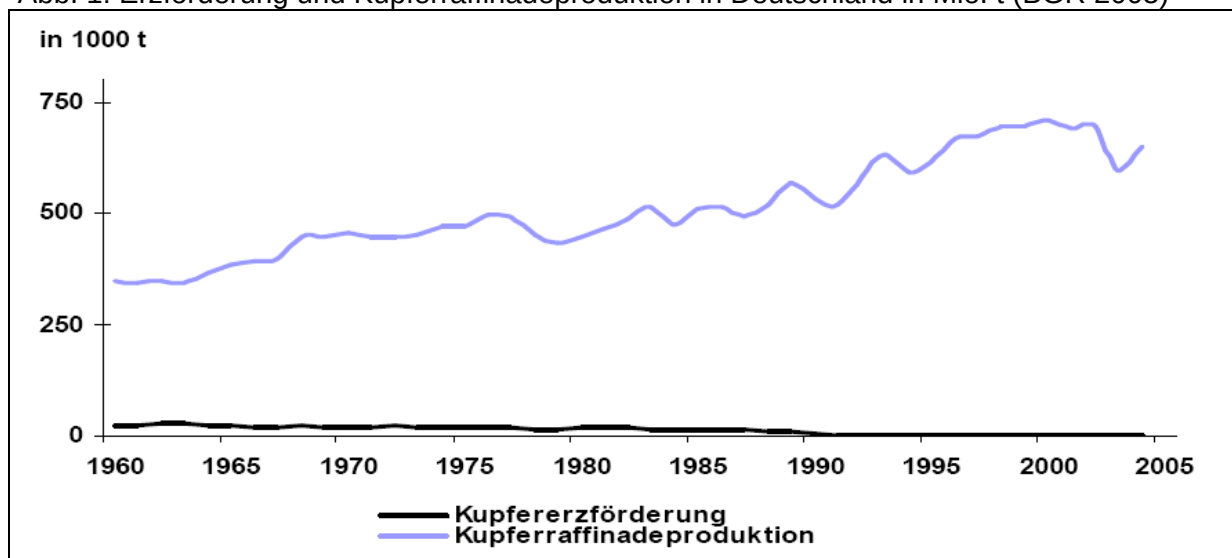
1.1 Kupfer als Wirtschaftsfaktor

Kupfer ist weltweit ein bedeutender Wirtschaftsfaktor. Es findet heute in fast allen Lebensbereiche der Gesellschaft Anwendung.

Nach Frondel et al. (2005) ist der seit 2003 zu verzeichnende drastische Preisanstieg bei raffiniertem Kupfer von rund 1500 US \$ pro Tonne auf nahezu das Sechsfache im Mai 2006 das Resultat einer zwischen 2000 und 2003 stagnierenden Produktion im weltweiten Kupferbergbau und einer ab 2003 wieder anziehenden globalen Nachfrage nach Kupfer. Den größten Anteil am weltweiten Kupferverbrauch 2004 weist mit etwa 19,4 % China auf.

In Deutschland stagnierte der Kupferbedarf mehr oder weniger und betrug 2004 etwas mehr als 1,1 Mio. t. Deutschland hatte 2004 einen Anteil von 6,7 % am weltweiten Verbrauch von 16,5 Mio. t und weist damit den vierthöchsten Bedarf in der Welt auf. In der EU ist Deutschland der größte Kupferverbraucher. Dieser stieg zwischen 1986 und 2004 von 0,93 Mio. t um rund 18 % bzw. rund 1 % jährlich an (BGR, DIW 1997:309). Der inländische Bedarf kann nicht allein durch die heimische Kupferproduktion gedeckt werden. 2004 lag die deutsche Kupferraffinadeproduktion bei 0,652 Mio. t (BGR, 2005).

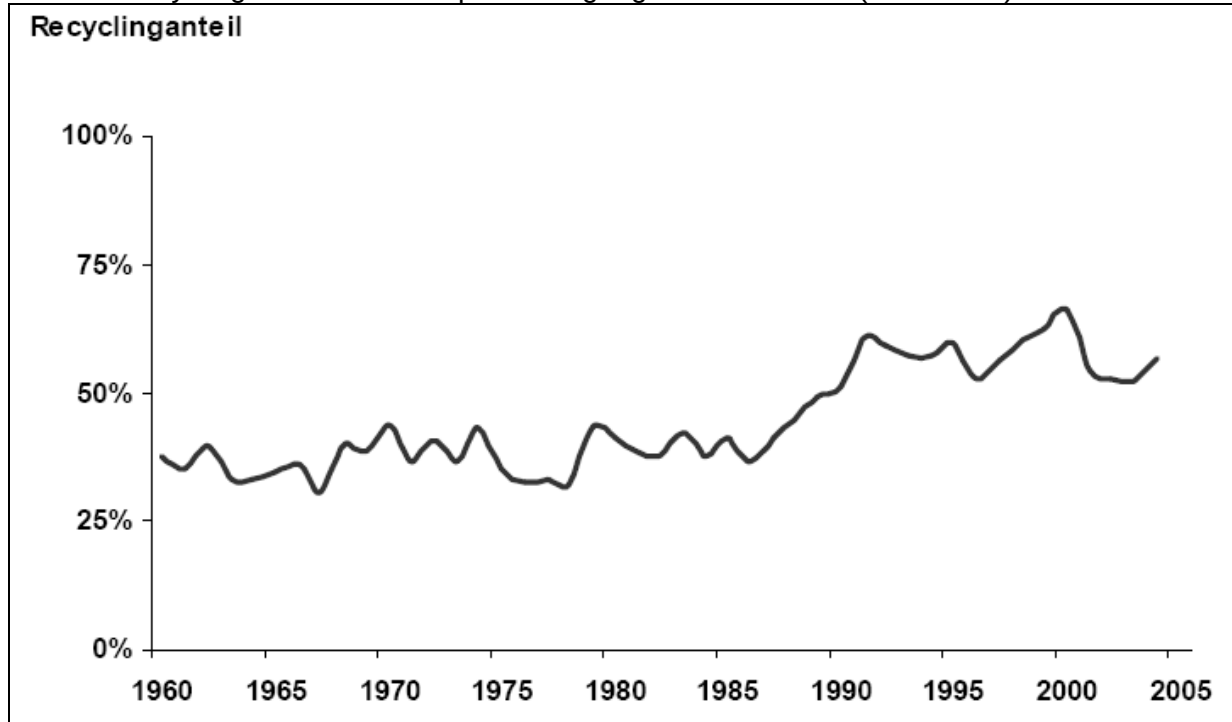
Abb. 1: Erzförderung und Kupferraffinadeproduktion in Deutschland in Mio. t (BGR 2005)



Der Einsatz von Kupferschrott bei der Kupferherstellung hat sich seit 1960 in Deutschland fast verdreifacht, von mehr als 130 000 t auf rund 370 000 t. Die Importe an Kupferschrott stammen dabei aus immer mehr Ländern, die frühere Dominanz von Frankreich, Großbritannien und den Niederlanden hat seit 1984 stark abgenommen. Durch die ab 2006 wirksame Elektronikschrottverordnung hat sich der Recyclingmarkt für Elektronikschrott verbessert. Bei hohen Preisen wird eine Substitution von Kupfer im Baubereich bei Rohren und Bedachungen erwartet (NA 2005).

In diesem Zusammenhang ist auf die Einträge von Kupfer in Altproduktströme zu verweisen, die nach Erdmann et al. (2005) in der Abfallwirtschaft Deutschlands erhebliche Ausmaße von insgesamt etwa 500.000 t/a annehmen können (siehe Tabelle 1).

Abb. 2: Recyclinganteil bei der Kupfererzeugung in Deutschland (BGR 2005)



Tab. 1: Grobschätzung des Eintrags von Kupfer in Altproduktströme in Deutschland (Erdmann et al., 2004)

	Mengenstrom	Quelle	Kupferstrom
Alt-Kfz	Ca. 3,5 Mio. Löschungen 1999	Abschätzung nach KBA 2001	~ 88.000 t
EE-Altgeräte	Ca. 1,8 Mio. t/a	Abschätzung nach Bvse 1998	80.000 – 130.000 t
Bauschutt	Ca. 30-40 Mio. t/a	IZT et al. 2000	> 300.000 t (Input)

Nach Frondel et al. (2005) ist Kupfer gut verformbar und besitzt mit Ausnahme von Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle. Deshalb wird Kupfer bevorzugt in elektrotechnischen Anwendungen genutzt. Kupfer verfügt über eine hohe Wärmeleitfähigkeit, welche nur von Silber übertroffen wird. Aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit wird Kupfer manchmal auch als Halbedelmetall bezeichnet. Kupferoberflächen bilden bei Kontakt mit Luft eine schützende Schicht, die als Patina oder Grünspan bezeichnet wird. Seine bakterienhemmende Wirkung verhindert die Ansiedlung von Keimen auf kupferhaltigen Oberflächen, wie beispielsweise Türgriffen aus Messing. Diese Eigenschaften von Kupfer sind beim Eintrag in Gewässer unerwünscht, weshalb es Bestrebungen gibt, Anwendungen von Kupfer, aus denen Kupferionen in Gewässer gelangen können, zu beschränken. Darunter fallen beispielsweise Kupferdächer und -fassaden, Regenrinnen und Regenfallrohre. Die Schweizer Umweltbehörden haben die Empfehlung ausgesprochen, auf den Einsatz von Kupfer in diesen Verwendungen zu verzichten.

Die Hauptverwendungsgebiete von Kupfer liegen in den Sektoren Bauwesen, Elektrotechnik und Elektronik. Diese Bereiche beanspruchen zusammen über zwei Drittel des Kupferbedarfs. Die Nutzung im Sektor Maschinenbau, Fahrzeug- und Verkehrstechnik fällt dagegen mengenmäßig deutlich ab (siehe Tabelle 2).

Ein Segment der Kupferverwendung im Bausektor ist die Trinkwasserleitungsinstallation in Gebäuden. Der Kupferverbrauch ist in diesem Bereich seit Anfang der 90er Jahre rückläufig.

Dies beruht auf dem Vormarsch von Kunststoffrohren, die sich durch technologische Verbesserungen beim Werkstoff und der Verbindungstechnik heute schnell und kostengünstig verlegen lassen. Lag der Anteil von Kupferrohren 1992 noch bei 66 % der verlegten Trinkwasserleitungen, fiel der Anteil auf 40 % im Jahr 2004 (KRV 2005) zurück.

Tab. 2: Anteile der Verwendungssektoren (WVM 2006)

Produktbeispiele		Anteile
Bauwesen	Trinkwasserrohre, Fassadenverkleidungen, Dachrinnen, Regenfallrohre, Armaturen, Türklinken, Beschläge, elektrische Leitungen	37 %
Elektrotechnik und Elektronik	Hochspannungskabel und -leitungen, Elektromotoren, Transformatoren, Schalter, Spulen und Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik, Haushaltsgeräte, Platinen, elektronische Bauelemente, Solarmodule	32 %
Maschinenbau	Wärmetauscher und Kühlmittelrohre, Ventile, Lagerwerkstoffe, Flussmittel und Schweißzusätze, Bleche und Bänder	14 %
Fahrzeugbau und Verkehrstechnik	Elektrische Stellmotoren, Anlasser, Lichtmaschine, Zündspule, Kabel, Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Kühler, Bremsleitungen, Stromschienen für Schienenfahrzeuge	8 %
Sonstiges	Feimechanik, Schmuck, Münzen, Pflanzenschutzmittel- und Holzschutzmittelzusatz	9 %
Insgesamt		100 %

Bei elektrischen Installationen wird durch die Computerisierung und Mechanisierung von Verstellvorgängen der Installationsaufwand weiter zunehmen. Darunter fallen Verstellvorgänge von Rollläden, Fenstern, Türen sowie die Ansteuerung von Leuchten, Haushaltsmaschinen, Kommunikationsgeräten und Computern. Begrenzt wird der Zuwachs durch die verstärkte Nutzung sicherer Funktechnik, die in den zurückliegenden Jahren große Fortschritte gemacht hat.

Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik stößt die Kupferleitung bei Breitbandanwendungen an technische Grenzen. Der Bedarf, die Übertragungsraten zu steigern, hält ungebrochen an und wird nicht nur durch die Einführung des High Definition Fernsehen Standards (HDTV) forciert. In diesem Bereich werden Kupferleitungen zunehmend durch Glasfaserkabel ersetzt werden.

Im Fahrzeugbau hält der Trend zur Mechanisierung von Verstellvorgängen an. Waren 1992 im Mittel noch 19 elektrische Stellmotoren im Fahrzeug vorhanden, so stieg die Zahl 2002 auf 30 an (IZT, 2004; CC, 2000). Fensterheber, Sitzverstellung, Türschließer sind nur einige Beispiele für solche Anwendungen, welche einen zusätzlichen Kupferbedarf für die Motorwicklungen auslösen.

Der Kupferbedarf für Traktionsmotoren in Fahrzeugen spielt gegenwärtig noch eine untergeordnete Rolle. Mit der gelungenen Markteinführung von Hybridfahrzeugen ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer breiten Anwendung dieser emissionsarmen und Kraftstoff sparenden Antriebstechnik gelungen. Die Einführung der Brennstoffzelle als Energiequelle des Fahrzeugantriebs könnte diesen Trend noch verstärken und einen starken Nachfrageschub nach Kupfer bei Fahrzeugtraktionsmotoren auslösen.

Insgesamt können sich die den Kupferbedarf steigernden und senkenden technischen Einflüsse beinahe die Waage halten. Der erwartete Rückgang der Kupferanwendungen im Baubereich und in der Elektrotechnik sollte durch die Steigerung der Kupfernachfrage in der Fahrzeugtechnik in etwa kompensiert werden. Da der spezifische Kupferbedarf folglich beinahe konstant bleiben sollte, dürfte die Nachfrage nach Kupfer bis 2025 in etwa proportional zum Wachstum der Nachfragesektoren verlaufen.

1.2 Stoffströme von Kupfer

Die nachfolgenden Texte sind aus Hillenbrand et al. (2005) zitiert.

Die mit der Produktion, Verarbeitung und Verwendung von Kupfer verbundenen Stoffströme sind über die Abwasser-, Abgas-, Abfall- und Produktpfade auf vielfältige Weise miteinander verknüpft, so dass es sehr schwierig ist, den einzelnen Verwendungsbereichen die unterschiedlichen Umwelteinträge zuzuordnen. In der nachfolgenden Abbildungen sind die wichtigsten Verknüpfungen dieser Stoffströme dargestellt. Soweit verfügbar, wurden bei den einzelnen Stufen dieser Stoffströme die damit verbundenen Mengen für das Jahr 2000 angegeben (siehe Abbildung 3).

Es wurden die Emissionen in die Umwelt und die Einträge in Gewässer und Böden für besonders relevante Anwendungsbereiche der Schwermetalle Kupfer, Zink und Blei detailliert analysiert und berechnet. Ausgangspunkt waren dabei jeweils die in den Bereichen eingesetzten Materialmengen und die sich aus den emissionsrelevanten Prozessen (Korrosionsprozesse, Abrieb, direkte umweltoffene Verwendung) ergebenden Belastungen der Umwelt. Darauf aufbauend wurden für die bekannten diffusen und punktförmigen Eintragspfade die Einträge in Gewässer und Böden berechnet.

Eine Übersicht für die Kupfereinträge in Böden (siehe Abbildung 4) zeigt die große Bedeutung der Umweltemissionen aus dem Bereich Kraftfahrzeuge (Bremsbeläge). Dieser Bereich hat auch für die Einträge in die Böden die größte Bedeutung, danach folgen hier die Bereiche Pflanzenschutzmittel, Trinkwasserverteilung und Oberleitungen. Der überwiegende Anteil der Emissionen aus dem Bereich Kraftfahrzeuge gelangt in die Böden. Am bedeutendsten ist hier der Sektor Kraftfahrzeuge, danach die Trinkwasserverteilung und der Bereich Dachablaufwasser.

Der Vergleich mit den anderen für den Boden relevanten Eintragsquellen zeigt ein uneinheitliches Bild bzgl. der wichtigsten Eintragsquellen (bei Kupfer Wirtschaftsdünger). In Relation zu den Einträgen aus den überwiegend landwirtschaftlich bestimmten Quellen besitzen die außerlandwirtschaftlichen Verwendungsbereiche nur eine untergeordnete Bedeutung. Ausnahme sind dabei die Einträge an Kupfer aus dem Bereich Kraftfahrzeuge, die mengenmäßig nach den Wirtschaftsdüngern an zweiter Stelle folgen.

Abb. 3: Kupferproduktion und -verwendung und qualitative Stoffströme in Verbindung mit Gewässereinträgen, Deutschland 2000 (Hillenbrand et al., 2005)

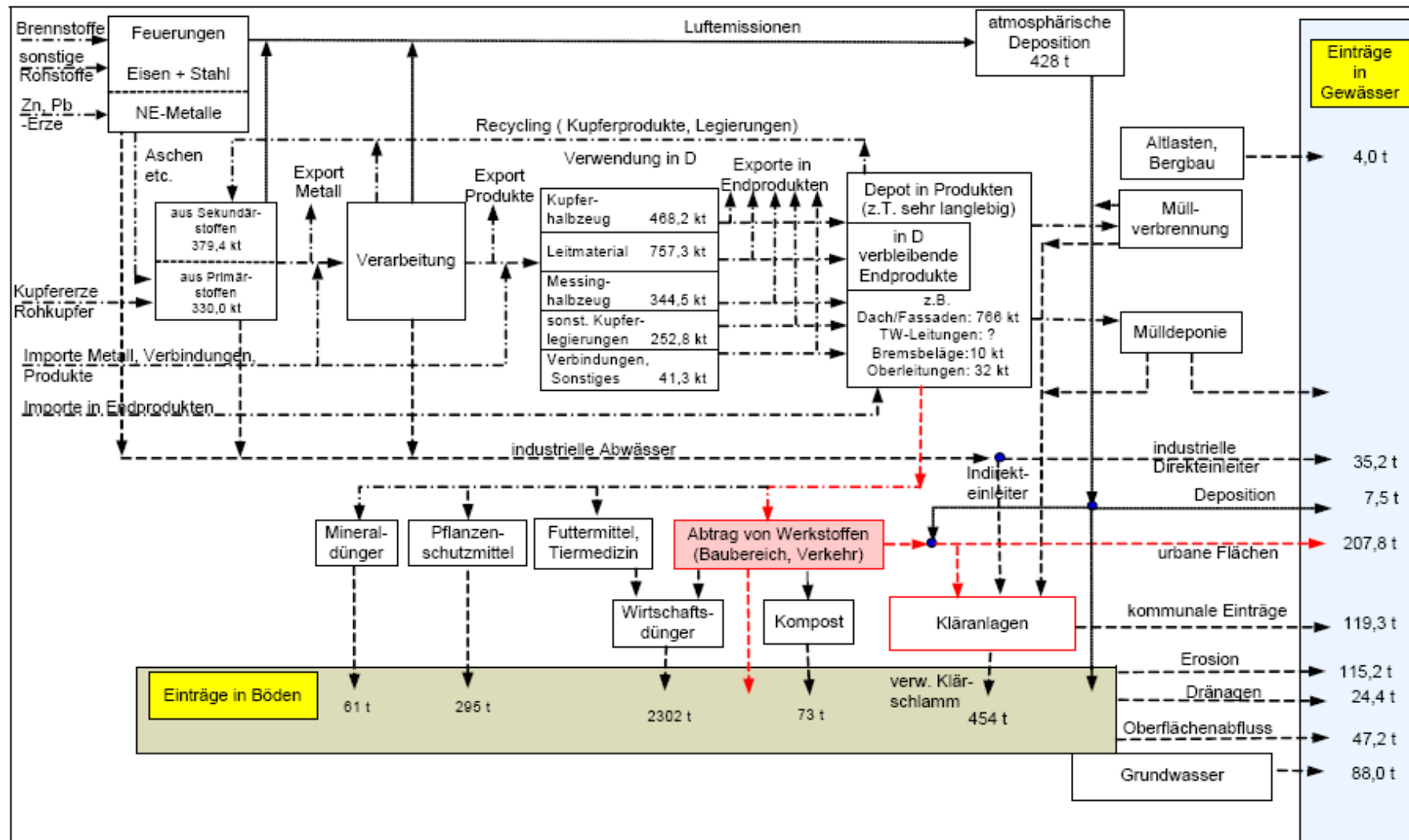
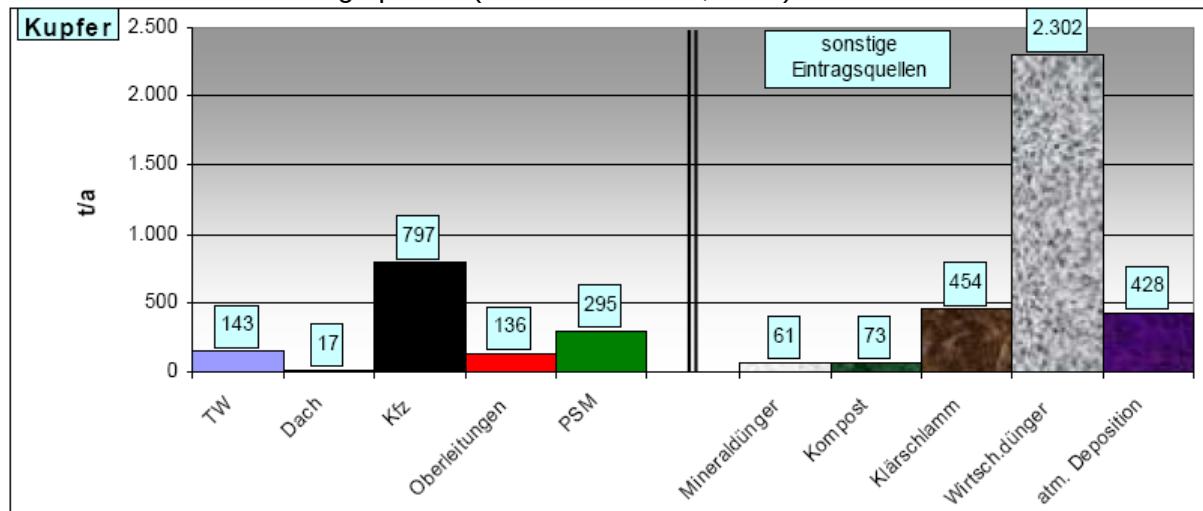


Abb. 4: Vergleich der für die einzelnen Verwendungsbereiche berechneten Einträge in den Boden mit anderen Eintragsquellen (Hillenbrand et al., 2005)



1.3 Kupfer in Böden

Im Boden gilt Kupfer als ein ubiquitäres aber wenig mobiles Schwermetall (Mengel, 1991; Kabata-Pendias, 2001). Scheffer & Schachtzabel (1992), zitiert in Terytze & Vogel (2006) nennen einen mittleren Kupfergehalt der kontinentalen Erdkruste von 35 mg/kg TM. Deutsche Hintergrund- und Vorsorgewerte für Kupfer in Böden sind nachfolgend tabellarisch zusammengestellt (siehe Tabelle 3).

Tab. 3:

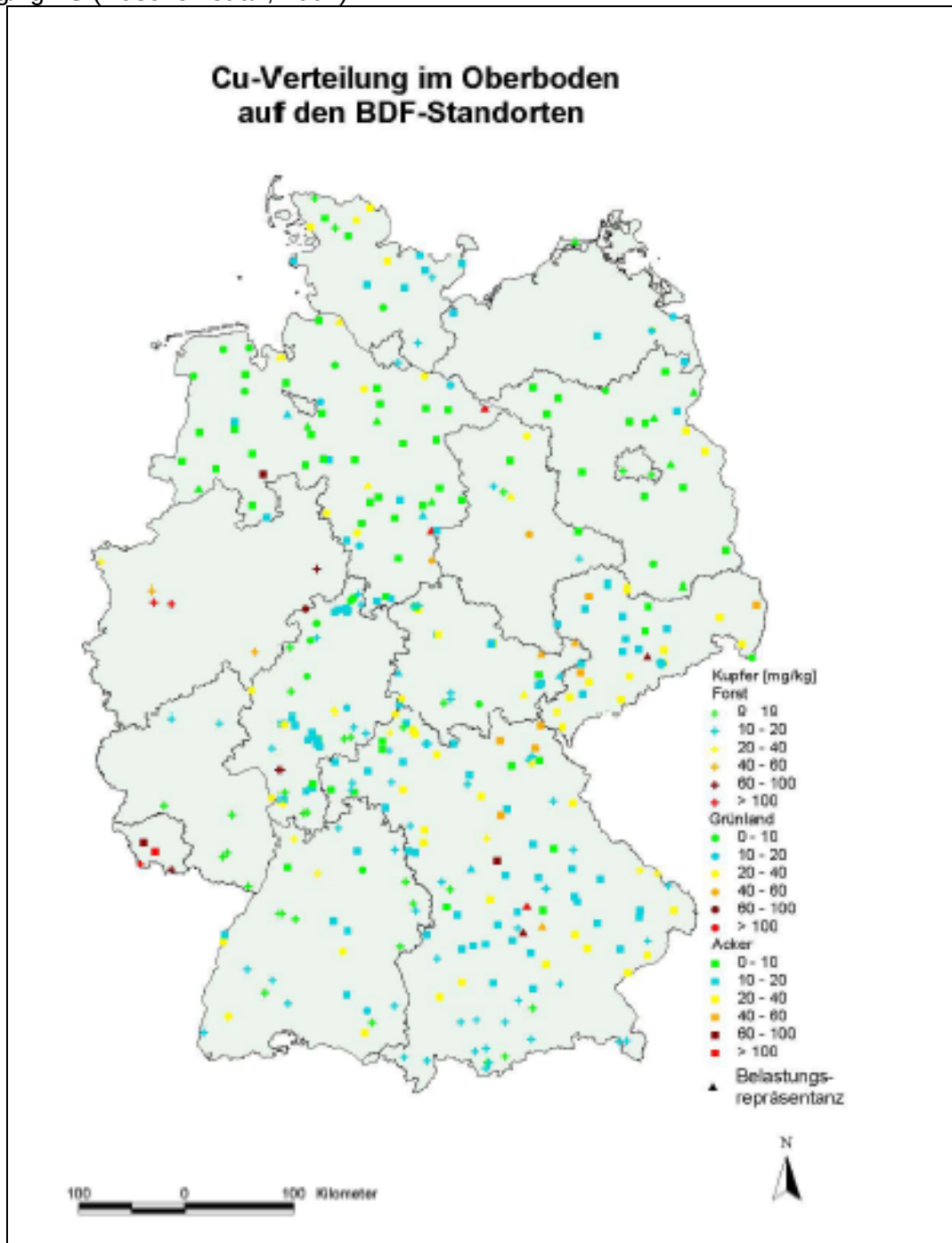
Hintergrundgehalte (nach Rosenkranz et al., 2003) und Vorsorgewerte (nach BBodSchV, 1998) von Kupfer für Böden			
Hauptbodenart nach BBodSchV	Vorsorge- und Hintergrundwerte (HW) in mg/kg TS		
	50. Perzentil	90. Perzentil	Vorsorgewert
Sand	8,5	13	20
Lehm / Schluff	8,4 - 15	13 - 24	40
Ton	23	45	60

Die 90. Perzentil-Werte der Hintergrundkupfergehalte in Böden liegen bei etwa 70 % der Vorsorgewerte nach BBodSchV. Für urbane Böden können diese Werte als Mindestgehalte ohne anthropogene Bodeneinträge angenommen werden.

Für die Erzeugung von Nahrungsgütern nutzt die Landwirtschaft grundsätzlich unbelastete Standorte. Bei der Nutzung und Verarbeitung von landwirtschaftlichen Erzeugnissen fallen in der Lebensmittelindustrie, auf Märkten und Haushalten (z.B. Küchen) Bioabfälle an, die von solch unbelasteten Böden stammen. In Deutschland sind in Böden folgende Kupfergehalte anzutreffen (siehe Abbildung 5).

Die flächige Verteilung der Kupfergehalte kann von den Boden-Dauerbeobachtungen der Länder (land- und forstwirtschaftliche Nutzflächen) abgeleitet werden. Sie zeigt, dass sich bundesweit ein Süd-Nord-Gefälle der Kupferbodengehalte andeutet. Gehalte über 60 mg Cu je kg Boden-TS treten nur vereinzelt auf, was auf mögliche punktuelle metallurgische bzw. bergbauliche Quellen hinweist (Hackenberg et al., 1996).

Abb. 5: Standortbezogene Cu-Gehalte im Oberboden differenziert nach Hauptnutzungsarten in mg/kg TS (Huschek et al., 2004)

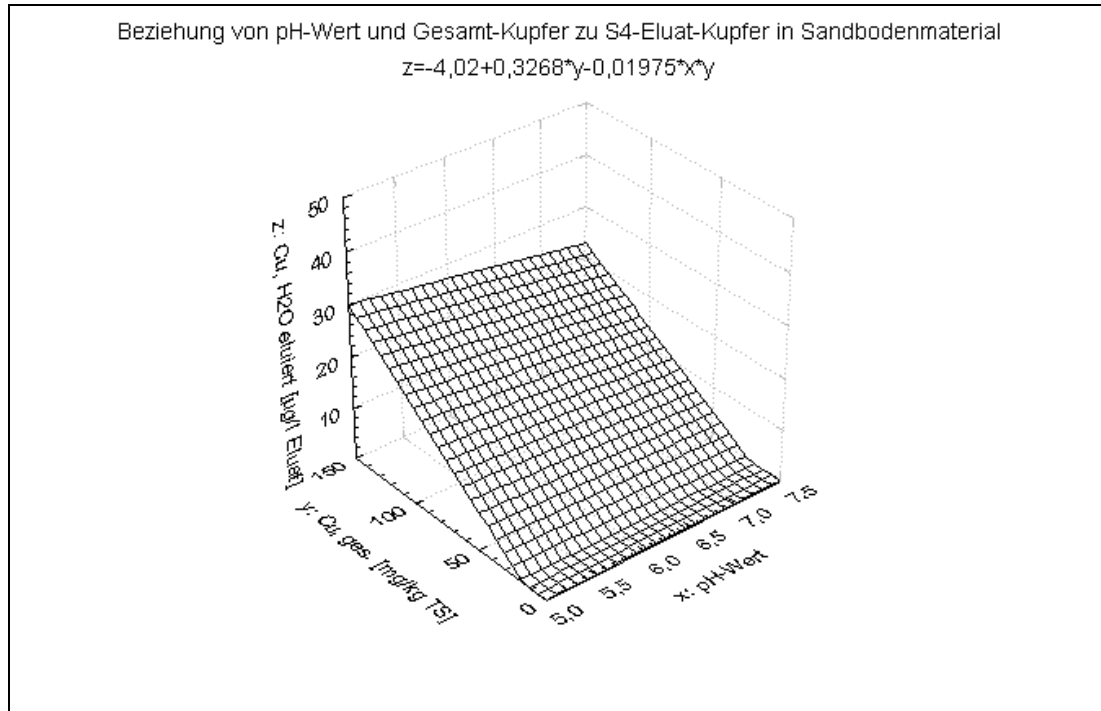


Kupfer liegt in Böden vor allem an die organische Substanz (25...75 %) oder an Eisen- und Manganoxide (15...70 %) gebunden vor. Während bei pH-Werten < 6 die organisch gebundene Fraktion den größten Anteil bildet, überwiegen bei neutraler Reaktion die oxidisch gebundenen Anteile (Tertytze & Vogel, 2007).

Für urbane Böden sind nur wenige belastbare Angaben über Kupfergehalte verfügbar. Reinhold (2002) nennt für urbane Sandstandorte im Berliner Raum einen mittleren Gehalt von 41,0 ($\pm$ 10,6) mg Cu / kg Boden-TS. Dabei wurden folgende Beziehungen zwischen den

Kupfergesamtgehalten und den wasserlöslichen Kupfergehalten (S4-Eluat nach LAGA M 20) ausgewiesen, wobei steigende pH-Werte die Löslichkeit abschwächen (siehe Abbildung 6).

Abb. 6:



In Hackenberg et al. (1996) sind aus bayerischen und hessischen Quellen (vorwiegend Lehm-/Schluffböden) für Stadtböden 88, für Gärten 60 und für Gartenböden 37 mg Cu / kg Boden-TS genannt. Für Altlastenstandorte können in Einzelfällen um ein Mehrfaches höhere Bodengehalte auftreten.

Für den Großraum Mannheim/Heidelberg liegen folgende vergleichende Angaben von urbanen und landwirtschaftlichen Standorten vor, die hier beispielhaft die nutzungsspezifischen Besonderheiten von Kupfereinträgen innerhalb einer Region verdeutlichen sollen (siehe Tabelle 4)

An diesem Beispiel der Kupfergehalte der Böden des Großraumes Mannheim/Heidelberg werden die deutlich höheren Kupfereinträge in urbane Böden im Vergleich zu land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten erkennbar. Die in Einzelfällen hohen Bodenkupfergehalte bei Sonderkulturen sind vor allem durch Einsatz kupferhaltiger Fungizide (z.B. Grünkupferspritzmittel) bedingt.

Ritschel (2000) hat für Gartenland vergleichbare Aussagen im Land Brandenburg gefunden, die jedoch auf Sandstandorten dem hier insgesamt niedrigeren Kupfergehaltsniveau entsprechen (siehe Tabelle 5).

In Ballungsgebieten und auf Flächen mit Historie können bei Punkteinträgen deutliche Überschreitungen der Vorsorgewerte für Böden auftreten. Das betrifft etwa 3 % der landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Gesamtfläche. Auf solchen Flächen sind Risikoabschätzungen für die hier erzeugten Lebensmittel erforderlich (Strumpf, 2008).

Unter Beachtung der standortspezifischen Schwermetallgehalte und durch geeignete Wahl der anzubauenden Nutzpflanzen können auch bei deutlicher Überschreitung der Vorsorgewerte für Böden (BBodSchV, 1999) die Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln eingehalten werden.

ten werden. Dazu ist nachfolgend eine grobe Übersicht aus den von Strumpf (2008) veröffentlichten Forschungsergebnissen zusammengestellt (siehe Tabelle 6). Die Hinweise von Tertyze & Vogel (2007) auf phytotoxische Wirkungen von Gesamtkupfergehalten im Boden ab 25 bis 30 mg/kg TS bei empfindlichen Pflanzen werden damit bestätigt. Andere krautige Pflanzen reagieren erst ab Werten über 50 mg/kg TS. Die Erzeugung von Obstgehölzfrüchten ist weit weniger kupferempfindlich, was mit der geringen Translokation des Kupfers von der Wurzel über den Stamm und die Baumkrone bis hin zur Frucht erklärbar ist.

Tab. 4:

Kupfergehalte der Böden des Großraumes Mannheim/Heidelberg (ohne Autor, 1998)		
Nutzungsart	Bodenwerte in mg Cu / kg TS	
	50. Percentil	90. Percentil
Ackerland	21	34
Grünland	19	31
Sonderkulturen	22	120
Haus- und Kleingärten	28	63
Forstland und Ökosysteme	7	26
Park- und Grünanlagen	23	65
Gewerbe und Verkehr	30	71
Sport und Freizeit	20	34
Kinderspielplätze	21	34

Tab. 5:

Kupfergehalte von sandigen Acker- und Gartenböden im Land Brandenburg (Ritschel, 2000)		
Nutzungsart	Bodenwerte in mg Cu / kg TS	
	50. Percentil	90. Percentil
Ackerland	4	9
Gartenland	14	33

Wie inhomogen die Verteilung von Kupfergehalten in urbanen Böden sein können soll an einem von Strumpf (2008) aufgeführten Beispiel verdeutlicht werden (siehe Abbildung 7). Solche praktisch häufig zu beobachtenden Inhomogenitäten der Schadstoffverteilung in urbanen Böden erschweren eine reproduzierbare Nachweisführung der Kupfereinträge auf städtischen Flächen und sollten, zusätzlich zu den Labormessunsicherheiten, bei der Bewertung kupferbelasteter Böden Berücksichtigung finden.

Roth-Kleyer & Reinhold (2005) empfehlen auf Grundlage der vorab aufgeführten Angaben für landschaftsbaulich genutzte urbane Böden (keine Nutzung zur Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln) mit erhöhten Bodengehalten Orientierungswerte bis zu 80 mg Cu / kg Boden-TS als Grundlage für behördlichen Einzelfallentscheidungen nach BBodSchV, wenn zugleich die Löslichkeit des Kupfers im S4-Eluat (nach LAGA M 20) auf 50 µg Cu / l begrenzt bleibt.

Tab. 6:

Risikobewertung von Kupfergehalten im Boden für Spross-, Frucht-, Wurzelgemüse und Obst (nach Strumpf, 2008)			
Fruchtartengruppe	Bedenklichkeitsstufe in mg Cu / kg Boden-TS		
	unbedenklich	muss geprüft werden	bedenklich
Blattgemüse	< 30 bis 50	30/50 bis 200/300	> 200 bis 300
Küchenkräuter	< 30	30 bis 200	> 200
Sprossgemüse	< 50 - 70	50/70 bis 200	> 200
Fruchtgemüse	< 50	50 bis 200	> 200
Wurzelgemüse	< 30	30 bis 100	> 100
Obstbäume	< 300 bis 500	300/500 bis 1000/1500	> 1000 bis 1500
Beerenobst	< 20 bis 50	20/50 bis 80/150	> 80 bis 150
Legende: unbedenklich - Anbau und Verzehr bis zu diesen Bodengesamtgehalten ohne Einschränkungen möglich muss geprüft werden - Anbau und Verzehr in Abhängigkeit der verfügbaren Bodengehaltsanteile, da die Bodengesamtgehalten keine Rückschlüsse auf die zu erwartende Belastungssituation zulassen bedenklich - Anbau und Verzehr sollte ab diesen Bodengesamtgehalten unterbleiben			

Die Methodologie der Werteableitung beruht dabei auf der Species Sensitivity Distribution in die Bodenorganismen aller Trophiestufen eingehen. Das verwendete Verteilungsmodell DIBAEX (Distribution based extrapolation) betrachtet das Bodenökosystem als geschützt, wenn 95 % aller in die Berechnung eingehenden Arten eine EC₁₀ größer als den ermittelten Bodenwert (HC₅) aufweisen. Diese Ableitung beruht auf den international anerkannten Regelungen des Technical Guidance Document on Risk Assessment (Vogel, 2008).

Unter Berücksichtigung der oben genannten Angaben zu Gesamtkupfergehalten in Böden können für die in diesem F&E-Bericht anzustellenden Betrachtungen, 70 % der Vorsorgewerte nach BBodSchV als Kalkulationswerte für unbelastete Böden angenommen werden. Für urban vorbelastete Böden scheint dagegen bodenartenunabhängig ein Kupfergehalt bis zu 56 mg / kg TS (70 % der empfohlenen Grundlage für Einzelfallentscheidungen nach Roth-Kleyer & Reinhold, 2005) für weitere Betrachtungen besser geeignet, obwohl vereinzelt auch deutlich höhere Kupfergehalte auftreten können.

Die BBodSchV gibt einen Vorsorgewert für Kupfer von 20 mg/kg TM für Sandböden, 40 mg/kg TM für Lehm/Schluff-Böden und 60 mg/kg TM für Tonböden an, bei deren Überschreitung eine schädliche Bodenveränderung zu besorgen ist. Der Ableitung dieses Wertes liegen ökotoxikologische Wirkungsdaten zum Pfad Boden-Bodenorganismen zu Grunde, die vor allem den Schutz der Lebensraum- und Regelungsfunktion des Bodens gewährleisten sollen (siehe Abbildung 8). Die Bodenflora und -fauna übernimmt im Rahmen der Transformationsfunktion bis zu 80% der stofflichen Umsetzungen im Boden.

Abb. 7: Variabilität der Kupfergesamtgehalte in urbanen Böden - Fallbeispiel Versuchsfeld Berlin Dahlem (nach Strumpf, 2008)

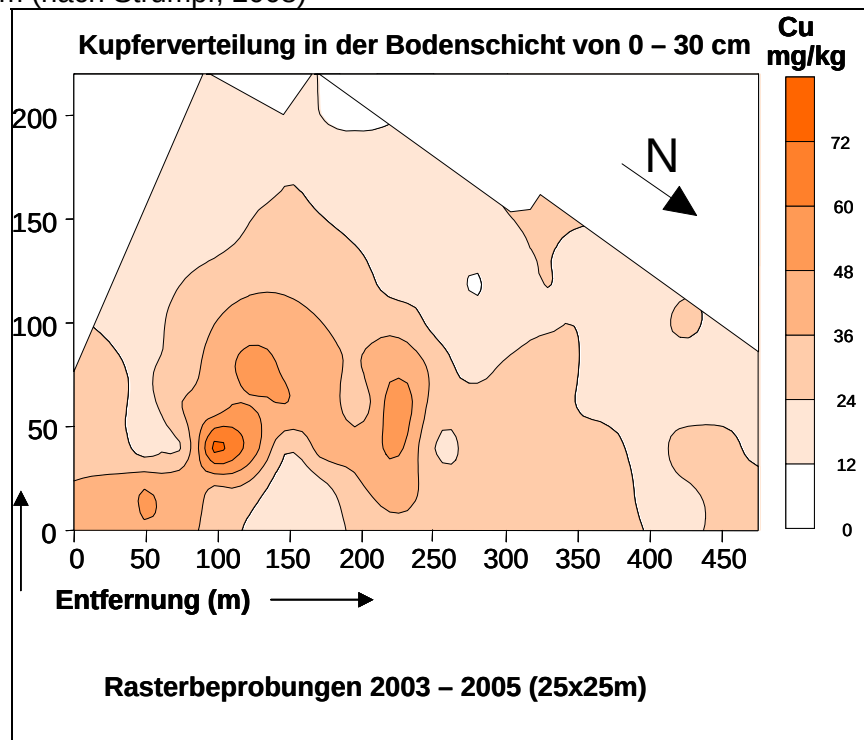
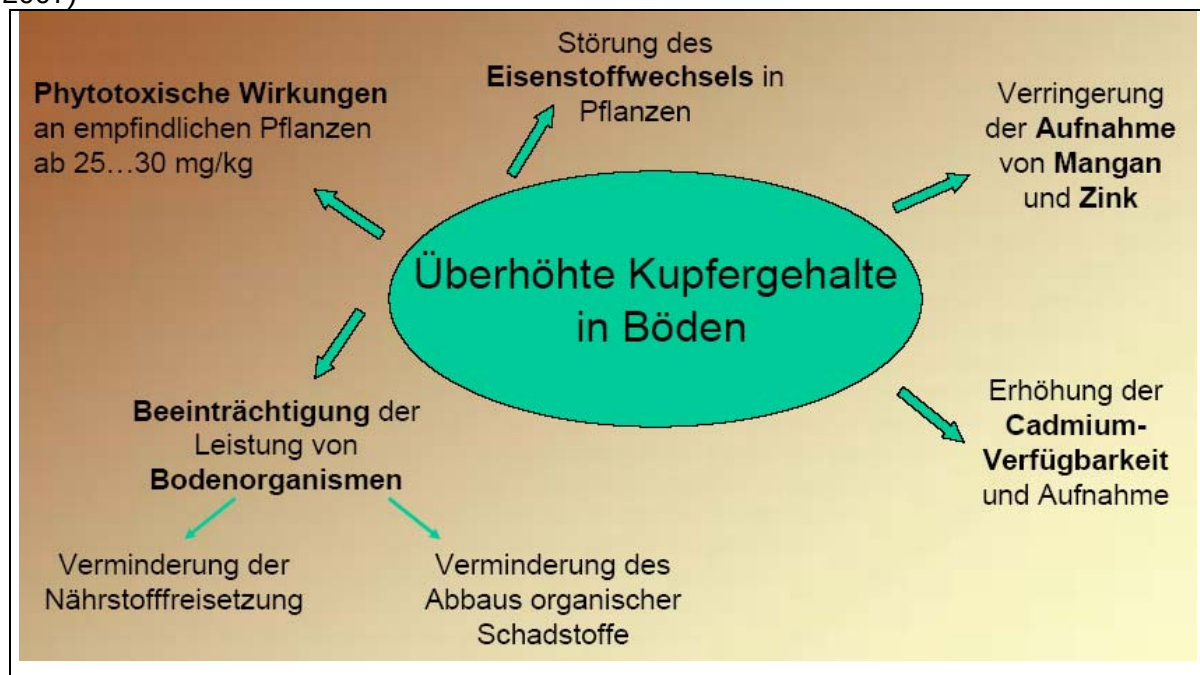


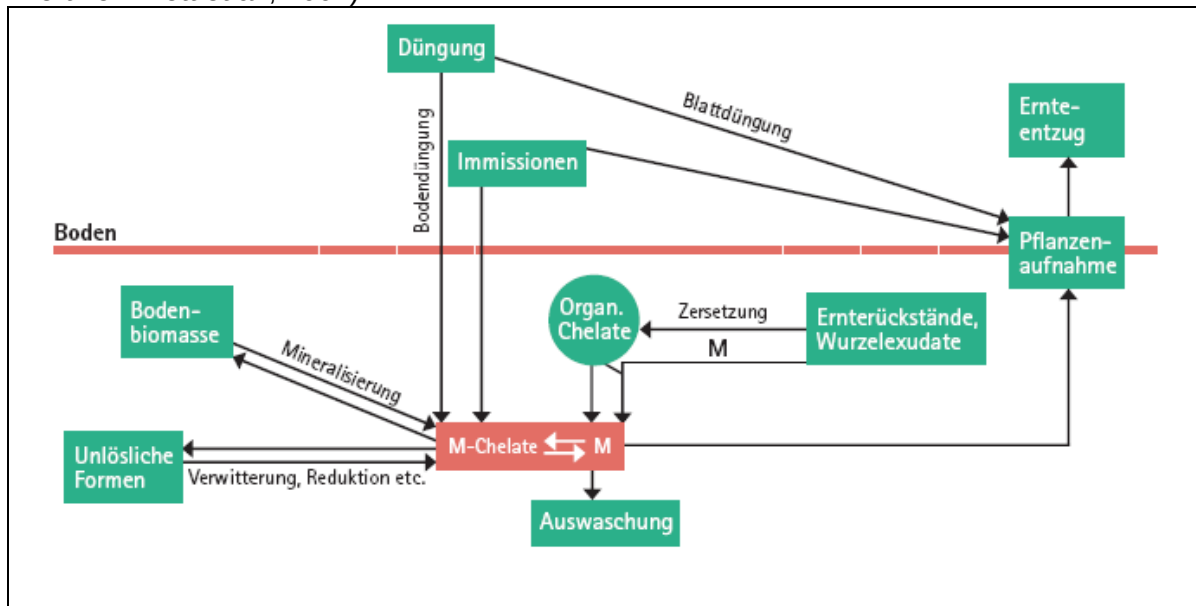
Abb. 8: Schadwirkungen von überhöhten Kupfergehalten in Böden (nach Terytze & Vogel, 2007)



1.4 Kupfer in Pflanzen

Das Aufnahmevermögen der Pflanzen ist – je nach Pflanzenart – für die einzelnen Schwermetalle unterschiedlich ausgeprägt. Die allgemeinen Grundzüge für die Stoffflüsse von Mikronährstoffen sind nachfolgend dargestellt (siehe Abbildung 9).

Abb. 9: Stoffflüsse von Mikronährstoffen (M) in Agrarökosystemen (Stevenson 1986, modifiziert von Trott et al., 2007)



Von Kloke, Sauerbeck & Vetter (1984) wurden als Ausdruck für die Pflanzenaufnehmbarkeit Schwermetalltransferfaktoren entwickelt, die nachfolgend grafisch dargestellt sind (siehe Abbildung 10). Diese Schwermetalltransferfaktoren leiten sich aus dem Verhältnis von Boden- zu Pflanzengehalten ab und können damit durch die Bodengehalte, deren Pflanzenaufnehmbarkeit und dem Verlagerungsverhalten in den Pflanzen beeinflusst werden. Für Kupfer wurde ein mittleres Aufnahmevermögen festgestellt.

Kupfer gilt als ein für die Ernährung aller Lebewesen essentielles Element. Dennoch können durch Überschreitung bestimmter Mengen toxische Wirkungen hervorgerufen werden (Merian et al., 2004). Aufgrund seiner vielfältigen Funktionen ist Kupfer, wenn es auch nur in sehr geringen Mengen benötigt wird, ein wesentliches Nährelement der Pflanzen, das praktisch am Ablauf aller wichtigen Stoffwechselreaktionen direkt oder indirekt beteiligt ist. In der Pflanze gilt Kupfer als Bestandteil vieler Enzyme von entscheidender Wichtigkeit. Seine wichtigsten Funktionen stehen dabei in Zusammenhang mit der Photosynthese, dem Phenol- und Proteinstoffwechsel sowie den Mechanismen zur Krankheitsresistenz.

Nach Bergmann (1993) nehmen Pflanzen das Kupfer über die Wurzeln als Cu^{2+} -Ion in freier und auch in gebundener, chelatartiger Form auf. Das geschieht besonders intensiv während der Jugendentwicklung der Pflanzen. Bei Anwendung kupferhaltiger Fungizide (z.B. Grünkupferspritzmittel) sowie bei Blattdüngungsspritzungen mit Kupfersulfat oder Kupferchelaten wird Kupfer auch über die Blätter aufgenommen. Das Aufnahmevermögen über die Blätter ist bei den einzelnen Pflanzenarten sehr unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die Zusammenhänge und Wirkprinzipien von Gesamtkupfergehalten in Böden und deren Verfügbarkeit für Pflanzen wurde von Trott et al. (2007) grafisch wie folgt dargestellt (siehe Abbildung 11).

Die Verfügbarkeit von Kupfer im Boden steigt ab einem pH-Wert unter 4,5 bis 5,0 an (Hermes & Brümmer, 1984). Kaygorodov (2004) verweist auf den Zusammenhang von Bodengehalten an pflanzenverfügbarem Kupfer (CAT-Methode) und den Kupfergehalten in den Pflanzen (siehe Abbildung 12). Eine Beziehung der Pflanzengehalte zu den Gesamtkupfergehalten im Boden wurde dagegen nicht gefunden.

Abb. 10:

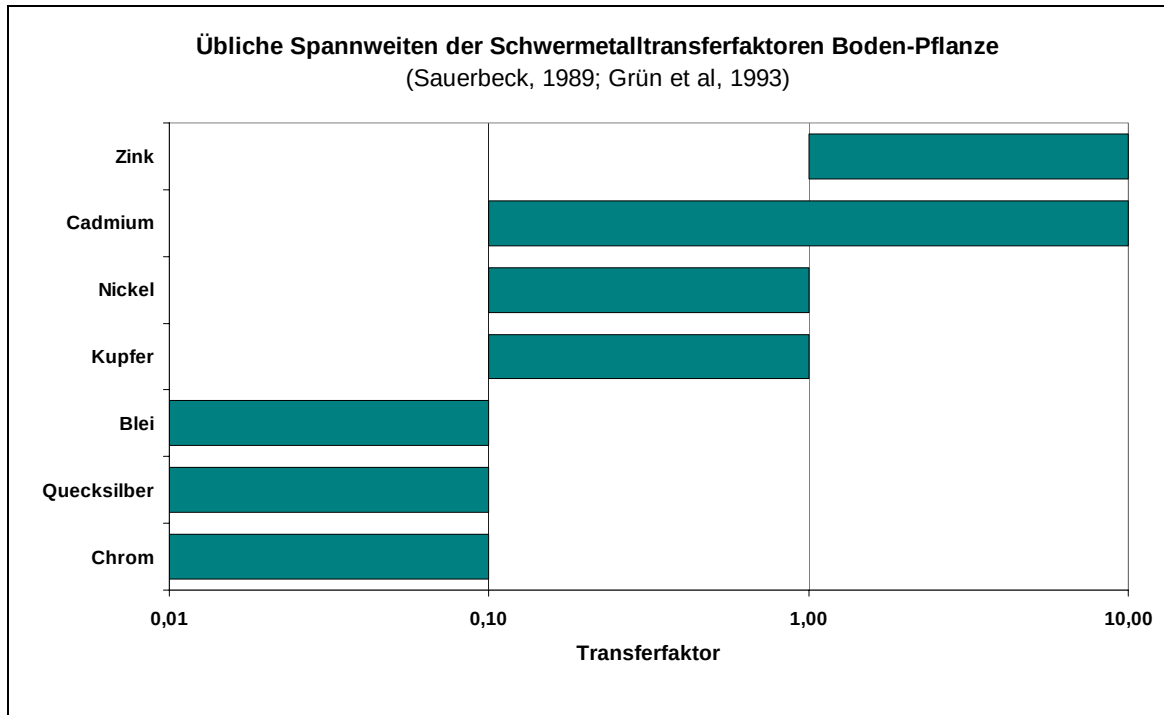
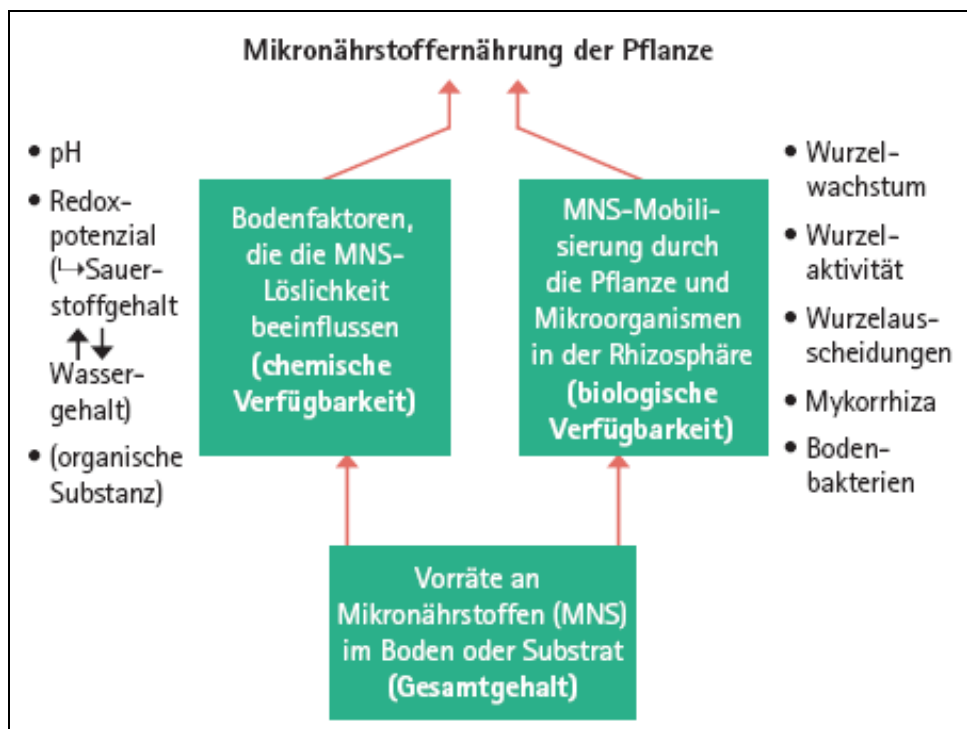
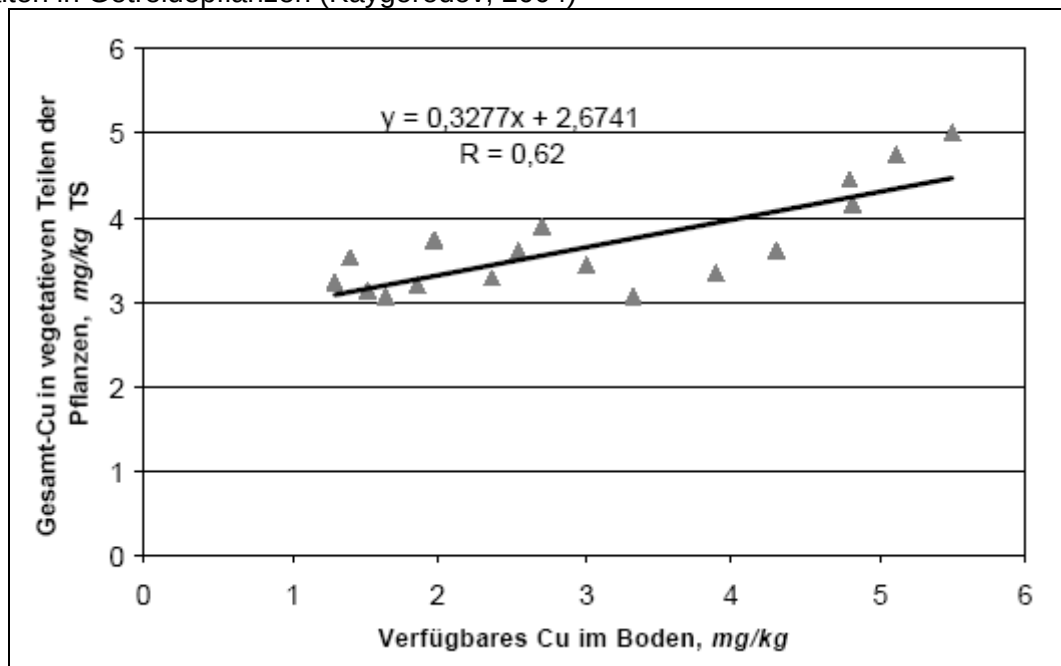


Abb.11:



Die Beweglichkeit von Kupferionen in den Pflanzen ist sehr gering und somit auch der Transport von den Wurzeln in die Spitzen der oberirdischen Teile (und zurück). Bei steigender Kupferversorgung von Pflanzen über den Boden wird Kupfer vor allem in den Wurzeln aber auch in anderen verholzten Pflanzenteilen angereichert, während die Blattgehalte nur sehr langsam ansteigen. Das Verhältnis von Wurzel- zu Sprossgehalten kann bei Kupferüberangebot deutlich mehr als 10 : 1 betragen (Bergmann, 1993).

Abb. 12: Zusammenhang von aufnehmbarem Kupfer im Boden (CAT-Methode) zu Kupfergehalten in Getreidepflanzen (Kaygorodov, 2004)



Pflanzengehalte von 10 - 25 mg Cu / kg TS gelten als optimal für die pflanzliche Ernährung. Ab Pflanzengehalten von > 30 mg / kg TS geht man von Phytotoxizität aus, bei Gehalten von < 5 mg / kg TS von einem Mangelzustand (Amberger, 1996). Trott et al. (2007) nennen für verschiedene Gemüsekulturen ausreichende Kupfergehalte von 3 bis 15 mg/kg TS im Markterzeugnis. Für nähere Angaben zu Kupfergehalten in und zur Kupferaufnahme und zu Kupferwirkungen von bzw. in Pflanzen kann auf Bergmann (1993), auf Domeyer (2005) sowie Trott et al. (2007) verwiesen werden.

Toxische Kupfergehalte schädigen bevorzugt die Zellmembranen der Wurzelzellen und führen so im Extremfall zum Wegfallen der sogenannten Wurzel/Spross-Barriere und zu einer erhöhten Translokation in der Pflanze. Als Mangelsymptome werden meist Chlorosen, Weißfärbung der Spitzen mit Eindrehen und Verkümmern der jüngeren Blätter genannt (Amberger, 1996; Kabata-Pendias, 2001).

Die einzelnen Pflanzenarten bzw. -gruppen zeigen unterschiedliche Optimal- bzw. Grenzwertbereiche. Dazu sind beispielhafte Angaben in der Tabelle 7 enthalten.

Für die weiteren Betrachtungen zu diesem F&E-Vorhaben wird auf der Grundlage der Literaturangaben davon ausgegangen, dass Kupfergehalte über 30 mg / kg Pflanzen-TS von phototoxisch geschädigten Pflanzen stammen. Von solch geschädigten Pflanzen fallen in Hausgärten sowie in Grün- und Parkanlagen wegen parallel auftretenden Wuchsdepressionen in der Regel keine erheblichen organischen Rückstände (Bioabfälle) an. Gehalte > 30 mg Cu / kg organische Trockensubstanz (oTS) in frischen pflanzlichen Bioabfällen deuten demnach meist auf externe, nicht durch die Pflanzen aufgenommene Kupferanträge hin.

Die Aufnahme von Kupfer als Mikronährstoff wird (unter dem Aspekt der Schadstoffübertragung) von Elsässer et al. (2004) als systemischer Eintragungspfad eines Schadstoffs definiert (siehe Abbildung 13). Für die Schadstoffübertragung wird hier zudem ein Verschmutzungspfad beschrieben. Bei pflanzlichem Ertrag an Futter- und Nahrungsmitteln besteht dieser aus Bodenanhang auf der Pflanzenoberfläche. Für Bioabfälle aus Hausgärten sowie von Grün- und Parkflächen kann dieser Wirkungsspfad auf technische Bodeneinträge bei der Aufnah-

me und beim Einsammeln erweitert werden, da hier bislang keine konsequente Orientierung auf Eintragsminderung besteht.

Tab. 7:

Ausreichende Gehalte und phytotoxische Grenzwertbereiche für Kupfer in Spross und Blättern ausgewählter Pflanzen und Pflanzengruppen (nach Bergmann, 1993)		
Kultur- pflanzenart	ausreichender Cu-Gehalt in mg/kg Pflanzen-TS	Toxischer Cu- Grenzwert- bereich in mg/kg Pflanzen-TS
Winterweizen	5 - 15	17 - 24
Sommergerste	5 - 12	22 - 30
Weidelgras	6 - 12	20 - 30
Schnittsalat	7 - 15	18 - 25
Zuckerrübe	7 - 15	20 - 30
Kartoffel	7 - 15	25 - 25
Sonnenblume	10 - 20	35 - 40
Koniferen	2 - 12	k.A.
Laubgehölze	5 - 12	k.A.
Gemüse	5 - 15	k.A.
Obstgehölze	5 - 15	k.A.
Zierpflanzen	4 - 20	k.A.
Durchschnitt	6 - 15	22 - 29
Legende:	k.A. - keine Angaben	

Amlinger et al. (2005) empfehlen die Einhaltung einer Höchstgrenze für Bodeneinträge von 15 Frischmasse-% zu den Ausgangsmaterialien bei der Bioabfallbehandlung. Die an diesem Projekt mitwirkenden Betreiber von Bioabfallbehandlungsanlagen bestätigen für bindige (Lehm-/Schluff- – Tonböden) bzw. nichtbindige (Sandböden) Standorte praktisch übliche Bodenverunreinigungen von 5 bzw. 12 % der Inputmaterialfrischmasse.

1.5 Beschreibung der Ausgangssituation bei der Bioabfallkompostierung

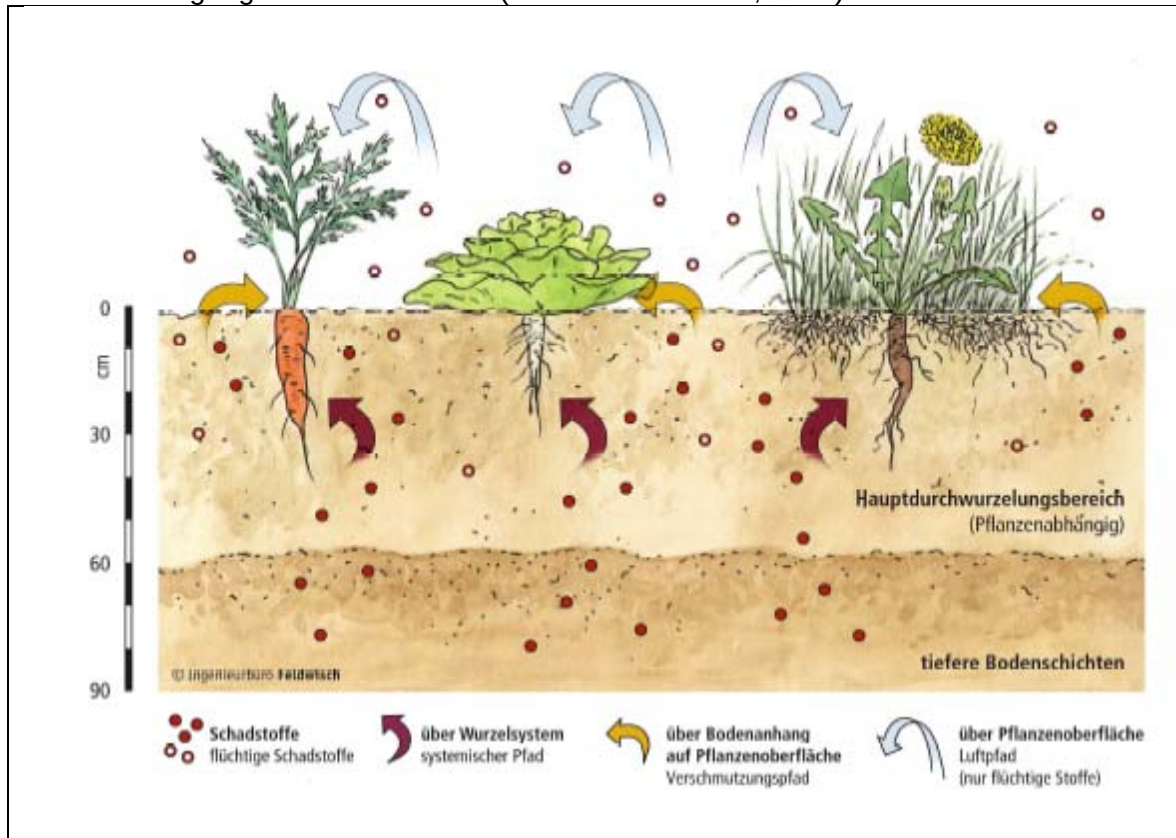
Die Bioabfallkompostierung verarbeitet vor allem pflanzliche Abfälle aus dem direkten Lebensbereich des Menschen. Es werden Siedlungsabfälle aus der Getrenntsammlung (Bio-tonne), einschließlich Hausgartenabfälle, Garten- und Parkabfälle aus dem Landschaftsbau und der Gartenanlagenpflege sowie unbelastete Gewerbeabfälle (zu großen Anteilen aus der Nahrungsgüterindustrie) verwertet. Diese Bioabfälle weisen nur insofern schadstoffhaltige Verunreinigungen auf, wie sie in ihren Ursprungsprodukten für den menschlichen Gebrauch enthalten oder durch meist unbewusste, menschliche Einträge verursacht worden sind. Die Schadstoffgehalte in Bioabfallkomposten reflektieren somit die Situation ihres Einzugsgebietes, was die Kupferversorgung von Pflanzen und den Umgang mit kupferhaltigen Gebrauchsgütern anbelangt. Sekundäre Schadstoffabtrennungen werden bei der stofflichen Verwertung von Bioabfällen nicht praktiziert.

In der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. haben sich über 500 Betreiber von Bioabfallbehandlungsanlagen zusammengeschlossen, um eine Qualitätssicherung nach dem Stand der Technik freiwillig zu gewährleisten. Die Bundesgütegemeinschaft Kompost verfügt mit ihrer Zentralen Auswertungsstelle (ZAS) über ein flächendeckendes Informationssystem zur

Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben 204 33 321 Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen	Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow
--	--

Erfassung von Qualitätsmerkmalen in Bioabfallkomposten und zur Überwachung der Einhaltung der Grenzwerte nach Bioabfallverordnung bzw. nach RAL-Gütezeichen 251. Hier gehen die Untersuchungsergebnisse von allen RAL-fremdüberwachten Bioabfallkompostanlagen ein.

Abb. 13: Schematische Darstellung der grundsätzlich zu berücksichtigenden Teilpfade beim Schadstoffübergang Boden $\Rightarrow$ Pflanze (nach Elsässer et al., 2004)



Dieser Datenpool ermöglicht umfassende statistische Auswertungen. Eine Weitergabe der Ursprungsdaten und deren anlagenbezogenen statistischen Auswertungen an Dritte (auch an das BMU bzw. das UBA) ist aus Gründen des Schutzes privatwirtschaftlicher Daten jedoch nicht zulässig, so dass nur durch die Bundesgütegemeinschaft autorisierte Bearbeiter solche Datenauswertungen durchführen dürfen. Die Ergebnisse anlagenübergreifender Auswertungen der Daten der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. sind dagegen frei verfügbar, womit die Bundesgütegemeinschaft Kompost und ihre Mitglieder einen Beitrag zur Transparenz in der Abfallwirtschaft leisten.

Bei bundesweiten Auswertungen der in der Zentralen Auswertungsstelle (ZAS) der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. vorliegenden Schadstoffgehaltsuntersuchungen wurden im Auftrag der Bundesgütegemeinschaft für die Jahre bis 1997 (unmittelbar vor Einführung der BioAbfV, Reinhold, 1998) und im Auftrag des Umweltbundesamtes für die Jahre 1998 bis 2002 (5 Jahre nach der Einführung der BioAbfV, Reinhold, 2004) folgende mittlere Veränderungen bei den Schadstoffgehalten in Bioabfallkomposten nachgewiesen (siehe Tabelle 8).

Bei der regionalen Auswertung der Daten von Bioabfallkompostierungsanlagen wurden für das Kupfer im Vergleich zu den anderen Schwermetallen besondere Anreicherungspotenziale festgestellt (Kördel et al., 2007).

Tab. 8: Entwicklung der Schadstoffgehalte in Bioabfallkomposten (1997 $\Rightarrow$ 2002) nach Reinhold (2004)

Parameter	Maß- einheit	Mittelwert 1997	2002	
			Mittelwert	% zu 1997
Blei	mg/kg TS	56,6	46,4	82,0
Cadmium	mg/kg TS	0,532	0,474	89,1
Chrom	mg/kg TS	24,7	25,3	102,4
Kupfer	mg/kg TS	48,7	57,7	118,4
Nickel	mg/kg TS	16,1	16,3	101,2
Quecksilber	mg/kg TS	0,177	0,156	88,1
Zink	mg/kg TS	196,2	203,7	103,8

1.6 Regionale Strukturen der Kupfergehalte in Bioabfallkomposten

In diesem Abschnitt werden Ausführungen von Reinhold (2004) zur inputmaterialbezogenen und regionalen Struktur der Kupfergehalte in Bioabfallkomposten zitiert.

Kupfer tritt bei den Grüngut- und den Mischgutkomposten (insgesamt 25 bis 100% Garten- und Parkabfälle) stets vergesellschaftet mit den anderen Schwermetallen auf. Bei Grüngutkomposten bestehen zudem enge Bindungen an deren Steingehalte. Zum Anteil der Biotonne am Inputmaterial und zu den Fremdstoffen bestehen lockere Beziehungen. Gänzlich anders ordnet sich Kupfer bei Biotonnenkomposten ein. Hier bestehen enge Bindungen an die wertgebenden Inhaltsstoffe, insbesondere an die organische Substanz und an die Hauptnährstoffe (N, P, K).

Bei der varianzanalytischen Auswertung der Kupfergehaltsmittelwerte RAL-gütesicherter Bioabfallkompostierungsanlagen wurden deutliche Auswirkungen von Inputmaterialart, von Zugehörigkeit der Anlagen zu Verdichtungsräumen und von regional vorherrschenden Hauptbodenarten ermittelt.

Aus den Abbildungen 14 bis 16 ist die Struktur der komplexen Abhängigkeit der Kupfergehalte von Einflussfaktoren der Bioabfallkompostierung ableitbar. Die Abbildung 14 zeigt den sehr starken Einfluss der Inputmaterialarten auf die Kupfergehalte der daraus erzeugten Komposte (vorwiegend Fertigkomposte). Grüngut-, Mischgut- und Biotonnenkomposte weisen hoch gesicherte Unterschiede in den Kupfergehalten auf, die mit dem Biotonnenanteil am gesamten Inputmaterial steigen.

In der Abbildung 15 wird gezeigt, dass die Zugehörigkeit der Bioabfallkompostierungsanlagen zu Verdichtungsräumen nur bei den Biotonnenkomposten von gesicherter Bedeutung ist. Getrennt gesammelte Siedlungsabfälle (Biotonne) der Kompostanlagen in Verdichtungsräumen bewirken niedrigere Kupfergehalte in den Komposten. Lockere Wohngebiete mit Hausgärten sind durch erhöhte Kupfergehalte in den getrennt gesammelten Siedlungsabfällen gekennzeichnet.

Zusätzlich spielen für die Kupfergehalte in Bioabfallkomposten, unabhängig von den Inputmaterialien und der Zugehörigkeit der Kompostanlagen zu einem Verdichtungsraum, die am Anlagenstandort vorherrschenden Bodenarten eine Rolle (siehe Abbildung 16). Sandstandorte fallen im Vergleich zu den sonstigen Böden durch deutlich niedrigere Kupfergehalte auf. Da diese Unterschiede nicht sehr groß sind, kann ein Zusammenhang mit den Gehalten an organischer Substanz gesehen werden. Die organische Substanz von Komposten ist im Ein-

zugsbereich/Umfeld von Sandbodenstandorten auch geringer, was für verstärkte Bodenabhängigkeit bei der Bioabfallsammlung spricht.

Abb. 14:

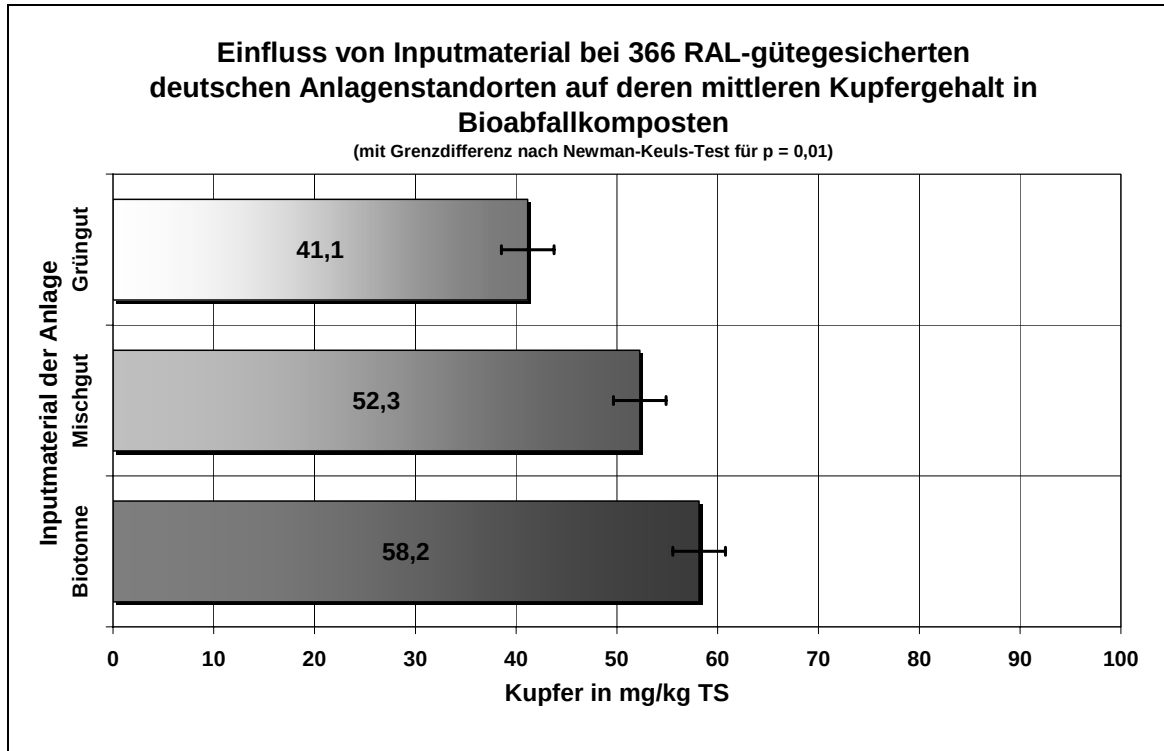


Abb. 15:

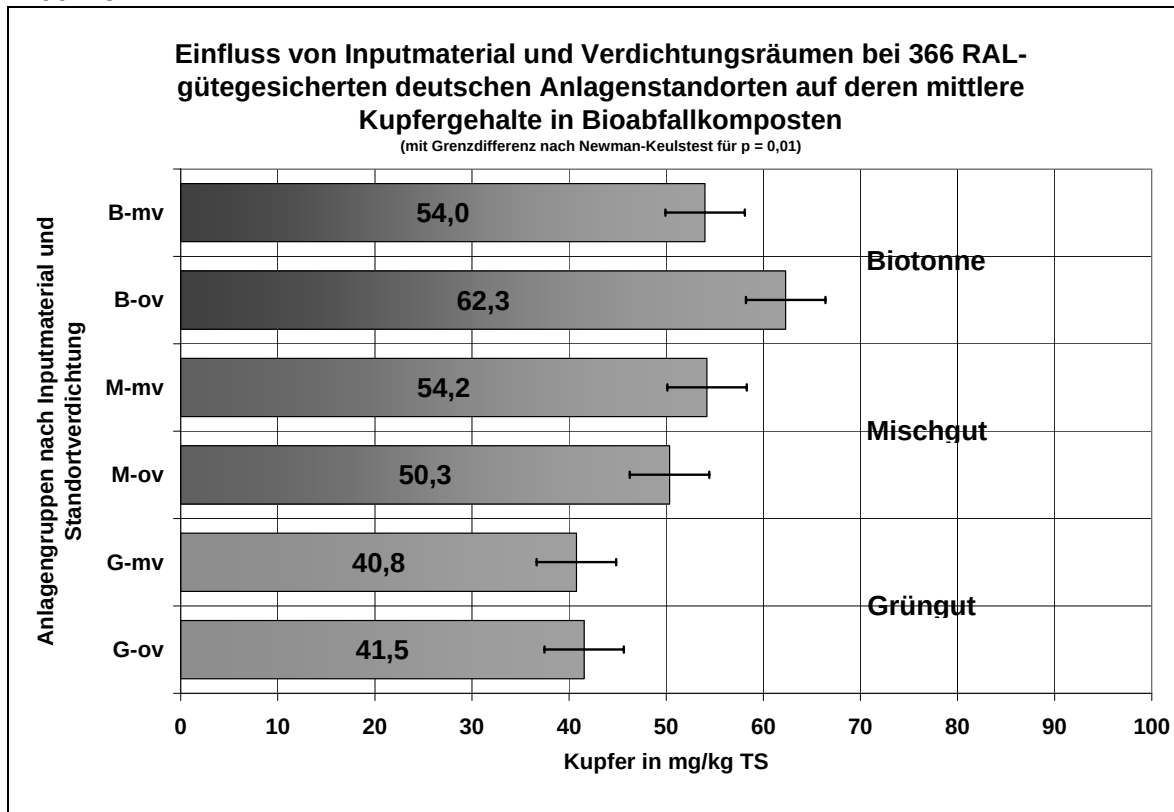
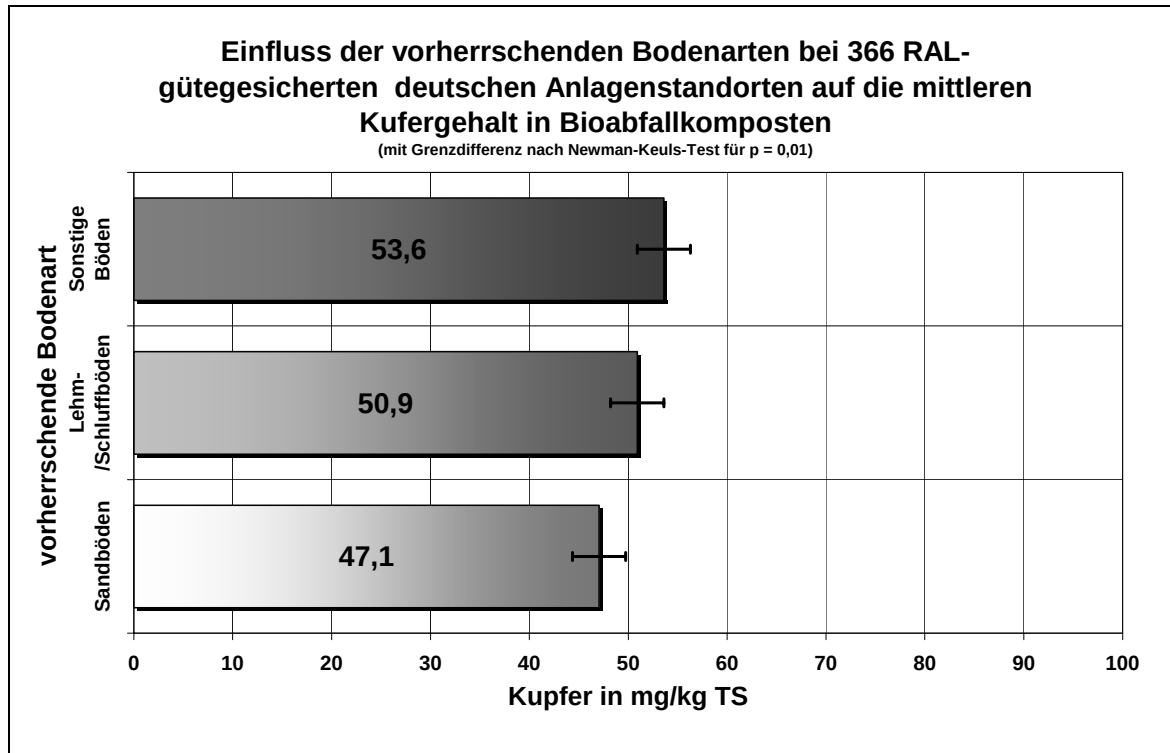


Abb. 16:



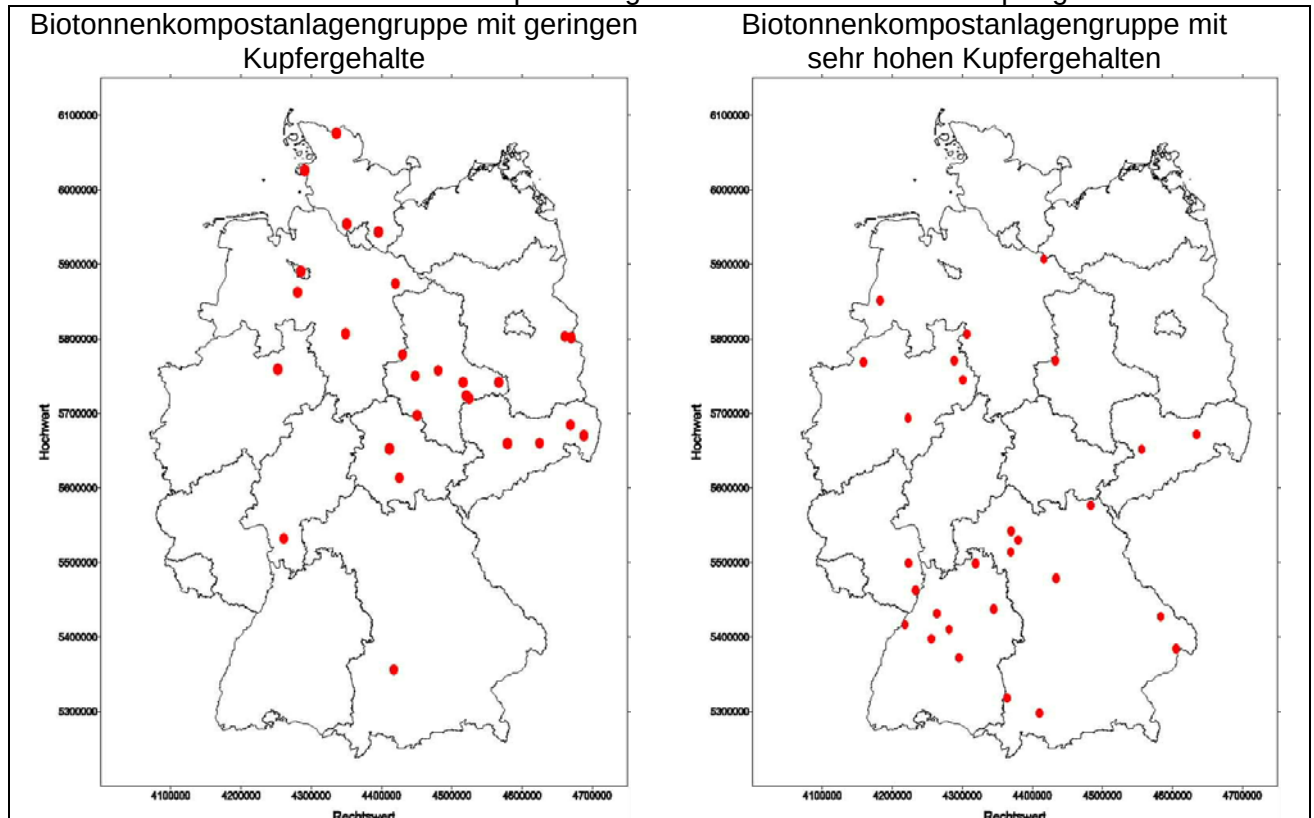
Die höchsten Kupfergehalte werden im Bereich sonstiger Böden gefunden. Das sind meist urbane Standorte, die keiner Bodenart direkt zuordenbar sind und in der Regel höhere Versiegelungsgrade aufweisen. In Regionen mit solchen, meist urbanen Standorten treten häufig erhöhte Kupfergehalte auf, die sich auf die Bioabfallzusammensetzung auswirken.

Eine Kompostierungsanlagengruppierung nach ihren Inputmaterialarten und Schwermetallgehaltsrangfolgen zeigte auch Beziehungen zu den Kupfergehalten. Hier hebt sich aus den Biotonnenkompostierungsanlagen eine kupferdominierte Gruppe deutlich ab. Bei den Mischgutkomposten ist dieser Trend nur noch angedeutet und bei den Grüngutkomposten überhaupt nicht mehr zu erkennen. Da sich zugleich bei den Biotonnenkomposten eine Anlagengruppe durch besonders niedrige Kupfergehaltsmittelwerte auszeichnet, sollen die flächigen Verteilungen dieser beiden Anlagengruppen in Deutschland kartografisch dargestellt werden (siehe Abbildung 17).

Es wird eine deutliche Struktur in der Verteilung von Biotonnenkompostanlagen mit hohen und geringen Kupfergehalten erkennbar. Während sich die kupferreichen Biotonnenkomposte vorwiegend im süddeutschen Raum befinden sind weniger kupferhaltige Biotonnenkomposte vor allem im mittel- bis norddeutschen Raum anzutreffen. Es sind aber auch Überschneidungen in der regionalen Verteilung der beiden gezeigten Anlagengruppen vorhanden. Eine nähere Interpretation ist nur durch Einzelbetrachtungen der Kompostanlagen möglich.

Durch die vorherrschenden Bodenarten, die Zugehörigkeiten der Anlagenstandorte zu einem Verdichtungsraum und die verarbeiteten Inputmaterialien können Differenzen der Kupfergehalte von 19,2 mg/kg TS (entspricht 33,3 % zum bundesweiten Mittelwert) hoch gesichert erklärt werden. Dabei sind die Einflussfaktoren Verdichtungsraum und Inputmaterial nur über Wechselwirkungen, also nur in Abhängigkeit von anderen Faktoren wirksam.

Abb. 17: Standorte von Biotonnenkompostanlagen mit unterschiedlichen Kupfergehalten



Ergänzend zu den Angaben nach Reinhold (2004) soll hier eine informelle kartografische Übersicht zur flächigen Verteilung von Anlagen mit unterschiedlichen Kupfergehalten in Bioabfallkomposten erfolgen (Stand 2002). Diese Angaben sind nicht geeignet zur Interpolation von Erwartungswerten für die Kupfergehalten bei neu zu errichtenden oder nicht in diese Auswertung einbezogenen Bioabfallbehandlungsanlagen, da hier nur die Informationen aus den ausgewählten Kompostierungsanlagen eingeflossen sind.

Besonders bei den Bioabfallkomposten im Raum Sachsen-Thüringen, in Nordrhein-Westfalen, in Baden-Württemberg und an der Elbemündung ist eine Tendenz zu höheren Kupfergehalten zu erkennen. In den Biotonnenkomposten der an der niedersächsischen Grenze zu den Niederlanden ausgewerteten Behandlungsanlagen ist zudem eine hohe Kupferkonzentration festzustellen. Insgesamt wird über Gesamtdeutschland die inhomogene Verteilung von Kompostierungsanlagen mit hohen und geringen Kupfergehalten erkennbar.

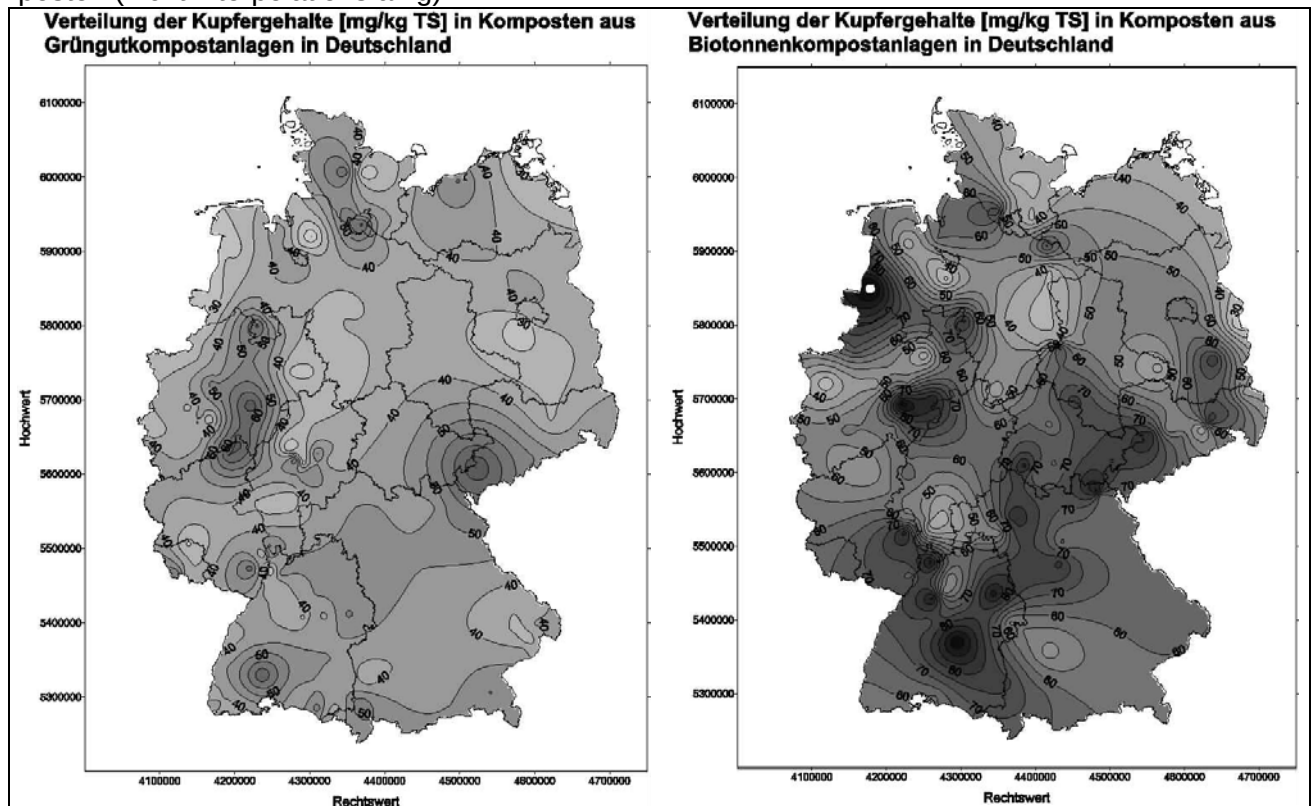
2. Auswertungen des Datenbestandes der Bundesgütegemeinschaft Kompost

2.1 Trendabschätzung der Entwicklung von Kupfergehalten in Bioabfallkompostierungsanlagen

Bei 376 Bioabfallkompostierungsanlagen mit einer Jahresinputmenge für 2002 von 4.860.127 t und mindestens 10 Datensätzen aus Untersuchungen nach Bioabfallverordnung bzw. RAL-Gütezeichen 251 Kompost wurden lineare Regressionsanalysen der Kupfergehalten über die Zeit (Probenahmedatum) durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Trendanalysen sind in Anhang 1 zusammengestellt. Hier sind je Anlage der Schätzmittelwert für das Jahr 2002, der jährliche Anstieg der Kupfergehalten über die Zeit von 1998 bis 2002 und die statistische Sicherheit der Trendaussage genannt. Zur besseren stofflichen Einord-

nung wurden je Anlage die Anteile der Biotonne am Gesamtinputmaterial und die verwertete Bioabfallmenge für das Jahr 2002 beigefügt.

Abb. 18: Übersicht zur regionalen Verteilung von Kupfergehalten in deutschen Bioabfallkomposten (nicht interpolationsfähig)

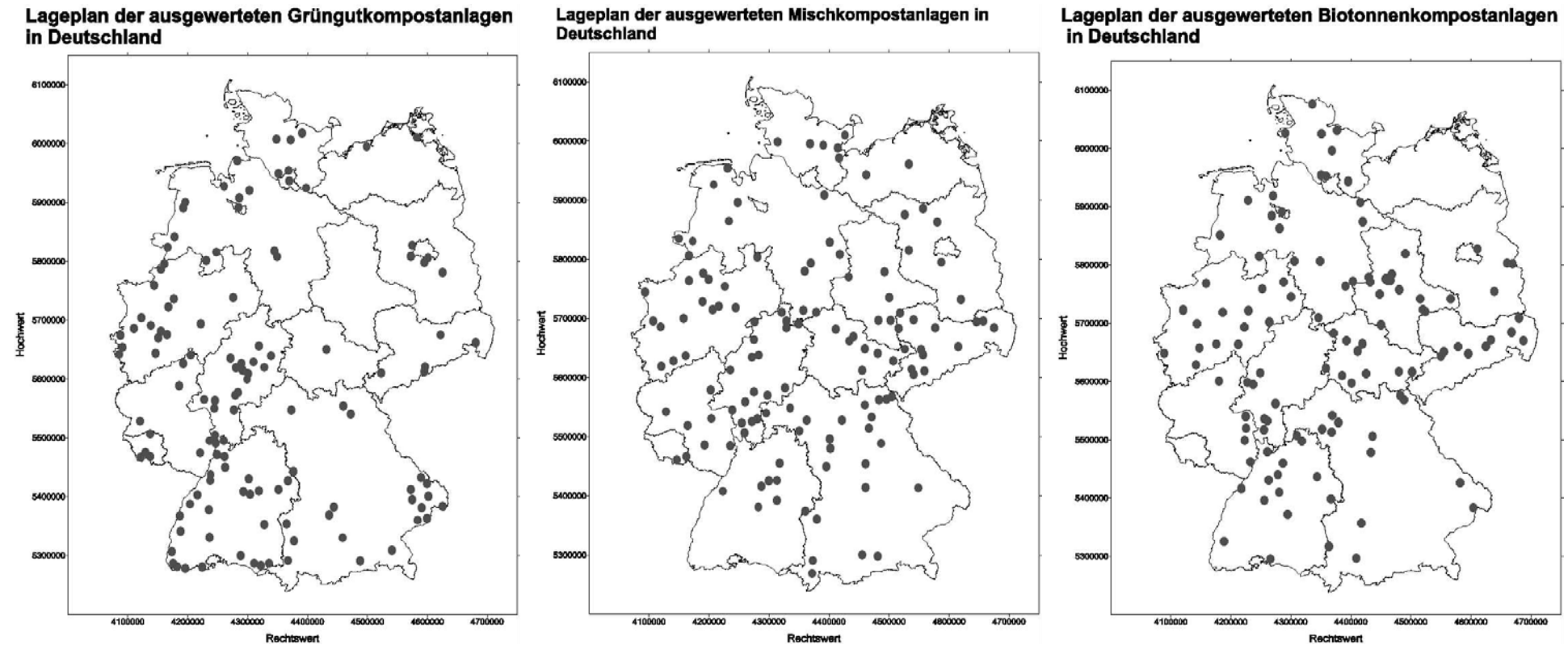


Die in diese Auswertung einbezogenen Bioabfallkompostierungsanlagen sind getrennt nach Grüngut-, Mischgut- und Biotonnenabfallkompostierungsanlagen nachfolgend in ihrer flächigen Verteilung dargestellt (siehe Abbildung 19). Die in dieses Projekt einbezogenen Bioabfallbehandlungsanlagen erlauben eine repräsentative Aussagen für Gesamtdeutschland. Durch die RAL-Gütesicherung kann davon ausgegangen werden, dass alle einbezogenen Anlagen dem Stand der Technik und damit auch den geltenden Umweltschutzanforderungen entsprechen.

Insgesamt sind folgende Ergebnisse der Trendanalyse für die Zeit von 1998 bis 2002 zu nennen:

- 18,6 % der Anlagen zeigen eine gesicherte Zunahme der Kupfergehalte, das betrifft 22,2 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle
- 69,9 % der Anlagen weisen keine zeitliche Veränderung der Kupfergehalte auf, das betrifft 68,5 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle
- 11,5 % der Anlagen sind durch abnehmende Kupfergehalte gekennzeichnet, das betrifft 9,3 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle.

Abb. 19: Lagepläne der ausgewerteten RAL-gütesicherten Bioabfallkompostanlagen

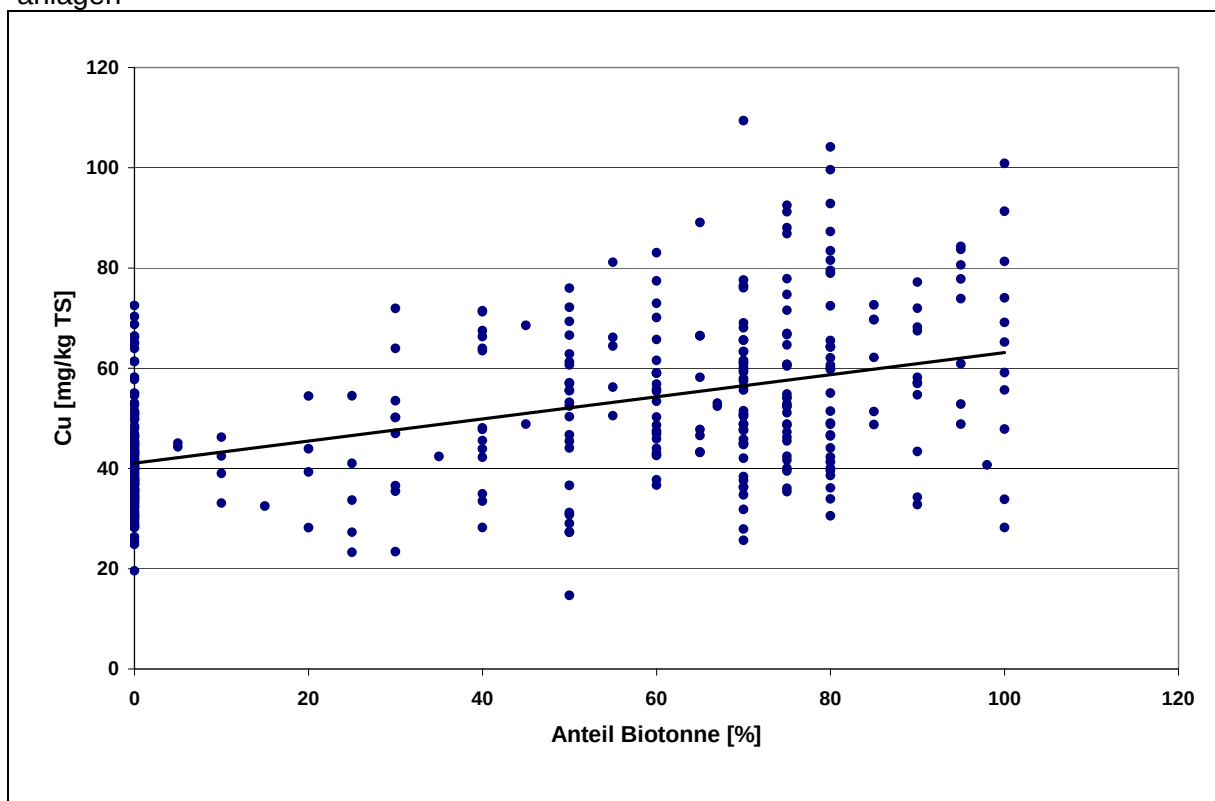


Die Schätzmittelwerte der Kupfergehalte für das Jahr 2002 zeigen folgende Staffelung:

- 0,8 % der Anlagen liegen in den Schätzmittelwerten über dem Grenzwert der Bioabfallverordnung (100 mg/kg TS), das betrifft 0,5 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle, insbesondere in der geogen kupferbelasteten Region um den Vogelsberg (Hessen)
- 11,2 % der Schätzmittelwerte der geprüften Anlagen überschreiten die Vorgaben nach BioAbfV, § 4, Absatz 3, Satz 2 (70 mg/kg TS), das betrifft 11,5 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle
- 81,6 % der Anlagen weisen Schätzmittelwerte zwischen 30 bis 70 mg/kg TS auf, das betrifft 82,8 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle
- 6,4 % der Anlagen liegen mit ihren Schätzmittelwerten unter 30 mg/kg TS, das betrifft 5,3 % der insgesamt verwerteten Bioabfälle.

In der Abbildung 20 ist der Einfluss des Anteils der Biotonne am Gesamtinputmaterial der Anlagen auf deren Schätzmittelwert von Kupfergehalten im Jahr 2002 dargestellt. Mit steigenden Biotonnenanteil nehmen die Kupfergehalte linear zu. Dieser Zusammenhang ist jedoch mit einer großen Variabilität verbunden.

Abb. 20: Zusammenhang von Biotonnenanteil am Gesamtinputmaterial und Schätzmittelwert der Kupfergehalte für das Jahr 2002 von RAL-fremdüberwachten Bioabfallkompostierungsanlagen

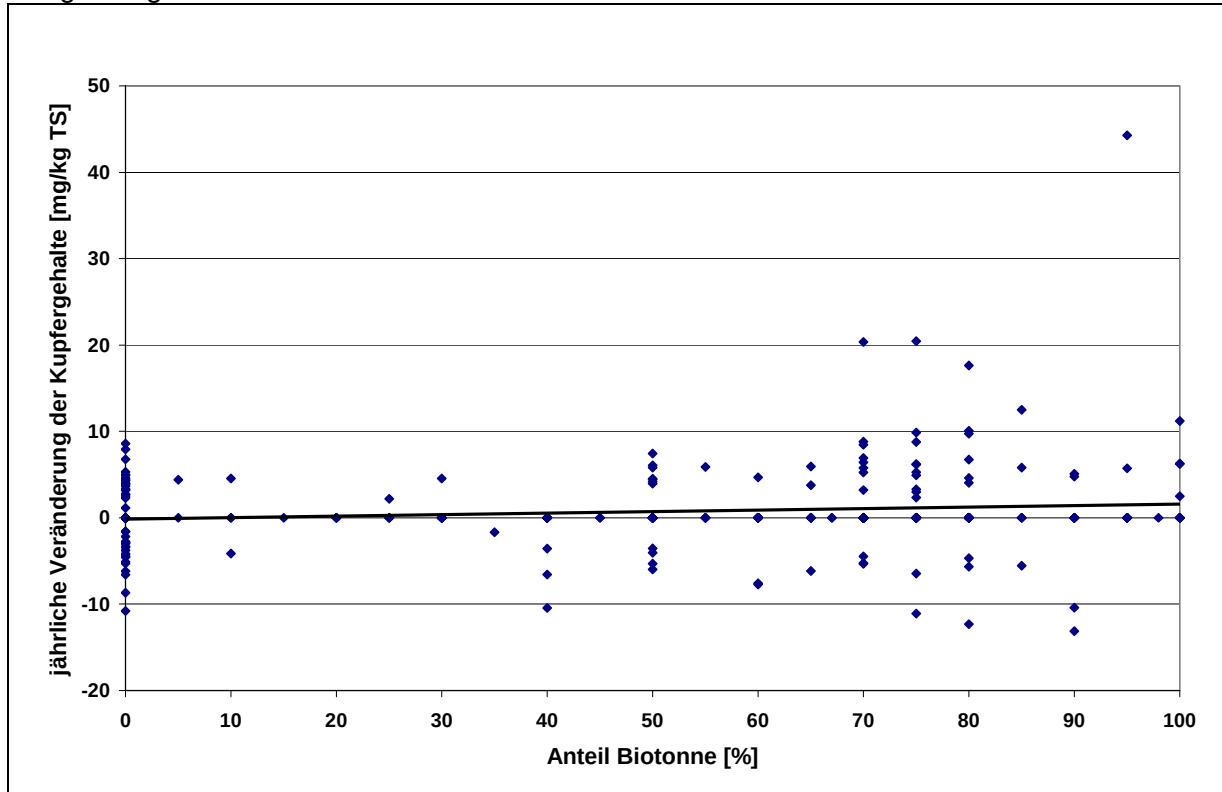


In der Abbildung 21 ist die jährliche Veränderung der Kupfergehalte in den geprüften Bioabfallkompostanlagen für die Zeit von 1998 bis 2002 in Abhängigkeit vom Anteil der Biotonne am Gesamtinputmaterial dargestellt. Der Anteil von Biotonnenabfällen am gesamten Inputmaterial zeigt hier keinen Einfluss auf die zeitabhängigen Veränderungen der Kupfergehalte.

Die Kupfergehalte in Bioabfallkomposten werden in der Höhe ihrer Mittelwerte durch die Biotonne beeinflusst, nicht jedoch im Verlauf der Einzelmesswerte über die Anlagenbetriebs-

dauer. Der in den Einzelanlagen nachgewiesene Trend der Kupfergehalte musste demnach anlagenspezifisch untersucht und ausgewertet werden.

Abb. 21: Zusammenhang von Biotonnenanteil am Gesamtinputmaterial und jährlichem Anstieg der Kupfergehalte von 1998 bis 2002 bei RAL-fremdüberwachten Bioabfallkompostierungsanlagen



2.2 Betroffenheitsanalyse

Auf der Grundlage der Trendabschätzung aus den Jahren 1998 bis 2002 erfolgte eine Betroffenheitsanalyse nach Kupferauswirkungen, indem die Bioabfallkompostierungsanlagen nach der Höhe des Schätzmittelwertes der Kupfergehalte und deren jährlicher Veränderung bewertet wurden.

Die Anlagen wurde nach dem Kupfergehaltstrend wie folgt gruppiert:

- stark zunehmender Trend – gesicherte Jahresveränderung über +7 mg/kg TS
- gering zunehmender Trend – gesicherte Jahresveränderung bis +7 mg/kg TS
- ohne Trend – keine gesicherte Veränderung
- gering abnehmender Trend – gesicherte Jahresveränderung bis -7 mg/kg TS

Die Anlagen wurden nach ihren Schätzmittelwerten folgendermaßen gruppiert

- mehr als 70 % Grenzwertausschöpfung nach BioAbfV
- 30 bis 70 % Grenzwertausschöpfung nach BioAbfV
- unter 30 % Grenzwertausschöpfung nach BioAbfV

Es konnten 12 Anlagengruppen gebildet werden, wobei die Anlagen mit Kupfer-Schätzmittelwerten für das Jahr 2002 unter 70 mg/kg TS und ohne gesicherten Trend über die Jahre von 1998 bis 2002 sowie alle Anlagen mit Kupfer-Schätzmittelwerten für das Jahr 2002 unter 70 mg/kg TS als nicht durch die Kupferproblematik betroffen eingestuft wurden. 7 Anlagengruppen sind durch hohe bzw. deutlich ansteigende Kupfergehalte betroffen und für die weiteren Auswertungen im Rahmen des F&E-Projektes praktisch relevant. Nachfolgend sind die gefundenen Anlagengruppen, ihre zahlenmäßige Besetzung und die jeweilige Jahresinputmenge für 2002 genannt:

- 10 Anlagen mit stark zunehmendem Trend und Schätzmittelwerten über 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 146.600 t)
- 7 Anlagen mit gering zunehmendem Trend und Schätzmittelwerten über 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 114.200 t)
- 5 Anlagen mit stark zunehmendem Trend und Schätzmittelwerten unter 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 66.100 t)
- 46 Anlagen mit gering zunehmendem Trend und Schätzmittelwerten unter 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 741.022 t)
- 20 Anlagen ohne Trend und Schätzmittelwerten über 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 175.000 t)
- 4 Anlagen mit gering abnehmendem Trend und Schätzmittelwerten über 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 36.000 t)
- 3 Anlagen mit stark abnehmendem Trend und Schätzmittelwerten über 70 mg/kg TS (Inputmenge im Jahr 2002: 63.600 t)

Insgesamt sind bei der RAL-gütesicherten Bioabfallkompostierung 95 Anlagen mit einer Jahresinputmenge im Jahr 2002 von 1.342.572 t durch die Kupferproblematik direkt betroffen. Das entspricht 25,3 % der in die Auswertung einbezogenen Bioabfallkompostierungsanlagen bzw. 27,6 % der Inputmenge für das Jahr 2002.

Ergänzend wurde für die gruppierten Anlagen eine Trendabschätzung für die Zeit vor 1998 durchgeführt. Beide zeitlich aufeinanderfolgende Trendabschätzungen zeigen sowohl ähnliche als auch deutlich voneinander abweichende Ergebnisse.

Innerhalb der einzelnen Anlagengruppen wurde eine Auswahl nach Eignung der Anlagen für weiterführende Datenauswertungen getroffen. Als Entscheidungsmerkmale wurden hier die Anlagengruppenpräsenz, die Dauer des Anlagenbetriebes und das Verhältnis der Ergebnisse der Trendabschätzungen vor 1998 und von 1998 bis 2002 gewählt. Im Anhang sind für die einzelnen Anlagengruppen die zugehörigen Anlagen und eine Auswahl für die weiterführend auszuwertenden Anlagen enthalten. Einige auswertungsrelevante Anlagen sind nach 2002 geschlossen wurden. Das ist durch einen entsprechenden Vermerk gekennzeichnet.

Insgesamt wurden für die weitere Datenauswertungen 42 Bioabfallkompostierungsanlagen ausgewählt, die deutlich im Bereich der Kupfergehalte betroffen sind und von ihrer Datenstruktur her differenziert aussagefähige Ergebnisse erwarten lassen. Im Anhang sind die in die weiteren Auswertung einbezogenen Anlagen mit ihrer Entwicklung der Kupfergehalte von der Inbetriebnahme bis zum Jahr 2004 je Anlagengruppe grafisch dargestellt.

2.3 Statistische Auswertung der Anlagendaten

Die 42 ausgewählten Bioabfallkompostierungsanlagen wurden auf die Beziehungen der Kupfergehalte zu anderen Kompostmerkmalen statistisch untersucht und bewertet. Das Ziel die-

ser Datenauswertungen besteht in der umfassenden Information über die anlageninternen Zusammenhänge der Kupfergehalte zum Anlagenbetrieb sowie zu wertgebenden und zu vorsorgebestimmenden Inhaltsstoffen der Komposte. Auf der Grundlage der anlageninternen Datenauswertungen wurden Anlagengruppen ähnlicher interner Zusammenhänge der Kupfergehalte abgeleitet.

Material und Methoden

Die Daten für die anlageninternen Auswertungsschritte der ausgewählten 42 Kompostierungsanlagen wurden durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Köln für die gesamte Dauer des jeweiligen Anlagenbetriebes bis zum Jahr 2004 bereitgestellt.

Folgende Merkmale wurden in die Auswertungen einbezogen:

Kennzeichnung der Anlagenbewirtschaftung:

- Dauer des Anlagenbetriebes in Jahren
- Wassergehalt der Komposte
- Maximalkorn der Komposte
- Rottegrad
- Anteil der Biotonne am Inputmaterial
- Anteil von Grün- und Parkabfällen am Inputmaterial
- Anteil von sonstigem Inputmaterial (vor allem Gewerbeabfälle)

Kennzeichnung wertgebender Inhaltsstoffe:

- Organische Substanz
- Basisch wirksame Bestandteile
- Gesamtstickstoff
- Gesamtphosphor
- Gesamtkalium
- Gesamtmagnesium
- Salzgehalt

Kennzeichnung vorsorgebestimmender Inhaltsstoffe:

- Fremdstoffe
- Steine (> 5 mm)
- Blei
- Cadmium
- Chrom
- Kupfer
- Nickel
- Quecksilber
- Zink

Für jede Anlage wurden die wesentlichen Aussagen zu den Kupfergehalten zusammengestellt (Anlagenkennzeichnung, Zeitverlaufdiagramm und Ergebnisse der Trendanalyse der Kupfergehalte). Diese weiterführende Auswertung der Daten erfolgt in folgenden 3 Schritten:

- Grafische Darstellung der Datenverteilung und der Beziehungen zu den Kupfergehalten
- Clusteranalyse der Kompostmerkmale
- Multiple Regressionsanalyse der Beziehungen von Kupfergehalten zu anderen Kompostmerkmalen.

Grafische Darstellungen

Die grafischen Darstellungen sind für Kupfergehalte im Kompost getrennt nach deren Beziehungen

- zur Anlagenbewirtschaftung
- zu wertgebenden Inhaltsstoffen

- zu Fremd- und Schadstoffen.
zusammengestellt.

Hier wird ersichtlich und bewertbar,

- welche Gesamttendenz in den einzelnen Beziehungen von Kupfer zu anderen Kompostierungsmerkmalen besteht und
- welchen Einfluss Ausreißermesswerte sowohl bei Kupfer als auch bei den anderen Kompostierungsmerkmalen auf diese Gesamttendenz haben.

Clusteranalyse

Die Clusteranalyse (numerische Taxonomie) ist ein numerisches Verfahren zur Strukturanalyse von Datenmengen, bei denen man das Ergebnis nicht durch Vorgaben beeinflussen möchte. Auf der Grundlage von der Untersuchung von Kompostproben soll eine Gruppierung der Kompostmerkmale in Cluster (Gruppen) gefunden werden. Ziel ist es kupferrelevante Kompostmerkmalsgruppen zu erkennen und zu bewerten.

Die Gruppierung der Kompostmerkmale erfolgt hierarchisch und disjunkt (ohne Überlappung der abgeleiteten Gruppen). Die Kompostmerkmale werden als Stichproben mit unbekanntem Verteilungsmuster betrachtet. Es erfolgt eine Standardisierung der Merkmale an der Standardabweichung der Mittelwerte über alle Kompostproben. Als Maß für die Distanz bzw. Ähnlichkeit wurde die lineare Korrelation ($1 - \text{pearson } r$) der standardisierten Merkmale gewählt.

Die Gruppenbildung erfolgte unter Gleichgewichtung aller verfügbaren Untersuchungsergebnisse der Kompostproben. Als Methode der Gruppierung wurde die von Ward gewählt, bei der sowohl Homogenität und als auch Distanziertheit der Kompostmerkmale berücksichtigt werden. Ab einem Distanzmaß von 2 und darüber wird von einer statistisch sicheren konventionen Gruppenbildung der Kompostmerkmale ausgegangen.

Die Ergebnisse der Clusteranalyse werden in Form eines Dendrogramms grafisch dargestellt. Hier sind sowohl die in sich sicheren Gruppenbildungen (Distanzmaß bzw. Linkage Distance ≤ 2) als auch der Grad der Distanziertheit zu anderen Gruppen erkennbar.

Multiple Regressionsanalyse

In einem dritten Auswertungsschritt wurde die Hypothese anlageninterner Zusammenhänge der Kupfergehalte zu anderen Kompostmerkmalen durch eine multiple Regressionsanalyse geprüft. Es wurden folgende Merkmale in die regressionsanalytische Auswertung einbezogen:

als Zielgröße

- y - Kupfer

als Einflussgrößen

- x_1 - Dauer des Anlagenbetriebes in Jahren
- x_2 - Wassergehalt der Komposte
- x_3 - Maximalkorn der Komposte
- x_4 - Rottegrad
- x_5 - Anteil der Biotonne am Inputmaterial
- x_6 - Organische Substanz
- x_7 - Basisch wirksame Bestandteile
- x_8 - Gesamtstickstoff
- x_9 - Gesamtposphor
- x_{10} - Gesamtkalium
- x_{11} - Gesamtmagnesium
- x_{12} - Salzgehalt

- x_{14} - Fremdstoffe
- x_{15} - Steine (> 5 mm)
- x_{16} - Blei
- x_{17} - Cadmium
- x_{18} - Chrom
- x_{19} - Nickel
- x_{20} - Quecksilber
- x_{21} - Zink

Für die Ableitung eines zu prüfenden Regressionsmodells wurde von der Hypothese ausgegangen,

- dass alle Einflussgrößen eine Beziehung zu den Kupfergehalten haben können,
- dass dieser Einfluss nicht nur linear, sondern auch quasi nichtlinear in Form einer Parabel beschreibbar ist und
- dass Wechselwirkungen aller Einflussgrößen nur mit der Dauer des Anlagenbetriebes, dem Biotonnenanteil am Inputmaterial und den Kompostgehalten an organischer Substanz relevant sind.

Daraus abgeleitet wurde folgendes Regressionsmodell statistisch geprüft:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_2 + a_4x_2^2 + a_5x_3 + a_6x_3^2 + a_7x_4 + a_8x_4^2 + a_9x_5 + a_{10}x_5^2 + a_{11}x_6 + a_{12}x_6^2 + a_{13}x_7 + a_{14}x_7^2 + a_{15}x_8 + a_{16}x_8^2 + a_{17}x_9 + a_{18}x_9^2 + a_{19}x_{10} + a_{20}x_{10}^2 + a_{21}x_{11} + a_{22}x_{11}^2 + a_{23}x_{12} + a_{24}x_{12}^2 + a_{25}x_{13} + a_{26}x_{13}^2 + a_{27}x_{14} + a_{28}x_{14}^2 + a_{29}x_{15} + a_{30}x_{15}^2 + a_{31}x_{16} + a_{32}x_{16}^2 + a_{33}x_{17} + a_{34}x_{17}^2 + a_{35}x_{18} + a_{36}x_{18}^2 + a_{37}x_{19} + a_{38}x_{19}^2 + a_{39}x_{20} + a_{40}x_{20}^2 + a_{41}x_{21} + a_{42}x_{21}^2 + a_{43}x_1x_2 + a_{44}x_1x_3 + a_{45}x_1x_4 + a_{46}x_1x_5 + a_{47}x_1x_6 + a_{48}x_1x_7 + a_{49}x_1x_{10} + a_{50}x_1x_{11} + a_{51}x_1x_{12} + a_{52}x_1x_{13} + a_{53}x_1x_{14} + a_{54}x_1x_{15} + a_{55}x_1x_{16} + a_{56}x_1x_{17} + a_{57}x_1x_{18} + a_{58}x_1x_{19} + a_{59}x_1x_{20} + a_{60}x_1x_{21} + a_{61}x_5x_2 + a_{62}x_5x_3 + a_{63}x_5x_4 + a_{64}x_5x_6 + a_{65}x_5x_7 + a_{66}x_5x_8 + a_{67}x_5x_9 + a_{68}x_5x_{10} + a_{69}x_5x_{11} + a_{70}x_5x_{12} + a_{71}x_5x_{13} + a_{72}x_5x_{14} + a_{73}x_5x_{15} + a_{74}x_5x_{16} + a_{75}x_5x_{17} + a_{76}x_5x_{18} + a_{77}x_5x_{19} + a_{78}x_5x_{20} + a_{79}x_5x_{21} + a_{80}x_6x_2 + a_{81}x_6x_3 + a_{82}x_6x_4 + a_{83}x_6x_7 + a_{84}x_6x_8 + a_{85}x_6x_9 + a_{86}x_6x_{10} + a_{87}x_6x_{11} + a_{88}x_6x_{12} + a_{89}x_6x_{13} + a_{90}x_6x_{14} + a_{91}x_6x_{15} + a_{92}x_6x_{16} + a_{93}x_6x_{17} + a_{94}x_6x_{18} + a_{95}x_6x_{19} + a_{96}x_6x_{20} + a_{97}x_6x_{21}$$

Solch ein komplexer Modellansatz verlangt bei einer Gesamtauswertung einerseits eine große Anzahl auswertbarer Datensätze und führt andererseits meist zu erheblichen internen Korrelationen der Einflussgrößen. Deshalb wurde ein schrittweiser Aufbau der statistisch zu sichernden Regressionsgleichung vorgenommen, wobei für die Ersteinbindung in die Regressionsgleichung ein partieller t-Wert des Regressionsfaktors ≥ 3 und für den Ausschluss wegen interner Korrelationen nicht mehr relevanter Regressionsfaktoren ein partieller t-Wert ≤ 2 gewählt wurden.

Für die ermittelten Regressionsgleichungen wurde der Schätzfehler für die Kupfergehalte ausgewiesen, der eine Aussage über das zu erwartende Maß der Erklärbarkeit von Kupfergehaltsunterschieden liefert. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind grafisch dargestellt, wobei in der Regel dreidimensionale Abbildungen entstanden sind – vor allem dort, wo Wechselwirkungen aufgetreten sind.

Zusammenfassende Auswertung der Anlagendaten

Die zusammenfassende Bewertung bezieht sich vor allem auf die Ergebnisse der Cluster- und der Regressionsanalysen. Dazu wird für jede Kompostierungsanlage eine tabellarische Übersicht erstellt. Treffen hier positive Beziehungen der Einflussfaktoren mit den Kupfergehalten im Kompost zusammen, so wird von einem dominanten Zusammenhang ausgegangen.

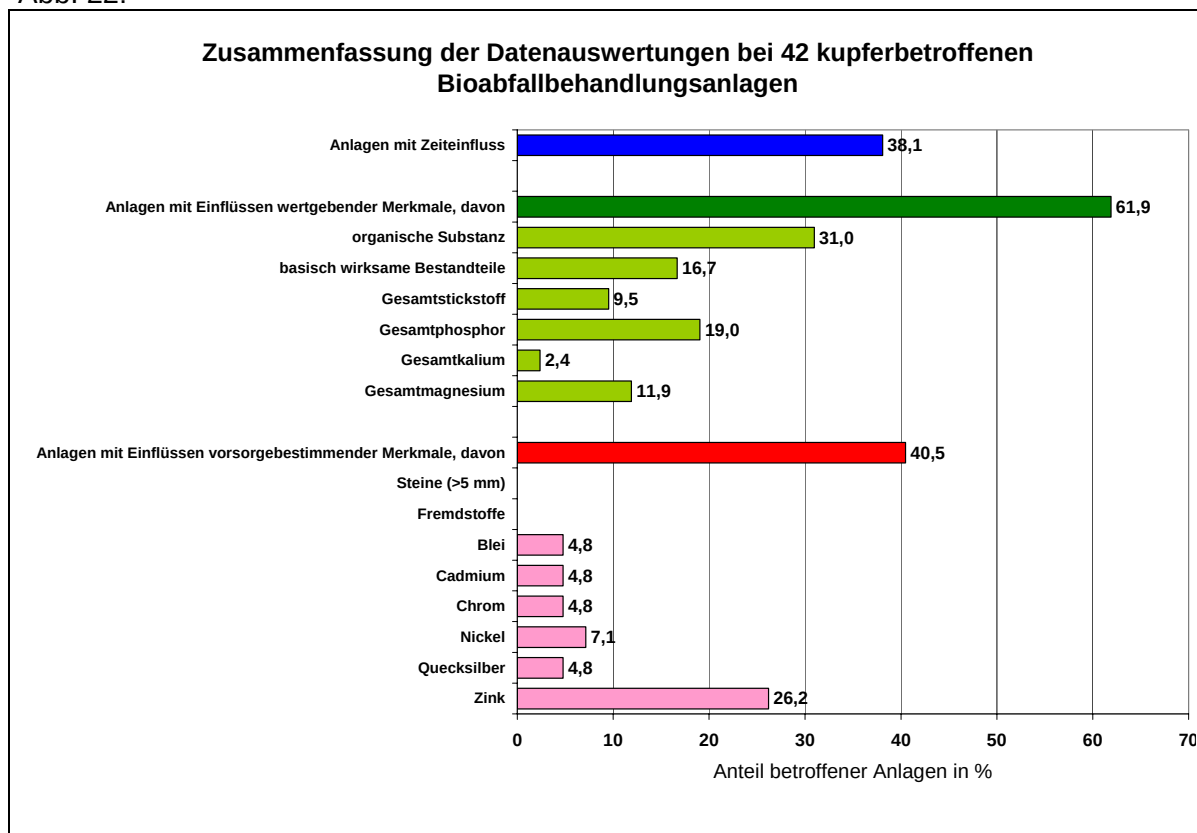
Treten in Einzelfällen positive Beziehungen aus der Clusteranalyse mit negativen Beziehungen aus der multiplen Regressionsanalyse in Widerspruch, so wird das als nachteilig für die weitere Anlagenauswertung hervorgehoben.

Unter Berücksichtigung aller Auswertungsschritte und der schon im Teilbericht vom November 2004 genannten Schlussfolgerungen wird ein erster Empfehlungsvorschlag für die Einbeziehung der Kompostierungsanlage in die weiterführenden Auswertungsschritte gegeben.

Ergebnisse der statistischen Auswertung der Anlagendaten

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Untersuchungsergebnisse für 42 Kompostierungsanlagen werden hier zusammenfassend dargestellt. Bewertungen für einzelne Kompostierungsanlagen sind entsprechend diesen Ergebnissen nachvollziehbar (siehe Abbildung 22).

Abb. 22:



Eine tabellarische Zusammenfassung der Einzelanlagenbewertungen ist nachfolgend einzusehen (siehe Tabelle 9).

Aus den Bewertungen der Anlagen können hinsichtlich der Beziehungen unterschiedlicher Kompostierungsmerkmale zum Kupfergehalt der Bioabfallkomposte folgende Aussagen abgeleitet werden:

Über 25 % der geprüften Anlagen mit erhöhten bzw. zunehmenden Kupfergehalten zeigen dominante Beziehungen von Kupfer zu den Einflussfaktoren

- Dauer des Anlagenbetriebes
- Gehalt an organischer Substanz
- Zinkgehalt

Tab. 9: Zusammenfassung der kupferrelevanten Einzelanlagenbewertungen

Anlagennr.	Bewertungs- vorschlag	Anzahl dominater Faktoren	als dominant bewertete Einflussfaktoren															
			Zeit	Bio- tonne	org. Subst.	N	P	K	Mg	Ca	Steine	Fremd- stoffe	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	Zn
145	o	1					X											
153	o	3			X				X	X								
175	+	1																X
232	+	3					X		X	X								
233	+	1	X															
237	o	0																
247	++	1	X															
253	+	1													X			
263	++	4	X		X			X	X									
271	+	2												X				X
276	++	2			X					X								
294	o	1	X															
296	o	0																
298	++	2	X		X													
304	++	1					X											
313	+	2	X							X								
315	++	1					X											
326	+	1																X
327	++	4	X		X		X			X								
329	++	3	X						X								X	
330	+	1				X												
334	+	2														X		X
337	+	1											X					
339	++	2	X												X			
342	++	2			X												X	
342	++	1			X													
344	o	2	X				X											
345	o	0																
347	+	1														X		
349	o	3	X		X													X
355	o	4	X			X							X					X
357	o	1	X															
358	+	1					X											
359	++	4	X		X		X											X
361	++	1																X
367	++	2	X		X													
368	++	4			X					X				X				X
371	o	5	X		X	X										X		X
373	++	1				X												
374	+	1			X													
375	+	2							X									X
376	+	1								X								
Häufigkeit dominater Einflussparameter			16	0	13	4	8	1	5	7	0	0	2	2	2	3	2	11

Legende: X - Einflussfaktor als dominant hervorgehoben
o - nicht zur weiteren Auswertung empfohlen
+ - zur weiteren Auswertung empfohlen
++ - zur weiteren Auswertung besonders empfohlen

Die beiden ubiquitär präsenten Mikronährstoffe Kupfer und Zink weisen auch in den Bioabfallkomposten enge Beziehungen zur organischen Substanz auf. Hier sind biologische Fixierungspotenziale als ursächlich anzunehmen. Die Dauer des Anlagenbetriebes ist wahrscheinlich losgelöst von dieser Merkmalskombination zu sehen, kann jedoch auf mögliche Anreicherungsprozesse durch Kreislaufführung von Materialien in den Anlagen hindeuten (z.B. Rückführung von Siebüberlaufanteilen und Prozesswasser) bzw. durch zunehmende nicht pflanzliche Einträge in die Bioabfälle verursacht worden sein.

10 bis 25 % der geprüften Anlagen zeigen dominante Beziehungen der Kupfergehalte zu den Merkmalen

- Gesamtphosphorgehalt
- Basisch wirksame Bestandteile
- Gesamtmagnesiumgehalt

Kupfer kann, ähnlich wie Phosphor, calzitisch ausgefällt werden. Dabei können Calcium und Magnesium vergesellschaftet auftreten. Das kann als Ursache für diese Merkmalskombination angesehen werden. Chemische Fixierungen von Kupfer können Anreicherungs Vorgänge begünstigen.

Weniger als 10 der geprüften Bioabfallkompostierungsanlagen zeigen dominante Beziehungen der Kupfergehalte zu den Merkmalen

- Gesamtstickstoffgehalt
- Nickelgehalt
- Blei-, Cadmium, Chrom und Quecksilbergehalt
- Gesamtkaliumgehalt

Hier ist keine gemeinsame Merkmalskombination mehr anzunehmen. Die Faktoren wirken selten und voneinander losgelöst.

Keine der geprüften Anlagen mit erhöhten bzw. zunehmenden Kupfergehalten zeigen spezielle dominante Beziehungen von Kupfer zum Einflussfaktor

- Anteil der Biotonne am Gesamtinputmaterial

Das deutet darauf hin, dass die schon aufgezeigten Beziehungen erhöhter Kupfergehalte zum Biotonnenabfallanteil bei der Kompostierung vor allem auf die oben genannten Inhaltsstoffe zurückzuführen sind.

Für die Anzahl der dominanten Einflussfaktoren auf die Kupfergehalte der Komposte ist folgende Aussage möglich:

- 6 Anlagen haben 25 % und mehr dominante Einflussfaktoren
- 14 Anlagen weisen 10 bis 25 % dominante Einflussfaktoren auf
- 19 Anlagen haben nur einen dominanten Einflussfaktor (unter 10 %)
- 3 Anlagen zeigen gar keine dominanten Einflussfaktoren

Zusammenfassend können anhand der statistischen Auswertung folgende Anlagengruppen gebildet werden:

- 3 Anlagen zeigen keine Beziehungen der Kupfergehalte zu anderen Kompostmerkmalen und werden daher aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen
- 4 Anlagen zeigen nur Beziehungen zur Dauer des Anlagenbetriebes – davon werden 2 Anlagen nicht für die Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen weil der Zeiteinfluss als nicht hinreichend angesehen wird
- 11 Anlagen zeigen nur Beziehungen zu wertgebenden Inhaltsstoffen – davon werden alle zur Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen
- 8 Anlagen zeigen nur Beziehungen zu den Fremd- und Schadstoffen – davon werden alle zur Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen

- 6 Anlagen zeigen Beziehungen zur Dauer des Anlagenbetriebes und zu wertgebenden Inhaltsstoffen – davon werden alle zur Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen
- 4 Anlagen zeigen Beziehungen zu wertgebenden Inhaltsstoffen und Fremd- und Schadstoffen – davon werden alle zur Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen
- 1 Anlage zeigt Beziehungen zur Dauer des Anlagenbetriebes und zu Fremd- und Schadstoffen – davon werden alle zur Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen
- 5 Anlagen zeigen Beziehungen zur Dauer des Anlagenbetriebes, zu wertgebenden Inhaltsstoffen sowie zu Fremd- und Schadstoffen – davon werden 4 Anlage nicht für die Einbeziehung in die weiterführenden Auswertungen empfohlen weil komplexe Faktorenwidersprüche möglich sind

Für die weiterführenden Auswertungsschritte werden folgende Ergebnisse der Auswertungen für 42 Einzelanlagen als erste Empfehlungsvorschlägen genannt:

- 16 Anlagen werden als besonders geeignet hervorgehoben
- 15 Anlagen sind als geeignet bezeichnet
- 11 Anlagen werden nicht zur weiteren Auswertung empfohlen

3. Befragungen in kupferrelevanten Bioabfallkompostierungsanlagen

Die Gespräche in den Bioabfallkompostierungsanlagen wurden alle durch den Projektverantwortlichen Dr. Reinhold persönlich durchgeführt. Damit wurden subjektive Variabilitäten bei den Gesprächsführungen ausgeschlossen. Als Grundlage für diese Gespräche dienten die oben genannten Datenauswertungen.

Bei den Anlagenbesuchen zeigte sich eine erhebliche Vielfalt der möglichen Ursachen für die erhöhten Kupfergehalte in pflanzlichen Inputmaterialien. Aus diesem Grunde wurde durch den Forschungsnehmer in Absprache mit dem Forschungsgeber die Anzahl der auszuwertenden Anlagen um 65 % erhöht, sodass nun insgesamt die Informationen aus 33 Anlagen in diesen F&E-Bericht einfließen.

In den folgend genannten Anlagen wurden Befragungen zu Kupfereinträgen durchgeführt (siehe Tabelle 10):

Die Ergebnisse der Befragungen fließen in die nachfolgenden statistischen Datenauswertungen anonymisiert ein.

In den Gesprächen wurde zuerst auf die statistischen Auswertungen der bisher verfügbaren Kompostuntersuchungsergebnisse eingegangen. Damit konnten den Anlagenbetreibern wichtige Hinweise auf kupferrelevante Zusammenhänge in ihren Anlagen gegeben werden. Lediglich in einer der 33 besuchten Anlagen erwiesen sich die statistischen Auswertungen als wenig hilfreich.

Anschließend erfolgte die Befragung der Anlagenbetreiber entsprechend dem erarbeiteten Fragebogen. In 30 der 33 besuchten Anlagen ergaben sich daraus wichtige Hinweise zu möglichen Eintragsquellen für Kupfer in Bioabfallkomposte. Die anhand der statistischen Auswertungen vorliegenden Grundzusammenhänge wurden dabei bestätigt und durch standortbezogene Detailinformationen unteretzt bzw. ergänzt. In einer der Anlagen wurde mit dem Anlagenbetreiber eine zeit- und produktdifferenzierte Datenauswertung vereinbart, die vom Anlagenbetreiber finanziert worden ist. Es konnte eingeschätzt werden, dass bei

Herstellung unterschiedlicher Kompostprodukte deren differenzierte Auswertung zusätzliche Informationen bringt.

Tab. 10: Zusammenstellung der Befragungstermine in kupferrelevanten Bioabfallbehandlungsanlagen

lfd. Nr.	Anl.-Nr.	Datum
1	232	18.10.2005
2	330	25.10.2005
3	355	28.12.2005
4	325	28.12.2005
5	339	30.12.2005
6	315	07.02.2006
7	233	08.02.2006
8	349	08.02.2006
9	237	09.02.2006
10	329	07.03.2006
11	358	07.03.2006
12	361	07.03.2006
13	342	27.03.2006
14	345	28.03.2006
15	374	28.03.2006
16	371	28.03.2006
17	368	29.03.2006
18	357	29.03.2006
19	153	30.03.2006
20	175	19.04.2006
21	263	20.04.2006
22	373	20.04.2006
23	326	20.04.2006
24	376	23.05.2006
25	145	23.05.2006
26	304	24.05.2006
27	347	24.05.2006
28	298	28.05.2006
29	247	07.06.2006
30	313	13.06.2006
31	359	13.06.2006
32	344	14.06.2006
33	375	14.06.2006

3.1 Merkmalsgruppierungen der befragten Anlagen

Die Merkmale der befragten 33 Kompostierungsanlagen lassen sich nach der Häufigkeit ihres Auftretens in 3 Gruppen unterteilen:

Merkmale, die bei weniger als 33 % der Anlagen auftreten

- Anlagen, in denen keine Veränderung von Kupfergehalten im Kompost auftrat
- Anlagen, in denen eine Abnahme von Kupfergehalten im Kompost auftrat
- Anlagen, in denen eine Zunahme der Wassergehalte im Inputmaterial auftrat
- Anlagen, in denen eine Zunahme der Steingehalte im Inputmaterial auftrat
- Anlagen, die Bioabfälle aus anderen Regionen übernehmen (Importe)
- Anlagen, die Marktabfälle kompostieren
- Anlagen, die unbehandelte Holzabfälle kompostieren

- Anlagen, bei denen getrennte Produktlinien (z.B. Biotonnen- und Grüngutkompost) betrieben werden
- Anlagen, bei denen ein Laborwechsel erfolgt ist
- Anlagen, bei denen Kupfer und Blei einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Cadmium einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Chrom einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Nickel einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Quecksilber einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden

Merkmale, die bei 33 bis zu 66 % der Anlagen auftreten

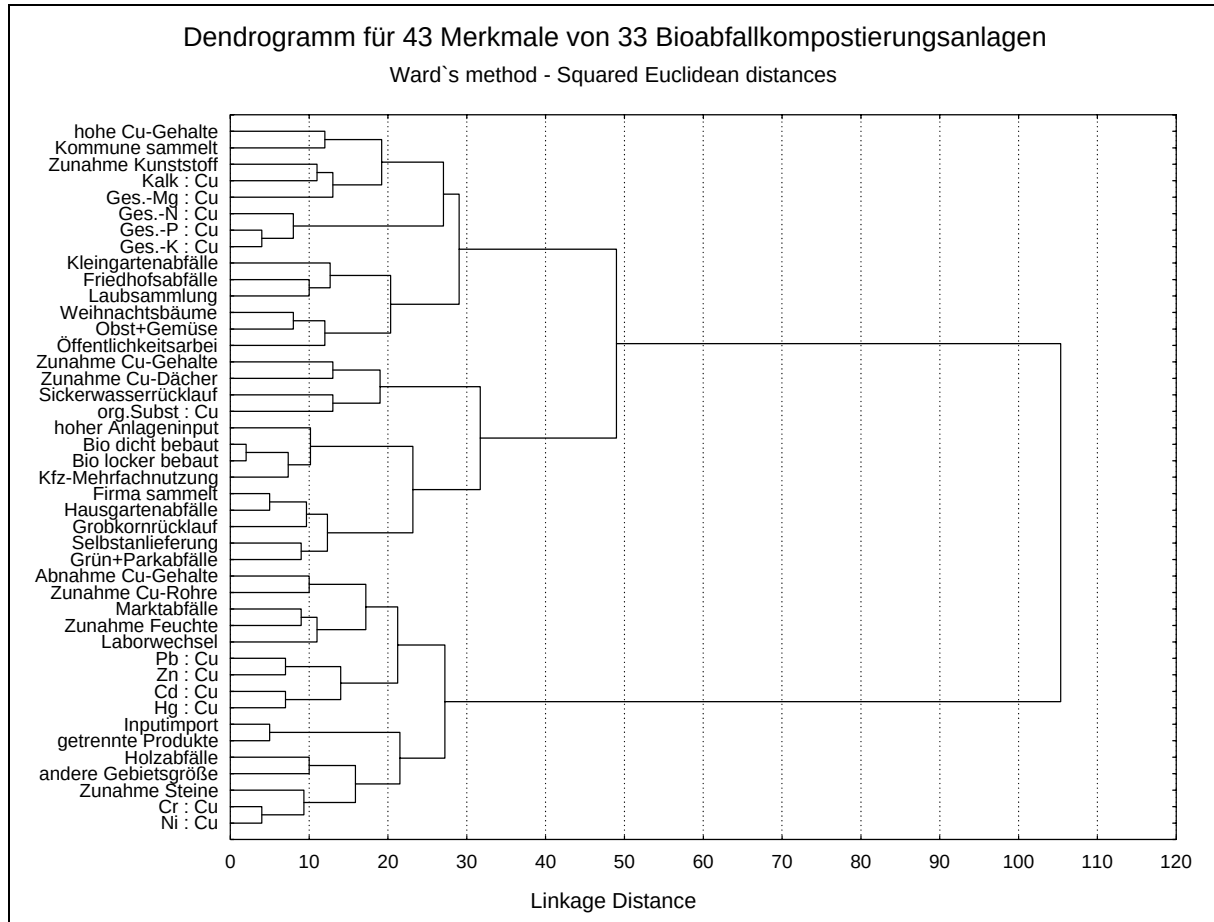
- Anlagen, die für das Jahr 2002 im Kompost einen Kupfergehalt von mehr als 70 mg/kg TS aufweisen
- Anlagen, in denen eine Zunahme von Kupfergehalten im Kompost auftrat
- Anlagen, in denen eine Zunahme der Kunststoffgehalte im Inputmaterial auftrat
- Anlagen, bei denen zumindest anteilig Kommunen die Bioabfälle einsammeln
- Anlagen, die Bioabfälle aus Kleingärten kompostieren
- Anlagen, die Bioabfälle von Friedhöfen kompostieren
- Anlagen, die Obst- und Gemüseabfälle kompostieren
- Anlagen, die Bioabfälle aus Laubsammlungen kompostieren
- Anlagen, die Weihnachtsbäume kompostieren
- Anlagen, bei denen sich die Größe des Einzugsgebietes verändert hat
- Anlagen, bei denen im Einzugsgebiet Kupferrohre für die Trinkwasserversorgung zuge-
nommen haben
- Anlagen, bei denen im Einzugsgebiet eine intensive Öffentlichkeitsarbeit betrieben wird
- Anlagen, bei denen das anfallende Prozesswasser zur Rottegutbefeuchtung genutzt wird
- Anlagen, bei denen Kupfer und organische Substanz einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Gesamtstickstoff einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Gesamtphosphor einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Gesamtkalium einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Gesamtmagnesium einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und basisch wirksame Bestandteile (Kalk) einer Merkmals-
gruppe zugeordnet wurden
- Anlagen, bei denen Kupfer und Zink einer Merkmalsgruppe zugeordnet wurden

Merkmale, die bei über 66 % der Anlagen auftreten

- Anlagen, die über 10.000 t Jahresinput genehmigt haben
- Anlagen, bei denen zumindest anteilig Firmen die Bioabfälle einsammeln
- Anlagen, bei denen zumindest anteilig Selbstanlieferung von Bioabfällen erfolgt
- Anlagen, die Biotonnenabfälle aus dichter Bebauung annehmen
- Anlagen, die Biotonnenabfälle aus lockerer Bebauung annehmen
- Anlagen, die Grün- und Parkabfälle annehmen
- Anlagen, die Bioabfälle aus Hausgärten kompostieren
- Anlagen, bei denen im Einzugsgebiet Kupferdachrinnen zugenommen haben
- Anlagen, bei denen die Bioabfalltransportfahrzeuge auch für andere Abfälle (z.B. Rest-
müll) genutzt werden
- Anlagen, bei der zumindest Anteile des Siebüberlaufs als Strukturmaterial genutzt wer-
den

Über die geprüften 33 Kompostierungsanlagen wurde eine Gruppierung der 43 Anlagenmerkmale vorgenommen, wobei die Ergebnisse der anlagenspezifischen Clusteranalysen auf zweiseitigen Beziehungen von Kupfer zu anderen Kompostmerkmalen mit eingeflossen sind (gekennzeichnet durch - Merkmal : Cu). Die Ergebnisse der Merkmalsgruppierung (Ähnlichkeit des Auftretens über die betrachteten Anlagen) sind nachstehend grafisch dargestellt (siehe Abbildung 23).

Abb. 23:



Es lassen sich folgende drei Merkmalsgruppen ableiten, wobei jede dieser Merkmalsgruppen durch ein kupferrelevantes Leitmerkmal gekennzeichnet werden kann:

Kompostmerkmalsgruppe I

- Kupfergehalte über 70 mg/kg TS, ohne eindeutige Tendenz
- Die Bioabfälle werden anteilig durch Kommunen eingesammelt
- Die Kunststoffgehalte im Inputmaterial nehmen zu
- Es werden Bioabfälle aus Kleingärten, Friedhöfen und Laubsammlungen angenommen
- Es werden anteilig Obst, Gemüse und Weihnachtsbäume kompostiert
- Es erfolgt eine intensive Öffentlichkeitsarbeit
- Alle Nährstoffe der Komposte weisen – ähnlich wie Kupfer – in der Regel hohe Gehalte auf.

Hohe Kupfergehalte in Komposten bilden eine Merkmalsgruppe mit einer Reihe von Inputarten, die in den betreffenden Anlagen angenommen werden. Über diese Inputmaterialarten sind demnach Kupfereinträge wahrscheinlich. Gleichzeitig deutet die Breite der hier ange-

nommenen Inputmaterialarten auf ein intensives Bemühen, möglichst große Mengen an Ausgangsstoffen einzuwerben, sicher um die Anlagen entsprechend auszulasten.

Die Kupfereinträge korrespondieren mit den Einträgen von Nährstoffen, was auf einen Einfluss vorrangig nährstoffreicher, aus wachsenden Beständen stammender krautiger Pflanzenreste hinweist.

Das Auftreten hoher Kupfergehalte geht mit einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit im Einzugsgebiet einher. Die Ursache dafür dürfte auch in den hohen Kupfergehalten bzw. in einer allgemeinen Vermeidungsstrategie gegen Fremdstoffeinträge zu suchen sein. Die Öffentlichkeitsarbeit steht hier in der Kausalkette nicht am Anfang sondern am Ende. Sie ist kommunale Reaktion auf eine allgemein festgestellte Eintragssituation, die sich auch auf die Kupfergehalte auswirkt.

Kompostmerkmalsgruppe II

- Kupfergehalte nehmen über die Zeit zu
- Komposte werden anteilig aus Biotonnenabfällen (dichte und lockere Bebauung mit häufigen Hausgartenherkünften) unter anteiligem Zusatz von Grün- und Parkabfällen (auch aus Selbstanlieferung) hergestellt
- Im Einzugsgebiet nehmen Kupferdachrinnen zu, vor allem in neu angeschlossenen Eigenheimbaugebieten
- Die Einsammlung der Bioabfälle erfolgt stark durch Firmen, wobei die eingesetzten Fahrzeuge auch für andere Abfalltransporte genutzt werden
- Die Kompostierungsanlagen haben eine genehmigte Inputkapazität von über 10.000 t/a
- In den Kompostierungsanlagen erfolgt eine Rückführung von Prozesswasser in die Intensivrotte und von geeigneten Korngrößen aus dem Siebüberlauf als Strukturmaterial
- Die Gehalte an organischer Substanz der Komposte weisen – ähnlich wie Kupfer – in der Regel zunehmende Gehalte auf

Bei dieser Merkmalsgruppe besteht eine besonders enge Bindung der Kupfergehaltzunahme in Komposten und der Zunahme von Kupferdachrinnen an Einfamilienhäusern im Einzugsgebiet. Hier sind die möglichen Eintragungspfade genauer zu betrachten, wobei die organische Substanz wahrscheinlich als Kupfertransporteur wirkt. Kupfer verbleibt hier als gering mobiler Nährstoff weitgehend in der Biomasse.

Welche konkrete Rolle der Prozesswasserrückführung und der Siebrückstandsnutzung als Strukturmaterial zukommt sollte abgeschätzt werden. Gleiches gilt für die hier häufig wechselnde Fahrzeugnutzung für Bioabfall- und Restmülltransporte. Die Größe der Anlagen (bezogen auf die angenommene Inputmaterialmenge) fördert anscheinend die genannten Verhaltensweisen beim Anlagenbetrieb.

Kompostmerkmalsgruppe III

- Kupfergehalte über die Zeit abnehmend
- Komposte werden anteilig aus Inputimporten (aus anderen Regionen antransportierte Bioabfälle) sowie aus unbehandelten Holz- und aus Marktabfällen hergestellt, wobei die Inputmaterialfeuchte und die Steinanteile (> 2 mm) insgesamt zunehmen
- Die Einzugsgebietsgröße hat sich geändert, zumeist verringert
- Im Einzugsgebiet nehmen die Kupferverrohrungen der Trinkwasserleitungen in den Haushalten zu
- In den Kompostierungsanlagen werden verstärkt getrennte Produkte (z.B. Grün- und Biotonnenkompost) erzeugt
- Große Anteil der Anlagenbetreiber haben das fremdüberwachende Labor gewechselt

- Die Gehalte an allen anderen Schwermetallen in den Komposten weisen – ähnlich wie bei Kupfer – in der Regel abnehmende Gehalte auf

Die den abnehmenden Kupfergehalten im Kompost zuzuordnenden Merkmale zeigen zu den beiden anderen Merkmalsgruppen die größten Unterschiede. Die Kupfergehaltsabnahme in Komposten ist demnach an besondere internen Merkmalsstrukturen dieser Kompostierungsanlagen gebunden.

In dieser Merkmalsgruppe zeigt sich, dass wahrscheinlich Verdünnungseffekte durch Einbeziehung kupferärmerer Inputmaterialien (feuchte Bioabfälle, steinhaltige Materialien, höhere Bodenanhäufungen) aufgetreten sind. Darauf deuten auch die parallel zu Kupfer abnehmenden Tendenzen der anderen Schwermetalle hin.

In den Anlagen mit abnehmenden Kupfergehalten werden häufig getrennte Kompostprodukte erzeugt, wobei der meist weniger kupferhaltige Grüngutkompost zur Substrat- und Oberbodenherstellung dient. Hier zeigt sich, dass in solchen Anlagen eine getrennte Datenauswertung nach einzelnen Produktlinien angebracht ist. Erfolgt das nicht nehmen die Streubreiten der Messwerte für die meisten Parameter zu.

Der mit in dieser Merkmalsgruppe enthaltene Wechsel des Untersuchungslabors kann im Zusammenhang mit der Herstellung von substratfähigem Grüngutkompost gesehen werden. Für die Analytik und Bewertung von Substraten haben sich einige Labore spezialisiert, die dann auch gerne mit der Gesamtanalytik beauftragt werden.

Die Veränderung der Einzugsgebietsgröße (zumeist Verringerung) deutet darauf hin, dass es sich hier aus qualitativer Sicht (z.B. Kupfereinträge) um problematische Regionen handelt. Diese werden wahrscheinlich zuerst aus der Getrenntsammlung entlassen.

Die Zunahme der Kupferverrohrung von Wohngebäuden im Einzugsgebiet bei sinkenden Kupfergehalten im Kompost deutet darauf hin, dass dieser für Klärschlämme relevante Eintrittspfad (Hellebrand et al., 2005) bei Bioabfällen keine Bedeutung hat. Die Verwendung von Trinkwasser zur Gartenbewässerung ist wegen der Dachwasserfassung rückläufig. Zudem sind die Kupferverrohrungen in den Haushalten zumeist in den Gebäuden installiert und betreffen somit in der Regel die Außenanlagen weniger.

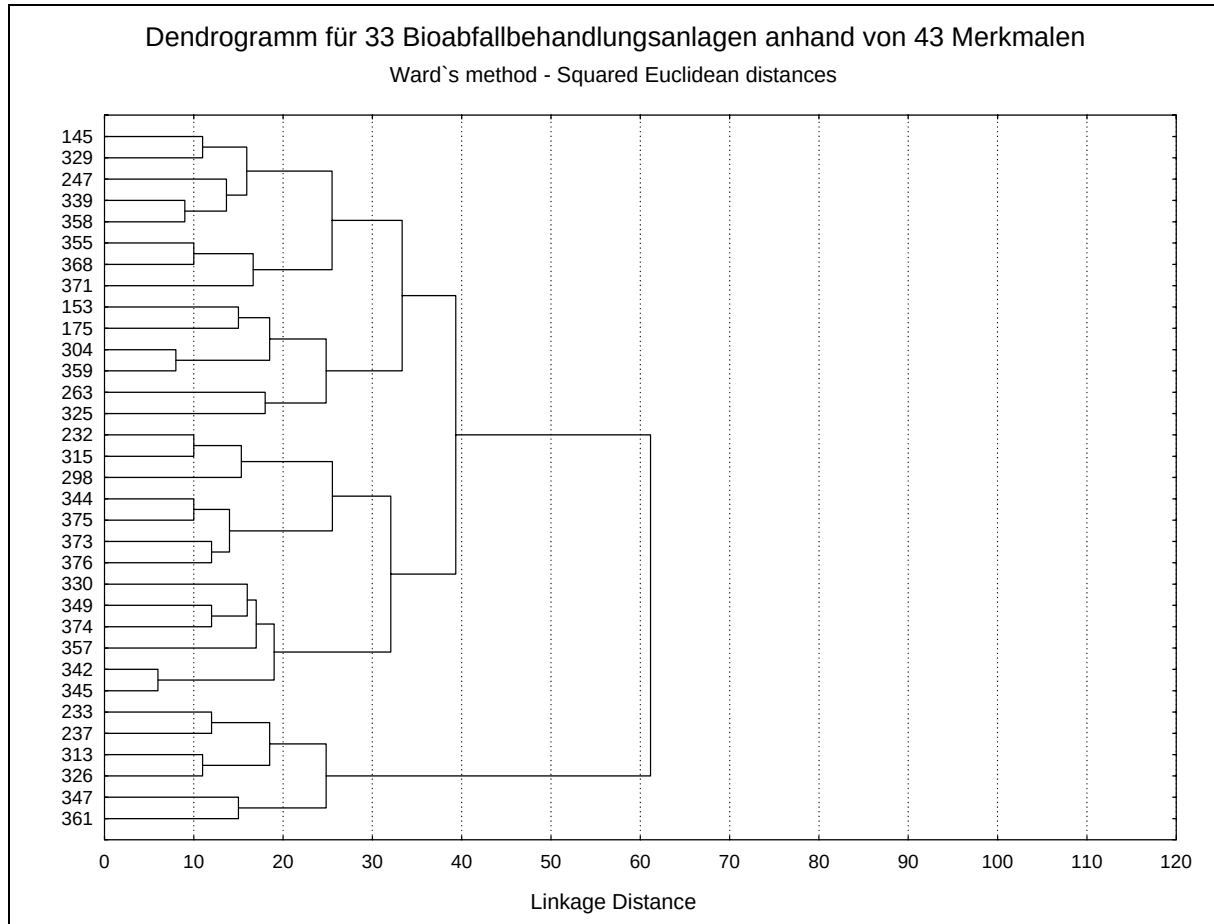
Anhand der Gruppierung der Anlagenmerkmale lassen sich erste Schlussfolgerungen für das Untersuchungs- und Bewertungsprogramm der Inputmaterialien auf ihre Kupfergehalte wie folgt ableiten:

- Hausgartenabfälle von Wohngebäuden mit Kupferdachrinnen sind für dieses Projekt auf Kupfer zu untersuchen
- In stark kunststoffhaltigen Inputmaterialien sowie bei Friedhofsabfällen und Laubsammlungen sind Sortierungen auf kupferhaltige Fremdstoffe durchzuführen
- Frisches Grüngut (z.B. Rasenschnitt) ist auf Kupfer zu untersuchen
- Obst und Gemüse sind auf Kupfer zu untersuchen
- Weihnachtsbaumreste sind auf Kupfer zu untersuchen
- Als Strukturmaterial genutzter Siebüberlauf ist auf Kupfer zu untersuchen
- Die möglichen Auswirkungen einer Prozesswasserrückführung auf die Kupfergehalte in Komposten sind zu bewerten

3.2 Gruppierungen der befragten Anlagen

Wurde unter Punkt 3.1 eine Gruppierung der untersuchten Kompostparameter vorgenommen, also die Ähnlichkeit des Auftretens dieser Parameter über alle ausgewerteten Anlagen betrachtet, so erfolgt hier nun eine davon unabhängige Gruppenbildung der Kompostierungsanlagen nach ähnlichen Strukturen der Kompostuntersuchungsergebnisse. Anhand der vorstehend beschriebenen 43 Anlagenmerkmale wurden mittels einer Clusteranalyse Gruppen von Anlagen mit ähnlichen Merkmalsstrukturen abgeleitet. Diese clusteranalytische Gruppierung der 33 geprüften Anlagen erbrachte folgendes Bild:

Abb. 24:



Die Clusteranalyse von 43 Merkmalen der 33 Kompostierungsanlagen führt zur Ableitung von 5 etwa gleich stark besetzten Anlagengruppen, die sich wie folgt zusammensetzen:

1. Anlagengruppe A mit 8 Anlagen
 - Anlagennummern: 145, 247, 329, 339, 355, 358, 368, 371
2. Anlagengruppe B mit 6 Anlagen
 - Anlagennummern: 153, 175, 263, 304, 325, 359
3. Anlagengruppe C mit 7 Anlagen
 - Anlagennummern: 232, 298, 315, 344, 373, 375, 376
4. Anlagengruppe D mit 6 Anlagen
 - Anlagennummern: 330, 342, 345, 349, 357, 374
5. Anlagengruppe E mit 6 Anlagen
 - Anlagennummern: 233, 237, 313, 326, 347, 361

Die Anlagengruppe E weist besonders deutliche Abweichungen zu den Ablagengruppen A bis D auf. Für den Hauptteil der Anlagen sind jeweils die Anlagengruppen A und B sowie C und D durch Ähnlichkeiten in ihrer Merkmalsstruktur gekennzeichnet. Die Anlagengruppen können auf der Grundlage der Clusteranalysenergebnisse und der ermittelten Abweichungen zur Gesamtheit aller Anlagen wie folgt beschrieben werden (siehe Abbildung 24)

Anlagengruppe A (Mittelwert aus 2002 für Kupfer: 72,7 mg/kg TS)

Die Abnahme von Kupfergehalten ist hier am stärksten ausgeprägt, wobei diese Abnahme auch mit sinkenden Gehalten an Kalk und Hauptnährstoffen verbunden ist, was auf abnehmende Anteile an frischem Grüngut hindeutet. Die Kommunen sammeln hier besonders oft die Bioabfälle ein und gewährleisten eine intensive Öffentlichkeitsarbeit. Transportfahrzeuge werden auch für Restmüll genutzt, was eine Gefährdung durch punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge erhöht. Wohnneubauten mit Kupferdachrinnen und damit mögliche Kupfereinträge über den Pflanzenpfad sind selten. Prozesswasserrückführungen und Bioabfallimporte finden wenig oder nicht statt.

Anlagengruppe B (Mittelwert aus 2002 für Kupfer: 60,3 mg/kg TS)

Diese Anlagengruppe ist besonders durch eine Zunahme von Kupfergehalten auf relativ niedrigem Gehaltsniveau geprägt, wobei diese Zunahme mit steigenden Quecksilbergehalten parallel läuft. Das kann in Verbindung mit den hier häufigen Friedhofsabfall- und Weihnachtsbaumsammelanteilen gesehen werden, wobei keine Zunahme von Fremdstoffeinträgen in die Komposte erfolgt. Insgesamt haben diese Anlagen ein sehr breites Annahmespektrum für Inputmaterialien. Frisches Grüngut spielt wahrscheinlich eine relativ geringe Rolle. Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgt intensiv.

Anlagengruppe C (Mittelwert aus 2002 für Kupfer: 81,4 mg/kg TS)

Im Durchschnitt über alle Anlagen sind hier die höchsten Kupfergehalte anzutreffen, jedoch mit besonders großer Spannweite der Einzelanlagenmittelwerte (große Unterschiede). Die Kupfergehaltserhöhungen erfolgen wahrscheinlich vor allem in Verbindung mit frischem Pflanzenmaterial. Auf die Nutzung von Friedhofsabfällen wird verzichtet. Kupfereinträge erfolgen unabhängig von den Einträgen anderer Schwermetalle. Prozesswasserrückführungen tragen nach Ansicht der Anlagenbetreiber wahrscheinlich zu einem anteiligen Verbleib von Kupfer im Rotteprozess bei, während Siebüberlaufrückführung wenig erfolgt. Die Öffentlichkeitsarbeit ist gering ausgeprägt.

Anlagengruppe D (Mittelwert aus 2002 für Kupfer: 79,1 mg/kg TS)

In dieser Anlagengruppe gibt es besonders viele Anlagen mit über 70 mg Cu je kg Kompost-Trockenmasse. Kommunen sind hier besonders selten an der Einsammlung von Bioabfällen beteiligt. Kupfergehalte werden vor allem durch nicht frische (abgestorbene bzw. verholzte) organische Substanz erhöht, die zunehmend aus nassen Inputmaterialien und wenig aus Garten- und Parkabfällen stammen. Beziehungen von Kupfer zu den Hauptnährstoffen sind besonders selten. Im Einzugsgebiet sind Wohnneubauten mit Kupferdachrinnen und damit möglichen Kupfereinträgen über den Pflanzenpfad stark verbreitet. Prozesswasserrückführungen tragen eventuell zu einem anteiligen Verbleib von Kupfer im Rotteprozess bei.

Anlagengruppe E (Mittelwert aus 2002 für Kupfer: 66,7 mg/kg TS)

In dieser Gruppe sind meist Anlagen mit genehmigten Annahmekapazitäten unter 10.000 t/a vertreten. Diese Anlagen kompostieren besonders wenig Biotonnenabfälle. Ihre Einzugsgebietsgröße ändert sich häufig. Die Kupfergehalte zeigen bei diesen Anlagen besonders häufig gleichlaufende Gehaltstendenzen, wie die der anderen Schwermetalle, was auf Gehaltsreduzierungen durch Verdünnung hindeutet. Die Beziehungen zur organischen Substanz und zu den Hauptnährstoffen sind dagegen schwach ausgeprägt. Die Zunahme der Steingehalte im Inputmaterial (möglicherweise aus Streugut) und die vermehrte Einbeziehung von

Holzabfällen (mit möglichen Verunreinigungen durch holzschutzmittelbehandelte Hölzern) können hier eine Rolle spielen. Die Öffentlichkeitsarbeit ist schwach ausgeprägt.

Für die im Rahmen des F&E-Vorhabens vorgesehenen Untersuchungen wurden aus jeder Anlagengruppe zwei Anlage ausgewählt werden:

- Anlagengruppe A – Anlage 371 – BGK-Region Süd
– Anlage 355 – BGK-Region Südwest
- Anlagengruppe B – Anlage 359 – BGK-Region Nord
– Anlage 325 – BGK-Region Südwest
- Anlagengruppe C – Anlage 373 – BGK-Region Nordrhein-Westfalen
– Anlage 232 – BGK-Region Südost
- Anlagengruppe D – Anlage 357 – BGK-Region Südost
– Anlage 330 – BGK-Region Nordrhein-Westfalen
- Anlagengruppe E – Anlage 347 – BGK-Region Sachsen-Thüringen
– Anlage 326 – BGK-Region Nordrhein-Westfalen

In diesen 10 Anlagen wurden die weiterführenden Untersuchungen an Inputmaterial-, Rottegut und Kompostproben durchgeführt. Hinzu kamen auf Hinweis der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. weitere 4 Bioabfallkompostierungsanlagen, die Berliner Bioabfälle verarbeiten. Diese Erweiterung wurde möglich, weil sich durch Produktionsumstellungen bzw. Rekonstruktionsarbeiten in drei der ausgewählten Anlagen der vorgesehene Untersuchungsumfang nicht im vollen Umfang umsetzen ließ. Folgende Anlagen sind damit in die letzte Untersuchungsrunde des Projektes zusätzlich einbezogen worden:

- Anlagengruppe Z – Anlage 17 – BGK-Region Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt
– Anlage 75 – BGK-Region Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt
– Anlage 107 – BGK-Region Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt
– Anlage 262 – BGK-Region Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt

4. Durchführung und Bewertung von Probenahmen und Laboruntersuchungen

Die Durchführung von Probenahmen wurde im Rahmen der aktiven Mitwirkung der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. am F&E-Projekt durch deren Mitglieder in den ausgewählten Anlagen gewährleistet. Den einzelnen Anlagenverantwortlichen wurden alle für die Probenahme notwendigen Informationen zugestellt und erforderliche Anleitungen auf Anforderung gewährt. Die Einweisung der Anlagenverantwortlichen erfolgte per Email, durch telefonische Rücksprachen und durch persönliche Anlagenbesuche. Als Grundlage für die Probenahme diente eine detaillierte Anleitung, die nach der PN 98 (LAGA, 2002) und dem Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (Bidlingmaier, 2006) erstellt worden ist.

Für die Probenahme wurden aus den bisherigen Datenauswertungen für jede einzelne Anlage Hinweise zu Untersuchungsschwerpunkten sowie zu auszuwählenden Inputmaterialherkünften abgeleitet.

Die zeitgleich beprobten Inputmaterialherkünfte wurden durch die Anlagenbetreiber in einer Rottecharge angesetzt, wobei weitere Inputmaterialien hinzukamen, um die übliche Rottechargenmenge zu erreichen. Insgesamt war dabei abzuschätzen, zu welchen Anteilen die einzelnen Inputmaterialherkünfte an dieser Rottecharge in etwa beteiligt sind. Die so angesetzte Rottecharge wurde entsprechend dem Beprobungsplan während der Kompostierung und aus dem Warenlager weiter auf Kupfer untersucht..

Tab. 11: Anzahl der durchgeführten Beprobungen und Untersuchungen von Inputmaterialien (Herbst-, Winter- und Frühsommer-Inputmaterial)

Nummer der Anlage	Inputmaterial ¹⁾	Rottegut ²⁾	Produkte
17 ³⁾	34	6	13
75 ³⁾	13	5	18
107 ³⁾	7	6	7
232	51	26	14
262 ³⁾	31	6	21
330	56	12	14
355	35	7	19
325 ³⁾	34	0	12
371	42	7	15
357	51	16	9
373	46	6	13
326 ³⁾	25	3	6
347	32	12	8
359 ³⁾	20	0	12
Alle Anlagen	477	112	181

Legende: ¹⁾ - einschließlich Siebüberlaufrückführung
²⁾ - einschließlich Prozesswasser
³⁾ - nicht an allen Beprobungsterminen beteiligt

Insgesamt wurden 770 Proben über einen Zeitraum von über einem Jahr in den ausgewählten Anlagen entnommen und in den Räumen sowie unter fachlicher Anleitung des DAR-akkreditierten (Registriernummer: DAP-PG-2596.00), bei der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. gelisteten sowie durch die zuständigen Landesbehörden für Bioabfalluntersuchungen notifizierte Labors der U&A Consult Gesellschaft für Umwelt & Analytik mbH, Dorfstraße 36, 13057 Berlin durch den Forschungsnehmer untersucht.

4.1 Bewertung der Inputmaterialuntersuchungen

Im Rahmen des F&E-Projektes wurden insgesamt 444 Proben aus den getrennt gesammelten bzw. angelieferten Inputmaterialien von 14 Bioabfallbehandlungsanlagen entnommen und auf folgende Merkmale untersucht:

- Wassergehalt
- Glühverlust (oTS)
- Kupfergehalt

Für die im Projekt erfolgten Untersuchungen an Inputmaterialien wurden getrennt nach Biotonnenabfällen, Grün- und Parkabfällen, sonstige Bioabfällen und Siebüberlaufrückständen die jeweiligen Vertrauensbereiche der Kupfereinzelmesswerte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($p < 0,05$) abgeleitet. Dabei wurden folgende obere Vertrauensgrenzen für Einzelmesswerte der Kupfergehalte von Inputmaterialgruppen ermittelt, die zu einer Erkennung von nicht in die Datenauswertung einzubeziehenden Ausreißermesswerten geführt haben.

Auf der Grundlage der genannten Vertrauensgrenzen für Einzelmesswerte wurden einzelne Kupferuntersuchungsergebnisse als Ausreißermesswerte erkannt, das heißt, diese gehören nicht der Grundgesamtheit der jeweiligen Bioabfallgruppe an. Folgende Inputmaterialproben wurden als Ausreißermesswerte erkannt und aus der Grundgesamtheit ausgeschlossen (siehe Tabellen 12 und 13).

Tab. 12: Stichprobenumfang und statistisch abgeleitete Ausreißergrenzen für 444 Inputmaterialproben

Inputmaterial -gruppe	Stichproben -umfang	obere Ausreißer- grenze	Anzahl der Aus- reißerdaten
Biotonnenabfälle	347	75,5 mg/kg TS	5
Grün- und Parkabfälle	78	35,5 mg/kg TS	3
sonstige Bioabfälle (naturbelasse- nes Holz, Rinde und Strohreste)	19	172,9 mg/kg TS	1
Siebüberlaufrückführung	33	48,4 mg/kg TS	1
Gesamt	477		10
Grenzwert BioAbfV	70,0 bzw. 100,0 mg Cu/kg Kompost-TS (zulässige Auf- wandmenge: 10,0 bzw. 6,7 t Kompost-TS/ha•a)		

Tab. 13: Ausreißermesswerte der Kupfergehaltsuntersuchungen an 444 Inputmaterialproben

Anlage Nr.	Bezeichnung der Probe	Cu-Gehalt in mg/kg TS
Biotonnenabfälle		
325	gemischte Biotonnenabfälle	80,5
373	gemischte Biotonnenabfälle	133,0
347	gemischte Biotonnenabfälle	141,0
325	Papierreste aus der Biotonne	266,0
325	Laubabfälle aus der Biotonne	404,0
Grün- und Parkabfälle		
326	gemischte Grün- und Parkabfälle	39,3
232	gemischte Grün- und Parkabfälle	56,5
17	gemischte Grün- und Parkabfälle	93,4
sonstige Bioabfälle		
262	gewerbliche Holzabfälle	313,0
Siebüberlaufrückführung		
359	Siebüberlauf aus der Biotonnenkompostierung	68,4

Bei 8 der insgesamt 14 in die Untersuchungen einbezogenen Anlagen wurden Ausreißermesswerte gefunden, wobei die Anlage Nr. 325 mit 3 Ausreißermesswerten besonders hervorgetreten ist. In der weiteren Datenauswertung werden die oben genannten Ausreißermesswerte nur als zufällig auftretende Extremwerte fallweise berücksichtigt.

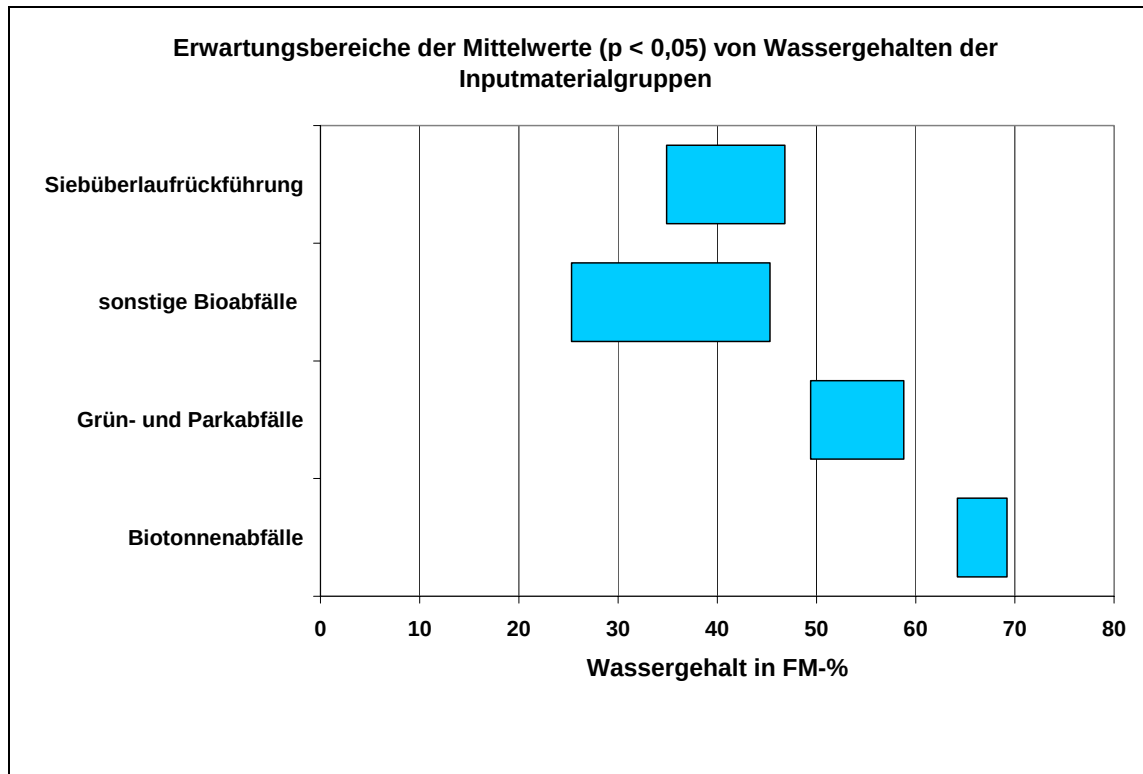
Die im Untersuchungszeitraum beprobten, vorwiegend pflanzlichen Biotonnenabfälle werden nachfolgend nach Stoffgruppen beschrieben. Dabei erfolgen eine Bewertung der Mittelwerte und der Erwartungsbereiche der Einzelmesswerte (begrenzt durch Geltungsbereich der Stichprobe) im Vergleich zu Übersichtsangaben aus der Literatur (Tabasaran & Sihler, 1993; Krauss et al., 1995; Reinhold, 1997; Lantzsch & Dinkelberg, 1998) und anhand einer Normierung an der organischen Substanz, um pflanzenphysiologisch nicht erklärbare Gehalte und damit nicht pflanzliche Kupfereinträge erkennen zu können.

In Anlehnung an Bergmann (1993) werden Kupfergehalte über 30 mg/kg TS im Pflanzenspross bzw. den -blättern als phytotoxisch bewertet, d.h. sie können mit erheblichen Wuchsdepressionen bzw. Missbildungen verbunden sein. Da Pflanzenspross- bzw. -blatteile zu meist über 95 TS-% aus organischer Substanz bestehen, gilt für die Normierung der Kupfergehalte auf den Glühverlust etwa der gleiche Orientierungswert. Treten bei frischen Inputmaterialien Kupfergehalte über 30 mg/kg organische Trockensubstanz (oTS) auf, so sind externe Kupfereinträge (über das Aufnahmevermögen der Pflanze hinausgehende Kupfergehalte) anzunehmen.

Nachfolgend werden die Begriffe Glühverlust und oTS (organische Trockensubstanz) synonym verwendet. Werden Kupfergehalte auf die organische Trockensubstanz bezogen, so werden diese als oTS-bezogen bezeichnet.

Bevor die einzelnen Stoffgruppen in sich betrachtet werden, sollen diese Stoffgruppen miteinander verglichen werden (siehe Abbildungen 25 bis 28).

Abb. 25:



Die Wassergehalte der Inputmaterialgruppen unterscheiden sich deutlich. Vor allem Biotonnenabfälle zeichnen sich durch besonders hohe Feuchtigkeit aus, gefolgt von den Grün- und Parkabfällen. Sonstige Bioabfälle (meist unbehandelte Holzreste) und Siebüberlaufrückführungsmaterial sind deutlich weniger feucht.

Statistisch gesicherte Unterschiede können für die Inputmaterialgruppen bei den Glühverlusten nicht gefunden werden. Auffällig ist jedoch die große Spannbreite der Erwartungsbereiche bei naturbelassenen Holzabfällen (sonstige Bioabfälle) und teilweise bei Siebüberlaufrückführungsmaterial. Dafür sind wahrscheinlich Mineralbodeneinträge verantwortlich zu machen.

Bei den Kupfergehalten treten deutliche Unterschiede zwischen den Inputmaterialgruppen auf. Die Grün- und Parkabfälle bilden eine gemeinsame Gruppe niedriger Kupfergehalte mit den sonstigen Bioabfällen (vor allem unbehandelte Holzabfälle). Die Biotonnenabfälle und das Siebüberlaufrückführungsmaterial zeigen dagegen statistisch gesichert höhere Kupfermesswerte.

Hier wird deutlich, dass in den Biotonnenabfällen die organischen Hausgartenreste eine große Rolle spielen. Diese können durch die unter Punkt 1.3 und 1.4 aufgeführten Kupfereintragspfade in Böden und Pflanzen erhöhte Kupfergehalte verursachen. Die Existenz solcher Eintragspfade wird durch die vorgelegten Untersuchungsergebnisse der Kupfergehalte in Biotonnenabfällen untermauert.

Abb. 26:

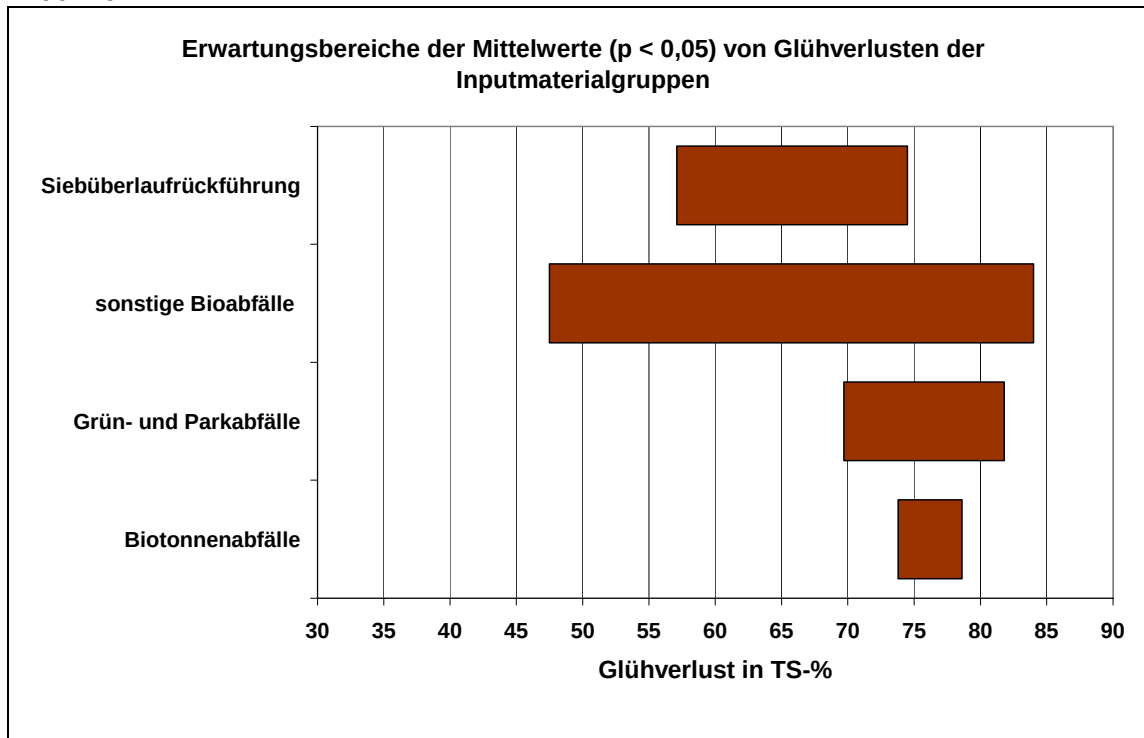
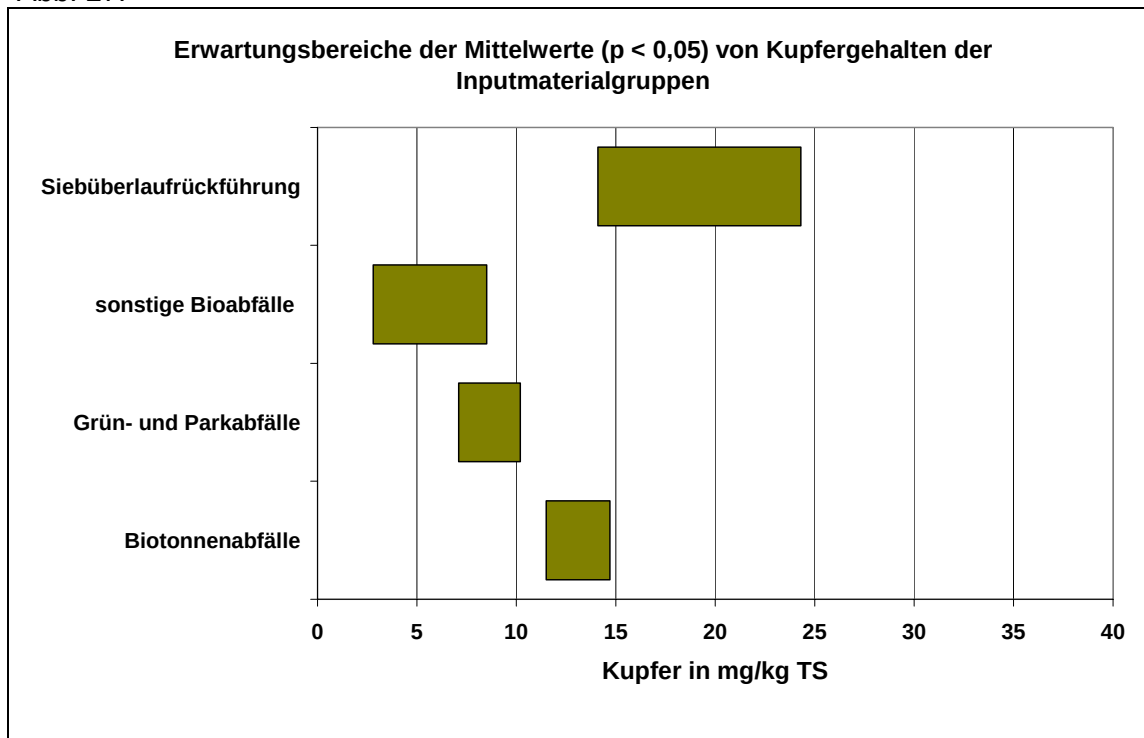
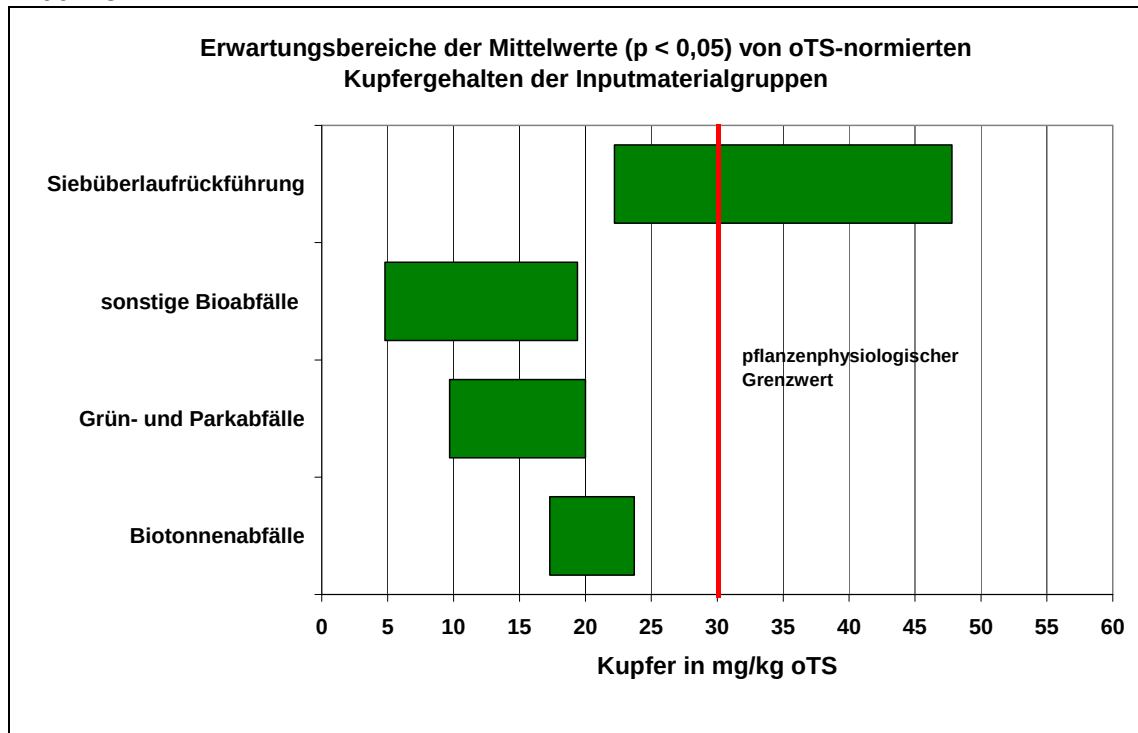


Abb. 27:



Bei den Siebüberlaufrückständen ist erkennbar, dass nach der Kompostierung nicht nur die ursprünglichen unbehandelten grobstrukturierten Holzreste ausgesiebt werden, sondern es hier zu geringen Anhaftungen von kupferhaltigen Feinanteilen aus dem Rotteprozess kommt. Je nach Rotteintensität, Materialfeuchte und Siebmaschenweite können diese Feinanteile unterschiedlich stark anhaften und damit die große Streubreite der Kupfermesswerte bewirken.

Abb. 28:



Werden die Kupfergehalte auf die organische Substanz bezogen, so zeigt sich, dass lediglich der Siebüberlauf Kupfergehalte aufweist, die schon für frisches Pflanzenmaterial als pflanzenphysiologisch bedenklich anzusehen wären. Dafür kann der Abbau an organischer Substanz (Aufkonzentrierung) oder ein Kupfereintrag über anhaftende Feinanteile verantwortlich sein.

4.1.1 Biotonnenabfälle

Bei den Biotonnenabfällen wurden folgende einzelne Abfallarten betrachtet (siehe Abbildungen 29 bis 32):

- Gartenabfälle (Staudenschnitt, Pflanzreste, Blumenreste)
- Rasenmärgut
- Strauchschnitt (Laubgehölze)
- Laubabfälle
- Tannengrün (meist weihnachtlich)
- Fruchtabfälle (Obst und Gemüse)
- Speisereste (Küchenabfälle)
- Kaffeefilterreste
- Papierreste (nur bis 10 % der Gesamtinputmenge zulässig)
- gemischte Biotonnenabfälle (meist angerottet)

Die Erwartungsbereiche der Wassergehaltsmittelwerte einzelner Biotonnenabfallarten zeigten, dass weihnachtliches Tannengrün und Papierreste oft relativ trocken sein können, während Obst- und Gemüsereste eine besonders hohe Feuchtigkeit aufweisen. Alle anderen Biotonnenabfälle zeigen recht ähnliche Wassergehalte.

Abb. 29:

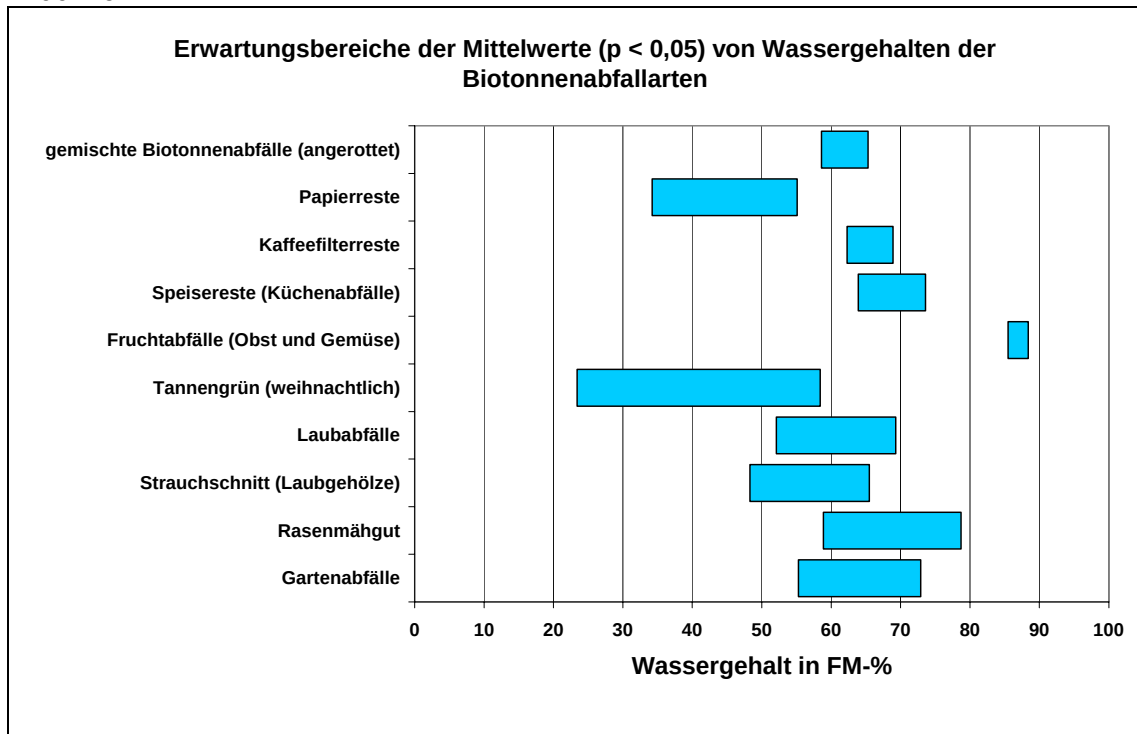
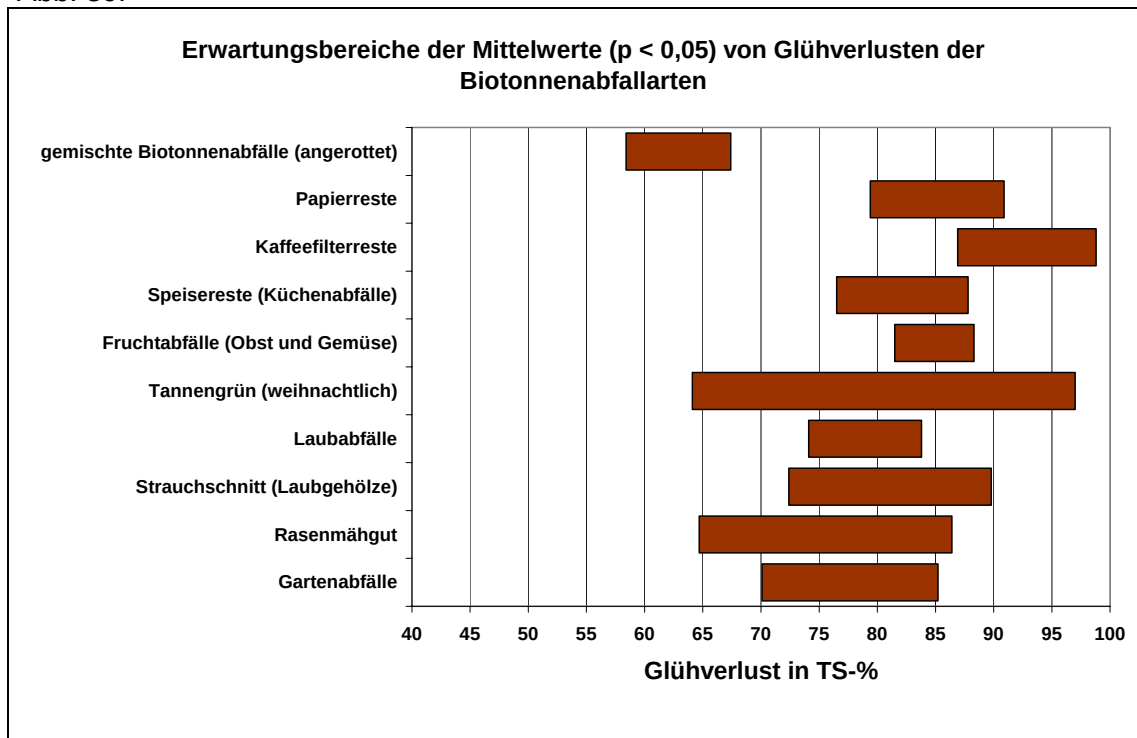


Abb. 30:

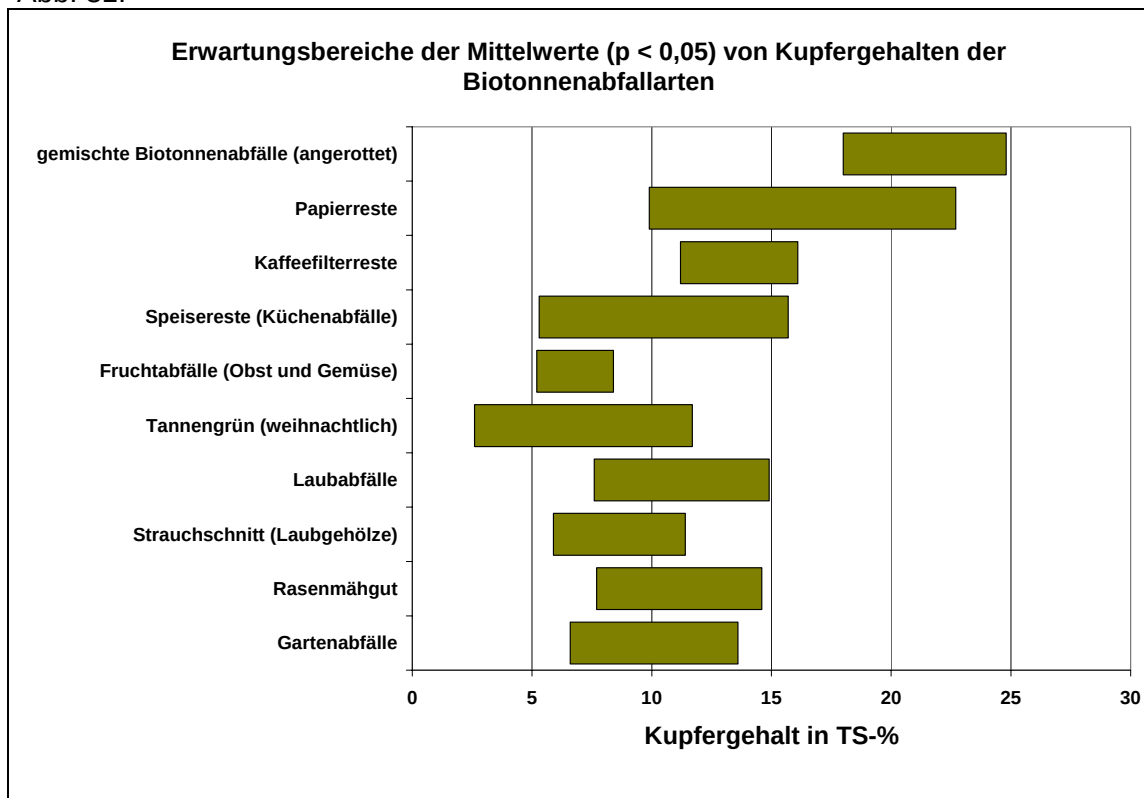


Die Glühverluste (oTS-Gehalte) der Biotonnenabfälle sind meist sehr ausgeglichen. Lediglich angerottete Biotonnenabfallmischungen sind durch deutlich geringere Gehalte gekennzeichnet. Hier können sich der Abbau organischer Substanz (Förderung von Verdunstungsprozessen) und anteilige Bodenanhänge auswirken.

Bei Kupfer fallen besonders die gemischten Biotonnenabfälle, aber auch die Papierreste durch erhöhte Gehalte auf. Alle anderen Biotonnenabfallarten bilden eine einheitliche Gruppe mit Kupfergehalten von höchstens 16 mg/kg Input-TS. Auch für Kaffeefilterreste wurden keine erhöhten Kupfergehalte nachgewiesen.

Werden die Kupfergehalte auf die organische Substanz bezogen, dann verstärkt sich die Aussage zu den Gehalten in der Trockenmasse noch. Die gemischten Biotonnenabfälle zeigen Kupfergehalte, die für frisches Blatt- und Sprossmaterial der Pflanzen physiologisch bedenklich wären. Das lässt darauf schließen, dass hier schon Veränderungen im organischen Material eingetreten sind, was auf den beginnenden Abbau organischer Substanz (relatives Anreicherungspotenzial) und/oder punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge hinweist.

Abb. 31:



Wird ein lehmiger Bodenanhang von 5 FM-% mit einem Kupfergehalt von 28 mg / kg Boden-TS zu den Biotonnenabfällen kalkuliert so ergeben sich folgende Aussagen zu Rotteverlusten und Kupfergehaltsanreicherungen in vor der Kompostierung zwischengelagerten, quasi vorbehandelten Biotonnenabfallmischungen:

Verluste an organischer Substanz (oTS)

Ø Verlust der oTS-Inputmenge: 20,4% der Input-oTS

Herkunft der Kupfereinträge

pflanzliche Inputeinträge: 63,3Cu-%

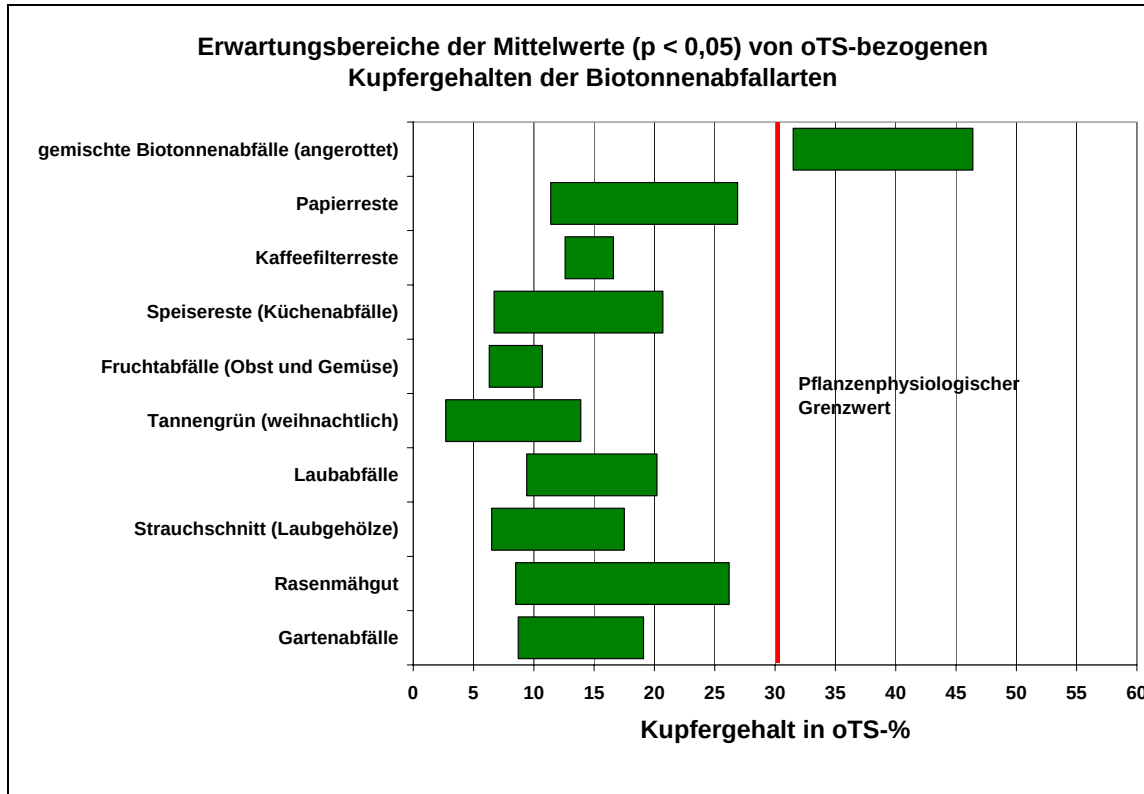
Bodeneinträge: 17,1Cu-%

punktuelle bzw. partikuläre Einträge: 19,7Cu-%

Während der Zwischenlagerung von Biotonnenabfällen werden schon etwa 20 % der Input-oTS abgebaut, was zu relativen Anreicherungen mineralischer Inhaltsstoffe führt. Die genannten nicht definierten Kupfereinträge sind nicht aus den Pflanzen- und Bodengehalten erklärbar. Als Ursache sind hier punktuelle bzw. partikuläre Einträge anzunehmen, die bei der Untersuchung der einzelnen pflanzlichen Biotonnenabfallbestandteile nicht erfasst wor-

den sind, die aber durch den schon beginnenden Rotteprozess in die Biomasse integriert wurden und damit untersuchungstechnisch erfassbar sind.

Abb. 32:



4.1.2 Grün- und Parkabfälle

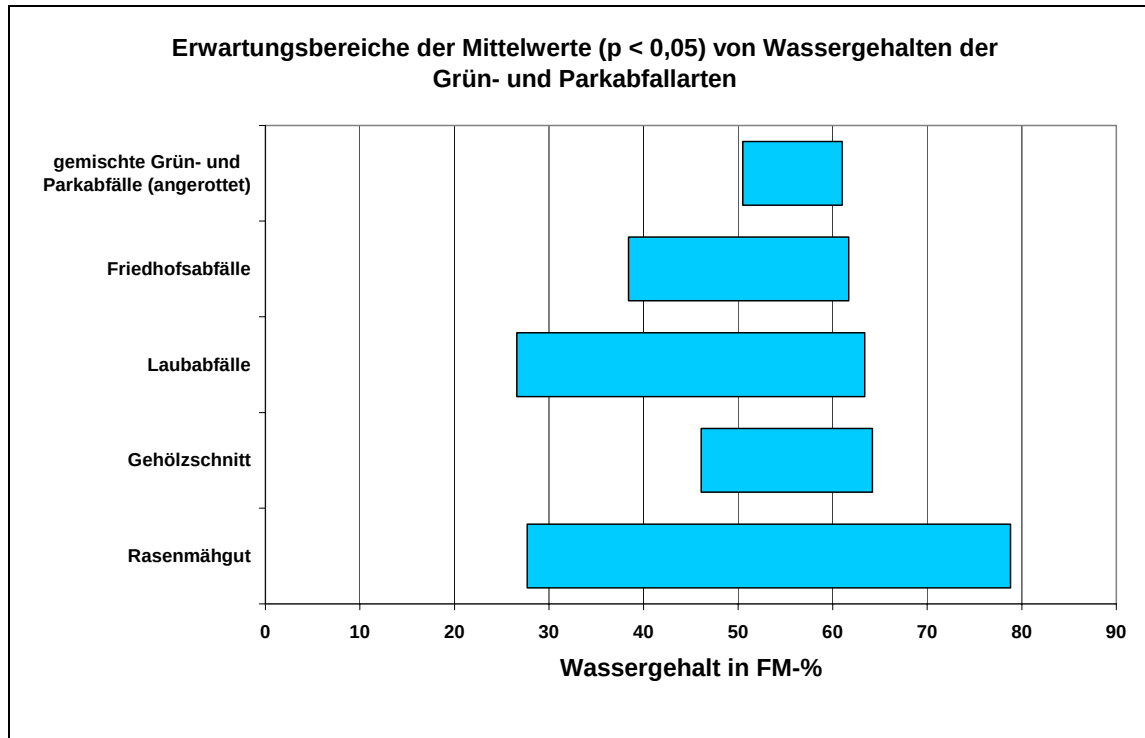
Bei den Grün- und Parkabfällen wurden folgende einzelne Abfallarten betrachtet (siehe Abbildungen 33 bis 36)

- Rasenmähgut
- Gehölzschnitt
- Laubabfälle
- gemischte Grün- und Parkabfälle (meist angerottet)

Die Wassergehalte der Grün- und Parkabfallarten sind statistisch nicht voneinander zu trennen. Es ist jedoch auffällig, dass Rasenmähgut und Laubabfälle eine deutlich größere Spannweite der Erwartungsbereiche ihrer Mittelwerte aufweisen. Hier können anteilig beträchtliche Austrocknungsprozesse stattfinden.

Die Gehalte an organischer Substanz weisen nur zwischen Gehölzschnitt und gemischten Grün- und Parkabfällen einen statistisch gesicherten Unterschied auf. Bei den gemischten Grün- und Parkabfällen ist durch Rotteprozesse schon ein leichter Abbau von organischer Substanz anzunehmen. Das Rasenmähgut und die Friedhofsabfälle bilden mit der Gesamtheit der Grün- und Parkabfälle eine Einheit. Die große Spannweite der oTS-Gehalte von Laubabfällen zeigt, dass hier erhebliche Mengen an mineralischen Beimengungen auftreten können. Sicherlich meist durch Streugut- oder Bodenanhäufungen verursacht.

Abb. 33:



Die Kupfergehalte der einzelnen Arten von Grün- und Parkabfällen bilden eine Einheit. Es deuten sich etwas erhöhte Gehalte bei Grüngutmischungen und bei Laubabfällen an. Bei letzterem verbunden mit einer größeren Breite der Erwartungsbereiche des Mittelwertes. Bei den Laubabfällen kann daraus auf leichte Verkehrsstaub- bzw. Kehrachteinträge geschlossen werden.

Werden die Kupfergehalte auf die organische Substanz bezogen, so bleibt die Grundaussage einer geschlossenen Gruppe der Grün- und Parkabfälle weitgehend erhalten. Nur die Laubabfälle fallen durch eine deutlich größere der Breite des Erwartungsbereichs ihres Mittelwertes auf, sodass hier Einzelchargen mit pflanzenphysiologisch bedenklichen Kupfergehalten anzunehmen sind. Hier treten vereinzelt externe Kupfereinträge auf, die durch mineralische Beimengungen (z.B. Streugut, Verkehrsstaub) verursacht sein können.

Insgesamt ist für die Grün- und Parkabfälle eine geringere Differenziertheit der einzelnen Abfallarten festzustellen als bei den Biotonnenabfällen. Lediglich die Laubabfälle und vereinzelt die gemischten Grün- und Parkabfälle können Besonderheiten wegen mineralischer Einträge bzw. wegen beginnender Rotteprozesse aufweisen.

Wird ein lehmiger Bodenanhang von 5 FM-% mit einem Kupfergehalt von 28 mg / kg Boden-TS zu den Grün- und Parkabfällen kalkuliert so ergeben sich folgende Aussagen zu Rotteverlusten und Kupfergehaltsanreicherungen in vor der Kompostierung stattfindenden Grün- und Parkabfallmischungen:

Verluste an organischer Substanz (oTS)

Ø Verlust der oTS-Inputmenge: 8,6 % der Input-oTS

Herkunft der Kupfereinträge

pflanzliche Inputeinträge: 85,7 Cu-%

Bodeneinträge: 14,3 Cu-%

nicht definierte Einträge: 0,0 Cu-%

Abb. 34:

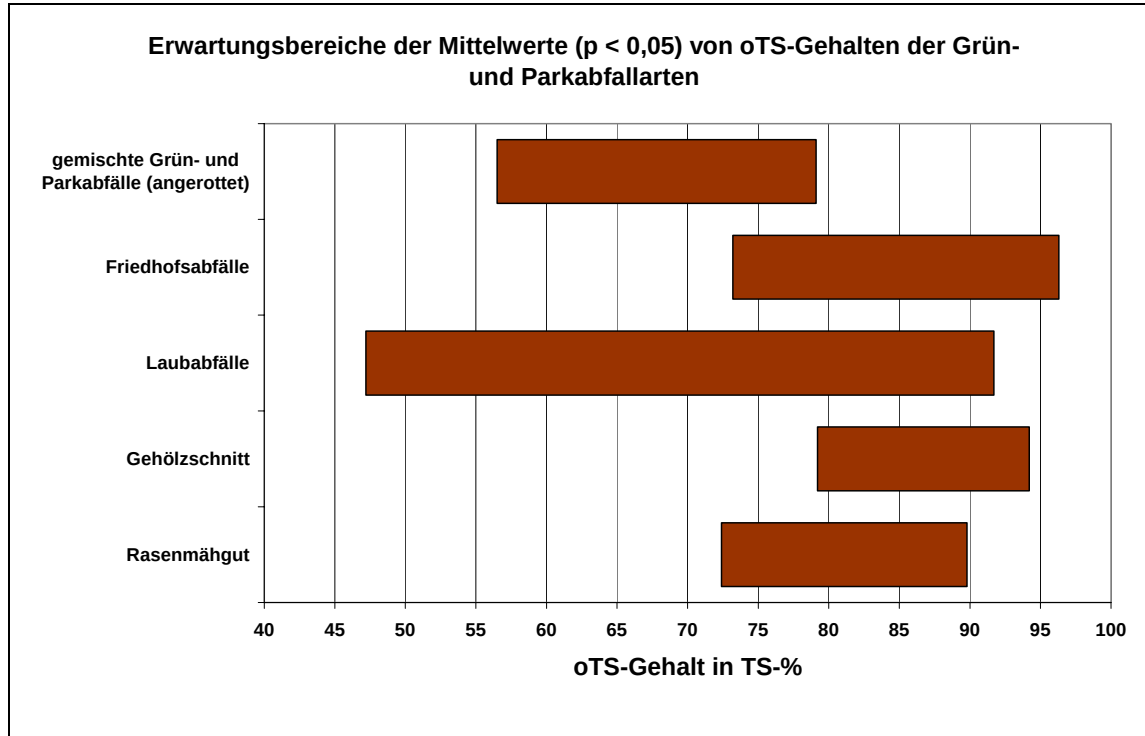
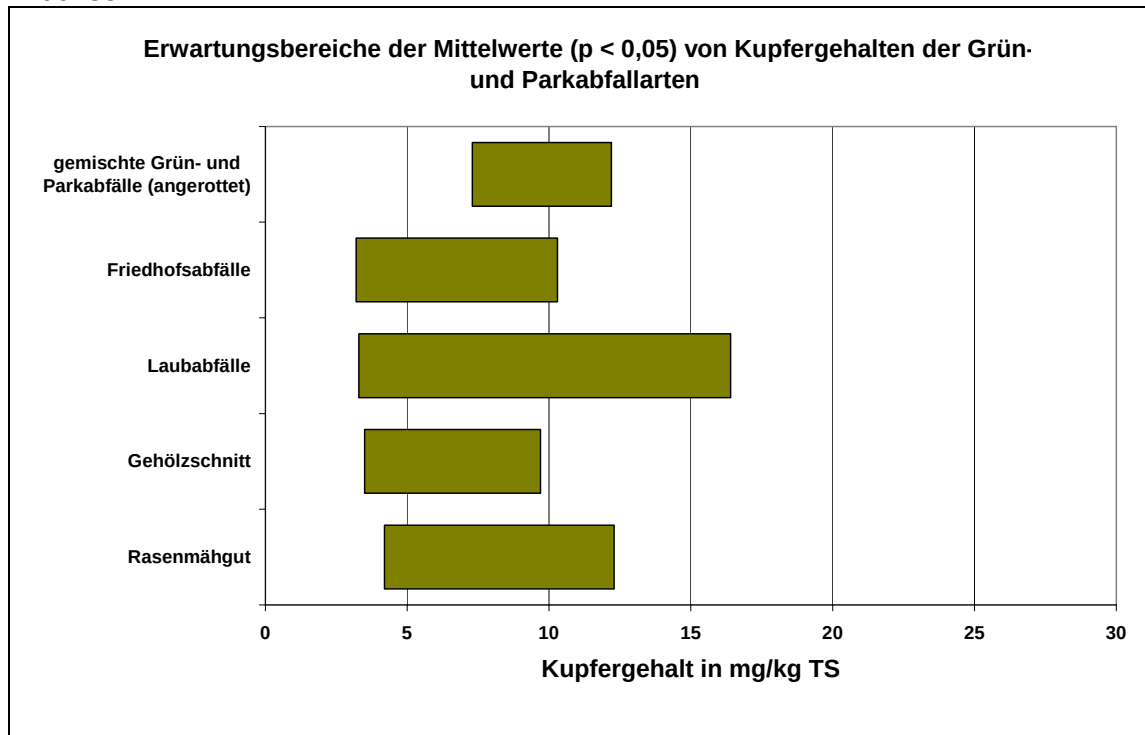
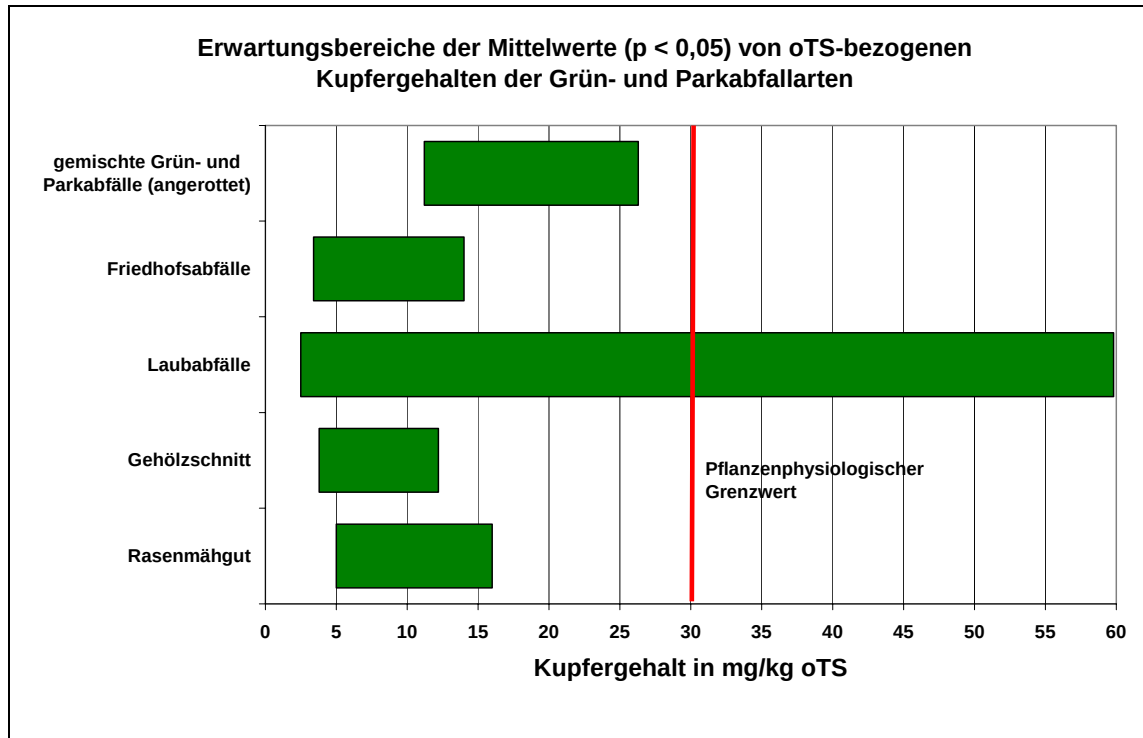


Abb. 35:



Die bei der Mischung von Grün- und Parkabfällen auftretenden Rottevorgänge fallen deutlich geringer aus als bei den Biotonnenabfällen. Mögliche punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge sind damit untersuchungstechnisch nicht nachweisbar oder überhaupt nicht vorhanden.

Abb. 36:



4.1.3 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit Literaturangaben

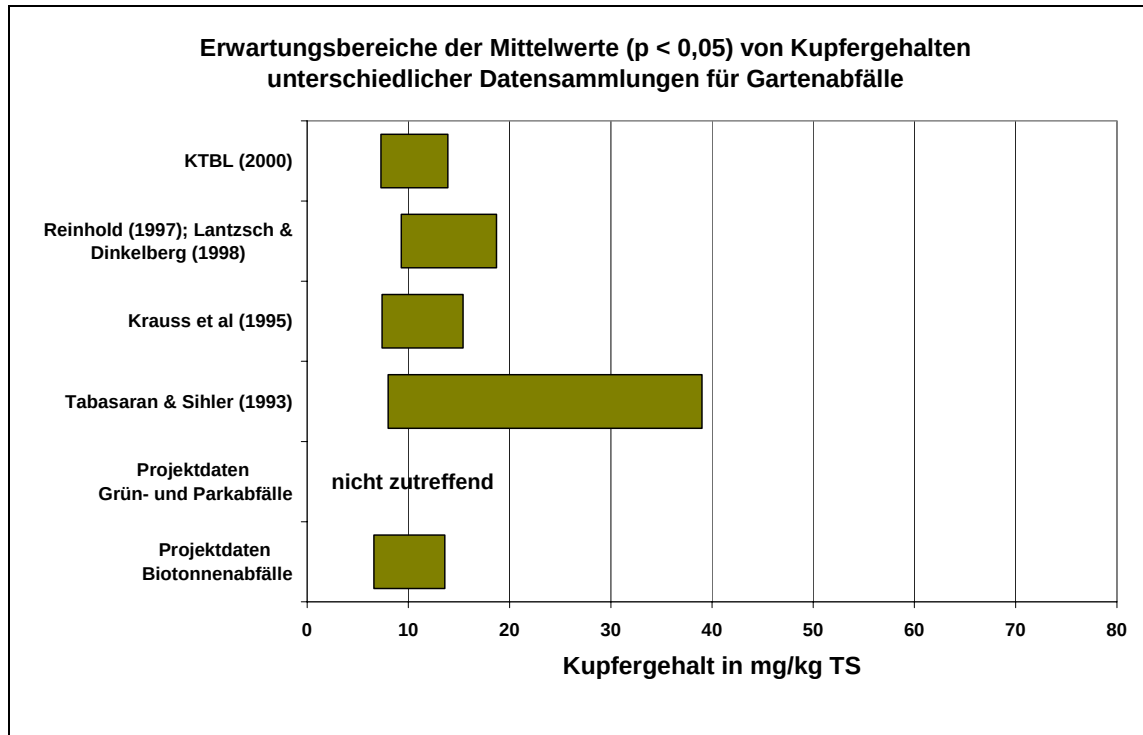
Für eine Reihe von Untersuchungsergebnisse aus diesem F&E-Projekt sind Vergleiche mit Literaturangaben möglich. Um hier eine zeitliche Entwicklung der Inputmaterialqualitäten nachvollziehen zu können wurden dafür ältere Quellen (vor 2000) ausgewählt. Die Projektdaten sind dabei in Biotonnenabfälle sowie in Grün- und Parkabfälle unterteilt. Das war bei den Literaturstellen nicht immer möglich, sodass bei diesen keine gleichwertige Unterteilung erfolgt ist. Auch waren die einbezogenen Übersichtsdatensammlungen oft andersartig strukturiert, was nur teilweise Vergleiche erlaubt hat. Dazu folgende Darstellungen (siehe Abbildungen 37 bis 45)

Gartenabfälle beinhalten ein recht breites Spektrum von pflanzlichen Herkünften. Hier sind Ernterückstände, Krautabfälle von Einjährspflanzen und Stauden sowie Reste von Balkonpflanzen zu nennen. Die Gartenabfälle fallen bei der Getrenntsammlung in Haushalten an und sind daher den Biotonnenabfällen zuzuordnen. Die Gartenabfälle der in das Projekt einbezogenen Anlagen bilden eine Einheit mit den verglichenen Datensammlungen. Lediglich die Untersuchungsergebnisse von Tabasaran & Sihler (1993) zeigen in der Tendenz eine Ausweitung der Datenspannbreite in Richtung höherer Kupfergehalte an.

Die im Projekt 2006/2007 gewonnen Kupfergehaltsdaten für Abfälle aus Hausgärten entsprechen dem langjährig bestätigten Stand.

Rasenmähgut fällt sowohl bei der Getrenntsammlung in Haushalten als auch bei der Grünflächen- und Parkpflege an. Den Literaturstellen war hier keine deutliche Trennung zu entnehmen. Aus den eigenen Projektdaten ergibt sich eine leichte Tendenz zu höheren Kupfergehalten in den Hausgärten. Das deutet mögliche Kupfereinträge z.B. aus Kupferdachrinnen und –spritzmittel an.

Abb. 37:



Die im Projekt 2006/2007 gewonnen Kupfergehaltsdaten für Rasenmäähgut entsprechen dem langjährig bekannten Stand.

Gehölzschnitt kann sowohl in Hausgärten als auch bei der Grünflächen- und Parkpflege anfallen. Sie ordnen sich daher in diese beide Hauptgruppen der Biotonnenabfälle ein. Auch hier zeigen die aus der Praxis der Bioabfallverwertung gewonnen Datensätze in der Tendenz leicht erhöhte Kupfergehaltsmesswerte für Biotonnenherkünfte aus Hausgärten an.

Ältere Datensammlungen führen zu Aussagen über früher gesichert höhere Kupfergehalte bei Gehölzschnittabfällen. Hier ist aktuell eine deutliche Entlastungssituation bei den Kupfer-einträgen in die Bioabfallbehandlung festzustellen.

Laubabfälle stammen meist aus saisongebundenen Sammelaktionen im Herbst bis anteilig in den Winter hinein. Insgesamt können bei den Projektdaten die Herkünfte aus Hausgärten (Biotonnenabfälle) und von Grün- und Parkflächen in ihren Kupfergehalten kaum unterschieden werden. Auffällig ist jedoch die größere Streubreite der Kupfergehalte der Grün- und Parkabfälle. Hier kann sich anteilig einfließendes Straßenbegleitgrün auswirken, das vereinzelt durch Straßenstaub (z.B. von Bremsbelägen) kupferbelastet sein kann

In der Tendenz zeigen früher gewonnene Messwerte von Laubabfällen anteilig höhere Kupfergehalte an. Besonders deutlich wird das bei der KTBL-Datensammlung, die wahrscheinlich heute nicht mehr in die ordnungsgemäße Bioabfallbehandlung einfließende Laubkehrherkünfte aus dem Straßenbereich mit beinhalten.

Die einbezogenen Übersichtsdatensammlungen beinhalten stark voneinander abweichende Aussagen zu den Kupfergehalten von Fruchtabfällen (Obst und Gemüse). Die aktuelle Eintragssituation hat sich drastisch verbessert bzw. wurden in früheren Jahren Ergebnisse von Belastungsprüfungen mit in die Abfallbewertung einbezogen. Das muss besonders für die extremen Kupfergehalte nach Reinhold (1997) sowie Lantzsch & Dinkelberg (1998) ange-

nommen werden. Hier ist die Einbeziehung von Prüfergebnissen auf Kupferspritzmittelrückstände in die Datensammlung anzunehmen.

Abb. 38:

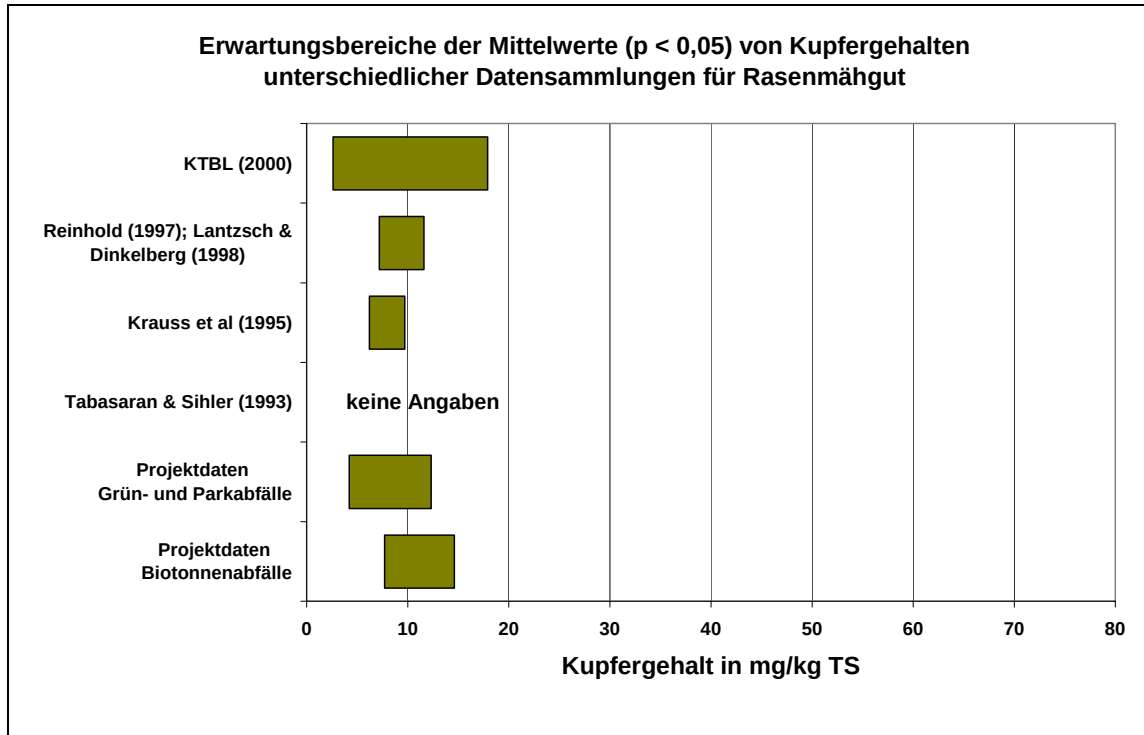


Abb. 39:

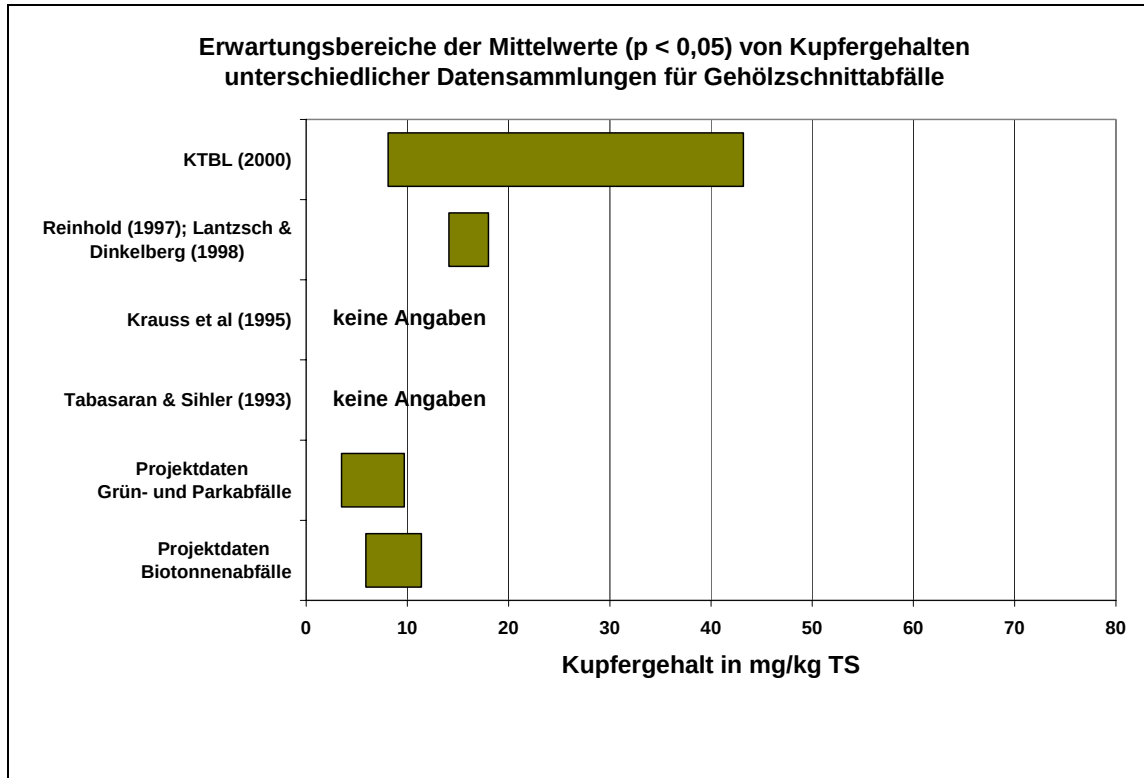
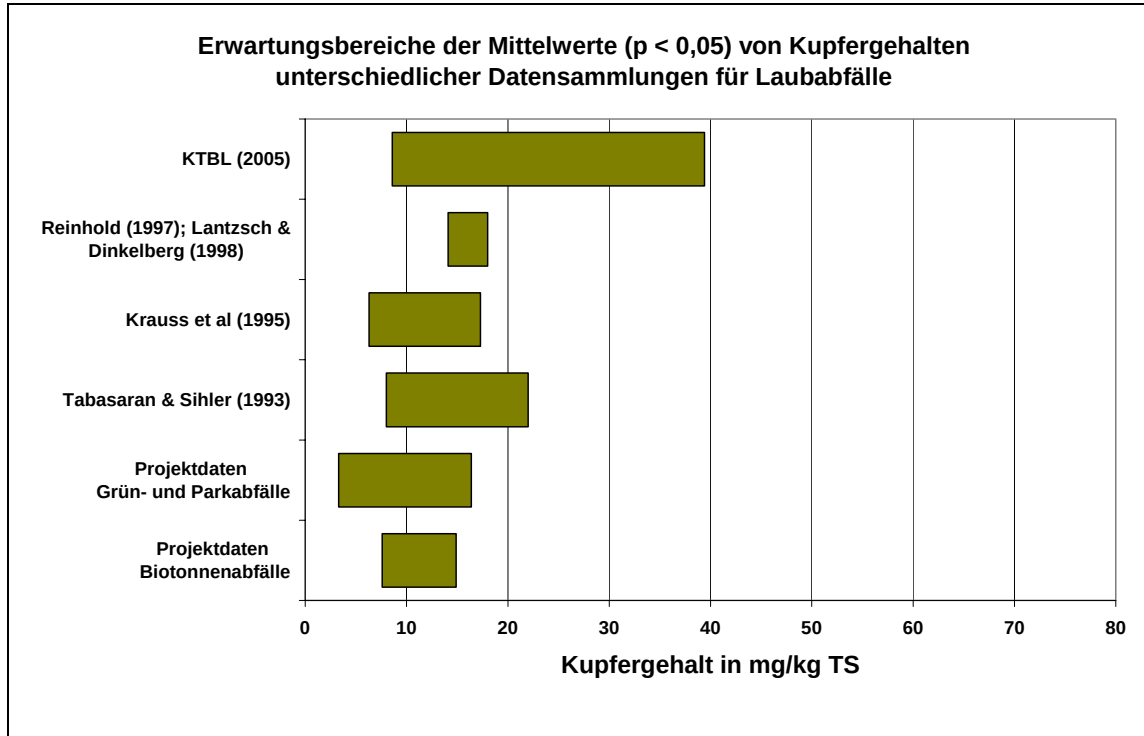


Abb. 40:



Der Vergleich von Datensammlungen zu Kupfergehalten in Küchenabfällen bestätigen die zu den Fruchtabfällen enthaltene Aussage über die Einbeziehung extrem hoher Kupferwerte. Die Küchenabfälle zeigen eine weitgehende Übereinstimmung der Kupfereintragsaussagen aller Datensammlungen an, mit leicht sinkender Tendenz für die aktuellen Projektdate.

Abb. 41:

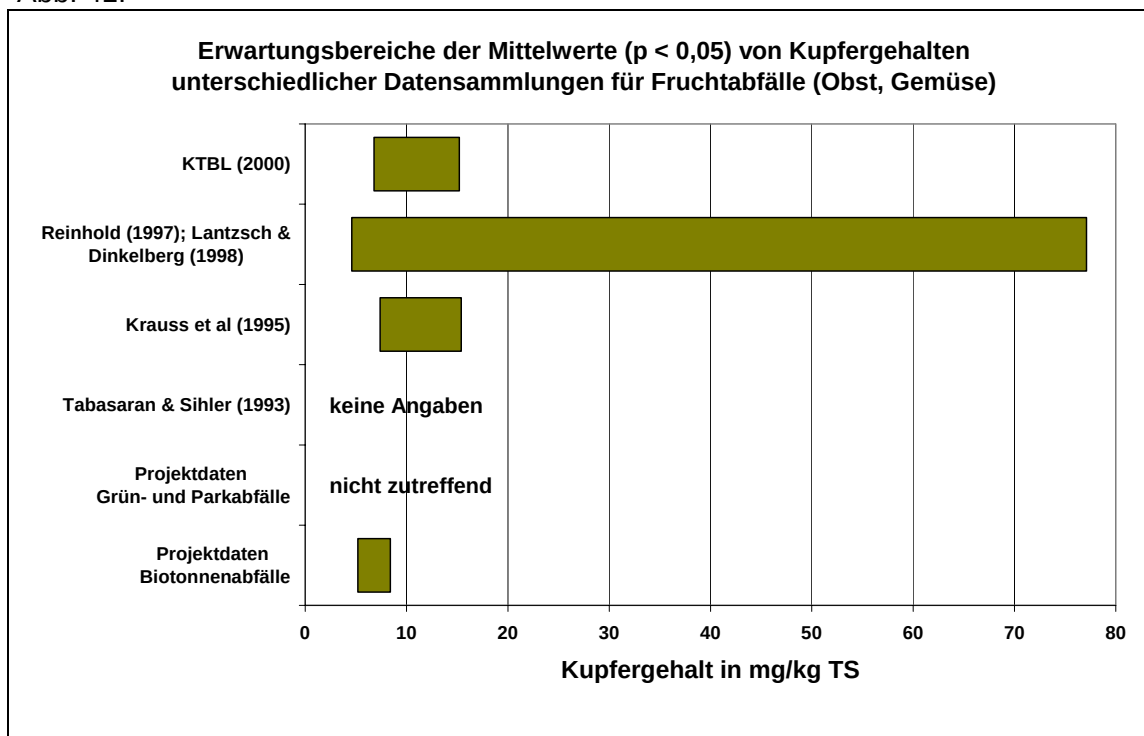


Abb. 42

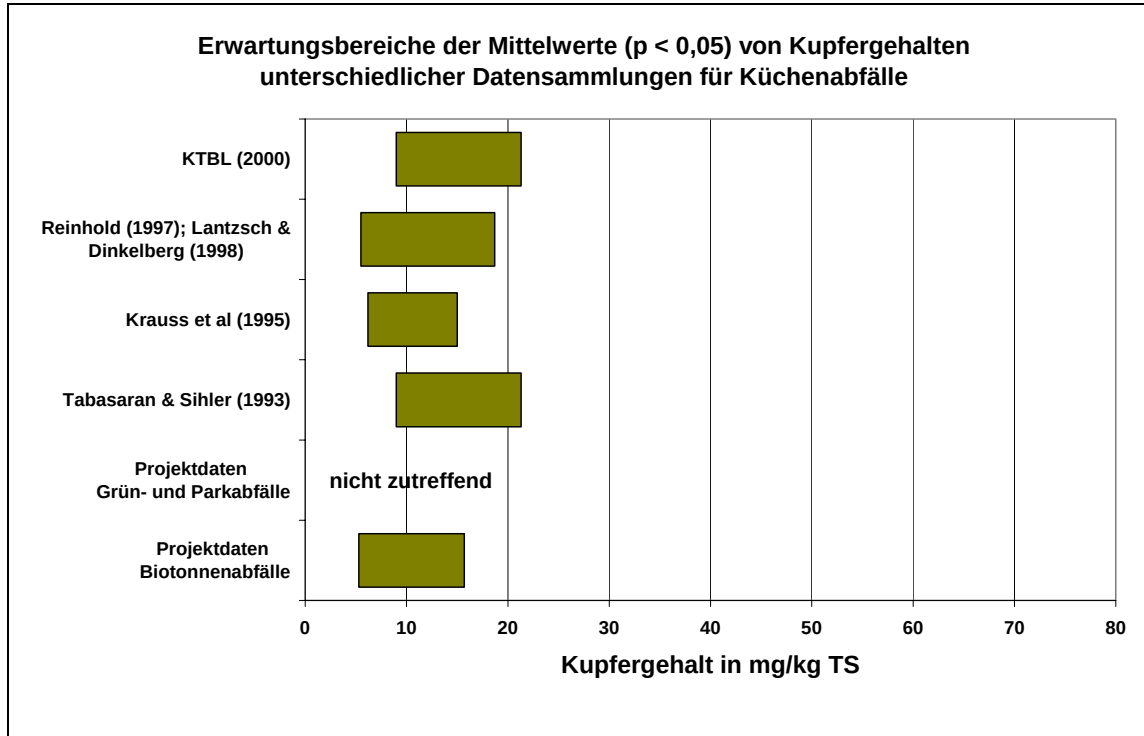
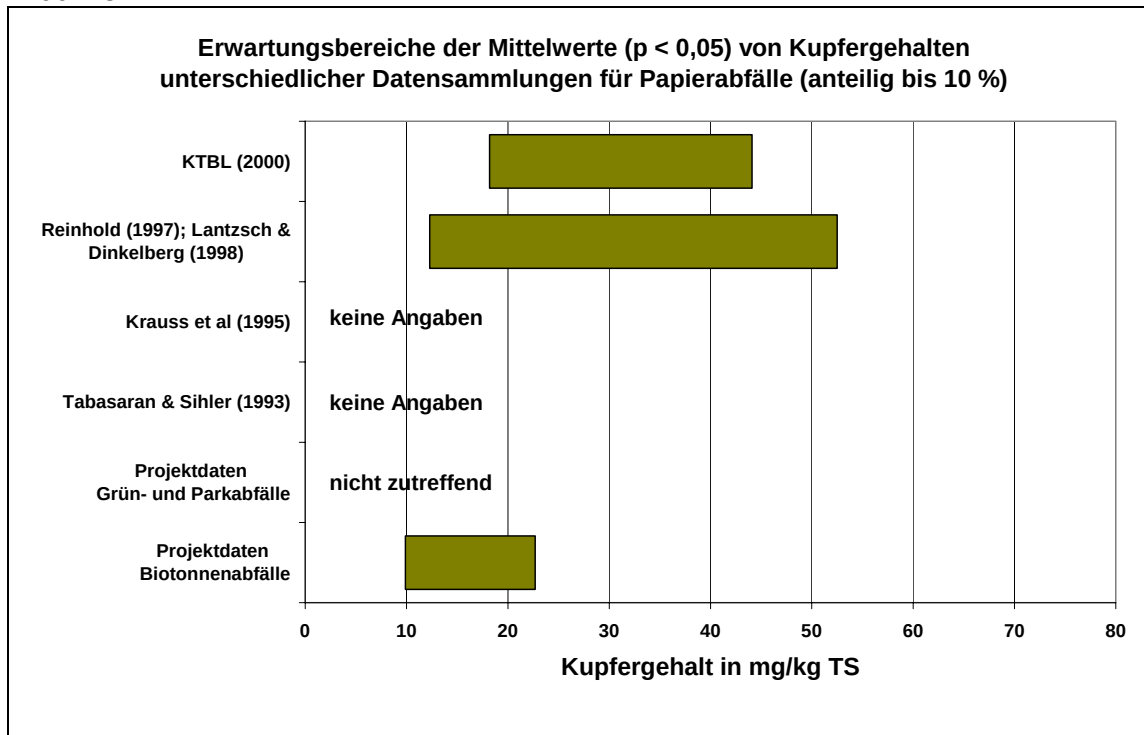


Abb. 43:



Papierreste dürfen nach Bioabfallverordnung nur anteilig bis zu 10 % der Gesamtinputmaterialmenge einer Bioabfallbehandlungsanlage ausmachen. Dafür sprechen die hochwertige Verwertung bei der Herstellung von Recyclingpapier und Pappe sowie die hohen Kupfergehalte bei Bunt- und Hochglanzdrucken. Die Einbeziehung solcher Papierabfälle haben auch die große Spannweite der Erwartungsbereiche der Mittelwerte in den Datensammlungen von Reinhold (1997) und Lantzsch & Dinkelberg (1998) sowie von der KTBL (2000) verursacht. Die aktuellen Projektdatei zeigen, dass die langjährige Öffentlichkeitsarbeit dazu geführt hat,

dass solche Papierabfälle praktisch kaum noch in den Bioabfallbehandlungsanlagen ankommen.

Abb. 44:

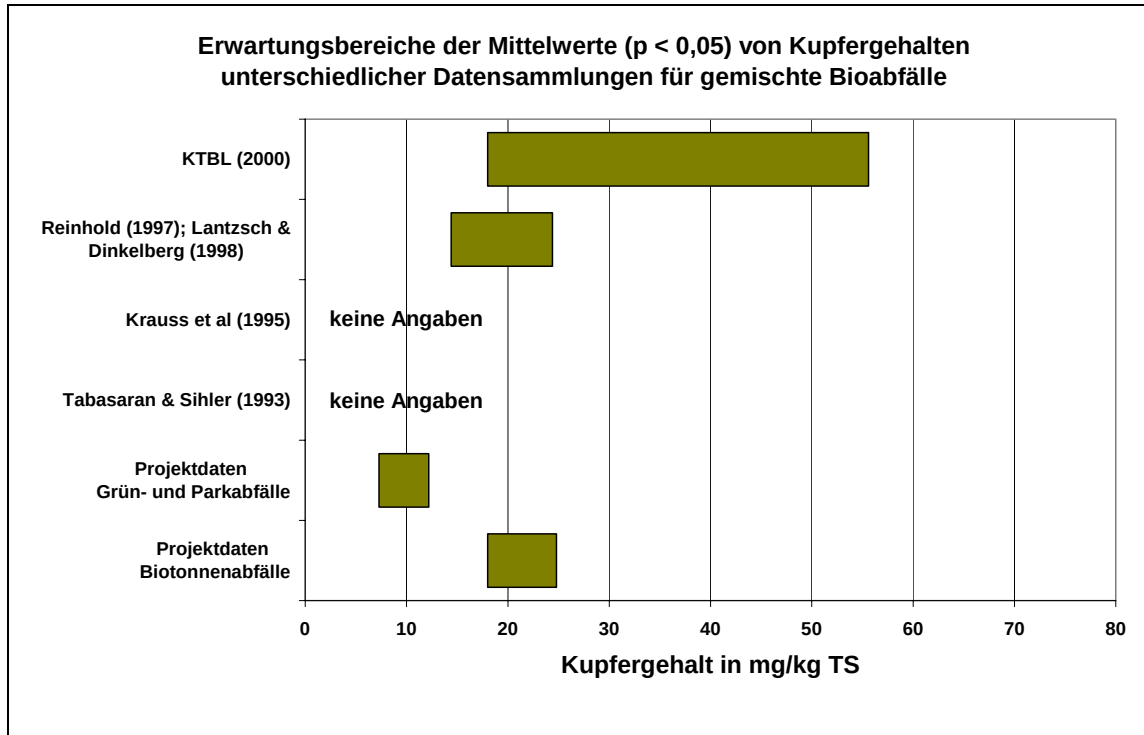
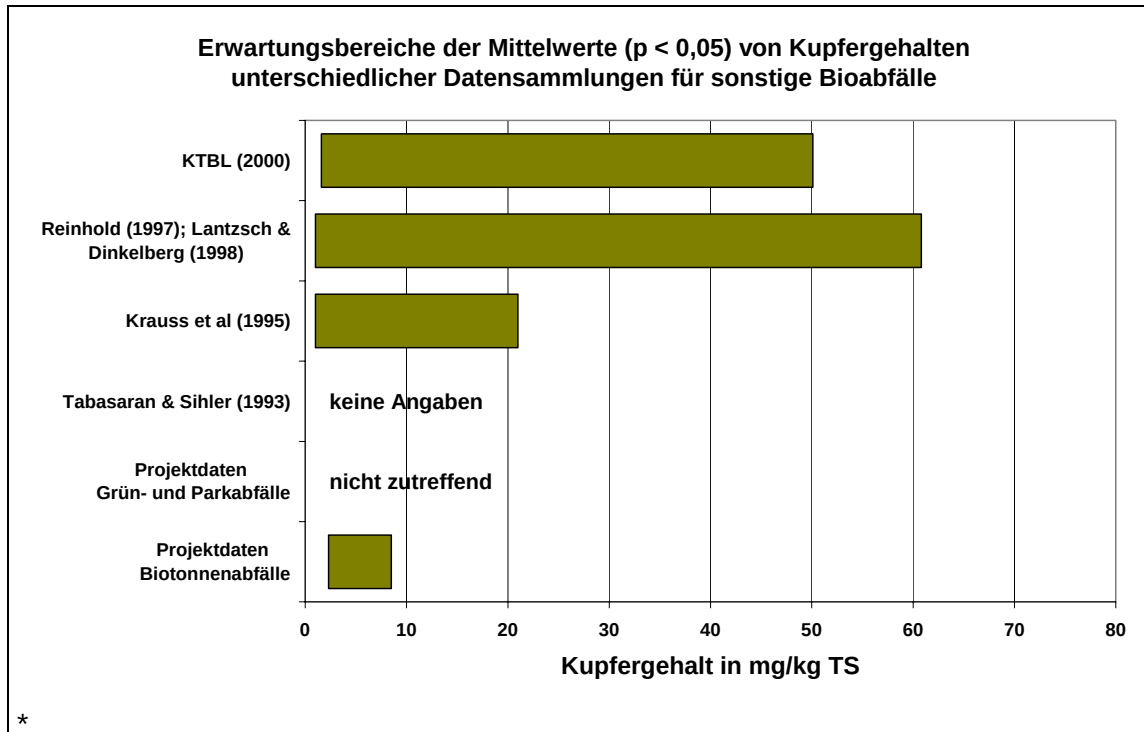


Abb. 45:



Gemischte Bioabfälle sind bei den aktuellen Projektdaten sowohl bei den Biotonnenabfällen als auch bei den Grün- und Parkabfällen aufgetreten. Hier wird der Unterschied in den Kupfergehalten zwischen den beiden Hauptgruppen der Bioabfälle besonders deutlich. Das ist vor allem auf die stärkeren Rotteverluste bei den gemischten Biotonnenabfällen zurückzuführen.

ren, die zu erheblichen Anreicherungsprozessen von Schwermetallen führen. Beginnende biochemische Aufschlüsse von punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen sind auch als Ursache möglich.

Der Vergleich zu älteren Datensammlungen fällt differenziert aus. Während die Angaben von Reinhold (1997) sowie Lantzsich & Dinkelberg (1998), die auch Biotonnenabfälle betreffen, weitgehend mit den aktuellen Praxisuntersuchungen harmonisieren, beinhalten die KTBL-Angaben von 2000 deutlich höhere Kupfergehalte. Das kann nur aus einer Einbeziehung von älteren, stark fehlerhaft beeinflussten Untersuchungsergebnissen herrühren. Diese sind heute nach langjähriger Öffentlichkeitsarbeit weitgehend ausgeschlossen.

Als sonstige Bioabfälle gelten gewerbliche Herkünfte außer Grün- und Parkabfälle aus der Grünflächen-, Park-, Landschafts- und Baumpflege. Hier laufen vor allem naturbelassene Holz- und Rindenabfälle sowie nicht landwirtschaftliche Strohabfälle auf. Die holzigen Bioabfälle werden als Strukturmaterial für die Gewährleistung aerober Rotteprozesse bei der Bioabfallbehandlung dringend benötigt. Das betrifft insbesondere die kostengünstige offene Mietenkompostierung.

In dem Bereich der sonstigen Bioabfälle zeigte sich in den zurückliegenden Jahren eine wesentlich Entlastungssituation für Kupfer. Die älteren Datensammlungen beinhalten noch Angaben zu holzigen Abfällen mit erheblichen Kupferbelastungen z.B. aus Holzschutzmitteln. Diese Stoffe fließen heute nicht mehr in die Bioabfallbehandlung ein, wozu auch der hohe Bedarf an heizwertreicher Biomasse für die Energiegewinnung durch Verbrennung beiträgt.

Zusammenfassend kann aus dem Vergleich älterer Datensammlungen von Kupfergehalten in Bioabfällen mit den Projektdaten aus der aktuellen Praxis der Bioabfalleinsammlung folgendes abgeleitet werden:

- Die Kupfergehalte in den pflanzlichen Biotonnenabfällen weisen etwas höhere Messwerte auf als die der Grün- und Parkabfälle, wobei die einzelnen Biotonnenabfallarten deutliche Unterschiede zeigen
- Insgesamt zeigen die Datensammlungen zu den Kupfergehalten der Bioabfälle einen Trend zu einer Abnahme der Kupfergehalte an, das betrifft Abfälle aus Hausgärten, von Gehölzschnitt, von Obst und Gemüse, aus Laubsammlungen, von Papierresten und besonders von holzigen sonstigen Bioabfällen, bei denen behandelte Holzreste nur noch sehr selten als Fehlwürfe vorkommen
- Die Kupfergehalte bei Rasenmärgut und Küchenabfällen sind über die zurückliegenden 15 Jahre annähernd gleichbleibend gering

Insgesamt leitet sich die Aussage ab, dass die pflanzlichen Inputmaterialien der Bioabfallbehandlungsanlagen im Verlauf der Jahre immer geringere Kupfereinträge in den Verwertungsprozess bewirken. Die pflanzlichen Kupferinhaltsstoffe sind damit nicht ausschlaggebend für die in den Jahren bis 2003 ansteigenden Kupfergehalte in den Komposten.

Die im Projekt untersuchten pflanzlichen Inputmaterialien, insbesondere die aus Hausgartenbereichen beinhalten auch die Auswirkungen der Anwendung von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln (z.B. Grünkupferspritzmittel) im Hausgartenbereich. Da die pflanzlichen Inputmaterialien keine Zunahme, sondern eher abnehmende Tendenzen in ihren Kupfergehalten aufweisen, kann eine steigende Anwendung solcher Spritzmittel ausgeschlossen werden. Auch die durchgehende Einhaltung des pflanzenphysiologischen Grenzwertes von 30 mg Cu je kg organischer Pflanzentrockenmasse in den untersuchten, nicht vorgerotteten Pflanzenresten belegt diese Annahme.

Die über den pflanzenphysiologisch vertretbaren Grenzen liegenden Kupfergehalte (> 30 mg/kg oTS) bei Laubabfällen deuten auf mögliche Depositionsauswirkungen von Straßentaub und auf Aufkonzentrationen durch Vorratteverluste hin. Letzteres gilt auch für Biotonnenabfallgemische, bei denen zusätzlich beginnende biochemische Aufschlüsse von partikulären Kupfereinträgen (z.B. kupferhaltige Metallteilchen) wirksam werden können.

Die Rückführung von Siebüberlaufrückständen führt zu keinen erheblichen Gehaltserhöhungen an Kupfer in den Komposten, obwohl wegen des vorhergehenden Durchlaufs der Rotteprozesse leichte Aufkonzentrationen eingetreten sind.

4.1.4 Einfluss von Kupferdachelementen auf die Inputmaterialien

Die Relation der Abschwemmungen aus dem Dachbereich zu den Depositionskupfereinträgen von Böden wird von Hullmann et al. (2001) mit 1 : 20 (5%) angegeben. Daraus wird insgesamt eine geringe Bedeutung der Kupferabschwemmungen aus den Dachbereichen abgeleitet. Diese Aussage wurde auch durch Hillenbrand et al. (2005) übernommen. Beide Feststellungen beziehen sich auf die Gesamtmengen für Deutschland, nicht auf spezielle Einzelfallbetrachtungen, wie z.B. für die Anwendung von gefasstem Dachablauf bei der Bewässerung von Hausgartenland.

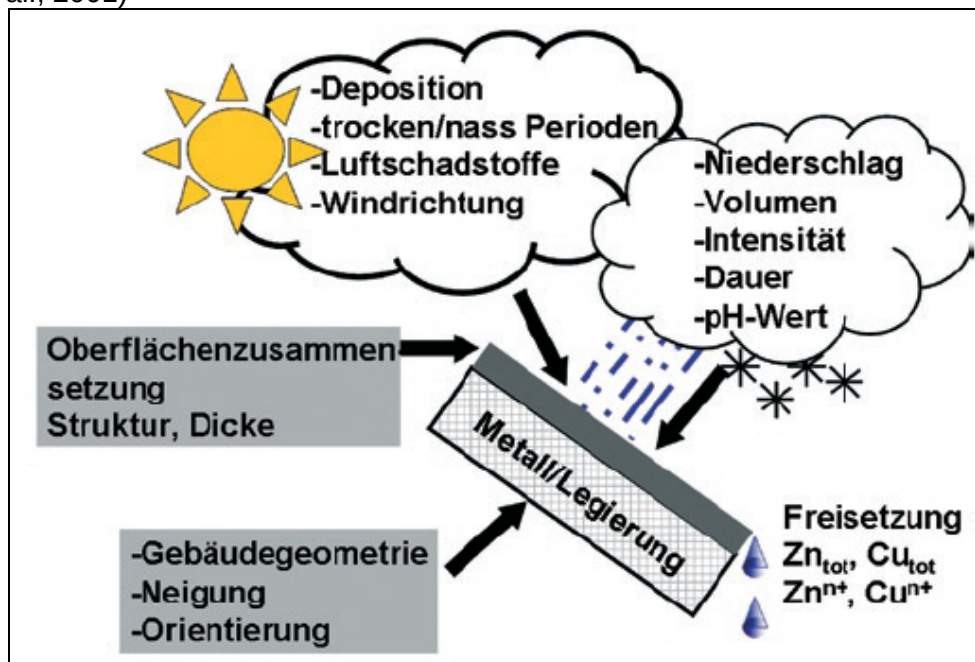
Hullmann et al. (2001) verweisen darauf, dass bei Kupfer die Parameter SO_2 , O_3 und die Nasszeit für die Abschwemmrate von Bedeutung sind. Wallinder et al. (2005) nennen eine mögliche Spannbreite der Kupferabschwemmungen von 0,8 bis 2,0 g / $\text{m}^2 \cdot \text{a}$. Die Kupferabschwemmungen aus dem Dachbereich werden dabei durch die Bildung von Patina auf der Kupferaußenhaut mit der Zeit vermindert. Dazu nachfolgende schematische Darstellung (siehe Abbildung 46).

Aus ökologischen Gründen wird die Fassung und Nutzung von Regenwasser als Brauchwasser allgemein empfohlen. Die im gefassten Regenwasser abgeschwemmten Kupfermengen sind in diesem Brauchwasser gelöst und wirken daher bei Nutzung zur Bewässerung ähnlich einer kombinierten Blatt- / Bodendüngung. Wegen der unterschiedlichen Kupferanteile im Dachbereich von Wohnhäusern und variierenden Größen der angeschlossenen Hausgärten, die über Regenwasserfassungsanlagen bewässert werden, ergeben sich für die mit solchem Brauchwasser versorgten Pflanzen stark voneinander abweichende Kupfergehalte.

In den nachfolgenden Szenarien und deren Bewertung wird dazu für eine komplette Regenwassernutzung zur Gartenbewässerung von folgendem ausgegangen:

- Dachgrundflächengröße von 100 m^2 mit einer durchschnittlichen Regenwasserfassung von etwa 60 m^3/a
- mittlerer Wasserverbrauch zur Nutzgartenbewässerung von 60 l/m^2 , was einer optimal zu bewässernden Gartenfläche von 1000 m^2 je 100 m^2 Dachgrundfläche entspricht, die jedoch nicht immer verfügbar ist.
- mittlere Dachneigung von 45° , was einer bewitterten Dachfläche von etwa 140 m^2 entspricht
- Kupferdachrinnen entsprechen einem Kupferanteil von 5 % an der Gesamtdachfläche
- Kupferdachrinnen und kleinteilige Dachbleche (z.B. Kehl-, Ortgang-, Verahrungs- und Firstbleche) entsprechen einem Kupferanteil von 10 % an der Gesamtdachfläche
- Dachfläche mit 100 % Kupfereindeckung

Abb. 46: Schematische Darstellung des Korrosions- und Abschwemmprozesses (nach Wal-
linder et al., 2001)



Unter Berücksichtigung der oben genannten Ausgangspunkte können aussagekräftige Ergebnisse der Szenarienberechnungen vorgestellt werden (siehe Tabelle 14)

Tab. 14:

Szenarien zur Kupferversorgung von Gartenpflanzen bei unterschiedlichen Kupferanteilen im Dachbereich und unterschiedlicher verfügbarer Gartenfläche									
Dachfläche in m²	Kupferflächenanteil in %	Abschwemmrate in g/m²a	Kupferabtrag in g/a	Gartenfläche in m²	Kupfereintrag in g/m²a			Kupferentzug für Rasen/Gehölze in g/m²a ²⁾	Kupferüberschuss in g/m²a
					Dachfläche	Deposition ¹⁾	Gesamt		
100 % der wassernutzungsoptimalen Gartenfläche verfügbar									
140	5	1,3	9,1	1000	0,0091	0,0045	0,0136	0,01	0,0036
140	10	1,3	18,2	1000	0,0182	0,0045	0,0227	0,01	0,0127
140	100	1,3	182,0	1000	0,1820	0,0045	0,1865	0,01	0,1765
50 % der wassernutzungsoptimalen Gartenfläche verfügbar									
140	5	1,3	9,1	500	0,0182	0,0045	0,0227	0,01	0,0127
140	10	1,3	18,2	500	0,0364	0,0045	0,0409	0,01	0,0309
140	100	1,3	182,0	500	0,3640	0,0045	0,3685	0,01	0,3585
25 % der wassernutzungsoptimalen Gartenfläche verfügbar									
140	5	1,3	9,1	250	0,0364	0,0045	0,0409	0,01	0,0309
140	10	1,3	18,2	250	0,0728	0,0045	0,0773	0,01	0,0673
140	100	1,3	182,0	250	0,7280	0,0045	0,7325	0,01	0,7225

Legende: 1) - nach Böhm (2000)
2) - nach Trott et al (2007)

In allen betrachteten Fällen ergibt sich aus der Nutzung von Dachwasserabläufen zur Gartenbewässerung ein Kupferüberschuss im Vergleich zum Pflanzenentzug, wenn die Kupfer-einträge aus Deposition berücksichtigt werden. Das gilt schon für eine Ausstattung nur mit Kupferdachrinnen (etwa 5 % Dachflächenanteil) bei einer verfügbaren Gartenfläche von 1000 m² je 100 m² Dachgrundfläche. Mittlere reale Bedingungen liegen jedoch zwischen 250 bis 500 m² Gartenfläche je 100 m² Dachgrundfläche.

Für eine bodenschutzgerechte Bewertung der ausgewiesenen Kupferüberschüsse soll hier für Böden ohne Überschreitung der Vorsorgewerte nach BBodSchV ein Vergleich zu den vorsorgebestimmten Kupferfrachten für Bioabfallkomposte bei deren landwirtschaftlicher Anwendung vorgenommen werden, der sich aus den Grenzwerten der BioAbfV mit 0,067 g Cu / m²a ableiten lässt. Werden jedoch die Vorsorgewerte nach BBodSchV überschritten,

was nach Bussian & Reinhold (2003) für urbane Sandböden zu etwa 80 % der untersuchten Flächen zu erwarten ist, so gilt die hier eine Gesamtfrachtengrenze (einschließlich Deposition) von 0,036 g Cu / m²a.

Schlussfolgernd ist aus den Ergebnissen der Szenarienbetrachtungen heraus festzustellen, dass eine komplette Kupfereindeckung von Wohnbebauungsdächern die Nutzung des hier anfallenden Regenwassers für eine Gartenbewässerung von vorn herein ausschließt.

Für Wohnbauten mit Kupferdachrinnen und kleinteiligen Dachblechen (z.B. Kehl-, Ortgang-, Verahrungs- und Firstbleche) ist mindestens ein Verhältnis von Dachgrundfläche zu bewässerter Gartenfläche von 1 : >2,5 erforderlich, wenn auf diesen Flächen die Kupfervorsorgewerte nach BBodSchV eingehalten werden. Bei Überschreitung der Bodenvorsorgewerte muss dieses Verhältnis auf 1 : >4,4 erweitert werden.

Sind lediglich Kupferdachrinnen im Dachbereich vorhanden, so besteht selbst bei Überschreitung der Kupfer-Bodenvorsorgewerte keine Beschränkung für eine Nutzung von Dachablaufwasser zur Gartenbewässerung, wenn ein Verhältnis von Dachgrundfläche zu bewässerter Gartenfläche von 1 : >2,2 eingehalten wird.

Bodenflächen zur Nutzung als offene Versickerungsflächen für Regenwasser (z.B. Mulden), wie sie z.B. Gantner (2002) empfiehlt, müssen schon bei sehr geringen Kupferanteilen im Dachbereich aus dem Geltungsbereich des Bodenschutzrechtes ausgeschlossen, also als Kleinanlagen zur Abwasserreinigung genehmigt, errichtet und betrieben werden. Bei der Pflege solcher Versickerungsanlagen anfallendes Mähgut ist abfallrechtlich wie das von bewachsenen Kiesfiltern zur häuslichen Abwasserreinigung einzuordnen.

Zur Überprüfung praktischer Auswirkungen von zunehmenden Kupferanteilen im Dachbereich von Wohnbebauungen wurden die vorliegenden Kupferuntersuchungsergebnisse für potenziell betroffene Bioabfallmaterialien nach Anlagen mit deutlicher und mit geringerer Kupferfreisetzung unterteilt und einer varianzanalytischen Auswertung unterzogen. Die Zuordnung der einzelnen Anlagen erfolgte anhand der jeweiligen Befragungsergebnisse wie folgt:

- Längerfristiger höherer Anteil an Kupfer im Dachbereich:
Anlagen-Nr. 232, 325, 357, 359, 371, 373
- Geringerer Anteil an Kupfer im Dachbereich bzw. deutliche Abnahme dieses Anteils:
Anlagen-Nr. 17, 75, 107, 262, 326, 330, 347, 355

Es wurde varianzanalytisch geprüft, ob die unterschiedlichen Kupfereinträge im Sammelgebiet der Anlagen, getrennt nach den beiden Bioabfallarten (Biotonnen- bzw. Grün- und Parkabfälle), statistisch gesicherte Beziehungen zu den Kupfergehalten folgender Bioabfallmaterialien auswirken:

- Gehölzschnittabfälle
- Rasenmähgut
- Gartenabfälle
- Herbstlaubsammlungen (Laubabfälle)

Die Auswertungsergebnisse sind in den Tabellen 15 bis 18 zusammengestellt, denen die Mittelwerte der Kupfergehalte und deren signifikante Unterscheidung entnommen werden kann.

Gehölzschnittabfälle zeigen in ihren Kupfergehalten besonders deutliche Zusammenhänge zu den Kupferanteilen im Dachbereich von Wohnbebauungen. Das gilt sowohl für Bioton-

nenabfälle als auch für Grün- und Parkabfälle, ist jedoch bei den vorwiegend aus Hausgärten stammenden Biotonnenabfällen etwas stärker ausgeprägt. In den Holzanteilen der Gehölzschnittabfälle reichern sich die aufgenommenen Kupfermengen an und stellen damit eine gewisse Summenfunktion für die Kupferaufnahme dar. Die Reaktion bei den Grün- und Parkabfälle kann sich vor allem durch Einflüsse aus den wohnhausnahen Flächen auf angrenzende Grünflächen erklären.

Tab.15:

Signifikanz der Kupfergehalte in Gehölzschnittabfällen in Abhängigkeit von der Bioabfallart und den Kupferanteilen im Dachbereich							
Var.	Bioabfallart	Kupferanteil im Dachbereich	Kupfergehalt in mg/kg TS	Variante			
				1	2	3	4
1	Biotonnenabfälle	hoch	10,9		xx		xx
2		gering	3,5	xx		xx	
3	Grün- und Parkabfälle	hoch	9,5		xx		xx
4		gering	4,1	xx		xx	
Legende: xx - Unterschied statistisch gesichert (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,05) x - Unterschied mit deutlicher Tendenz (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,10)							

Bei den Gartenabfällen handelt es sich sowohl um Ganzpflanzenreste von Pflanz- und Beetkulturen als auch um Abräumreste von Beet- und Staudenflächen. Hier sind nur bei den Biotonnenabfällen signifikant höhere Kupfergehalte infolge zunehmender Kupfereinträge aus Dachbereichen nachweisbar. Für die hier dominierenden Hausgartenherkünfte waren solche Reaktionen zu erwarten. Bei den Grün- und Parkabfällen wurden zwar im Mittel recht hohe Werte gefunden, jedoch mit so starken Streuungen der Einzelmesswerte, dass keine statistisch gesicherten Unterschiede erkennbar sind.

Die Laubabfälle aus der Biotonne zeigen in ihren Kupfergehalten eine ähnliche Reaktion auf erhöhte Kupfereinträge aus Dachbereichen wie die Gartenabfälle, jedoch nur als deutliche Tendenz. Das deutet auf überdeckende Einflüsse z.B. durch Straßenstaubbelastungen hin. Die Grün- und Parkabfälle weisen sehr unterschiedliche Mittelwerte auf. Diese zeigen jedoch wieder wegen großer Streubreiten der Einzelmesswerte nicht einmal in der Tendenz gerichtete Unterschiede an. Für die vereinzelt höheren Kupfergehalte sind hier andere Einflussfaktoren wirksam.

Tab. 16:

Signifikanz der Kupfergehalte in Gartenabfällen in Abhängigkeit von der Bioabfallart und den Kupferanteilen im Dachbereich							
Var.	Bioabfallart	Kupferanteil im Dachbereich	Kupfergehalt in mg/kg TS	Variante			
				1	2	3	4
1	Biotonnenabfälle	hoch	12,1		xx		
2		gering	6,8	xx			
3	Grün- und Parkabfälle	hoch	14,7				
4		gering	11,9				
Legende: xx - Unterschied statistisch gesichert (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,05) x - Unterschied mit deutlicher Tendenz (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,10)							

Tab. 17:

Signifikanz der Kupfergehalte in Laubabfällen in Abhängigkeit von der Bioabfallart und den Kupferanteilen im Dachbereich							
Var.	Bioabfallart	Kupferanteil im Dachbereich	Kupfergehalt in mg/kg TS	Variante			
				1	2	3	4
1	Biotonnenabfälle	hoch	13,3		x	x	
2		gering	8,3	x			
3	Grün- und Parkabfälle	hoch	5,7	x			
4		gering	11,9				
Legende: xx - Unterschied statistisch gesichert (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,05) x - Unterschied mit deutlicher Tendenz (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,10)							

Tab. 18:

Signifikanz der Kupfergehalte in Rasenmähgut in Abhängigkeit von der Bioabfallart und den Kupferanteilen im Dachbereich							
Var.	Bioabfallart	Kupferanteil im Dachbereich	Kupfergehalt in mg/kg TS	Variante			
				1	2	3	4
1	Biotonnenabfälle	hoch	9,9				
2		gering	13,2			xx	
3	Grün- und Parkabfälle	hoch	6,2		xx		
4		gering	9,6				
Legende: xx - Unterschied statistisch gesichert (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,05) x - Unterschied mit deutlicher Tendenz (Irrtumswahrscheinlichkeit: p < 0,10)							

Bei dem Rasenmähgut haben die unterschiedlichen Kupfereinträge aus den Dachbereichen keinen Bezug zu den Kupfergehalten gezeigt. Hier handelt es sich in der Regel um frische, jung ausgetriebene Pflanzenteile, die durch das verringerte Umlagerungsverhalten von Kupfer aus älteren in jüngere Pflanzenteile weniger auf aktuelle Kupferversorgungszustände reagieren.

Die hier signifikant erhöhten Kupfergehalte in Biotonnenabfällen mit geringem Kupfereintrag von Dachflächen zu den Kupfergehalten von Grün- und Parkabfällen in Gebieten mit erhöhten Kupferanteil der Dachflächen lassen nur vermuten, dass hier Vermischungen mit anderen Materialien also andere Eintragspfade zufällig aufgetreten sind. Für die Bewertung der Kupfereinträge aus Dachbereichen ist dieses Ergebnis irrelevant.

Zusammenfassend leitet sich aus den in diesem Abschnitt enthaltenen Datenauswertungen folgendes ab:

- Insgesamt kann bestätigt werden, dass erhöhte Kupfereinträge aus Dachbereichen zu höheren Kupfergehalten in den Biotonnenabfällen (durchschnittlich über die 4 ausgewerteten Bioabfallmaterialien um 3,6 mg/kg Input-Trockenmasse bzw. um 45 %) führen.

- Der Einfluss erhöhter Kupfereinträge aus Dachbereichen auf die Zunahme der Kupfergehalte von Grün- und Parkabfällen ist nur bei Gehölzschnittabfällen gesichert nachweisbar.
- Es zeigt sich eine Abstufung im Reaktions- bzw. Anzeigevermögen der einzelnen Materialien auf die erhöhten Kupfereinträge, wobei Bioabfälle mit höheren Anteilen an Speicherorganen (z.B. Holz, Ganzpflanzen) stärker reagieren und Blätter, insbesondere sehr junger Aufwuchs (z.B. Rasenmärgut) weniger oder nichts anzeigen. Das entspricht dem geringen Umlagerungsverhalten von Kupfer in den Pflanzen (Bergmann, 1993, Domeyer, 2005), was zu relativen Anreicherungen in den älteren Organen führt.

Die Ergebnisse der Betrachtungen zu den Kupfereinträgen aus Dachbereichen und deren Auswirkungen auf die Kupfergehalte in Bioabfällen sind Anlass, die Empfehlungen von Boller (2004), von Friedli et al. (2001) sowie von Hillenbrand et al. (2005) zur kurz- und mittelfristigen Umsetzung von Barriersystemen bei der Regenwasserfassung von Dachbereichen mit Kupferanteilen sowie zur längerfristigen und nachhaltigen Substitution von Kupfer im Dachbereich durch ökologisch günstigere Materialien aufzugreifen und ihre Umsetzung anzuregen.

4.2 Entwicklung der Kupfergehalte in den untersuchten Kompostierungsanlagen

Für die 14 untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen wurden die bisher verfügbaren Angaben zur Entwicklung der Kupfergehalte in den Komposten zusammengestellt (siehe Tabelle 19). Hier wurde das Ergebnis der aktuellen Datenauswertungen zur Ableitung einer Limitierungsstrategie schon einbezogen.

Es zeigt sich, dass die in den untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen von 1997 bis 2002 folgende mittlere Zunahme der Kupfergehalte stattgefunden hat:

- Biotonnenabfallkompostierung um +11,1 mg/kg TS
- Grün- und Parkabfallkompostierung um +14,4 mg/kg TS

Seit dem Jahr 2002 konnte dieser Prozess durch qualitätssichernde Maßnahmen im Rahmen dieses Projektes umgekehrt werden. Dazu wurde vor allem Einfluss auf die Stabilisierung und Vertiefung des Qualitätsbewusstseins bei den Anlagenbetreibern Einfluss genommen. Die Anlagenbetreiber haben daraufhin ihre Kontrollen bei der Bioabfallannahme verstärkt und die Öffentlichkeitsarbeit der Kommunen intensiver unterstützt.

So konnte im Durchschnitt der 14 Untersuchten Anlagen von 2002 bis 2007 folgende Abnahme der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten festgestellt werden:

- Biotonnenabfallkompostierung um –11,3 mg/kg TS
- Grün- und Parkabfallkompostierung um –16,2 mg/kg TS

Damit wurden die Kupfergehaltsanstiege aus dem vorhergehenden Jahrfünft wieder ausgeglichen. Der nur aus pflanzlichen Inputmaterialien ableitbare Gehalt (ohne externe Kupfereinträge), der nur bei Ausschaltung aller punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in den Bioabfallbehandlungsprozess erreichbar ist, zeigt die noch theoretisch vorhandenen Reduzierungspotenziale für Kupfergehalte auf. Hier sind folgende theoretischen Reduzierungsbeiträge zu nennen:

- Biotonnenabfallkompostierung um –25,0 mg/kg TS
- Grün- und Parkabfallkompostierung um –13,6 mg/kg TS

Tab. 19:

Entwicklung der Kupfergehalte in den 14 untersuchten Bioabfallkompostierungsanlagen					
Anlage Nr.	Produkt	Produkt-Kupfergehalte in mg/kg TS			
		1997 ¹⁾	2002 ²⁾	2007	davon aus Pflanzenteilen ³⁾
Biotonnenabfallbehandlung					
17	Fertigkompost	36,8	37,9	40,8	40,8
75	Fertigkompost	k.A.	36,6	48,0	30,2
232	Frischkompost	59,1	52,5	51,8	32,1
262	Fertigkompost	40,0	48,9	31,3	31,3
325	Frisch- und Fertigkompost	k.A.	68,2	46,5	26,0
330	Fertigkompost	k.A.	69,6	45,1	33,7
347	Fertigkompost	k.A.	76,0	45,0	20,4
355	Fertigkompost	80,8	79,0	62,1	36,0
357	Fertigkompost	96,0	80,6	84,9	28,4
359	Frischkompost	25,2	64,4	82,8	32,5
371	Frischkompost	55,0	92,5	51,6	24,7
371	Fertigkompost			55,3	27,9
373	Fertigkompost	k.A.	99,6	81,5	38,1
Biotonnenabfall, gesamt		56,1	67,2	55,9	30,9
Grün- und Parkabfallbehandlung					
17	Fertigkompost	36,8	37,9	32,7	17,3
107	Fertigkompost	34,9	41,4	31,9	31,9
232	Fertigkompost	59,1	52,5	30,1	17,9
325	Fertigkompost	k.A.	68,2	30,1	23,1
326	Fertigkompost	46,9	68,3	75,4	44,4
359	Fertigkompost	25,2	61,9	32,7	16,4
Grün- und Parkabfall, gesamt		40,6	55,0	38,8	25,2
Legende: ¹⁾ nach Reinhold (1998) ²⁾ nach Reinhold (2004) ³⁾ Kupergehalt ohne punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge und ohne Bodenanhaftungen					

Diese Reduzierungspotenziale müssten durch eine Abnahme der punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in die Inputmaterialien der Kompostierungsanlagen erreicht werden. Aus den bisherigen Erfahrungen und den Möglichkeiten der Einflussnahme heraus stellt sich das für die Biotonnenabfallbehandlung als nicht beeinflussbar und nicht kontrollfähig dar. Eine Kupfergehaltsreduzierung unter das im Jahr 2007 nach intensiven Bemühungen erreichte Niveau, ist in den 14 ausgewerteten Anlagen kurz- bis mittelfristig somit nicht zu erwarten.

4.3 Ableitung der Ursachen für die Kupfergehalte in Komposten

4.3.1 Material und Methodik

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind im Anhang getrennt nach den 14 untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen tabellarisch zusammengestellt.

Für alle im Projekt erfolgten Untersuchungen an Inputmaterialien wurden die Vertrauensbereiche für Kupfer Einzelmesswerte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($p < 0,05$) abgeleitet. Dabei wurden folgende obere Vertrauensgrenzen für Einzelmesswerte der Kupfer-

gehalte von Inputmaterialgruppen ermittelt, die zu einer Erkennung von nicht in die Datenauswertung einzubeziehenden Ausreißermesswerten geführt haben.

Tab. 20: Ausreißererkenkung für die einzelnen Materialgruppen

Materialgruppe	Stichproben- umfang	obere Ausreißer- grenze	Anzahl der Ausreißer- daten
Biotonnenabfälle	347	75,5 mg/kg TS	5
Grün- und Parkabfälle	78	35,5 mg/kg TS	3
sonstige Bioabfälle (naturbelas- senes Holz, Rinde und Strohres- te)	19	172,9 mg/kg TS	1
Rottegut	93	91,7 mg/kg TS	2
Bioabfallkompost	181	98,2 mg/kg TS	3
Siebüberlauf	33	48,4 mg/kg TS	1
Prozesswasser	19	528,6 mg/kg TS	1
Gesamt	770		16
Grenzwert BioAbfV	70,0 bzw. 100,0 mg/kg TS (zulässige Aufwandmenge: 10 bzw. 6,7 t/a)		

Insgesamt wurden die 16 Ausreißermesswerte nicht in die weiteren Auswertungen einbezogen. Das sind lediglich 2,1 % aller Messdaten, die entsprechend den Aussagen der statistischen Prüfung nicht der Grundgesamtheit der Bioabfalluntersuchungsergebnisse angehören, also gesondert betrachtet werden müssen.

Die Input- und Outputuntersuchungsergebnisse werden anlagenbezogen vergleichend ausgewertet. Dazu werden aus den ausreißerbereinigten Bioabfallproben (die in etwa dem Annahmespektrum der jeweiligen Anlage entsprechen) Mittelwerte der untersuchten Parameter berechnet. Mögliche Bodenanhänge der Bioabfälle wurden nach Angaben der Anlagenbetreiber mit einbezogen. Dazu wurden Einträge von unbelasteten Böden in Höhe bis zu 5 Frischmasse-% der Bioabfälle berücksichtigt, für Sandbodenregionen in Anlehnung an die Aussagen von Reinhold (2004b) bis zu 12 %.

Die Kupfergehalte der vorwiegend urbanen Böden werden für unbelastete Böden mit 70 % der Vorsorgewerte nach BBodSchV (Sandböden mit 14 mg/kg TS; Lehm/Schluff und sonstige Böden mit 28 mg/kg TS) angenommen. In Anlehnung an Roth-Kleyer & Reinhold (2005) fließen Gehalte an organischer Substanz (oTS) von urbanen Sandböden mit 2,5 TS-% und für urbane Schluff-/Lehmböden mit 4 TS-% ein. Berechnungsbeispiele für anthropogen erhöhte Bodeneinträge gehen von einem Kupfergehalt von 56 mg/kg Boden-TS aus.

Die mittleren Qualitäten der Inputmaterialmischungen werden mit und ohne diesen Bodenanhang berechnet. Aus diese beiden Inputmaterialqualitäten und den Untersuchungsergebnissen der Endprodukte werden der obere und der untere Erwartungswert für die Gesamtverluste an organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses nach folgendem Algorithmus abgeleitet. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle in der Inputmaterialmischung enthaltenen mineralischen Bestandteile in das Endprodukt einfließen:

$$y_1 = 100 - ((100 \cdot x_3 \cdot x_2) \cdot (x_1 \cdot x_4)^{-1})$$

- y_1 = oTS-Verlust in % der oTS-Inputmenge
 x_1 = oTS der Inputmaterialien in TS-%
 x_2 = Aschegehalt der Inputmaterialien in TS-%
 x_3 = oTS der Endprodukte in TS-%
 x_4 = Aschegehalt der Endprodukte in TS-%

Die Ergebnisse aus den Verlustberechnungen an organischer Substanz werden im Vergleich zu den Kompostierungsverlustangaben von Amlinger et al. (2005) bewertet. Die Angaben zu den oTS-Rotteverlusten bei der Bioabfallkompostierung liegen hier zwischen 20 und 65 % der Input-oTS, wobei die unteren Werte für Frischkomposte und die oberen Werte für Fertigkomposte gelten. Etwa zwei Drittel der Rotteverluste können der Vor- und Intensivrotte und etwa ein Drittel der Nachrotte zugeordnet werden. Die Stoffausschleusungen durch Fraktionierungsmaßnahmen werden mit 30 bis 35 % der kompostierten Bioabfälle angegeben. Hier werden vor allem grobstrukturierte, wenig oder nicht mikrobiologisch zersetzte organische Anteile (z.B. Holzreste mit Kunststoffverunreinigungen) ausgeschleust, die in der Regel nur sehr geringe mineralische Anhaftungen aufweisen.

Durch den Abbau von organischer Substanz während des Rotteprozesses kommt es zu einer Anreicherung an Schwermetallen im Feinkorn des Rottegutes. Das trifft für Kupfer - als stark organisch gebundenem Schwermetall – in besonderem Maße zu. Dieses Feinkorn wird durch eine das Kompostierungsverfahren abschließende Fraktionierung des Rottegutes endproduktwirksam.

Somit lassen sich anlagenbezogen aus der Beschaffenheit der vorwiegend pflanzlichen Bioabfälle (mit und ohne Bodenanhänge) ableitbaren Kupfergehalte der erzeugten Bioabfallkomposte nach folgendem Algorithmus berechnen:

$$y_2 = (100 \cdot x_5) \cdot (x_2 + (x_1 \cdot [100 - y_1] \cdot 100^{-1}))^{-1}$$

y_2 = Höchsterwartungswert für durchschnittliche Cu-Gehalte in Komposten in mg/kg TS

y_1 = oTS-Verlust in % der oTS-Inputmenge

x_1 = oTS der Inputmaterialien in TS-%

x_2 = Aschegehalt der Inputmaterialien in TS-%

x_5 = Cu der Inputmaterialien in mg/kg TS

Der aus den Gehalten an organischer Substanz und an Kupfer abgeleitete Erwartungswert für die Kupfergehalte im Endprodukt lässt erkennen, welchen Anteil die untersuchten (meist pflanzlichen) Bioabfälle an den Kupfermengen im Endprodukt erklären können. Durch die Eingabe von Inputmaterialmischungen mit und ohne Bodenanhang besteht die Möglichkeit der separaten Abschätzung von Kupfereinträgen aus den organischen Inputmaterialien und aus Bodenanhängen.

In der Regel werden in den Endprodukten (Komposten) der Bioabfallbehandlung höhere Kupfergehalte gemessen als sie nach den oben genannten Algorithmen aus den Inputmaterialqualitäten abschätzbar sind. Die Differenz von gemessenen und modellhaft berechneten Kupfergehalten im Endprodukt gibt Auskunft über die nicht durch die Inputmaterialuntersuchungen und die kalkulierten Bodenanhänge belegfähigen Kupfereinträge. Diese werden im weiteren als punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge bezeichnet (siehe dazu auch Punkt 4.3.4). Als punktuelle Kupferquellen gelten hier geringfügige Materialanteile mit hohen Kupfergehalten (z.B. behandelte Holzreste, Goldglanzpapier). Partikuläre Quellen sind kleine kupferhaltige Metallstücke (z.B. Büroklammern, Messingknöpfe). Die punktuellen und partikulären Kupfereinträge kennzeichnen in etwa das Fehlwurfverhalten der Bürger beim Getrennthalten von Biotonnenabfällen.

Beispielsberechnungen für Inputmaterialmischungen mit kupferbelasteten Bodenanhaltungen der Bioabfälle sowie Auswertungen für einzelne Rottestadien erfolgten auch nach den oben genannten Algorithmen.

Die ermittelten Prozessverluste an organischer Substanz erwiesen sich über die ausgewerteten Anlagen als stark differenziert, weshalb eine Plausibilitätskontrolle erfolgte, die die Pro-

zessverluste vor allem in Relation zum Rottegrad (Frischkompost, Fertigkompost, Vererdung für Substratherstellung) und zur Vorrotte der Inputmaterialien stellt (siehe Tabelle 21).

Tab. 21:

Plausibilitätskontrolle der abgeleiteten Prozessverluste für die untersuchten Bioabfallkompostierungsanlagen				
Anlagen-Nr.	Inputmaterial	erzeugter Kompost	Prozessverluste in oTS-%	Bemerkungen
17	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	65 - 88	keine
	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	78 - 86	stark vererdet
75	Biotonne	Fertigkompost	30 - 57	Inputmaterialgemisch vorgerottet
107	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	80 - 89	stark vererdet
232	Biotonnenabfälle	Frischkompost	44 - 58	keine
	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	25 - 37	Inputmaterialgemisch vorgerottet
262	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	62 - 79	keine
325	Biotonnenabfälle	Frisch-/Fertigkompost	57 - 76	keine
	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	64 - 73	keine
326	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	85 - 94	stark vererdet, viel Siebrückstand
330	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	71 - 79	keine
347	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	28 - 41	Inputmaterialgemisch vorgerottet
355	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	68 - 81	keine
357	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	78 - 84	keine
359	Biotonnenabfälle	Frischkompost	59 - 73	keine
	Grün- und Parkabfälle	Fertigkompost	57 - 66	Inputmaterialgemisch angerottet
371	Biotonnenabfälle	Frischkompost	56 - 72	keine
		Fertigkompost	66 - 79	keine
373	Biotonnenabfälle	Fertigkompost	78 - 86	keine

Legende: oTS - organische Trockensubstanz

Frischkomposte zeigen im Vergleich zu den Fertigkomposten deutlich niedrigere Prozessverluste an organischer Substanz. Erfolgt dagegen eine Vererdung von Komposten, so steigen die Prozessverluste weiter an. Einen besonderen Einfluss nimmt die Annahme von Bioabfallmischungen als Ausgangsstoffe, die in der Regel schon vorgerottet waren. Dadurch sinken die Prozessverluste in der Kompostierungsanlage. In einem Fall scheinen sich die erheblichen Siebrückstandsmengen bei der Kompostierung von Friedhofsabfällen erhöhend auf die Prozessverluste ausgewirkt zu haben. Unter Berücksichtigung der aufgeführten Unterschiede in der Inputmaterialbeschaffenheit und in der Prozessführung in den Anlagen können alle ermittelten Prozessverluste an organischer Substanz als plausibel bezeichnet werden.

4.3.2 Stoffstrombetrachtungen für die Kupfergehalte in Bioabfallkomposten

Anhand der 14 untersuchten Anlagen sollen hier einerseits Aussagen für die Anlagengruppen nach Punkt 3.2 (Anlagengruppierung nach Vor-Ort-Befragungen) und andererseits bezogen auf die unterschiedlichen Endprodukte (Komposte) dargestellt werden. Die Spannbreiten der berechneten Werte ergeben sich dabei aus der Betrachtung mit und ohne standorttypische Bodenanhäufungen der Bioabfälle.

4.3.2.1 Betrachtung der Anlagengruppen nach Punkt 3.2

Anlagengruppe A

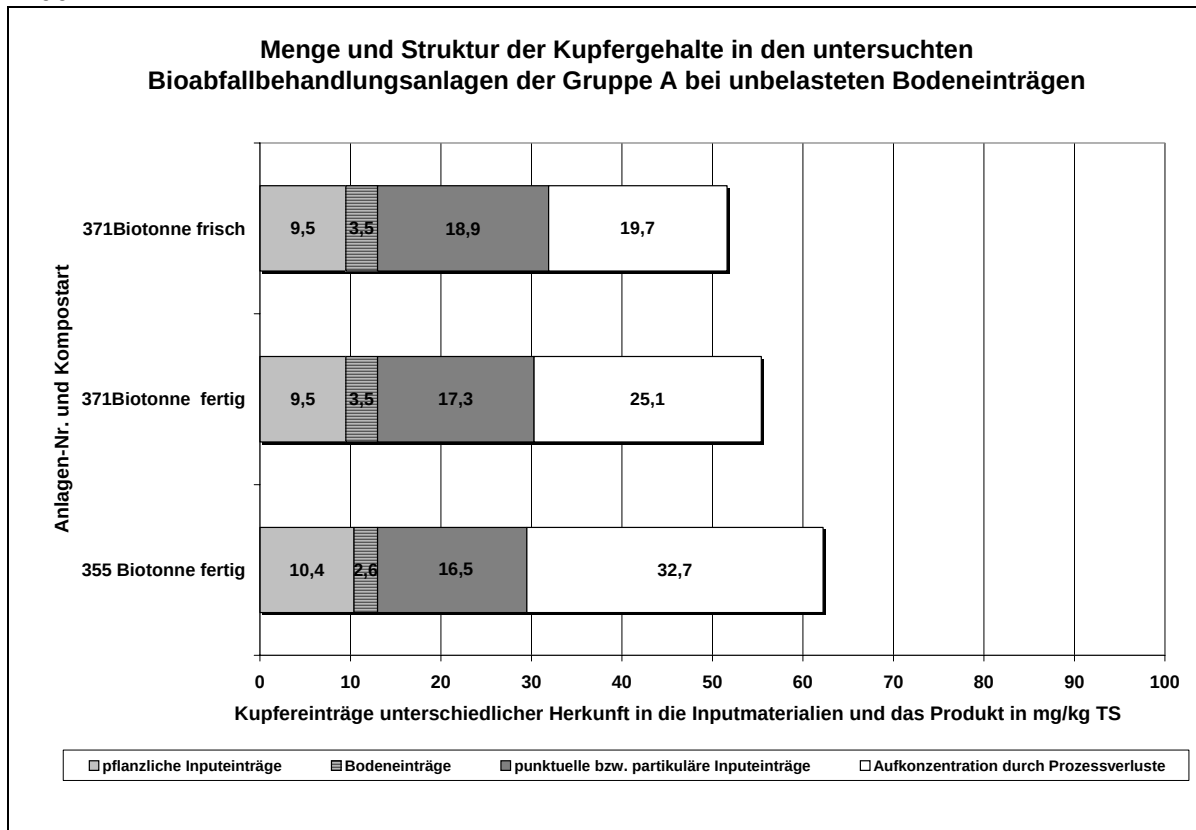
Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 85,8 mg/kg TS
für 2007 – 56,3 mg/kg TS)

Die Abnahme von Kupfergehalten war hier bis 2002 am stärksten, wobei diese Abnahme auch mit sinkenden Gehalten an Kalk und Hauptnährstoffen verbunden ist. Das deutet auf

abnehmende Anteile an frischem Grüngut hin. Diese Kupfergehaltsabnahme setzt sich bis 2007 weiter intensiv fort.

- Die Kommunen sammeln hier besonders oft die Bioabfälle ein und gewährleisten eine intensive Öffentlichkeitsarbeit.
- Transportfahrzeuge werden auch für Restmüll genutzt.
- Wohnneubauten mit Kupferdachrinnen sind selten.
- Prozesswasserrückführungen und Bioabfallimporte finden wenig oder nicht statt.

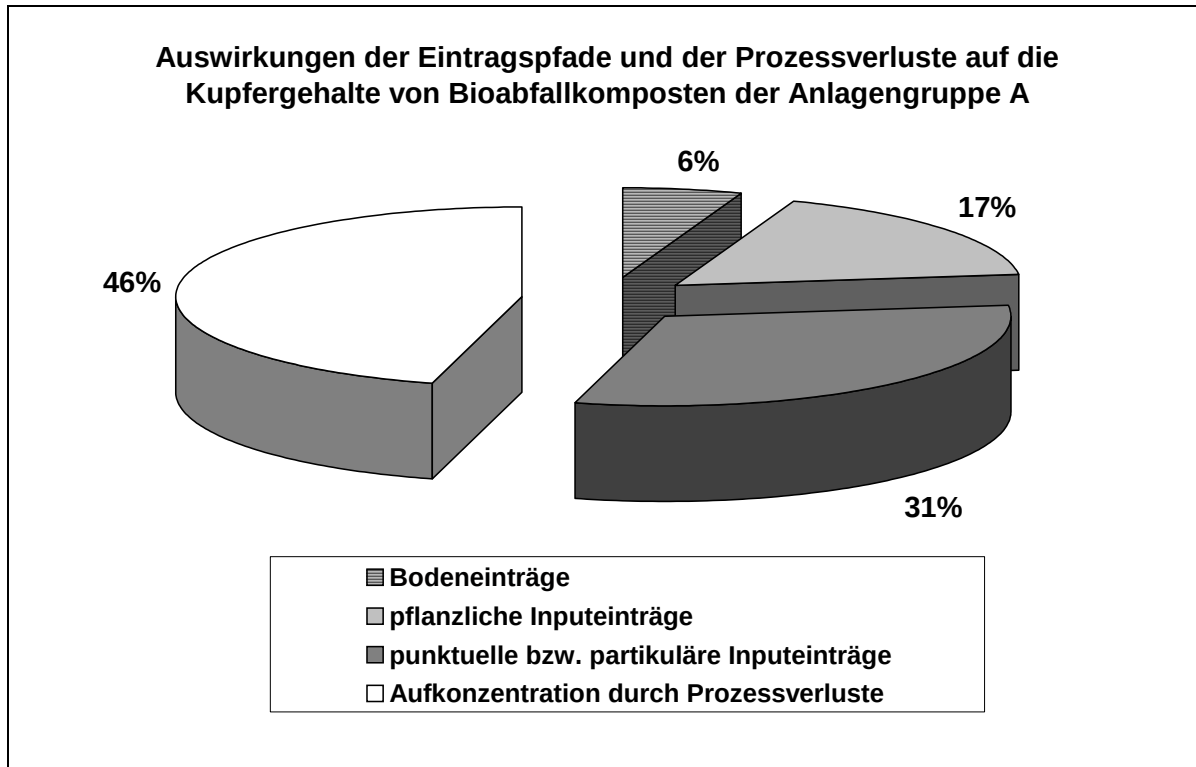
Abb. 47:



Die Eintragsstruktur für Kupfer ist in den drei Anlagen dieser Gruppe sehr ähnlich. Über unbelastete pflanzliche Biomasse und über Einträge von unbelasteten Böden kommen schon 42 % der Kupfereinträge zustande. Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind zu 58 % an den Gesamtkupfereinträgen beteiligt (siehe Abbildungen 47 und 48).

Das Aufkonzentrieren der Kupfergehalte durch Verluste organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses hat den größten separaten Einfluss (46 %) auf die Kupfergehalte im Endprodukt. Durch Reduzierung von Prozessverlusten, insbesondere von Rotteverlusten kann diesem Prozess entgegengewirkt werden. Damit werden die Verluste an humusproduktionswirksamer organischer Substanz und an pflanzenverfügbarem Stickstoff reduziert und zugleich die Kupfergehalte in der Trockenmasse niedriger gehalten. Die nach BioAbfV ausgewiesene Kompostqualität steigt (höhere Mengen wertgebender Inhaltsstoffe und niedrigere Gehalte vorsorgebestimmender Inhaltsstoffe). Die allgemeinen Aussagen unter Punkt 1.8 zum Einfluss der Inputmaterialgruppen auf die Kupfergehalte werden damit deutlich erweitert.

Abb. 48:



Anlagengruppe B

Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 65,7 mg/kg TS
für 2007 – 48,0 mg/kg TS)

Diese Anlagengruppe war bis 2002 durch eine besondere Zunahme von Kupfergehalten auf relativ niedrigem Gehaltsniveau geprägt, wobei diese Zunahme mit steigenden Quecksilbergehalten verbunden ist. Das kann in Verbindung mit den hier häufigen Friedhofsabfall- und Weihnachtsbaumsammlungsanteilen gesehen werden, wobei keine Zunahme von Fremdstoffeinträgen erfolgt. Diese Zunahme konnte für den Zeitraum bis 2007 in eine Abnahme umgekehrt werden.

- Die Anlagen haben ein sehr breites Annahmespektrum für Inputmaterialien.
- Frisches Grüngut spielt wahrscheinlich eine relativ geringe Rolle.
- Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgt intensiv.

Die Eintragsstruktur für Kupfer ist in den vier Anlagen dieser Gruppe recht unterschiedlich. Vor allem die Anlage 359 mit Biotonnenabfallfrischkompostherstellung fällt durch besonders hohe punktuelle bzw. partikuläre aber auch pflanzliche Kupfereinträge auf.

Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind im Mittel der vier Anlagen zu 55 % an den Gesamtkupfereinträgen beteiligt. Auch die Aufkonzentration von Kupfer durch Verluste beim Kompostierungsprozess waren bei der Anlage 359 vergleichsweise hoch. Die Aufkonzentration der Kupfergehalte durch Verluste organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses hat insgesamt für diese Anlagengruppe den größten separaten Einfluss (39 %) auf die Entwicklung der Kupfergehalte im Endprodukt, war aber deutlich niedriger als bei der Anlagengruppe A.

Abb. 49:

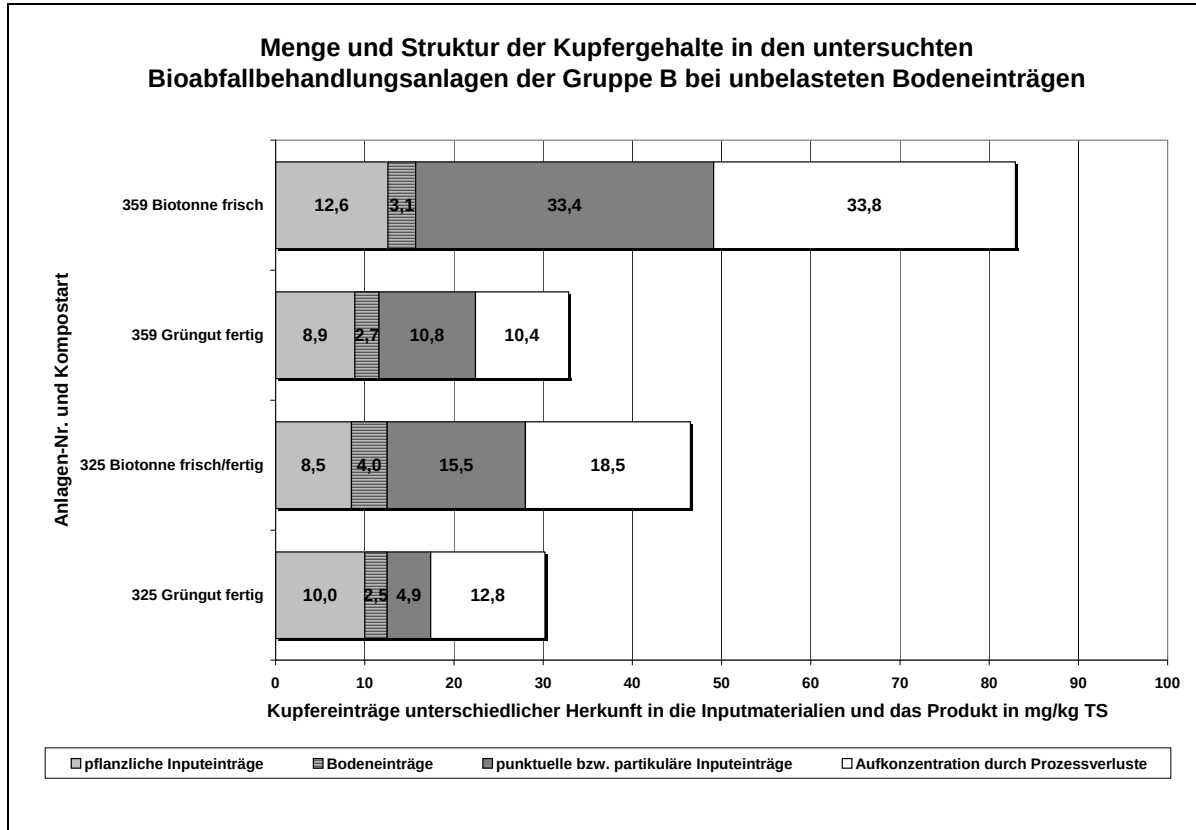
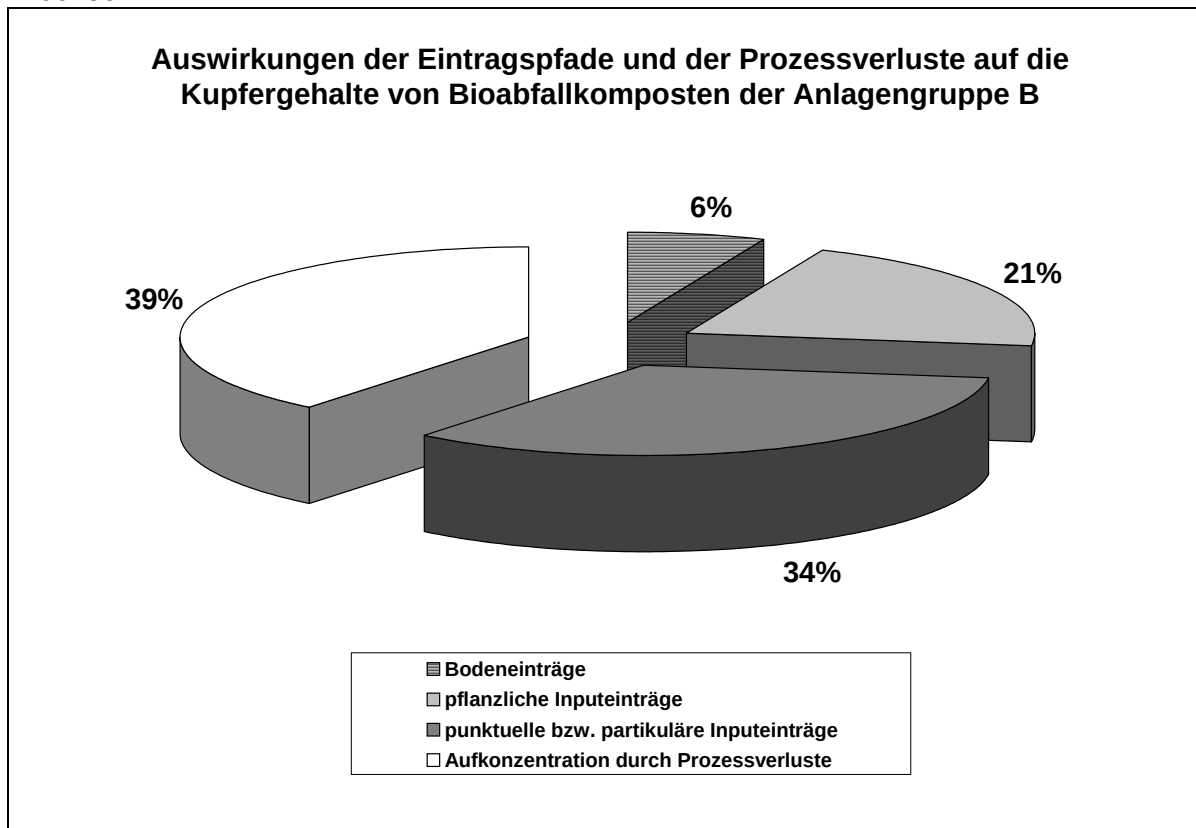


Abb. 50:



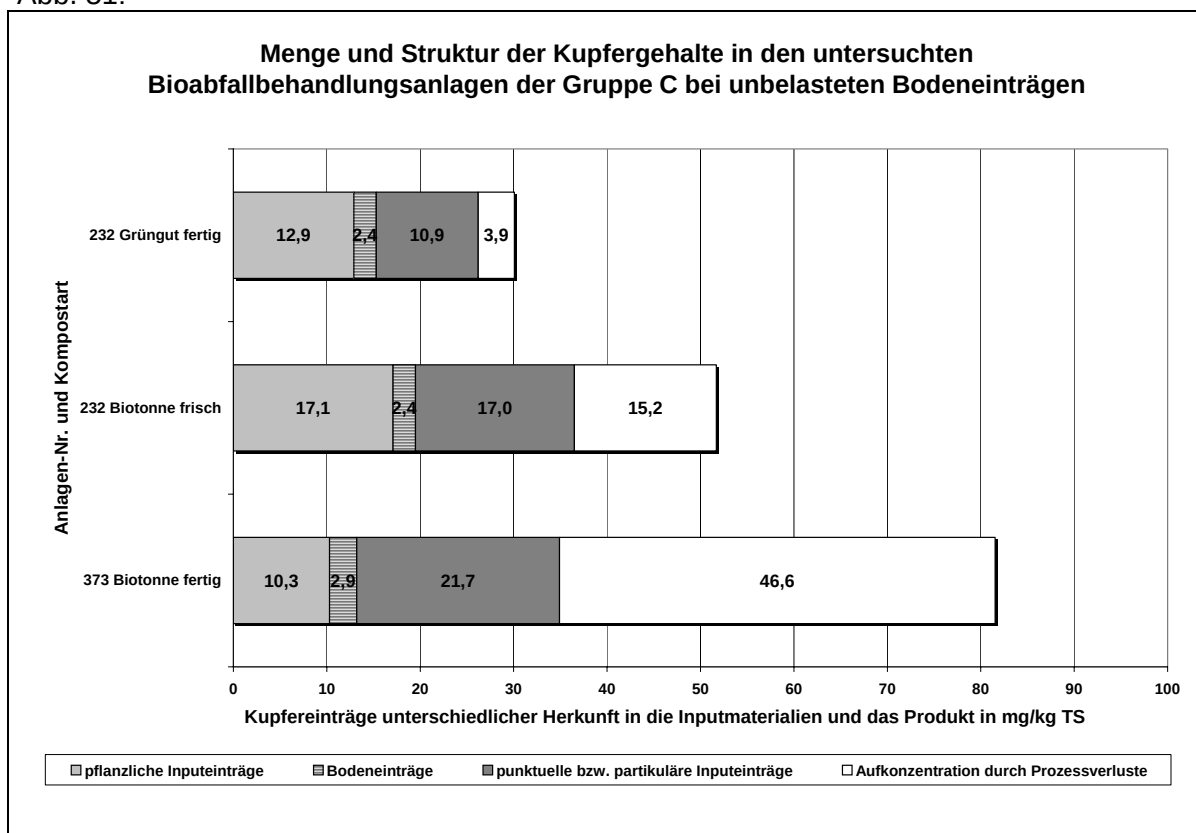
Anlagengruppe C

Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 68,2 mg/kg TS
für 2007 – 54,5 mg/kg TS)

Im Durchschnitt über alle Anlagen waren hier bis 2002 die höchsten Kupfergehalte anzutreffen, jedoch mit besonders großer Spannweite der Einzelanlagenmittelwerte. Die drei ausgewählten Anlagen zeigten auch schon 2002 relativ niedrige Kupfergehalte, die bis 2007 sogar noch weiter abnahmen.

- Die Kupfereinträge erfolgen wahrscheinlich vor allem über frisches Pflanzenmaterial.
- Auf die Nutzung von Friedhofsabfällen wird verzichtet.
- Kupfereinträge erfolgen unabhängig von den Einträgen anderer Schwermetalle.
- Siebüberlaufrückführungen sind wenig erfolgt..
- Die Öffentlichkeitsarbeit war gering ausgeprägt.

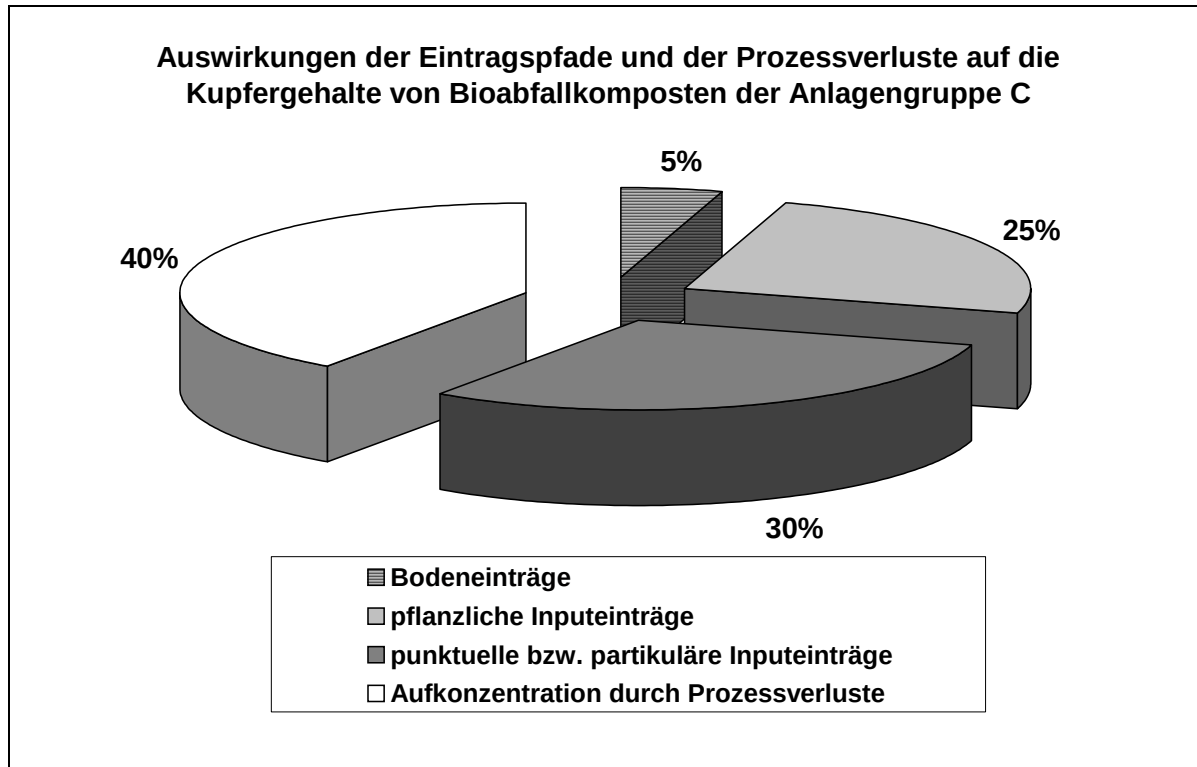
Abb. 51:



Die Eintragsstruktur für Kupfer ist in den drei ausgewählten Anlagen recht unterschiedlich, was die schon erwähnte Heterogenität dieser Anlagengruppe bestätigt. Vor allem die Anlage 373 mit Biotonnenabfallfertigkompostherstellung fällt durch besonders hohe punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge auf.

Hier scheint eine Intensivierung der Öffentlichkeitsarbeit im Einzugsgebiet der zu großen Anteilen importierten Biotonnenabfälle angebracht, was jedoch durch die räumliche Entfernung von Bioabfalleinsammler und –behandler erschwert ist. Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind im Mittel der drei Anlagen zu 51 % an den Gesamtkupfereinträgen beteiligt. Das ist relativ gering.

Abb. 52:



Auch die Aufkonzentration von Kupfer durch Verluste beim Kompostierungsprozess war bei der Anlage 373 besonders stark ausgeprägt. Die Aufkonzentration der Kupfergehalte durch Verluste organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses hat insgesamt für diese Anlagengruppe den größten separaten Einfluss (40 %) auf die Entwicklung der Kupfergehalte im Endprodukt, war aber deutlich niedriger als bei der Anlagengruppe A.

Anlagengruppe D

Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 75,1 mg/kg TS
für 2007 – 65,0 mg/kg TS)

In dieser Anlagengruppe gibt es besonders viele Anlagen mit über 70 mg Cu je kg Kompost-Trockenmasse (Stand 2002). Die beiden ausgewählten Anlagen dieser Gruppe zeigen von 2002 bis 2007 eine Abnahme der Kupfergehalte, woran jedoch nur durch die Anlage 330 Anteil hatte.

- Kommunen sind hier besonders selten an der Einsammlung von Bioabfällen beteiligt.
- Kupfer wird vor allem durch nicht frische (grüne) organische Substanz eingetragen, die zunehmend aus nassen Inputmaterialien und wenig aus Garten- und Parkabfällen stammt.
- Beziehungen von Kupfer zu den Hauptnährstoffen sind kaum nachzuweisen.
- Im Einzugsgebiet sind Wohnneubauten mit Kupferdachrinnen stark verbreitet.

Die Eintragsstruktur für Kupfer weicht in den zwei ausgewählten Anlagen stark voneinander ab. Vor allem die Anlage 357 mit Biotonnenabfallfertigkompostherstellung fällt durch besonders hohe punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge auf. Trotz intensiver Ursachenforschung und Limitierungsbestrebungen im Rahmen dieser F&E-Projektdurchführung wurden hier keine Verbesserungen erzielt.

Abb.: 53:

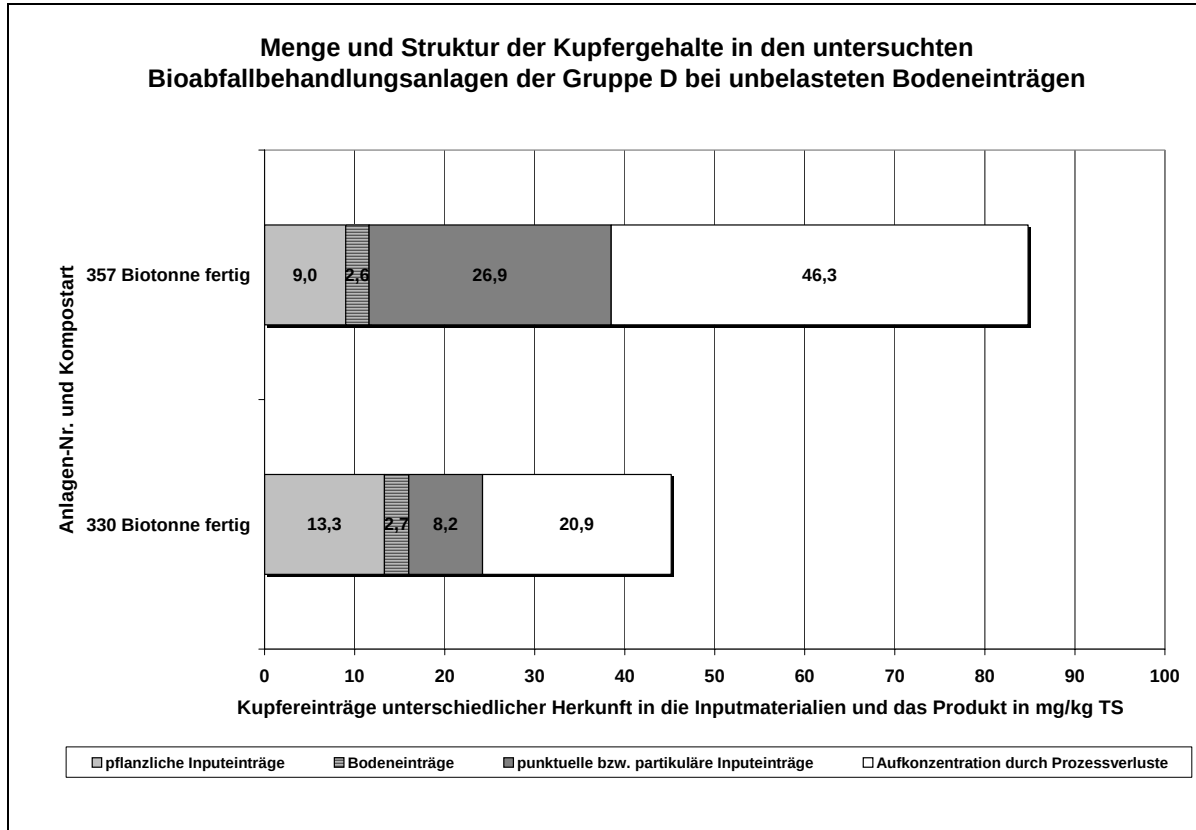
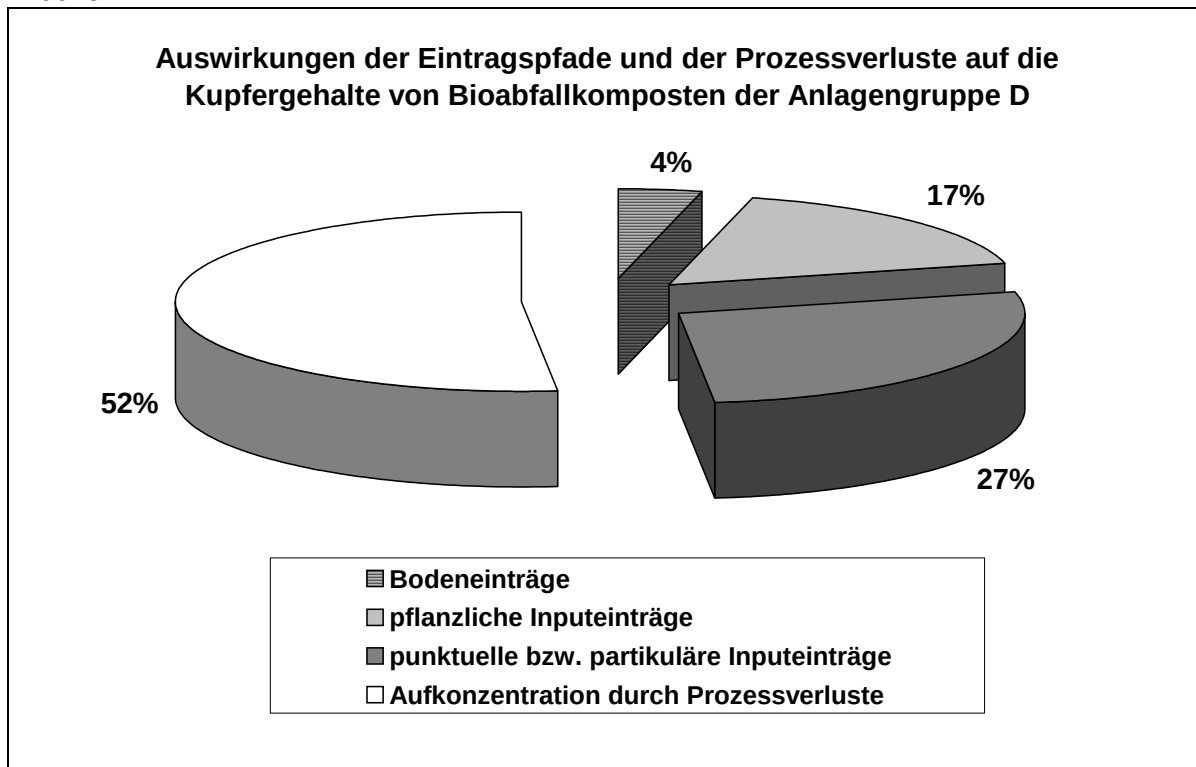


Abb. 54:



Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind im Mittel der zwei Anlagen zu 56 % an den Gesamtkupfereinträgen beteiligt und liegen damit nur knapp unter den Höchstangaben für die Anlagengruppe A.

Auch die Aufkonzentration von Kupfer durch Verluste beim Kompostierungsprozess war bei der Anlage 357 besonders stark ausgeprägt. Die Aufkonzentration der Kupfergehalte hat insgesamt für diese Anlagengruppe den größten Einfluss (52 %) auf die Entwicklung der Kupfergehalte im Endprodukt und war somit deutlich höher als bei der Anlagengruppe A. Das kann mit dem hohen Anteil nasser Biotonnenabfälle zusammen hängen.

Anlagengruppe E

Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 75,1 mg/kg TS
für 2007 – 65,0 mg/kg TS)

In dieser Gruppe sind vorwiegend Anlagen mit genehmigten Annahmekapazitäten unter 10.000 t/a vertreten.

- Diese Anlagen kompostieren besonders wenig Biotonnenabfälle.
- Ihre Einzugsgebietsgröße ändert sich häufig.
- Die Kupfergehalte zeigen bei diesen Anlagen besonders häufig gleichlaufende Gehaltstendenzen, wie die anderen Schwermetalle, was auf Gehaltsreduzierungen durch Verdünnung hindeutet.
- Die Beziehungen zur organischen Substanz und zu den Hauptnährstoffen sind dagegen schwach ausgeprägt. Die Zunahme der Steingehalte im Inputmaterial (möglicherweise aus Streugut) und die vermehrte Einbeziehung von Holzabfällen können hier eine Rolle spielen.
- Die Öffentlichkeitsarbeit ist schwach ausgeprägt.

Die Eintragsstruktur für Kupfer weicht in den zwei ausgewählten Anlagen stark voneinander ab. Die Anlage 347 mit Biotonnenabfallfertigkompostherstellung fällt durch erhöhte pflanzliche Kupfereinträge auf.

Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind im Mittel der zwei Anlagen zu 60 % an den Gesamtkupfereinträgen beteiligt und liegen damit noch über den bisherigen Höchstangaben für die Anlagengruppe A. In diesen kleineren Anlagen scheint das Qualitätsmanagement weniger entwickelt zu sein.

Die Aufkonzentration von Kupfer durch Verluste beim Kompostierungsprozess waren bei der Anlage 326 mit Grün- und Parkabfallfertigkompostherstellung besonders stark ausgeprägt. Diese Anlage verarbeitet besonders viel Friedhofsabfälle, was zu entsprechend hohen Siebüberlaufückständen bei der Fraktionierung (z.B. Gebinde) führt. Die Aufkonzentration der Kupfergehalte durch Verluste organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses hat insgesamt für diese Anlagengruppe den größten separaten Einfluss (48 %) auf die Entwicklung der Kupfergehalte im Endprodukt und war damit deutlich höher als bei der Anlagengruppe A, erreichte aber nicht das Verlustniveau der Anlagengruppe D.

Abb. 55:

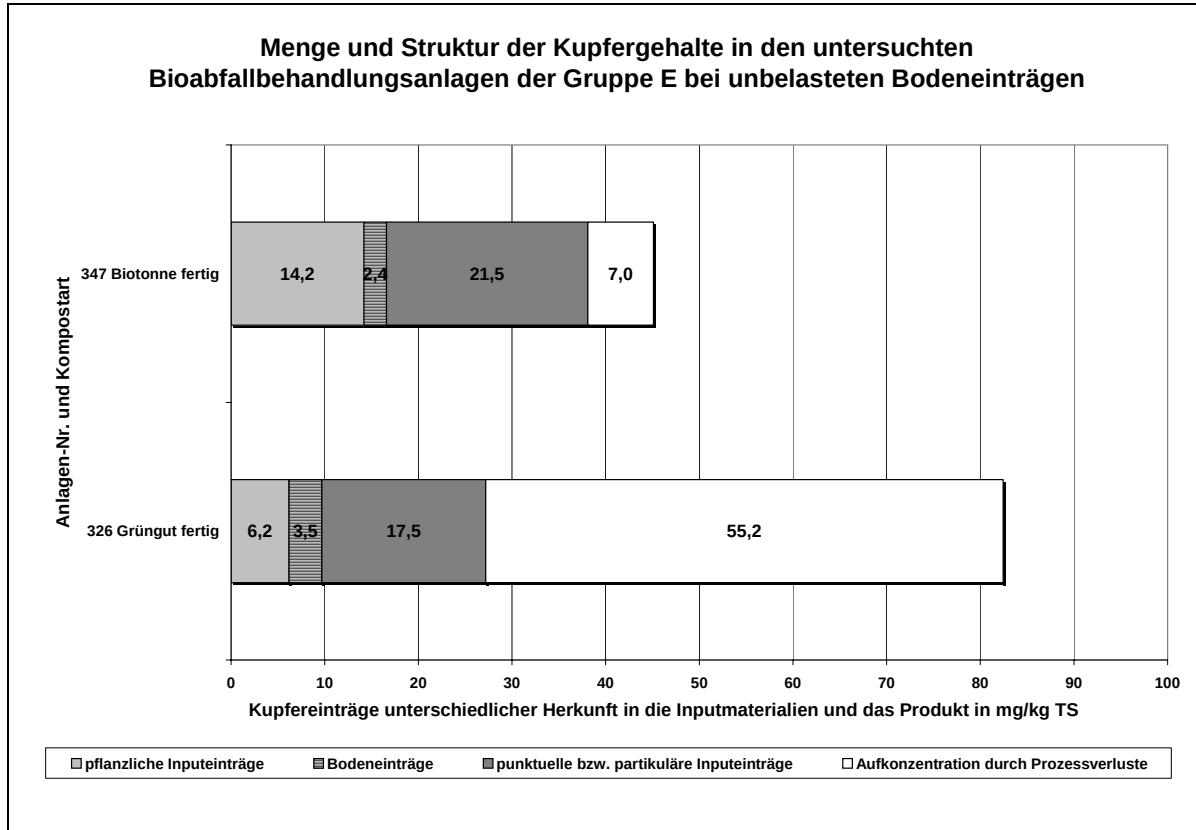
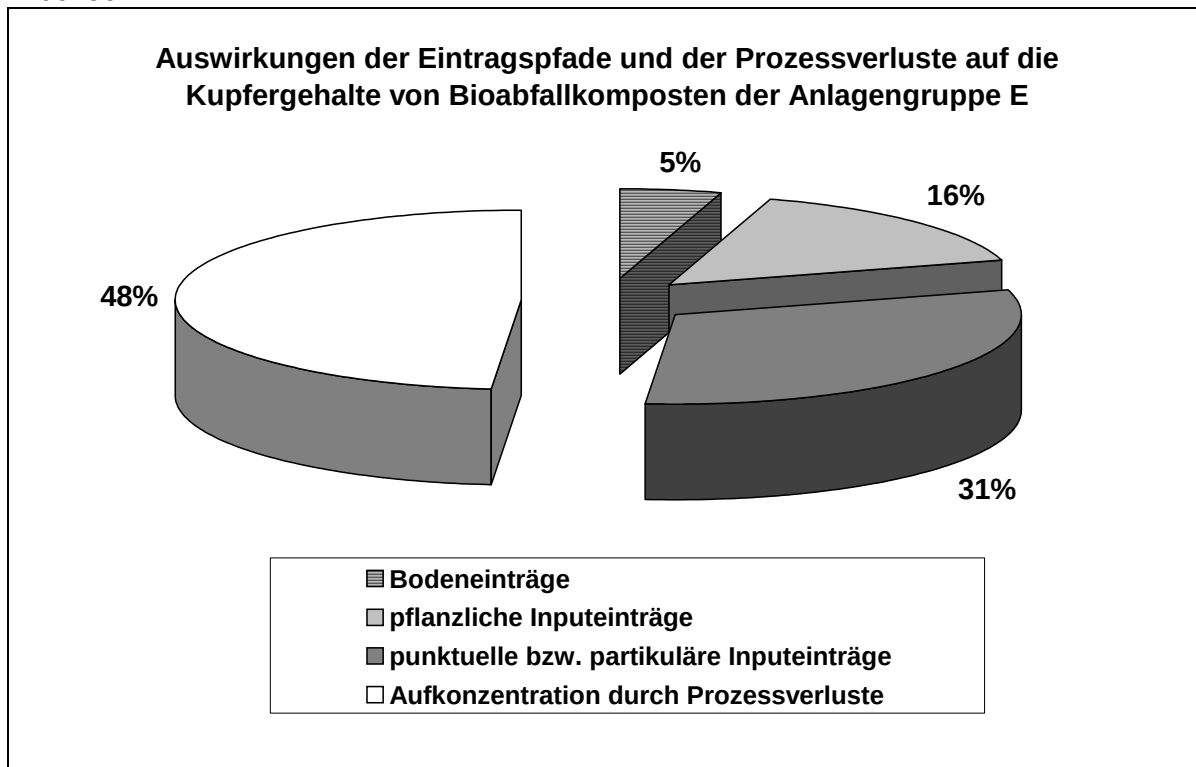


Abb. 56:



Anlagengruppe Z

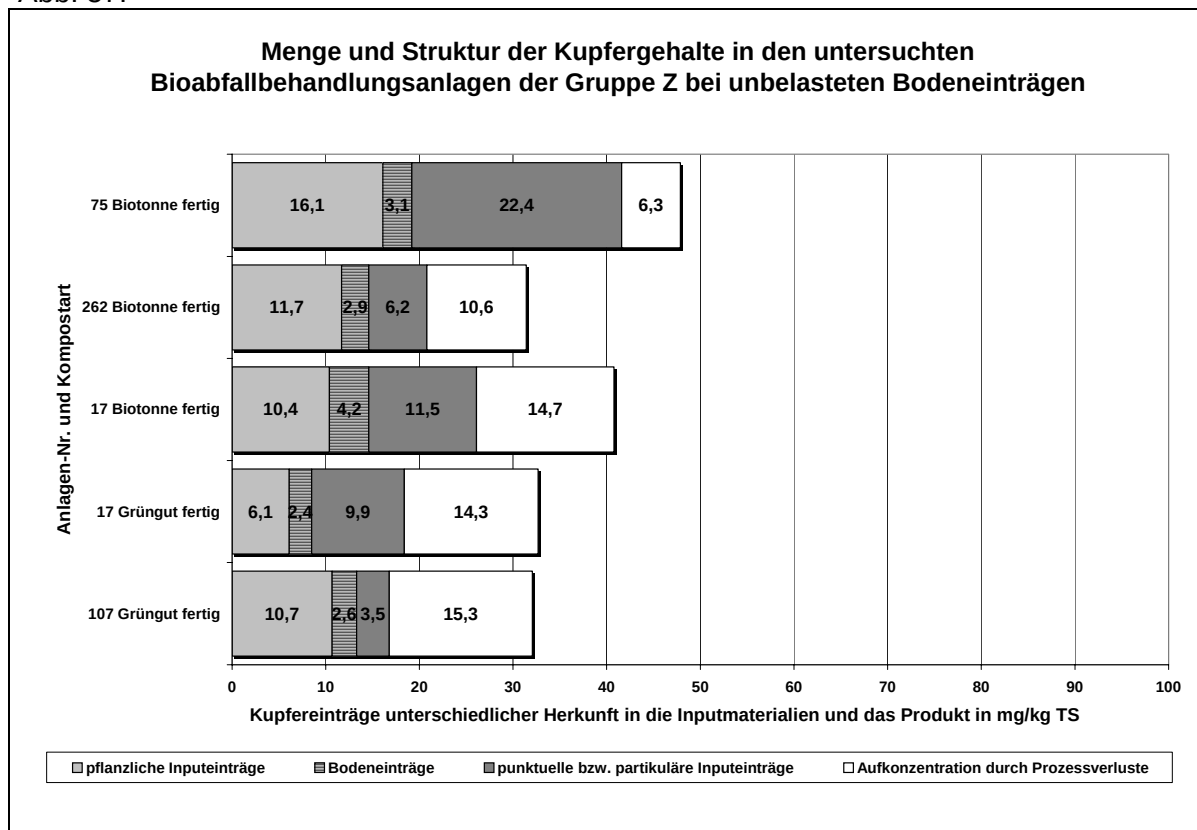
Kupfermittelwerte der ausgewählten Anlagen: für 2002 – 40,5 mg/kg TS

für 2007 – 36,9 mg/kg TS)

Diese zusätzlich in das schon laufende Untersuchungsprogramm aufgenommene Anlagengruppe ist im Land Brandenburg angesiedelt und verarbeitet vorwiegend Berliner Bioabfälle. Die vorgelagerten Auswertungen von Daten der Bundesgütegemeinschaft Kompost sind hier wegen der späteren Einbeziehung in das F&E-Vorhaben nicht erfolgt. Die Kupfergehalte dieser Anlagengruppe lagen für 2002 deutlich unter dem Niveau der anderen Gruppen. Sie nehmen bis 2007 auch kaum weiter ab, werden aber von den anderen Anlagengruppen in diesen geringen Gehalten nicht erreicht.

Die Eintragsstruktur für Kupfer in den fünf ausgewählten Anlagen ist recht gleichmäßig. Lediglich die Anlage 75 mit Biotonnenabfallfertigkompostherstellung fällt durch etwas erhöhte punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge auf. Sie verarbeitet Biotonnenabfälle aus dem Berliner Norden.

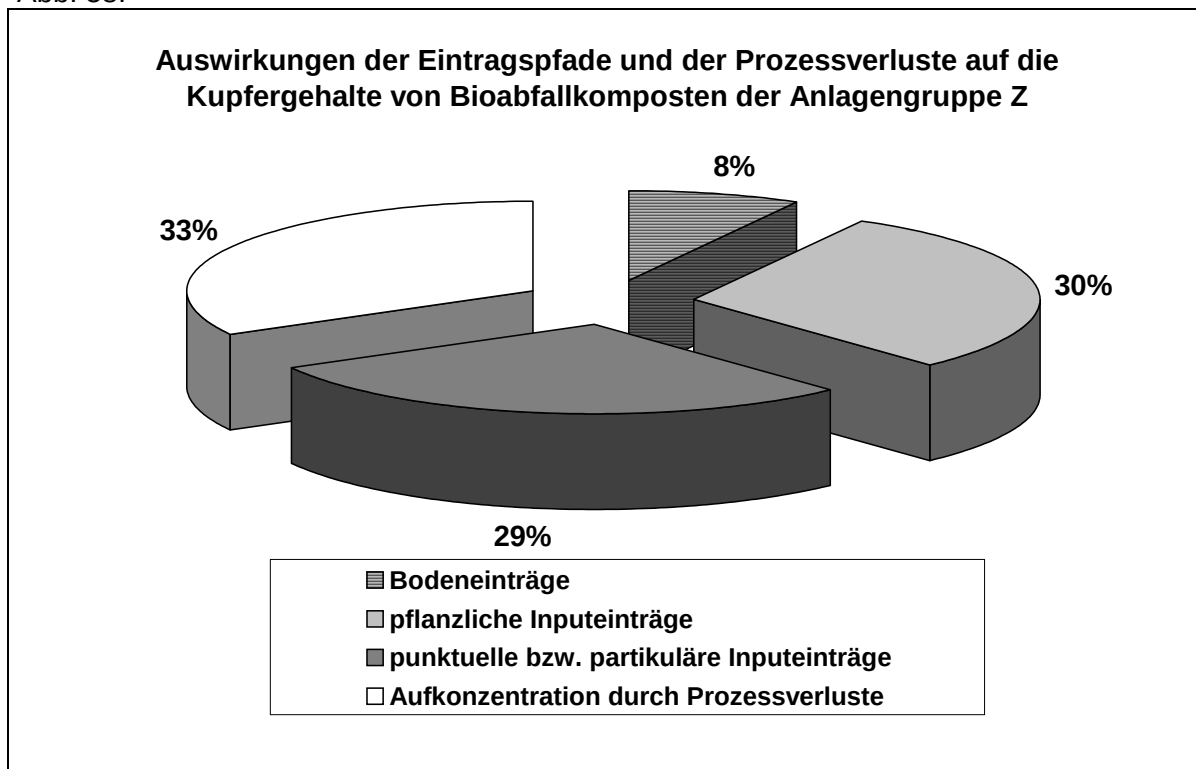
Abb. 57:



Die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge sind im Mittel der fünf Anlagen zu 43 % an den Gesamteinträgen beteiligt und liegen damit deutlich unter den Angaben der anderen Anlagengruppen. In diesem Sammelgebiet scheinen punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in die Bioabfälle seltener aufzutreten, was für eine insgesamt hohes Niveau der Getrenntsammlung spricht.

Die Aufkonzentration der Kupfergehalte durch Verluste organischer Substanz während des Kompostierungsprozesses hat insgesamt für diese Anlagengruppe den größten Einfluss (33 %) auf die Entwicklung der Kupfergehalte im Endprodukt, lag aber damit deutlich unter dem Niveau der anderen Anlagengruppen. Das kann mit der hier dominanten Kompostierung in offenen Dreiecks- bzw. Tafelmieten zusammenhängen.

Abb. 58:



Zusammenfassung der Anlagengruppenbewertungen

Zu den Auswertungen nach Anlagengruppen aus Punkt 3.2 kann folgendes festgestellt werden:

Von 6 Anlagengruppen erwiesen sich hinsichtlich der Struktur der Kupfereinträge bzw. der Verluste durch Kompostierungsprozesse lediglich die Gruppen A und Z als in sich recht homogen. Damit sind zwei Drittel der aus den Kompostmerkmalen, der Prozessgestaltung und der Einordnung in die Region abgeleiteten Anlagengruppen wenig geeignet die Unterschiede bei den Kupfereinträgen und bei den Aufkonzentrationen durch Kompostierungsprozessverluste zu erklären.

Die Bedeutung einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit, in Verbindung mit einem hohen Stand des Qualitätsmanagements in den Bioabfallbehandlungsanlagen, stellt sich als wesentlich für die schon erreichten Absenkungen von Kupfergehalten in den Komposten dar. Hier hat sich die gezielte Zusammenarbeit im laufenden F&E-Vorhaben als hilfreich erwiesen. Daraus leitet sich ab, dass Öffentlichkeitsarbeit und Qualitätsmanagement ständiger Aufmerksamkeit bedürfen. Ein Nachlassen kann in diesem Bereich nicht zugelassen werden und führt zu erheblichen Qualitätsschwankungen der erzeugten Produkte (Bioabfallkomposte).

Die Einführung der Qualitätsberatung ihrer Mitgliedsbetriebe durch die Bundesgütegemeinschaft wirkt in diese Richtung und zeigt anscheinend schon erste Erfolge. Die Wirksamkeit dieser Anstrengungen sollte jedoch noch mehr auf die Getrenntsammlung von Bioabfällen ausgedehnt werden, die jedoch in Verantwortung der Kommunen erfolgt. Die Enge der Zusammenarbeit von Kommunen und Bioabfallbehndlern ist hier letztendlich entscheidend.

4.3.2.2 Betrachtungen nach Bioabfallart und Rotteintensität

Um die großen Unterschiede bei den Kupfereinträgen und bei den Aufkonzentrationen durch Kompostierungsprozessverluste besser erklären zu können, wurden die Untersuchungsdaten der ausgewählten Anlagen danach zusammengefasst, ob Grün- und Parkabfälle oder Biotonnenabfälle verarbeitet werden. Bei den Biotonnenabfällen waren noch Anlagen mit Frisch- und Fertigkompostherstellung zu unterscheiden. Diese zusammengefassten Untersuchungsergebnisse wurden beispielhaft wie eine Anlage ausgewertet und nachfolgend dargestellt. In den Anlagen sind die Ableitungen für jede einzelne der ausgewählten Bioabfallkompostierungsbeispielsanlagen einzusehen.

Beispielsberechnung für Biotonnenabfallfrischkompost

In die Beispielrechnung sind die Biotonnenabfall-Inputuntersuchungsergebnisse und die Frischkompostmesswerte aus 4 Anlagen eingegangen. Die Mittelwerte der Gehalte an organischer Substanz in den untersuchten Biotonnenabfällen (mit und ohne Bodenanhafungen) und Endprodukten (Biotonnenabfallfrischkomposte) sind wie folgt nachgewiesen worden:

- oTS der Inputmaterialien: 65,1 – 76,2 TS-%
- oTS der Frischkomposte: 50,5 TS-%

Daraus leitet sich nach dem unter Punkt 4.3.1 genanntem Algorithmus folgende Bilanz der organischen Substanz bei der Kompostierung bezogen auf die Menge an organischer Substanz in den Inputmaterialien ab:

- Prozessverluste an oTS: 45,3 – 68,1 % der Input-oTS
- produktwirksame oTS: 31,9 – 54,7 % der Input-oTS

Folgende Mittelwerte sind in die Berechnung der Höchsterwartungswerte für die Kupfergehalte in den Komposten zusätzlich eingegangen:

- Cu der Inputmaterialien: 13,1 – 14,3 mg/kg TS

Der aus den Gesamtprozessverlusten der Kompostierung und den Cu-Gehalten der Inputmaterialien abgeleitete durchschnittliche Kupfergehalt im Endprodukt kann nun den Cu-Messwerten im Endprodukt gegenübergestellt werden. Hier ergibt sich folgendes Bild:

- aus Inputmaterialien und oTS-Verlust abgeleiteter Cu-Gehalt: 20,4 – 27,2 mg/kg TS
- Mittelwert der im Endprodukt gemessenen Cu-Gehalte: 58,5 mg/kg TS

Wird davon ausgegangen, dass die Differenz zwischen der aus der Inputmaterial- und oTS-Verlustwerten berechnete Kupfergehaltsspanne und dem Mittel der tatsächlichen Kupfermesswerten in den Biotonnenabfallfrischkomposten durch punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge verursacht wird, werden diese Einträge nun wie folgt abschätzbar.

Das Ergebnis dazu sieht nun für Biotonnenabfallfrischkomposte mit und ohne 7 % Bodeneintrag (gewogenes Mittel aus Regionen mit und ohne Sandböden) über die Inputmaterialien wie folgt aus:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 15,8 – 27,2 mg/kg TS bzw. 27,0 – 46,6 %
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 4,6 mg/kg TS bzw. 0,0 – 7,8 %
- externer Kupfereintrag: 31,3 – 38,1 mg/kg TS bzw. 53,4 – 65,2 %

Bezogen auf die Qualität der Inputmaterialmischungen beim Ansetzen zur Rotte können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 11,2 – 13,1 mg/kg Input-TS
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 3,2 mg/kg Input-TS
- externer Kupfereintrag: 15,0 – 26,9 mg/kg Input-TS
- Gesamtgehalt: 28,1 – 41,3 mg/kg Input-TS

Beispielsberechnung für Biotonnenabfallfertigkompost

In die Beispielrechnung sind alle Biotonnenabfall-Inputuntersuchungsergebnisse und die Fertigkompostmesswerte aus 10 Anlagen eingegangen. Die Mittelwerte der Gehalte an organischer Substanz in den untersuchten Biotonnenabfällen (mit und ohne Bodenanhaftungen) und Endprodukten (Biotonnenabfallfertigkomposte) sind wie folgt nachgewiesen worden:

- oTS der Inputmaterialien: 65,1 – 76,2 TS-%
- oTS der Fertigkomposte: 37,3 TS-%

Daraus leitet sich nach dem unter Punkt 4.3.1 genannten Algorithmus folgende Bilanz der organischen Substanz bei der Kompostierung bezogen auf die Menge an organischer Substanz in den Inputmaterialien ab:

- Prozessverluste an oTS: 68,1 – 81,4 % der Input-oTS
- produktwirksame oTS: 18,6 – 31,9 % der Input-oTS

Folgende Mittelwerte sind in die Berechnung der Höchsterwartungswerte für die Kupfergehalte in den Komposten zusätzlich eingegangen:

- Cu der Inputmaterialien: 13,1 – 14,3 mg/kg TS

Der aus den Gesamtprozessverlusten der Kompostierung und den Cu-Gehalten der Inputmaterialien abgeleitete durchschnittliche Kupfergehalt im Endprodukt kann nun den Cu-Messwerten im Endprodukt gegenübergestellt werden. Hier ergibt sich folgendes Bild:

- aus Inputmaterialien und oTS-Verlust abgeleiteter Cu-Gehalt: 25,8 – 34,5 mg/kg TS
- Mittelwert der im Endprodukt gemessenen Cu-Gehalte: 56,6 mg/kg TS

Wird davon ausgegangen, dass die Differenz zwischen der aus der Inputmaterial- und oTS-Verlustwerten berechneten Kupfergehaltsspanne und dem Mittel der tatsächlichen Kupfermesswerte in den Biotonnenabfallfrischkomposten durch punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge verursacht wird, werden diese Einträge nun erstmals abschätzbar.

Das Ergebnis dazu sieht für Biotonnenabfallfrischkomposte mit und ohne 7 % Bodeneintrag (gewogenes Mittel aus Regionen mit und ohne Sandböden) über die Inputmaterialien wie folgt aus:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 20,0 – 34,5 mg/kg TS bzw. 35,4 – 61,0 %
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 5,8 mg/kg TS bzw. 0,0 – 10,3 %
- externer Kupfereintrag: 22,1 – 30,8 mg/kg TS bzw. 39,0 – 54,4 %

Bezogen auf die Qualität der Inputmaterialmischungen beim Ansetzen zur Rotte können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 11,2 – 13,1 mg/kg Input-TS
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 3,2 mg/kg Input-TS
- externer Kupfereintrag: 8,4 – 17,1 mg/kg Input-TS
- Gesamtgehalt: 21,5 – 31,5 mg/kg Input-TS

Beispielsberechnung für Grün- und Parkabfallfertigkompost

In die Beispielrechnung sind alle Grün- und Parkabfall-Inputuntersuchungsergebnisse und die Grüngutkompostmesswerte aus 6 Anlagen eingegangen. Die Mittelwerte der Gehalte an organischer Substanz in den untersuchten Bioabfällen und Endprodukten (Grüngutfertigkomposte) sind wie folgt nachgewiesen worden:

- oTS der Inputmaterialien: 75,8 – 67,4 TS-%
- oTS der Fertigkomposte: 28,8 TS-%

Daraus leitet sich nach dem unter Punkt 4.3.1 genannten Algorithmus folgende Bilanz der organischen Substanz bei der Kompostierung bezogen auf die Menge an organischer Substanz in den Inputmaterialien ab:

- Prozessverluste an oTS: 80,5 – 87,1 % der Input-oTS
- produktwirksame oTS: 12,9 – 19,5 % der Input-oTS

Folgende Mittelwerte sind in die Berechnung der Höchsterwartungswerte für die Kupfergehalte in den Komposten zusätzlich eingegangen:

- Cu der Inputmaterialien: 8,6 – 10,0 mg/kg TS

Der aus den Gesamtprozessverlusten der Kompostierung und den Cu-Gehalten der Inputmaterialien abgeleitete durchschnittliche Kupfergehalt im Endprodukt kann nun den Cu-Messwerten im Endprodukt gegenübergestellt werden. Hier ergibt sich folgendes Bild:

- aus Inputmaterialien und oTS-Verlust abgeleiteter Cu-Gehalt: 22,0 – 25,3 mg/kg TS
- Mittelwert der im Endprodukt gemessenen Cu-Gehalte: 35,3 mg/kg TS

Wird davon ausgegangen, dass die Differenz zwischen der aus der Inputmaterial- und oTS-Verlustwerten berechnete Kupfergehaltsspanne und dem Mittel der tatsächlichen Kupfermesswerten in den Biotonnenabfallfrischkomposten durch beprobungs- und untersuchungstechnisch nicht erfasste punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge verursacht wird, werden diese Einträge damit erstmals abschätzbar.

Das Ergebnis dazu sieht nun für Grüngutkomposte mit und ohne 7 % Bodeneintrag über die Inputmaterialien wie folgt aus:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 16,7 – 25,3 mg/kg TS bzw. 47,3 – 71,7 %
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 5,3 mg/kg TS bzw. 0,0 – 15,2 %
- externer Kupfereintrag: 10,0 – 13,3 mg/kg TS bzw. 28,3 – 37,5 %

Bezogen auf die Qualität der Inputmaterialmischungen beim Ansetzen zur Rotte können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Kupfer aus Pflanzeninput: 7,6 – 8,6 mg/kg Input-TS
- Kupfer aus Bodeneintrag: 0,0 – 2,5 mg/kg Input-TS
- externer Kupfereintrag: 3,4 – 6,1 mg/kg Input-TS
- Gesamtgehalt: 12,0 – 16,2 mg/kg Input-TS

Zusammenfassende Betrachtung zu den Beispielsrechnungen

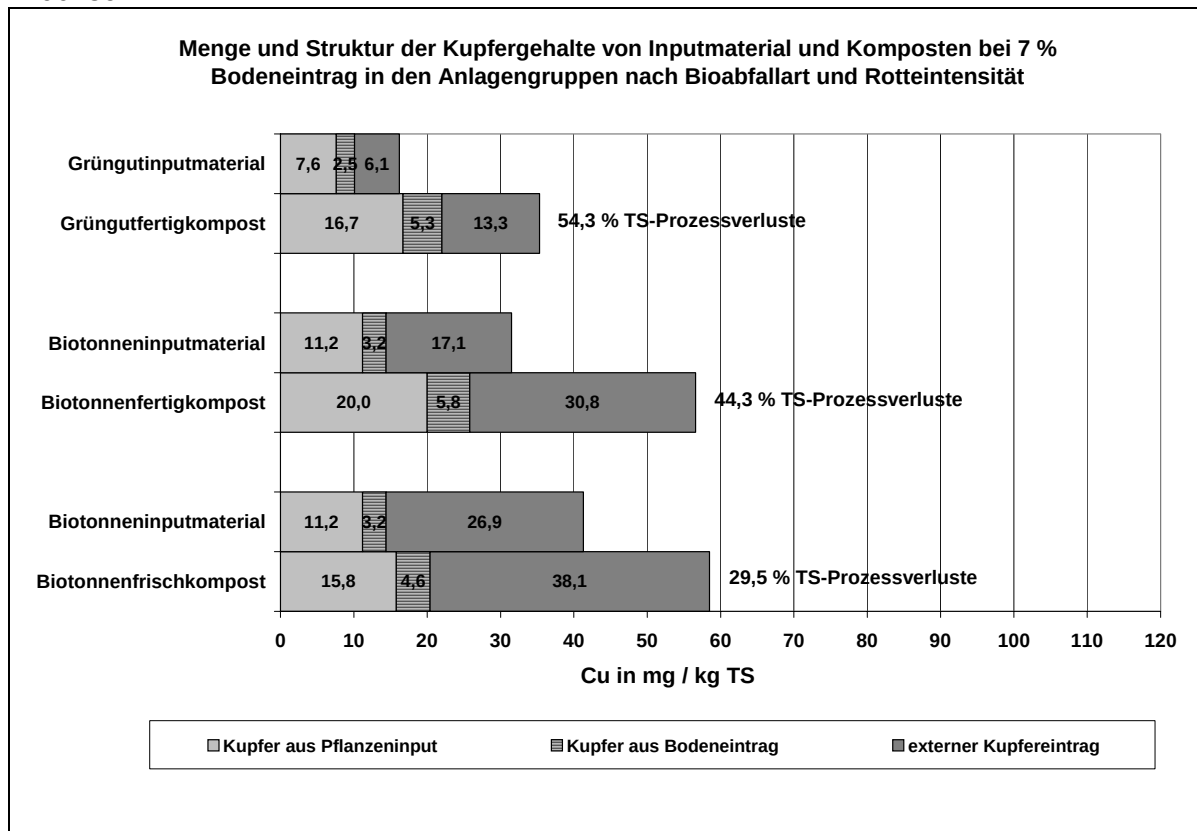
Die Ergebnisse der drei Beispielsrechnungen sind nachfolgend grafisch dargestellt (siehe Abbildungen 59).

Es wird deutlich, dass bei den gewählten Beispielen vor allem unterschiedlich große Mengen externer (punktuelle bzw. partikulärer) Kupfereinträge festzustellen sind. Bei Biotonnenabfällen gab es deutlich höhere Einträge als bei den Grün- und Parkabfällen. All diesen externen Kupfereinträgen ist gemeinsam, dass sie bei Beprobungen von pflanzlichen Inputmaterialien nicht oder nur in Ausnahmefällen erfasst werden (z.B. Ausreißermesswerte). So gleiten partikuläre Metallbestandteile bei der Beprobung frischer pflanzlicher Reststoffe nach unten und befinden sich somit außerhalb des Aktionsfeldes des Probennehmers. Nach Krauss et al. (1995) können hier vor allem Reste von messinghaltigen Kleidungsaccessoires (Knöpfe, Reißverschlusssteile, Büroklammern usw.) in die Biotonnen gelangen.

Weitere punktuelle Einträge können über kupferhaltiges Glanz- und Schmuckpapier, über schutzmittelbehandelte Holzreste sowie über Laub- und Grüngutreste von verkehrsnahen Flächen geschehen. Diese Stoffe gelten in den Biotonnen als Fehlwürfe. Nachfolgend soll

daher eine Betrachtung erfolgen, welche Anteile solcher Fehlwürfe erforderlich sind, um solche Kupferanreicherungen in Inputmaterialien zu erwirken, wie sie z.B. für Biotonnenabfälle bei der Fertigkomposterzeugung ausgewiesen worden sind:

Abb. 59:



Beispiel Biotonnenabfallfertigkompost:

Externe Einträge in das Inputmaterial 17,1 mg Cu / kg TS

In der Tabelle 21 sind Zusatzmengen verschiedener Materialien aufgeführt, mit denen die genannten externen Kupfereinträge erreicht werden:

Die als kritisch anzusehenden externen Einträge von Kupfer in die Inputmaterialien der beispielhaft ausgewählten Biotonnenabfallkompostierung werden durch sehr unterschiedliche Mengen an kupferhaltigen Zusätzen erreicht werden. Bei kupferreichen Chemikalien bzw. Metallteilen genügen schon kleinste Zusätze von unter 0,005 TS-%, um die für die Beispielsbetrachtung berechneten externen Einträge von 16,3 mg/kg Input-TS zu realisieren. Das entspricht einem Zusatz von 5,5 bis 15,5 g je t Frischmasse Biotonnenabfälle. Diese externen Einträge geschehen bei den metallischen Verbindungen meist partikulär, während bei den Pflanzen- und Holzschutzmitteln der Eintrag über chemisch behandelte Pflanzenteile erfolgt.

Auch für kupferbehandelte organische Materialien sind in der Tabelle 21 einige Beispiele enthalten. Von diesen Stoffen reichen unerhebliche Zusatzmengen zu unbelasteten Inputmaterialien aus, um die gefundenen externen Kupfereinträge zu bestätigen. Hier sind für das aufgeführte Beispiel Zusätze von 63 bis 5.900 g Trockensubstanz je t Frischmasse Biotonnenabfälle ausreichend.

Aber auch die gefundenen Ausreißermesswerte der Bioabfalluntersuchungen können schon die externen Kupfereinträge der Beispielsberechnungen begründen. Für diese Ausreißer-

substanzen lassen sich Zusatzmengen von 13 bis 72 kg Trockenmasse je t Biotonnenabfälle berechnen, die schon zu einem externen Kupfereintrag von 17,1 mg/kg Input-TS führen. 54 kg Trockensubstanzzusatz von nach BioAbfV zulässigen Ausgangsstoffen, die gerade die Grenzwerte einhalten, sind hier je t pflanzliche Bioabfälle auch schon genug, um die externen Kupfereinträge zu begründen.

Tab. 21:

Zusammenstellung von Materialzusätzen zum Erreichen eines Kupfereintrags von 17,1 mg/kg Input-Trockensubstanz			
Material	Cu-Gehalt in TS-%	abgeleiteter Materialzusatz in Inputmaterial in TS-%	Quellenangabe für Cu-Gehalt
kupferreiche Chemikalien			
gediegenes Kupfer	99,0	0,00173	ohne Autor, 1997
Messingteil	50,0	0,00342	ohne Autor, 1997
Kupferhydroxid (PSM)	45,0	0,00380	Pfeiffer, 2003
Holzschutzmittel	35,0	0,00489	Hillenbrand et al, 2005
Extremwerte kupferbelasteter organischer Stoffe			
Geschenkpapier mit Goldbedruck	8,852	0,019	von Arx, 2006
Geschenkpapier	1,769	0,097	von Arx, 2006
Kabeltrommelaltholz	0,406	0,421	Reinhold, 1997
behandeltes Zaunaltholz	0,196	0,872	Reinhold, 1997
Stadtgewässerschlamm	0,186	0,919	Reinhold, 1997
Schweinemastfäkalien	0,147	1,162	Müller, 2006
Hausstaub	0,118	1,452	Krauss et al, 1995
Deinkingschlamm	0,092	1,859	Striegel et al, 2004
Angaben aus Praxisdatensammlung zu Kupferextremwerten			
Laub aus Biotonne	0,0404	4,23	dieser Bericht
gewerbliche Holzabfälle	0,0313	5,46	dieser Bericht
Papier aus Biotonne	0,0266	6,43	dieser Bericht
Leichtfraktion (Gelbe Tonne)	0,0149	11,48	Lapp, 2007
gemischte Bioabfälle	0,0141	12,13	dieser Bericht
Grenzwert BioabfV	0,0100	17,10	BioAbfV, 1998
Ausreißergrenze Biotonnenabfälle	0,0076	22,65	dieser Bericht

Insgesamt ergibt sich aus den Betrachtungen zu den punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen, dass die Qualität der Getrenntsammlung großen Einfluss auf die Kupfergehalte der Komposte ausübt. Hier muss die Bevölkerung gezielter sensibilisiert werden, um sich der großen Auswirkung oft kleinster Fehlwürfe bewusst zu werden.

Darüber hinaus sind aus der Abbildung 59 Auswirkungen der Trockenmasseverluste während des Kompostierungsprozesses erkennbar. Die Prozessverluste bestehen sowohl aus Rotteverlusten (ausschließlich organische Trockensubstanz) als auch aus Fraktionierungsverlusten, bei denen Siebüberlaufmengen mit hohen Anteilen organischer Substanz ausgehalten werden. Die mineralischen Bestandteile sind in den ausgesiebten Feinkornanteilen angereichert und verbleiben somit fast ausschließlich im Endprodukt. Das trifft grundsätzlich auch für die Kupferanteile zu.

Für die ausgewählten Beispielsbetrachtungen ergeben sich aus den Gesamtprozessverlusten von den angesetzten Ausgangsstoffen (mit mittleren 7 % Bodeneintrag) hin zum jeweiligen Endprodukt folgende Kupfergehaltsanreicherungseffekte:

- Biotonnenabfallfrischkompost auf das 1,4-fache
- Biotonnenabfallfertigkompost auf das 1,8-fache

Abschlussbericht F&E-Vorhaben 204 33 321 Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen	Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow
--	--

- Grüngutfertigkompost

auf das 2,2-fache

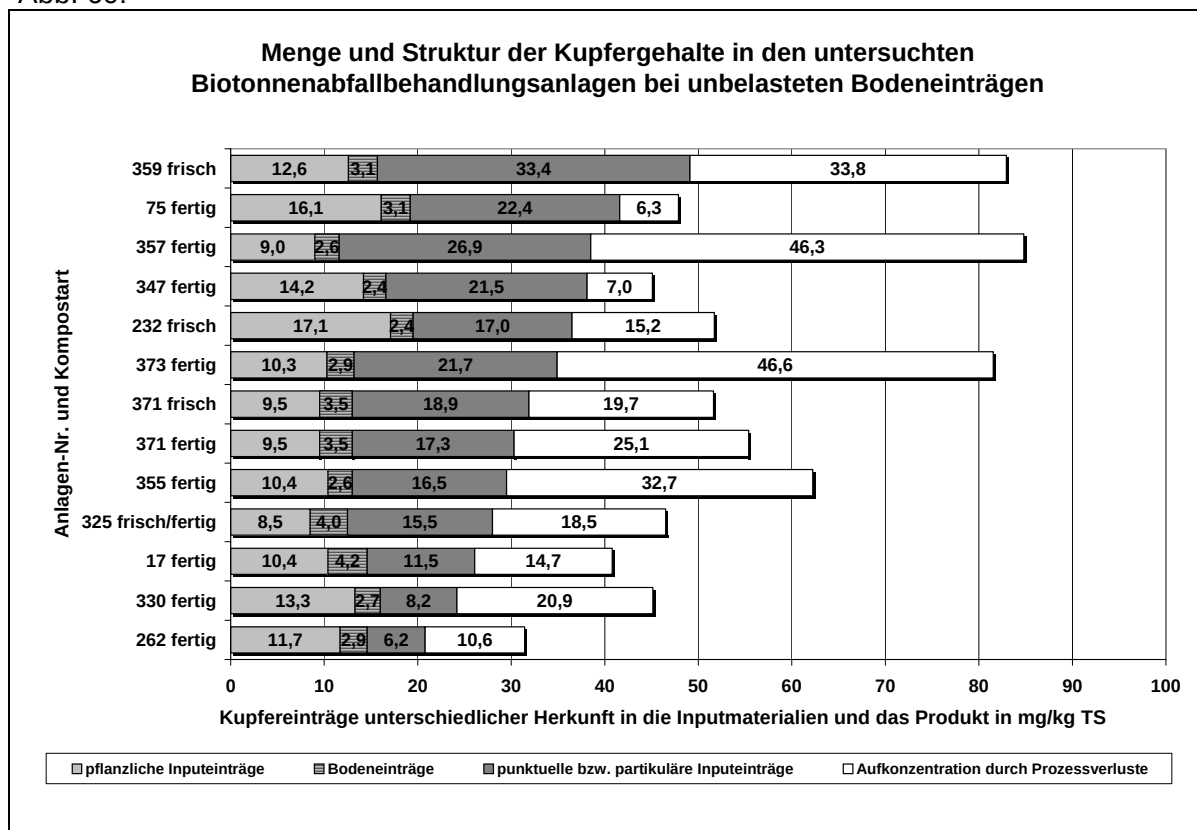
Der Unterschied zwischen dem Biotonnenfrisch- und –fertigkompost lässt sich vor allem mit dem zunehmenden Reifegrad der erzeugten Komposte erklären, der durch Abbau organischer Substanz erkauft wird. Die Siebdurchgangsanteile nehmen dagegen wegen höherer Materialfeinheit etwas zu, so dass dieser Anreicherungsunterschied begrenzt bleibt.

Die Herstellung von Grüngutfertigkomposten geschieht zumeist für die Anwendung der Komposte zur Oberboden- bzw. Substratherstellung. Die Abbaustabilität und damit die Rotteverluste sind hier noch stärker ausgeprägt als bei den Biotonnenfertigkomposten. Zugleich haben die Grün- und Parkabfälle einen deutlich höheren Strukturmaterialanteil als Biotonnenabfälle, woraus sich eine geringere endproduktwirksame Siebdurchgangsmenge ergibt.

Die in der Anlage zusammengestellten Ergebnisse der Einzelauswertungen der 14 Bioabfallkompostierungsanlagen sind in den Abbildungen 60 und 61 für Biotonnenabfälle sowie Grün- und Parkabfälle gesondert zusammengestellt, wobei die standorttypischen Bodeneinträge und die Anreicherungsergebnisse durch Prozessverluste mit berücksichtigt worden sind.

Zwischen den untersuchten Anlagen bestehen vor allem erhebliche Unterschiede im Anteil der Kupfereinträge über punktuelle bzw. partikuläre Quellen und im Anreicherungs geschwährend des Kompostierungsvorgangs durch Gesamtprozessverluste. Bei den Grün- und Parkabfällen hebt sich eine Kompostierungsanlage besonders ab, die vorwiegend Friedhofsabfälle verarbeitet. Hier wurde schon auf mögliche Auswirkungen von enthaltenen Friedhofsgebinden hingewiesen.

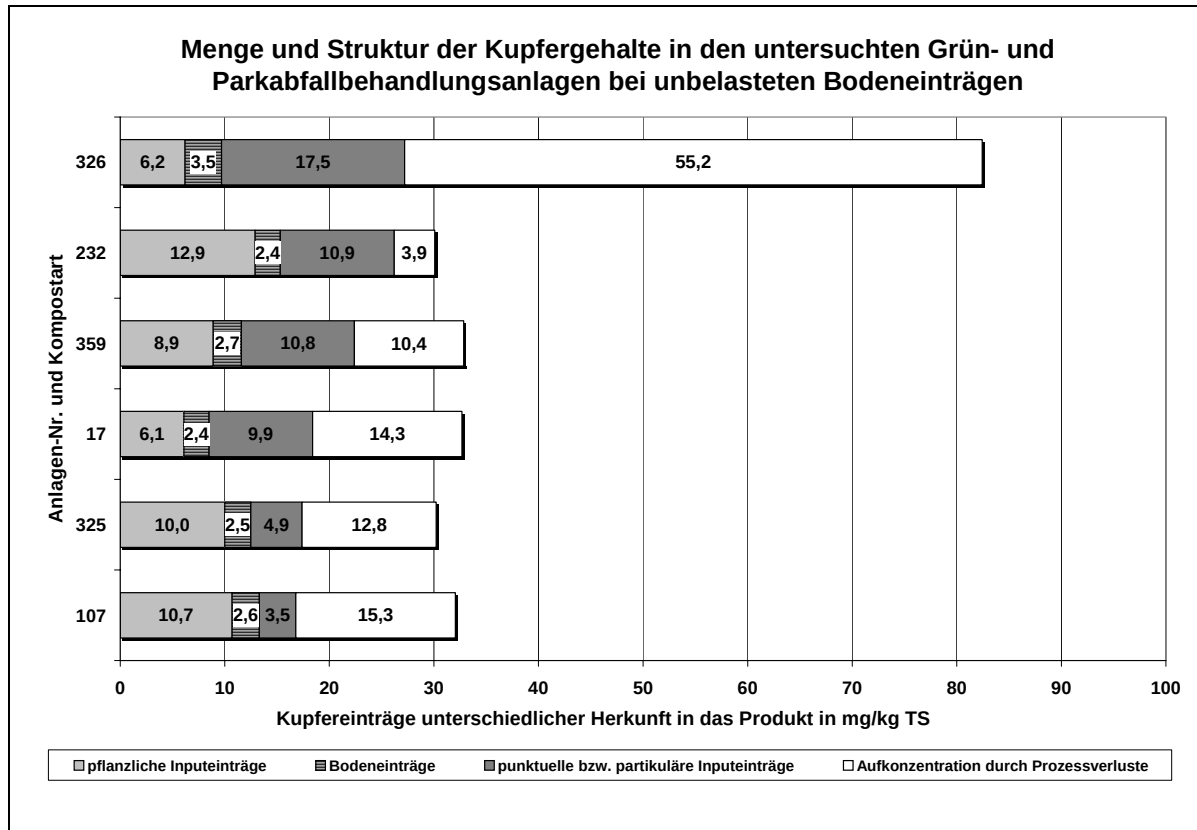
Abb. 60:



Die festgestellten großen Unterschiede zwischen den ausgewählten Anlagen sind nachfolgend zusammengestellt:

- Bodeneinträge (unbelastet) 2,4 – 4,2 mg/kg Kompost-TS
- Pflanzliche Einträge 6,1 – 16,1 mg/kg Kompost-TS
- Punktuelle bzw. partikuläre Einträge 3,5 – 33,4 mg/kg Kompost-TS
- Anreicherungen durch Prozessverluste 3,9 – 55,2 mg/kg Kompost-TS

Abb. 61:



Aus den Spannbreiten der kupfergehaltserhöhenden Faktoren leitet sich deren mittlere anteilige Beteiligung an den bisherigen und künftigen Qualitätsentwicklungen bei den Kupfergehalten von Bioabfallkomposten ab (siehe Abbildung 62).

Es ergibt sich folgende Rangfolge der möglichen Einflussnahme auf kupfergehaltssenkende Maßnahmen:

Prozessverluste > punktuelle bzw. partikuläre Einträge > Pflanzeneinträge > Bodeneinträge

Bei der Entwicklung von Limitierungsstrategien ist das zu berücksichtigen. Dazu können die so bedeutsamen Prozessverluste anhand der Untersuchungen in den 14 ausgewählten Bioabfallbehandlungsanlagen regressionsanalytisch quantifiziert werden. Dazu folgende Abbildungen (63 und 64), getrennt nach Biotonnenabfall- sowie nach Grün- und Parkabfallkompostierung.

Insgesamt zeigt sich ein statistisch hoch gesicherter Einfluss der Prozessverluste an organischer Substanz auf die Kupfergehalte im Rotteprodukt. Die dabei eintretende Kupfergehaltserhöhung verläuft weitgehend linear und kann wie folgt quantifiziert werden:

- Biotonnenabfälle 0,58 mg Cu/kg Rottegut-TS je 1 % oTS-Verlust
- Grün- und Parkabfälle 0,44 mg Cu/kg Rottegut-TS je 1 % oTS-Verlust

Abb. 62:

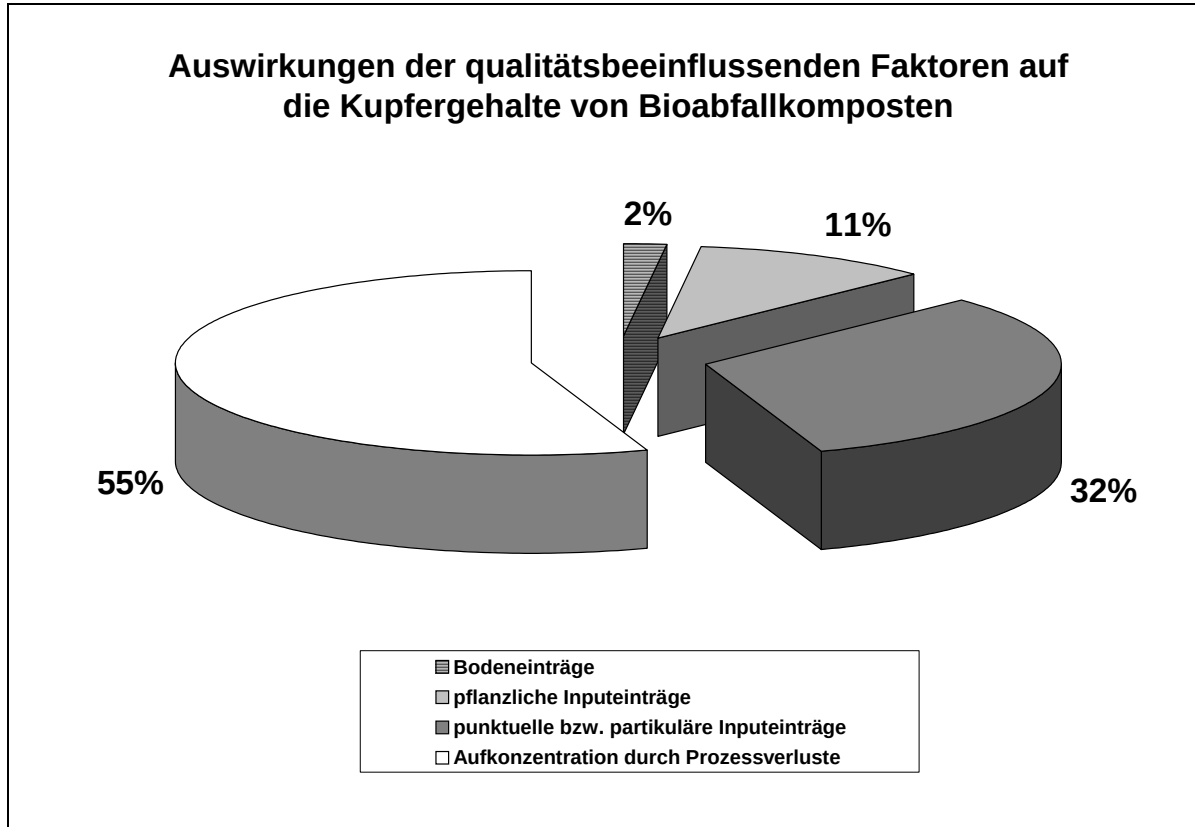
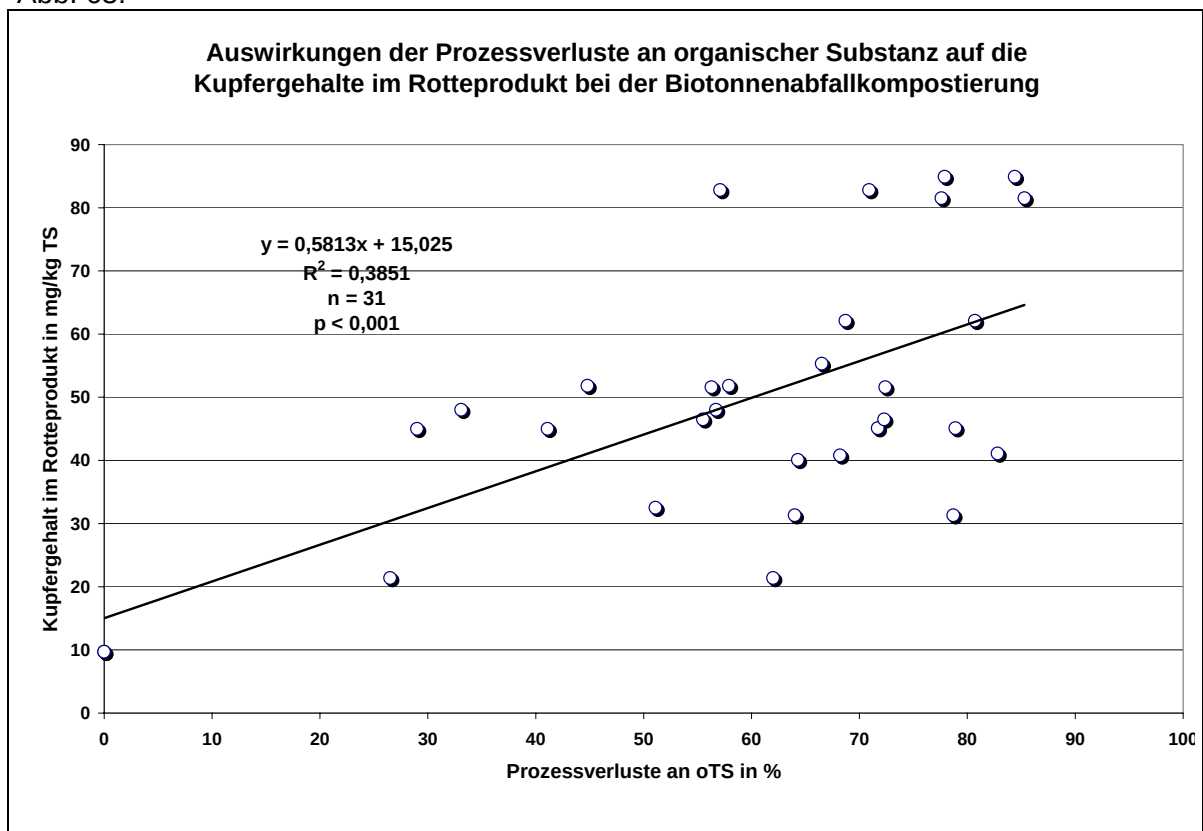
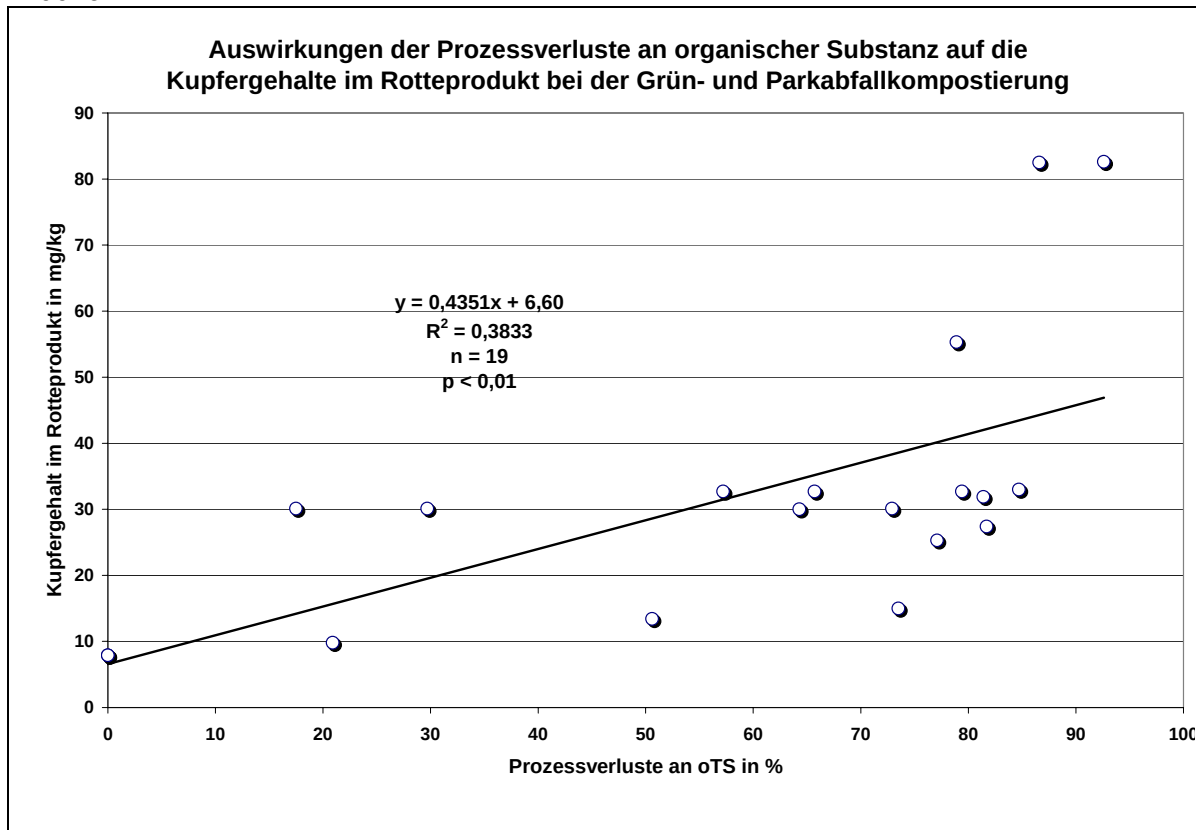


Abb. 63:



Insbesondere durch die bei den Biotonnenabfällen stärkeren punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen verläuft die Regressionsgerade auf einem höheren Niveau und mit einem stärkeren Anstieg, als die bei den Grün- und Parkabfällen. Aus der Sicht einer Qualitätsbemessung an den Grenzwerten der BioAbfV ist somit vor allem bei der Biotonnenabfallbehandlung eine Orientierung auf geringe Prozessverluste vorteilhaft.

Abb. 64:



4.3.3 Betrachtungen zum Einfluss von Bodenanhängen der Inputmaterialien auf die Kupfergehalte

Die Bodenanhänge führen in den Inputmaterialien schon beim Einsammeln zu „Vermischungseffekten“, die alle Inhaltsstoffe der Bioabfälle betreffen. Dabei spielen vor allem die Gehalte der Bodenmaterialien an Schadstoffen - im Rahmen dieses F&E-Vorhabens an Kupfer - eine besondere Rolle. Nachfolgend sollen die Auswirkungen von kupferbelasteten Bodenanhängen auf die Beschaffenheit der Inputmaterialgemische, auf die Prozessverluste während der Kompostierung und letztendlich auf die Kupfergehaltsveränderungen in den Komposten dargestellt werden.

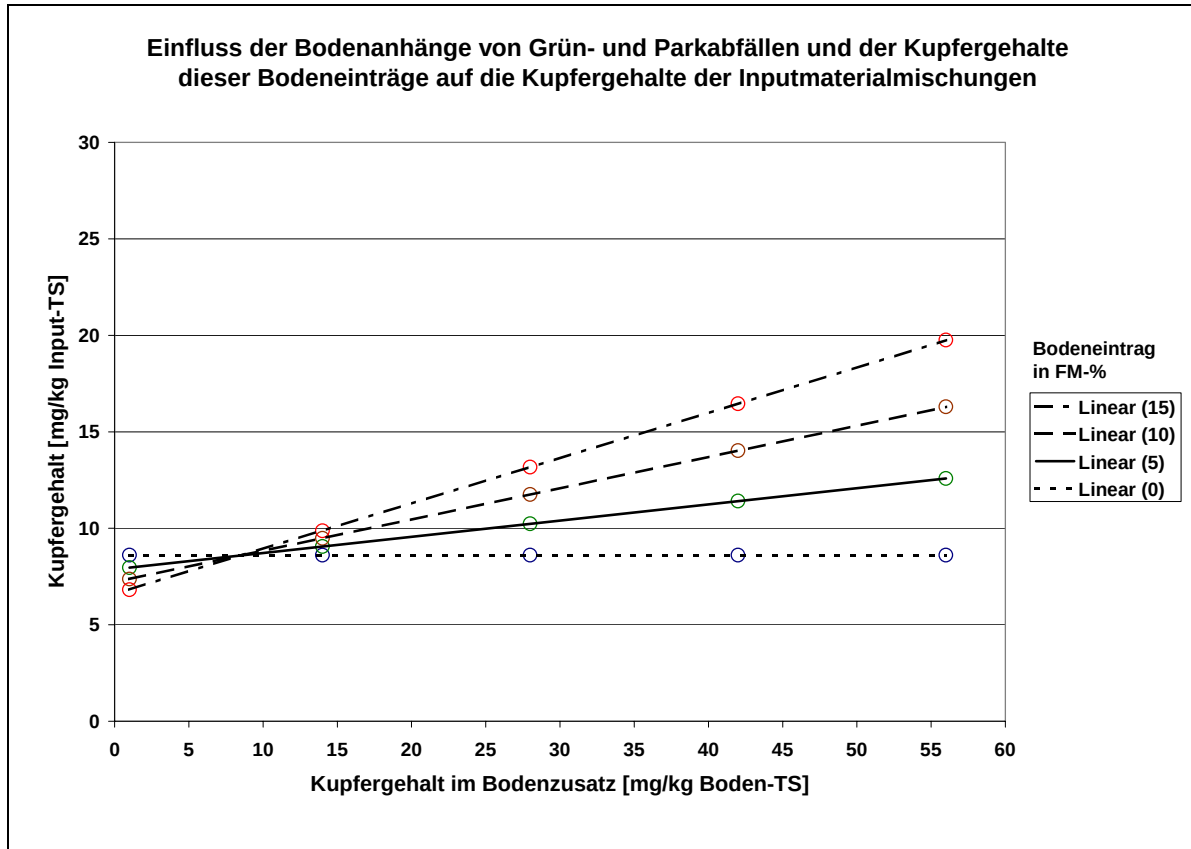
Anhand der unter Punkt 4.3.1 aufgeführten Methodik zur modellhaften Abschätzung von Kompostierungsprozessverlusten und von Kupfereinträgen in die Komposte sollen in diesem Abschnitt die Auswirkungen von unterschiedlichen Mengen an Bodenanhängen des Inputmaterials und von unterschiedlichen Kupfergehalten dieser Bodeneinträge abgeschätzt werden.

Bei den voranstehenden Auswertungen wurde von einer Vermengung der meist pflanzlichen Inputmaterialien mit bis zu 5 Frischmasse-% Boden bei bindigen (Lehm, Schluff, Ton) und bis zu 12 Frischmasse-% Boden bei sandigen Standorten im Einzugsbereich der Bioabfallbehandlungsanlagen ausgegangen. Das entspricht den Auswertungsergebnissen von Rein-

hold (2005) sowie den praktischen Erfahrungswerten der an diesem Projekt beteiligten 14 Anlagenbetreibern. Die jeweiligen Kupfergehalte der Bodenanhafungen wurden im Durchschnitt mit 70 % der Vorsorgewerte nach BBodSchV angesetzt. In Anlehnung an Amlinger et al. (2005) sowie Roth-Kleyer & Reinhold (2005) wird bei den Betrachtungen zu Auswirkungen von Bodenanhängen bis 15 FM-% und von Bodenkupfergehalten bis 56 mg/kg TS ausgegangen.

Die Einflüsse der Bodenkupfergehalte auf die Inputmaterialgemische soll in den nachfolgenden Abbildungen (65 und 66) für Grün- und Parkabfälle sowie für Biotonnenabfälle dargestellt werden.

Abb. 65:



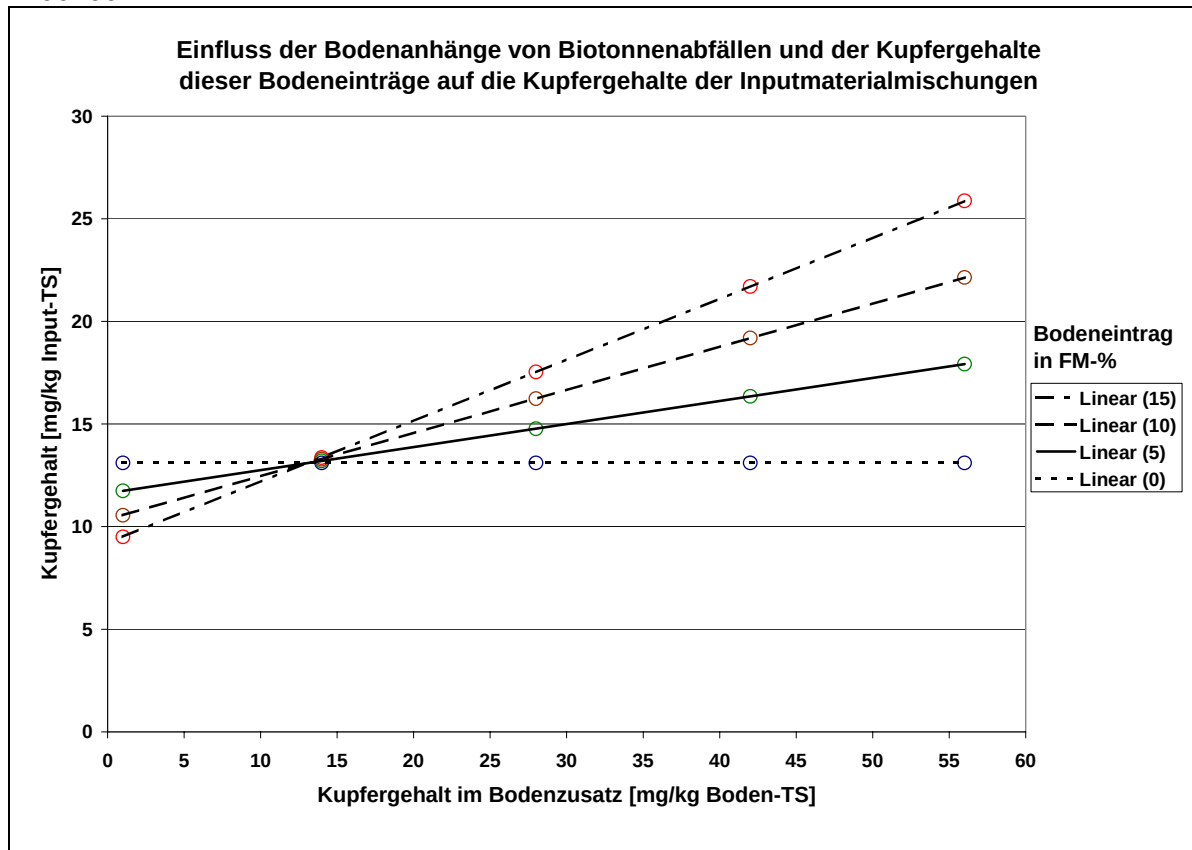
Es ist festzustellen, dass die erhöhten Bodenkupfergehalte sich bei Inputmaterialmischungen mit Biotonnenabfällen stärker auswirken, als bei solchen mit Grün- und Parkabfällen. Die Ursache dafür liegt in den geringeren Trockenmassegehalten bzw. höheren Wassergehalten der Biotonnenabfälle. Gleiche Bodenanhafungen je Tonne Frischmasse führen bei nasserem Inputmaterialien zu stärkeren Veränderungen in der Trockenmassezusammensetzung im Rotte- Ausgangsmaterial als bei trockeneren Inputmaterialien.

Sind die Kupfergehalte der jeweiligen Bioabfälle gleich denen der Bodenanhafungen, so ergeben sich keine Gehaltsveränderungen der Bioabfall-Boden-Mischungen zu den reinen, vorwiegend pflanzlichen Bioabfällen. Dieser Gehalt ist in den Abbildungen durch den Schnittpunkt der unterschiedlicher Bodeneintragsmengen gekennzeichnet. Da die Biotonnenabfälle höhere Kupfergehalte aufweisen als die Grün- und Parkabfälle liegen die jeweiligen Schnittpunkte auch auf unterschiedlichem Niveau.

Als weiterer Einflussfaktor auf die Kupfergehalte im Endprodukt sind die Gesamtprozessverluste an organischer Substanz (Rotteverluste und Siebüberläufe) zu berücksichtigen, die sich

bei zunehmenden Bodeneinträgen und der damit verbundenen Zunahme von mineralischen Substanzen im Rottegut verringern. Das hat seine Ursachen sowohl im Abbau organischer Substanzen durch Rotteprozesse als auch im größeren Siebdurchgangsanteil von feinkörnigem Material nach Rotteabschluss. Für die drei unter Punkt 4.3.2.2 genannten Anlagenbeispiele haben sich hier folgende Ableitungen ergeben (siehe Abbildung 67).

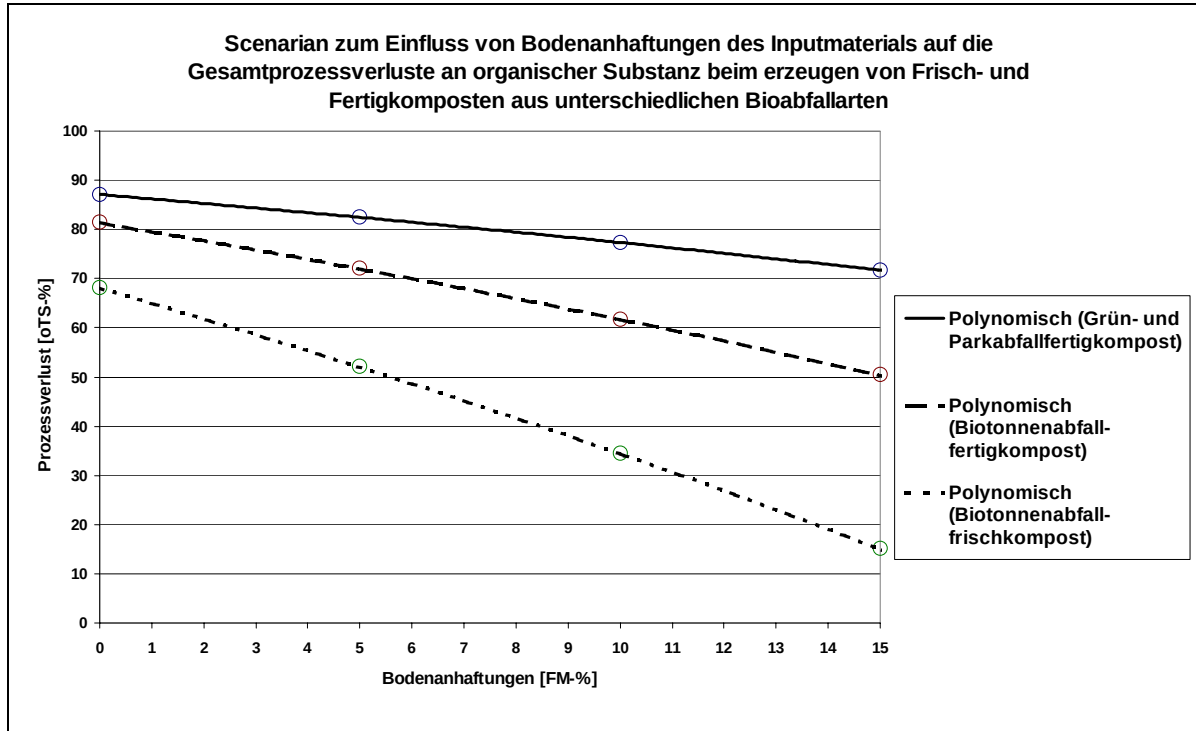
Abb. 66:



Die Größenordnung der Gesamtprozessverluste an organischer Substanz liegt für die drei dargestellten Beispiele auf deutlich unterschiedlichem Niveau. Die höchsten Verluste an organischer Substanz treten bei der Kompostierung von Grün- und Parkabfällen auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass hier wegen der Verwendung der Grüngutfertigkomposte zur Oberboden- und Substratherstellung sehr hohe Rottegrade angestrebt werden. Hinzu kommen wegen des höheren Holzanteils im Inputmaterial größere Siebüberlaufrückstände. Durch Bodenanhänge werden die hohen oTS-Gesamtprozessverluste bei der Grün- und Parkabfallkompostierung nur geringfügig vermindert.

Die Herstellung von Frisch- bzw. Fertigkomposten aus Biotonnenabfällen ist mit geringeren oTS-Gesamtprozessverlusten verbundenen, die zudem durch Bodeneinträge auch noch stärker vermindert werden. Als Ursache dafür ist die hier zumeist dichtere Rottegutlagerung anzunehmen, die durch mineralische Zusätze noch weiter strukturgemindert wird. Bei der Frischkompostherstellung ist das besonders ausgeprägt, da diese in eingehausten High-Tech-Anlagen in sehr kurzer Zeit mit besonders hoher Rotteintensität erfolgt. Bodeneinträgen über 10 Frischmasse-% in der Inputmaterialmischung können hier dazu führen, dass die Rotteintensität kaum mehr die nach BioAbfV ordnungsgemäße Hygienisierung durch Selbst-erwärmung gewährleisten kann.

Abb. 67:



Für die drei unter Punkt 4.3.2.2 genannten Anlagenbeispiele lassen sich nun folgende Auswirkungen von unterschiedlich kupferbelasteten Bodenanhaltungen auf die Veränderung der Kupfergehalte in Komposten abschätzen (siehe Abbildungen 68 bis 70).

Abb. 68:

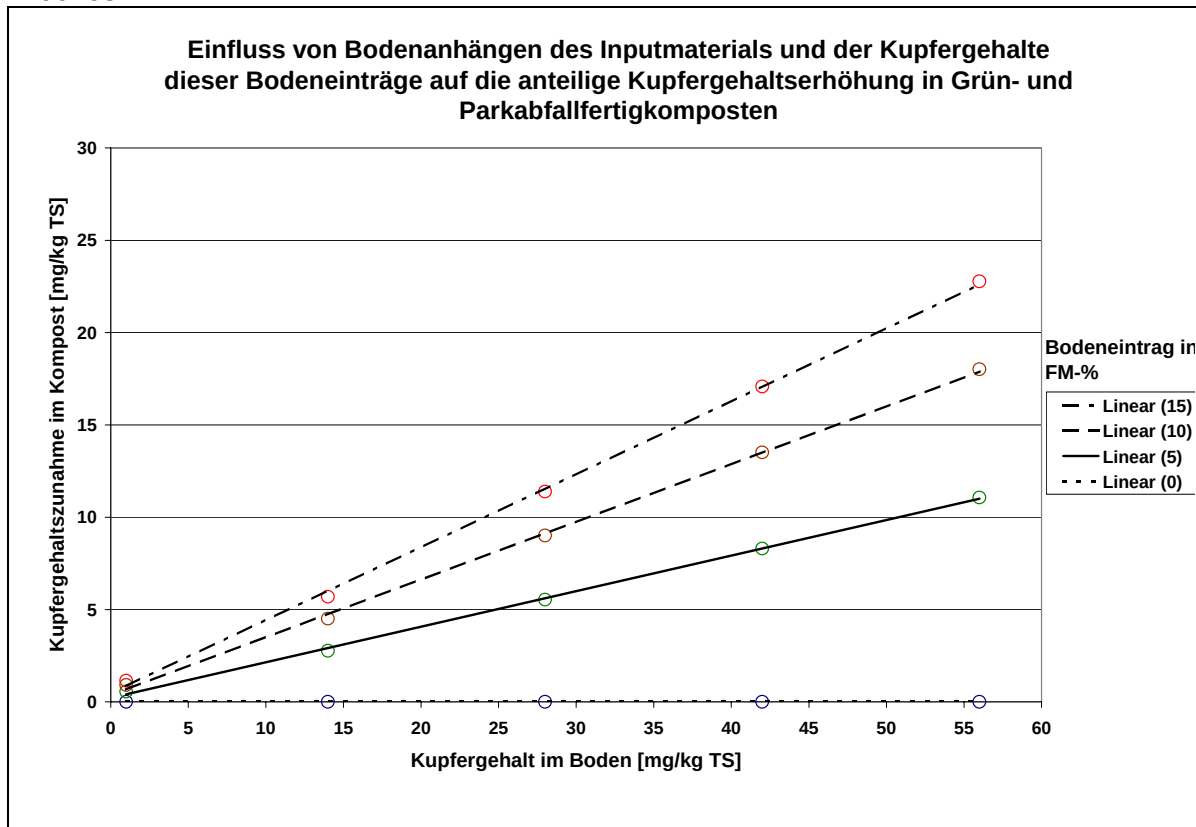


Abb. 69:

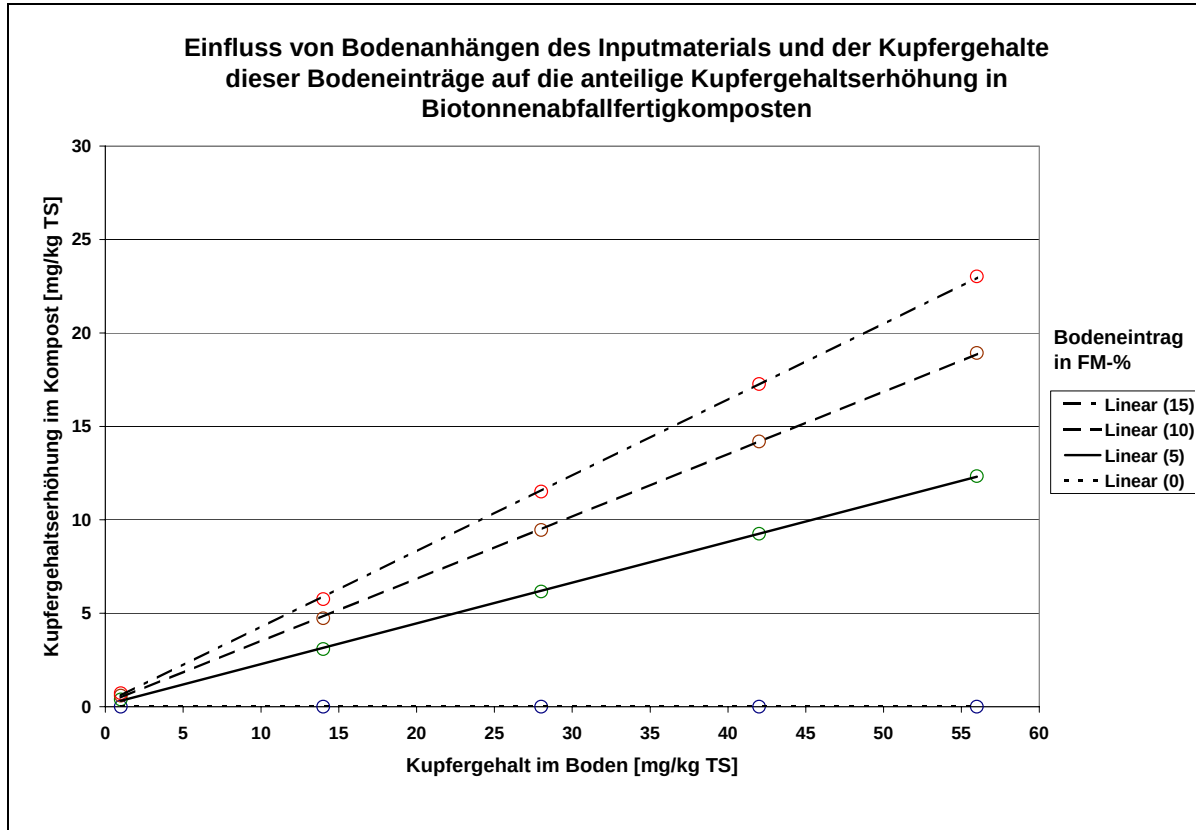
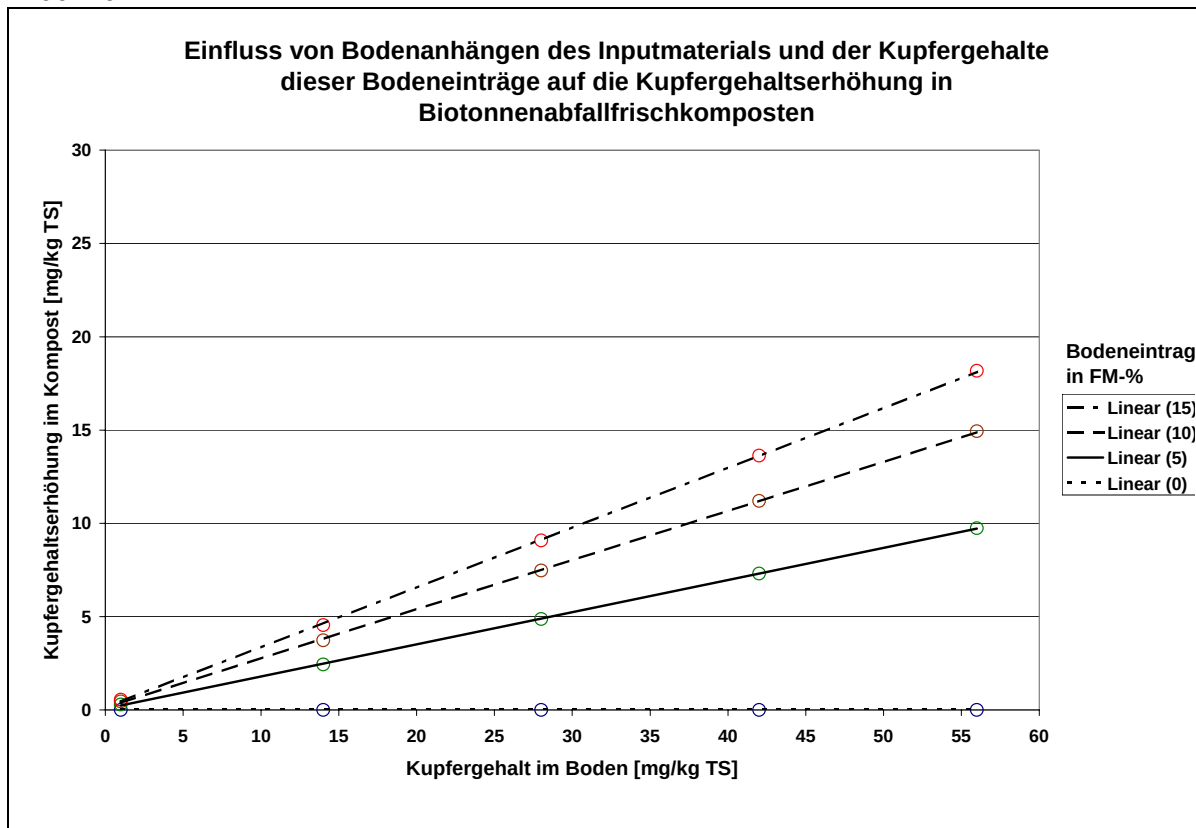


Abb. 70:



Bei den Fertigkomposten aus Grün- und Parkabfällen und aus Biotonnenabfällen zeigen sich sehr ähnliche Auswirkungen von unterschiedlich kupferhaltigen Bodenanhaftungen auf die Veränderungen der Kupfergehalte im Kompost. Hier führen die höhere Kupferanreicherung bei den Biotonnenabfall-Boden-Gemischen und die höheren Gesamtprozessverluste bei der Grün- und Parkabfallkompostierung zu in etwa ausgeglichenen Gesamtwirkungen. Bei Bodeneinträgen von 15 FM-% und möglichen Bodenkupfergehalten von 56 mg/kg Boden-TS können hier Kupfergehaltserhöhungen bis zu etwa 23 mg/kg Kompost-TS erwartet werden. Das entspricht, bezogen auf die mittleren Kupfergehalte folgenden relativen Zunahmen:

- für Biotonnenabfallfertigkomposte bis etwa 41 %
- für Grün- und Parkabfallfertigkomposte bis etwa 65 %

Bei den Biotonnenabfallfrischkomposten wirken sich die niedrigeren Gesamtprozessverluste wegen der damit verbundenen geringeren Aufkonzentrationen von Kupfer im Endprodukt so aus, dass sich die Kupfergehaltzunahme durch kupferhaltige Bodenanhänge in Grenzen hält. Bei Bodeneinträgen von 15 FM-% und möglichen Bodenkupfergehalten von 56 mg/kg Boden-TS können hier Kupfergehaltserhöhungen bis zu etwa 18 mg/kg Kompost-TS erwartet werden. Das entspricht, bezogen auf die mittleren Kupfergehalte folgenden relativen Zunahmen:

- für Biotonnenabfallfrischkomposte bis etwa 18 %

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Bodenanhaftungen von Inputmaterialien zu erheblichen Kupfergehaltserhöhungen beitragen können. Vor allem Bodeneinträge kupferhaltiger urbaner Herkunft sind hier kritisch zu bewerten. Fertigkomposte reagieren auf stärker kupferhaltige Bodeneinträge empfindlicher als Frischkomposte, was den hier geringeren Prozessverluste geschuldet ist.

Die praktischen Auswirkungen von Bodeneinträgen bei der Bioabfallannahme werden durch die regional sehr differenzierten Kupfergehalte in Oberböden bestimmt. Da bei den erhöhten Bodenkupfergehalten von einem punktuellen Auftreten auszugehen ist, sind solche Kupfer-einträge in die Bioabfallsammlung bzw. nachfolgend in die Bioabfallbehandlung nur in regionalen Einzelfällen zu erwarten.

4.3.4 Betrachtungen zur biochemischen Umwandlung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge beim Kompostierungsprozess

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse erlauben Aussagen darüber, wann die so bedeutsame Aufkonzentration der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten untersuchungstechnisch nachweisbar wird. Das soll wieder für die drei Beispielbetrachtungen zur Bioabfallkompostierung (Biotonnenabfall zur Frisch- und Fertigkomposterzeugung sowie Grün- und Parkabfallfertigkompostherstellung) dargestellt werden.

Die im F&E-Vorhaben nachgewiesenen Kupfergehalte werden zur besseren Interpretation von Veränderungen im Behandlungsverlauf auf folgende unterschiedliche Inhaltsstoffe der Bioabfälle/Komposte normiert:

- Trockenmasse (Labormesswert)
- Organische Substanz (oTS)
- Mineralische Substanz (mTS)

Die unterschiedlich normierten Kupfergehalten zeigen, dass durch diese unterschiedliche Bezugsbasis für Kupfergehalte differenzierte Aussagen ermöglicht werden:

Abschlussbericht F&E-Vorhaben 204 33 321 Ursachenforschung und Limitierungsstrategien für zunehmende Kupfergehalte in Bioabfällen	Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH Stahnsdorfer Damm 39 14532 Kleinmachnow
--	--

- Der Bezug auf die Trockensubstanz beschreibt den tatsächlich stattfindenden und qualitätswirksamen Anreicherungsverfahren im Endprodukt.
- Der Bezug auf die organische Substanz (oTS) zeigt die Veränderungen in den Kupfergehalten hinsichtlich des zu erwartenden Nutzens beim Produkteinsatz an, vor allem hinsichtlich der Humusreproduktionsleistung bei der Kompostanwendung.
- Der Bezug auf die mineralische Trockensubstanz (mTS) zeigt am ehesten den Verlauf der biochemischen Umwandlung von untersuchungstechnisch zuvor nicht erfassten Kupfereinträgen in produktwirksame Bestandteile während des Rotteprozesses an. Im Idealfall (ohne biochemische Umwandlung von punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen) verläuft dieser Kupfergehalt über den Rotteverlauf gleichbleibend. Treten hier deutliche Unterschiede auf, so ist das als Beleg einer sich verändernden untersuchungstechnischen Nachweisbarkeit von Kupfer zu werten.

In den nachfolgenden Beispielsbetrachtungen bildet die Kupfergehaltsentwicklung bezogen auf die mineralische Trockensubstanz den Schwerpunkt. Nur mit dieser Betrachtungsweise können die notwendigen Aussagen über die biochemische Umwandlung während des Kompostierungsprozesses abgeleitet werden.

Beispielsbetrachtung für Biotonnenabfallfrischkompost

Die Entwicklung der untersuchten Inhaltsstoffe während des Gesamtprozesses der Frischkomposterzeugung aus Biotonnenabfällen soll am Beispiel der 4 ausgewählten Anlagen nachfolgend dargestellt werden (siehe Tabellen 22 und 23).

Tab. 22:

Entwicklung der Mittelwerte von Inhaltsstoffen während des Rotteprozesses bei der Biotonnenabfallfrischkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Wassergehalt in FM-%	Glühverlust in TS-%	Prozessverluste in TS-%
Reine Bioabfälle	66,7	76,2	0,0
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	63,4	65,1	0,0
Intensivrottegut	43,7	53,0	25,7
abgesiebter Frischkompost	32,1	50,5	29,5

Bei der Herstellung von Frischkompost aus Biotonnenabfällen sind in den für das Projekt ausgewählten Kompostierungsanlagen im Mittel 29,5 TS-% Verluste an Trockensubstanz aufgetreten, wobei der größte Teil dieser Verluste dem Abbau organischer Substanz während des Rotteprozesses zuzuschreiben ist.

Tab. 23:

Entwicklung der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte während des Rotteprozesses bei der Biotonnenabfallfertigkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Reine Bioabfälle	13,1	20,5	72,5
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	14,3	22,0	41,0
Intensivrottegut	32,4	65,2	75,6
abgesiebter Fertigkompost	58,5	118,5	120,4

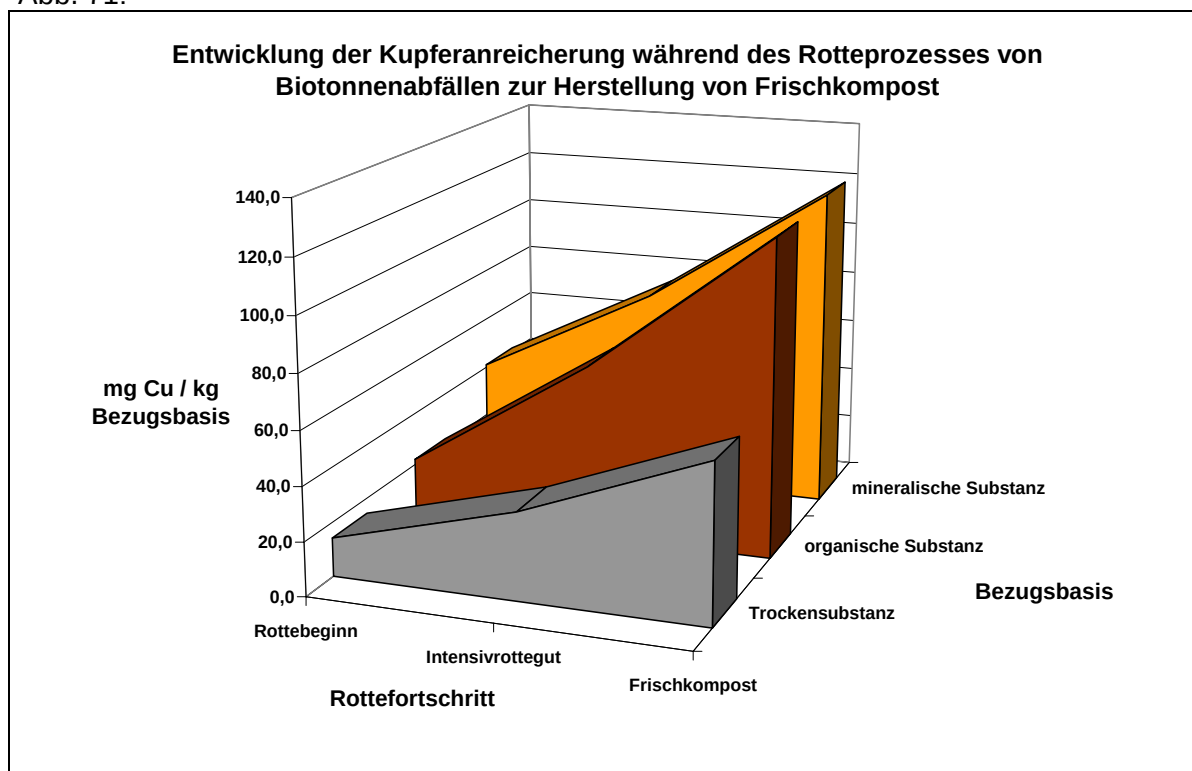
Die starke Zunahme der auf die mineralische Substanz bezogenen Kupfergehalte zeigt intensive Freisetzungsvorgänge an Kupfer im Rotteverlauf an, was auf erhebliche punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge schließen lässt.

Die Grafik (Abbildung 71) zeigt, dass bei der Erzeugung von Biotonnenabfallfrischkomposten

- die Kupfergehalte in der Trockensubstanz während des Rotteprozesses stark ansteigen,
- bezugnehmend auf den Nutzwert (oTS) eine ständige Zunahme der Kupfergehalte je Einheit stattfindet und
- die biochemische Umwandlung von punktuellen, meist partikulären Kupfereinträgen sehr intensiv über den gesamten Prozess verläuft und eventuell zum Rotteabschluss noch nicht beendet ist

Um die Saisonabhängigkeit der Kupfereinträge bewerten zu können, wurden die Fertigkompostuntersuchungen den jeweiligen Anlieferungsjahreszeiten zugeordnet. Hier ergab sich für den Untersuchungszeitraum folgendes Bild (siehe Tabelle 24).

Abb. 71:



Tab. 24:

Saisonale Vergleiche der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte bei der Frischkomposterzeugung aus Biotonnenabfällen			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Frühjahrsanlieferung	56,4	117,6	109,6
Sommeranlieferung	55,0	115,4	107,5
Herbstanlieferung	54,5	108,5	116,3
Winteranlieferung	68,3	131,9	150,7

Die höchsten Kupfergehalte von Frischkomposten treten bei Winteranlieferung der Biotonnenabfälle auf. Das zeigt sich besonders deutlich bei Bezug der Kupfergehalte auf die mineralische Trockenmasse (mTS), was für einen dominanten Einfluss punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge spricht. Hier sind Einflüsse weihnachtlicher Gebrauchsgegenstände (z.B. Weihnachts- und Adventsdekorationen bzw. Geschenkpapier mit Goldbedruck) anzunehmen.

Beispielsbetrachtung für Biotonnenabfallabfallfertigkompost

Die Entwicklung der untersuchten Inhaltsstoffe während des Gesamtprozesses der Fertigkomposterzeugung aus Biotonnenabfällen soll am Beispiel der 10 ausgewählten Anlagen wie folgt dargestellt werden (siehe Tabellen 25 und 26).

Tab. 25:

Entwicklung der Mittelwerte von Inhaltsstoffen während des Rotteprozesses bei der Biotonnenabfallfertigkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Wassergehalt in FM-%	Glühverlust in TS-%	Prozessverluste in TS-%
Reine Bioabfälle	66,7	76,2	0,0
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	63,4	65,1	0,0
Intensivrottegut	43,7	53,0	25,7
Nachrottegut	41,4	47,4	33,6
abgesiebter Fertigkompost	32,7	37,3	44,3

Bei der Herstellung von Fertigkompost aus Biotonnenabfällen sind in den für das Projekt ausgewählten 10 Kompostierungsanlagen mit Biotonnenabfallfertigkompostherstellung im Durchschnitt 44,3 TS-% Verluste an Trockensubstanz aufgetreten, wobei der größte Teil dieser Verluste (fast 26 TS-%) durch den Abbau organischer Substanz während der Intensivrotte erfolgt ist. Die Verluste in der Nachrotte lagen bei nur etwa 8 TS-%. Auch die Verluste bei dem Absieben und der Zwischenlagerung im Endproduktlager waren mit fast 9 TS-% recht gering ausgefallen.

Tab. 26:

Entwicklung der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte während des Rotteprozesses bei der Biotonnenabfallfertigkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Reine Bioabfälle	13,1	20,5	72,5
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	14,3	22,0	41,0
Intensivrottegut	32,4	65,2	75,6
Nachrottegut	40,1	90,1	83,9
abgesiebter Fertigkompost	56,6	156,9	91,5

Der Vergleich von an verschiedenen Kompostmerkmalen normierten Kupfergehalten während des Rotteprozesses zeigt, dass die unterschiedliche Bezugsbasis für Kupfergehalte differenzierte Aussagen ermöglicht (siehe Abbildung 72)

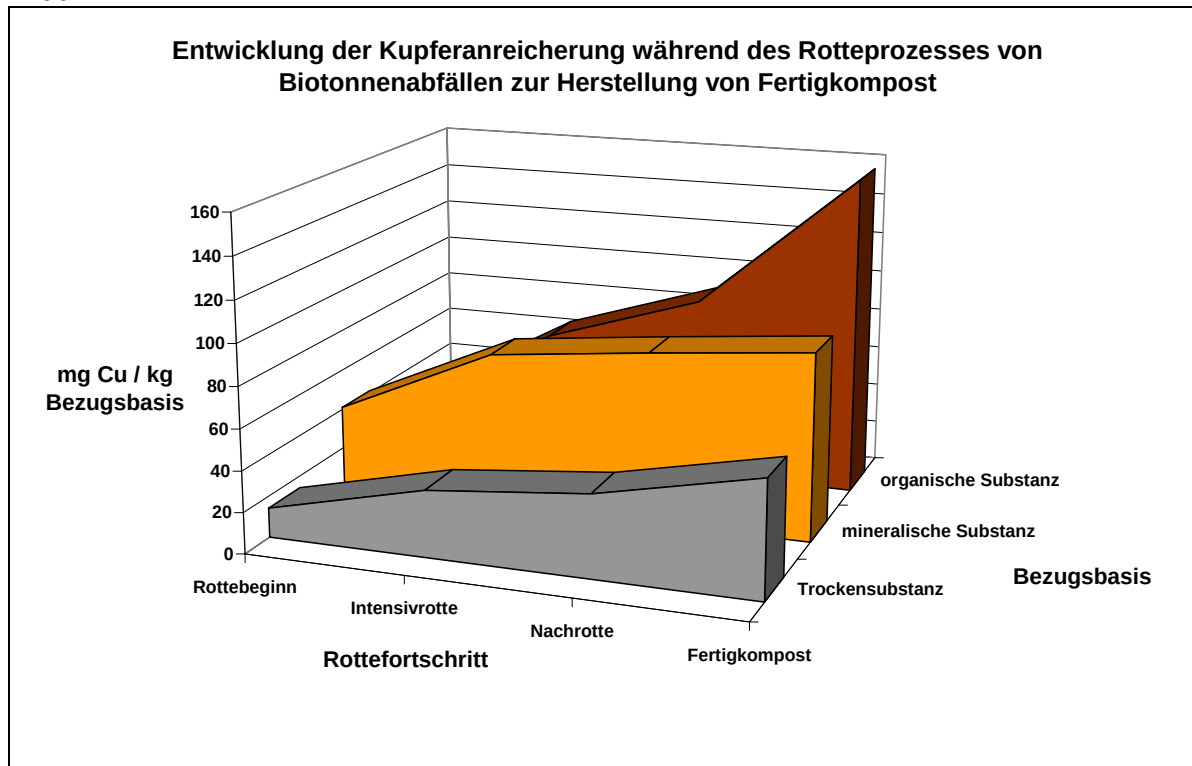
Die Grafik (siehe Abbildung 72) zeigt, dass bei der Biotonnenabfallfertigkomposterzeugung

- die Kupfergehalte in der Trockensubstanz während des Rotteprozesses stetig ansteigen,
- bezugnehmend auf den Nutzwert (oTS) eine ständige Kupferzunahme je Einheit stattfindet und
- die biochemische Umwandlung von punktuellen, meist partikulären Kupfereinträgen am stärksten im Intensivrottegut vollzieht und anschließend abklingt.

Im biochemischen Umwandlungsgeschehen punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge reagieren die 10 untersuchten Biotonnenabfallkompostierungsanlagen mit Fertigkompostherstellung weniger stark, als die Anlagen mit Frischkomposterzeugung. Das hat sicher etwas mit der bei der Frischkomposterzeugung besonders intensiven Rotteführung in ge-

schlossenen Anlagen zu tun, kann aber auch anteilig auf Unterschiede im Getrenntsammlverhalten im Einzugsgebiet hinweisen.

Abb. 72:



Die höchsten Kupfergehalte von Fertigkomposten treten bei Winteranlieferung der Biotonnenabfälle auf (siehe Tabelle 27). Das ist zwar weniger extrem ausgeprägt als bei der Frischkompostherstellung, aber deutlich erkennbar. Durch die längeren Rottezeiten können sich bei der Fertigkompostherstellung auch Vermischungen mit anderen saisonalen Herkünften einstellen.

Tab. 27:

Saisonale Vergleiche der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte bei der Fertigkomposterzeugung aus Biotonnenabfällen			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Frühjahrsanlieferung	51,6	153,4	79,5
Sommeranlieferung	55,7	158,6	87,8
Herbstanlieferung	58,8	152,0	98,2
Winteranlieferung	60,9	164,2	102,2

Auch hier zeigt sich eine besonders deutliche Reaktion bei Bezug der Kupfergehalte auf die mineralische Trockenmasse (mTS), was wiederum für einen dominanten Einfluss punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge spricht. Dabei sind Einflüsse weihnachtlicher Gebrauchsgegenstände (z.B. Weihnachts- und Adventsdekorationen bzw. Geschenkpapier mit Goldbedruck) anzunehmen. Die schon hohen punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge bei der Herbstanlieferung von Biotonnenabfällen können auf mögliche Auswirkungen von Laubsammlungen in den Hausgärten hindeuten, die möglicherweise durch Kupferdepositionen beeinflusst worden sind.

Beispielsbetrachtung für Grün- und Parkabfallfertigkompost

Die Entwicklung der untersuchten Inhaltsstoffe während des Gesamtprozesses der Fertigkomposterzeugung aus Grün- und Parkabfällen kann am Beispiel der 6 ausgewählten Anlagen wie folgt dargestellt werden (siehe Tabellen 28 und 29).

Tab. 28:

Entwicklung der Mittelwerte von Inhaltsstoffen während des Rotteprozesses bei der Grün- und Parkabfallfertigkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Wassergehalt in FM-%	Glühverlust in TS-%	Prozessverluste in TS-%
Reine Bioabfälle	54,1	75,8	0,0
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	51,7	67,4	0,0
Intensivrottegut	50,6	41,4	44,4
Nachrottegut	50,5	37,9	47,5
abgesiebter Fertigkompost	39,6	29,0	54,3

Bei der Herstellung von Fertigkompost aus Grün- und Parkabfällen sind in den für das Projekt ausgewählten 6 Kompostierungsanlagen insgesamt 54,3 TS-% Verluste an Trockensubstanz aufgetreten, wobei der größte Teil dieser Verluste durch den Abbau organischer Substanz während der Intensivrotte entstanden ist. Die Verluste in der Nachrotte, bei dem Absieben und der Zwischenlagerung im Endproduktlager waren mit etwa 10 TS-% recht gering ausgefallen.

Tab. 29:

Entwicklung der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte während des Rotteprozesses bei der Grün- und Parkabfallfertigkomposterzeugung (mit 7 % Bodeneintrag)			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Reine Bioabfälle	8,6	14,8	53,3
Bioabfälle mit 7 % Bodeneintrag	10,0	14,8	30,7
Intensivrottegut	15,0	38,7	25,3
Nachrottegut	25,3	67,9	41,0
abgesiebter Fertigkompost	35,0	124,7	50,9

Der Vergleich von an verschiedenen Kompostmerkmalen normierten Kupfergehalten während des Rotteprozesses zeigt, dass die unterschiedliche Bezugsbasis für Kupfergehalte differenzierte Aussagen ermöglicht (siehe Abbildung 73)

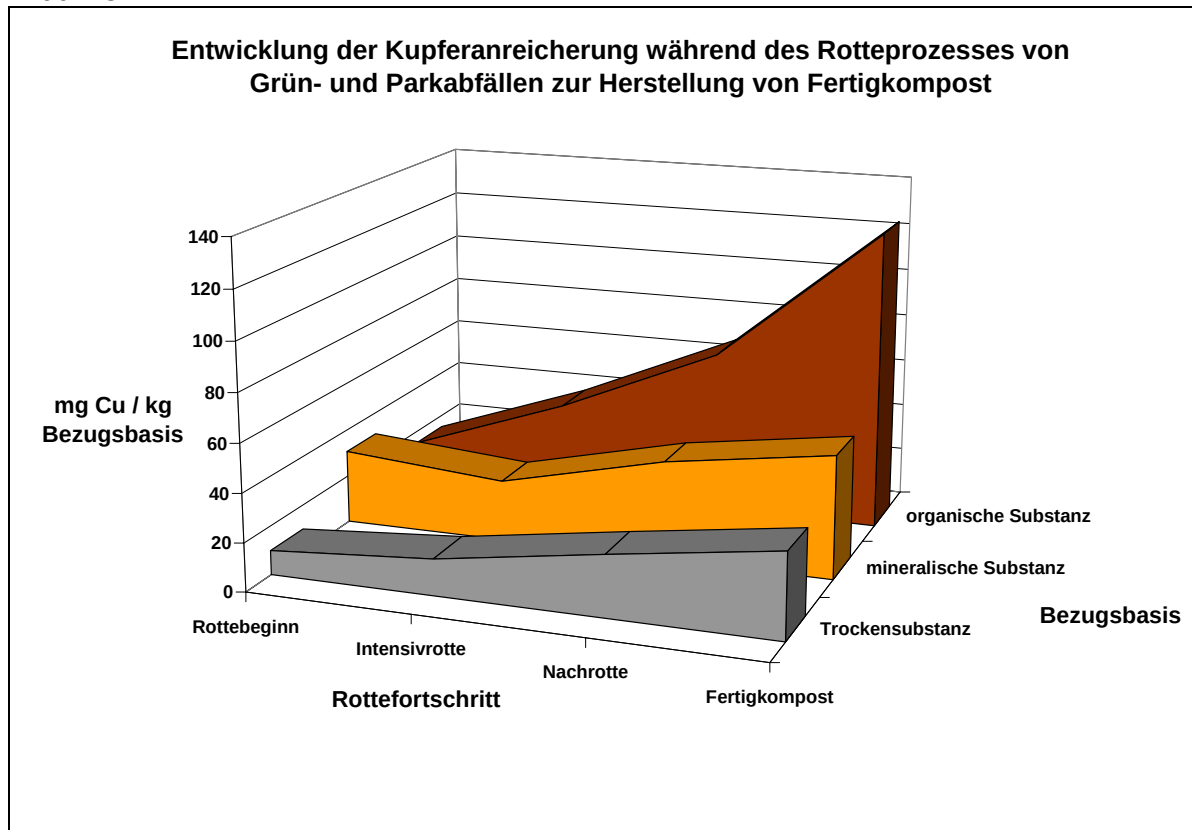
Die Grafik zeigt, dass bei der Grün- und Parkabfallkompostierung

- die Kupfergehalte in der Trockensubstanz während des Rotteprozesses gering, aber stetig ansteigen,
- bezugnehmend auf den Nutzwert (oTS) eine ständig starke Kupferzunahme je Einheit stattfindet und
- die biochemische Umwandlung von punktuellen, meist partikulären Kupfereinträgen kaum vorkommt bzw. erst in der Nachrotte beginnt und bis zur Endaufbereitung fortsetzt.

Im biochemischen Umwandlungsgeschehen punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge reagieren die 6 untersuchten Grün- und Parkabfallkompostierungsanlagen mit Fertigkompostherstellung weniger stark und deutlich verzögert, als die zuvor dargestellten Anlagen mit Biotonnenabfallkompostierung. Da die Rotteintensität (Abbau organischer Substanz) sehr

intensiv verlaufen ist, muss hier von deutlich geringeren punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen ausgegangen werden als bei den Biotonnenabfällen.

Abb. 73:



Die Kupfergehalte der Fertigkomposte aus Grün- und Parkabfällen sind über die Jahreszeiten wesentlich ausgeglichener als die aus Biotonnenabfällen. Die höchsten Kupfergehalte von Fertigkomposten treten bei Herbstanlieferung der Grün- und Parkabfälle auf. Auch hier zeigt sich eine stärkere Reaktion bei Bezug der Kupfergehalte auf mineralische Trockenmasse (mTS), was wiederum für einen gewissen Einfluss punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge spricht. Es werden auch die Auswirkungen der herbstlichen Laubsammelaktionen sichtbar, die zu den höchsten Kupfergehalten bezogen auf die Kompost-TS und besonders der Kompost-mTS führen (siehe Tabelle 30).

Tab. 30:

Saisonale Vergleiche der Mittelwerte von unterschiedlich normierten Kupfergehalte bei der Fertigkomposterzeugung aus Grün- und Parkabfällen			
beprobtes Material	Kupfergehalt in mg/kg TS	Kupfergehalt in mg/kg oTS	Kupfergehalt in mg/kg mTS
Frühjahrsanlieferung	34,0	130,4	48,4
Sommeranlieferung	33,4	123,8	46,1
Herbstanlieferung	36,4	121,6	55,5
Winteranlieferung	35,5	129,2	50,7

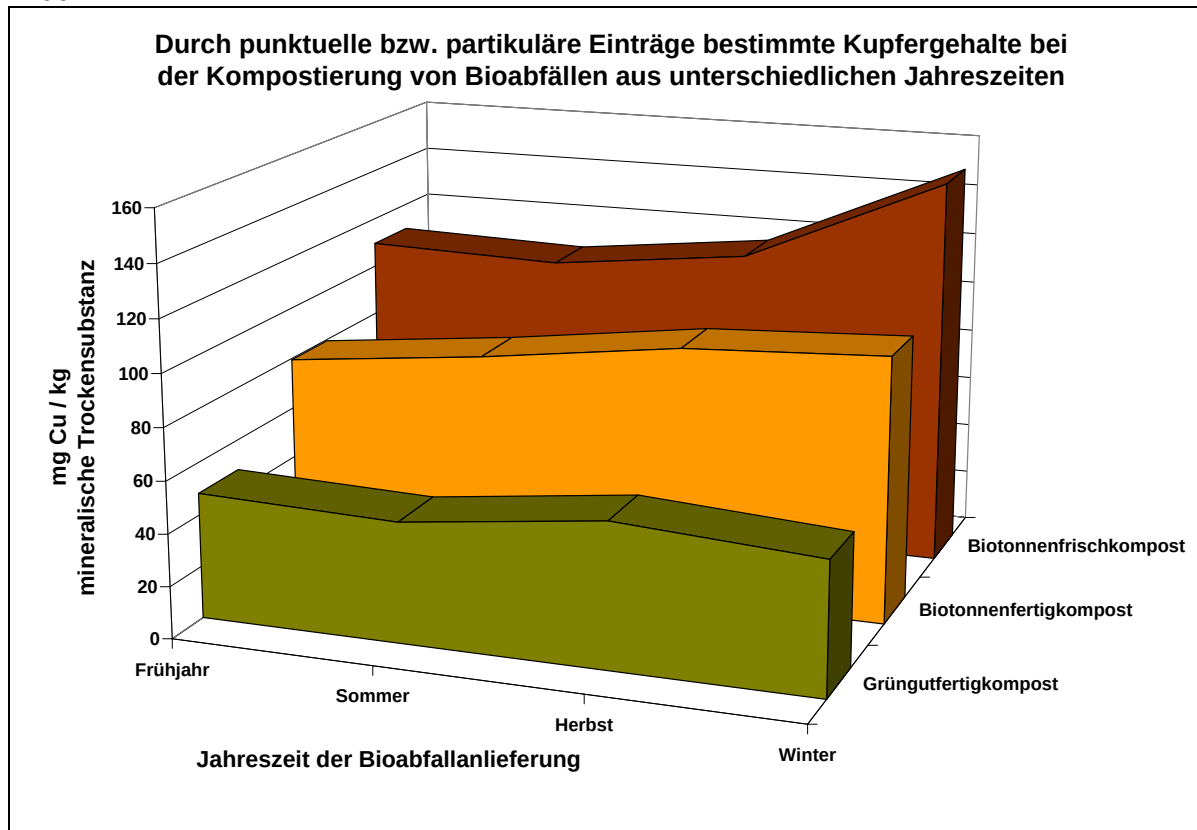
Zusammenfassende Betrachtung

Zusammenfassend kann für die drei betrachteten Beispiele festgestellt werden, dass eine biochemische Umwandlung von punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen während des Rotteverlaufs bei Biotonnenabfallkomposten vor allem während der Intensivrotte in beträcht-

lichem Maße sowie bei Grün- und Parkabfällen in geringerem Umfang erst in der Nachrotte geschieht.

Der Einfluss der Jahreszeiten der Bioabfallanlieferung ist bei den dargestellten Beispielen der Bioabfallkompostierung unterschiedlich. Dazu folgende Darstellung (siehe Abbildung 74).

Abb. 74:



Bei Biotonnenabfallkomposten zeigen sich auch hier deutliche Einflüsse punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge durch vor- und weihnachtliche Gebrauchsgegenstände (z.B. Weihnachts- und Adventsdekorationen bzw. Geschenkpapier mit Goldbedruck). Die geringere Ausprägung dieses Einflusses bei den Biotonnenabfallfertigkomposten kann durch stärkeres Vermischen mit anderen jahreszeitlichen Inputmaterialherkünften während des hier deutlich längeren Rotteprozesses erklärt werden. Anteilige Zusätze von Grün- und Parkabfällen können auch eine Rolle spielen.

Bei Grün- und Parkabfallkomposten sind solche Vermischungen noch wahrscheinlicher. So deuten sich hier leicht erhöhte Kupfereinträge durch herbstliche Laubsammelaktionen mit möglichen Straßenstaubablagerungen nur schwach an.

Die biochemischen Umwandlungen und Umverteilungen von Kupfer hängen von der Intensität der mikrobiologischen Rottevorgänge ab, die durch den Abbau von organischer Substanz während des Rotteprozesses beschrieben werden kann. Die Mikroorganismen ernähren sich von abbaubarer organischer Substanz, setzen dabei unter aeroben Bedingungen Energie frei (Selbsterwärmung im Rottekörper) und entlassen als Stoffwechselprodukte Kohlendioxid, Wasser und feinste abbaustabilere organische Substanzen.

Punktueller bzw. partikulärer Kupfer wird durch die Stoffwechselprodukte Wasser und Kohlendioxid (Kohlensäure) in Lösung gebracht und dadurch über das Interstitialwasser feinverteilt, diffundierbar und bioverfügbar. Die Kompostmikroorganismen können Kupfer aufneh-

men. Gleichzeitig kann Kupfer durch kapillare und schwerkraftbedingte Wasserbewegungen sowie durch Wachstum und Bewegung von Mikroorganismen im Rottekörper verteilt werden. All diese Vorgänge sind vorwiegend an die organischen und mineralischen Feinanteile bzw. an die Oberflächenreaktionen größerer Partikel im Rottekörper gebunden. Diese Feinanteile finden sich durch die abschließenden Siebungsvorgänge im Endprodukt wieder, während in den Siebüberlaufrückständen vor allem ungerottete, gering kupferhaltige Holzbestandteile mit geringen feinteiligen Anhaftungen verbleiben.

Die Zunahmen der mTS-normierten Kupfergehalte während des Kompostierungsverlaufs lassen auf solche biochemische Umwandlung und Umverteilung von punktuellen bzw. partikulären Kupferanteilen der eingesammelten Bioabfälle in die Feinanteile der Bioabfallkomposte schließen. Kupfer wird biochemisch aufgeschlossen und in den Feinanteilen organisch bzw. mineralisch fixiert. Auf diesem Wege verbleibt durch den abschließenden Fraktionierungsvorgang (Absieben) das Kupfer vorwiegend im Endprodukt (Kompost).

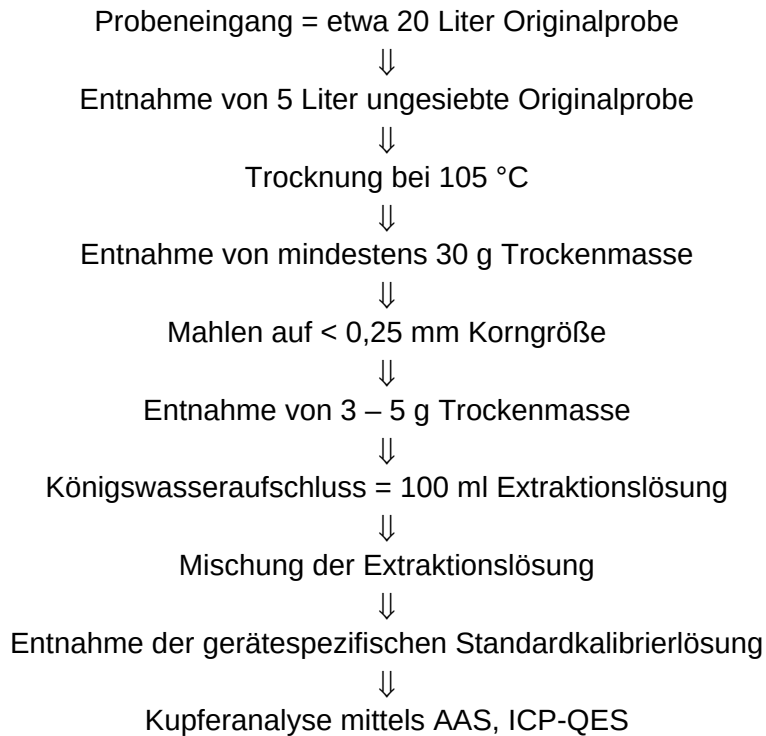
Dieser biochemische Umwandlungsprozess führt zugleich zu Veränderungen beim untersuchungstechnischen Nachweis von Kupferanteilen bzw. Kupfergehalten im Rottegut und im Kompost. Die Probenahme, die Probenaufbereitung im Labor und die Laboranalysen erfolgten entsprechend den Vorgaben der BioAbfV nach Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Komposte e.V. (Bidlingmaier et al., 2006).

Die Probenahme bei den unbehandelten Bioabfällen erfolgte dagegen nach den Grundsätzen der Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, LAGA PN 98 - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien (LAGA, 2002).

Die Probenahme der unbehandelten Bioabfälle war laut Forschungsprogramm für einzelne Bioabfallmaterialien selektiv vorgesehen und schloss damit die Erfassung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge weitgehend aus, die nur durch eine Hot-Spot-Beprobung nach LAGA PN 98 (2002) zu erfassen wären. Zufällig erfasste hohe Kupfergehalte sind nur durch Anhaftungen (z.B. kupferhaltige Pflanzenschutzmittel, Staubrückstände) oder durch oberflächige Materialbehandlungen (z.B. kupferhaltige Holzschutzmittel) zu erklären. Durch Repräsentativitätsauswertungen nach LAGA PN 98 (2002) konnten diese zumeist als nicht geeignet für die Beschreibung der Grundqualität der Bioabfallarten, also als Ausreißermesswerte gekennzeichnet und separat betrachtet werden.

Bei den geschredderten Bioabfallmischungen sowie bei dem Rottegut und den Komposten erfolgte bei der Probenahme die Herstellung von Mischproben nach BioAbfV. Diese Mischungsvorgaben gehen in der Regel davon aus, dass die einzelnen Bestandteile des zu beprobenden Materials in etwa gleiche Schüttdichten aufweisen. Das ist vor allem bei partikulären Kupfereinträgen nicht der Fall, sodass hier eine Entmischung dieser metallischen Partikel wahrscheinlich ist. In der Mischprobe sind vor allem leichtere grobstrukturierte Materialien und organische Feinanteile enthalten, die auch in der Regel über 98 % der zu beprobenden Masse ausmachen.

Bei der Probenaufbereitung im Labor erfolgt für die Kupferanalyse zuerst eine Trocknung der Probe mit anschließender Entnahme einer kleineren Mischprobe, die dann gemahlen wird. Aus dem Mahlgut wird dann die zu analysierende Probenmenge entnommen. Nach Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. entwickelt sind die jeweilige Probenmenge wie folgt:



Für Probenmaterialien mit kleinen Materialanteilen (< 2 %) mit sehr hoher Dichte (wie z.B. kupferhaltige Metallteilchen) besteht vor allem in den ersten vier Schritten der Probenaufbereitung im Labor die Möglichkeit des Auftretens von Entmischungsvorgängen. Diese Wahrscheinlichkeit ist umso größer, je grobstrukturierter und je leichter die in Bioabfällen dominanten organischen Fraktionen sind. Daraus ergibt sich, dass solche Entmischungsprozesse in Komposten mit ihren hohen Anteilen an mikrobiologisch umgewandelter, feinstrukturierter organischer Substanz (etwa 60 bis 90 % der oTS) kaum auftreten und daher zu vernachlässigen sind. Das gilt umso mehr, als bei diesen biochemischen Vorgängen Kupfer zu großen Anteilen in die Biomasse integriert wird, also nicht mehr partikulär vorliegt.

Werden jedoch unbehandelte Bioabfälle bzw. Intensivrottegut mit keinem oder geringem Anteil an mikrobiologisch umgewandelter organischer Substanz der gleichen Probenaufbereitung unterzogen, können sich die oben beschriebenen Entmischungsprozesse einstellen und damit den Nachweis der punktuellen bzw. partikulären Kupferanteile erschweren bzw. ausschließen. Das führt dann dazu, dass der Kupfernachweis untersuchungstechnisch anteilig ausgeschlossen wird. Die in diesem Punkt über den Verlauf des Kompostierungsprozesses erzielten Untersuchungsergebnisse können als Bestätigung für solch einen Prozess angesehen werden.

Für die in diesem Forschungsprojekt gestellten Aufgaben erwies sich die nachweismethodische Schwäche der Kupfergehaltsbestimmung nach BioAbfV bei den nicht oder nur schwach gerotteten Bioabfällen als vorteilhaft für das Verständnis der bei der Kompostierung vorgehenden biochemischen Umwandlungen von Kupferanteilen und für die Quantifizierung von partikulären Kupfereinträgen bei der Bioabfalleinsammlung und –behandlung.

Gleichzeitig wird damit die Notwendigkeit der schon bestehenden Einschränkung des Anwendungsbereichs der Probenahme- und Laboruntersuchungsmethoden nach BioAbfV auf die Untersuchung anwendungsfähiger organischer Dünge- und Bodenverbesserungsmittel sowie auf (hergestellte) Oberboden- und Kultursubstrate (Bidlemaier et al., 2006) bestätigt. Nur bei Einhaltung dieser Voraussetzung können Aussagen über die Grundqualität von Bioabfällen abgeleitet werden. Nach den Vorgaben der BioAbfV vorgenommene Kupferuntersuchungen in unbehandelten Bioabfällen sind somit für eine Beschreibung der Grundqualität

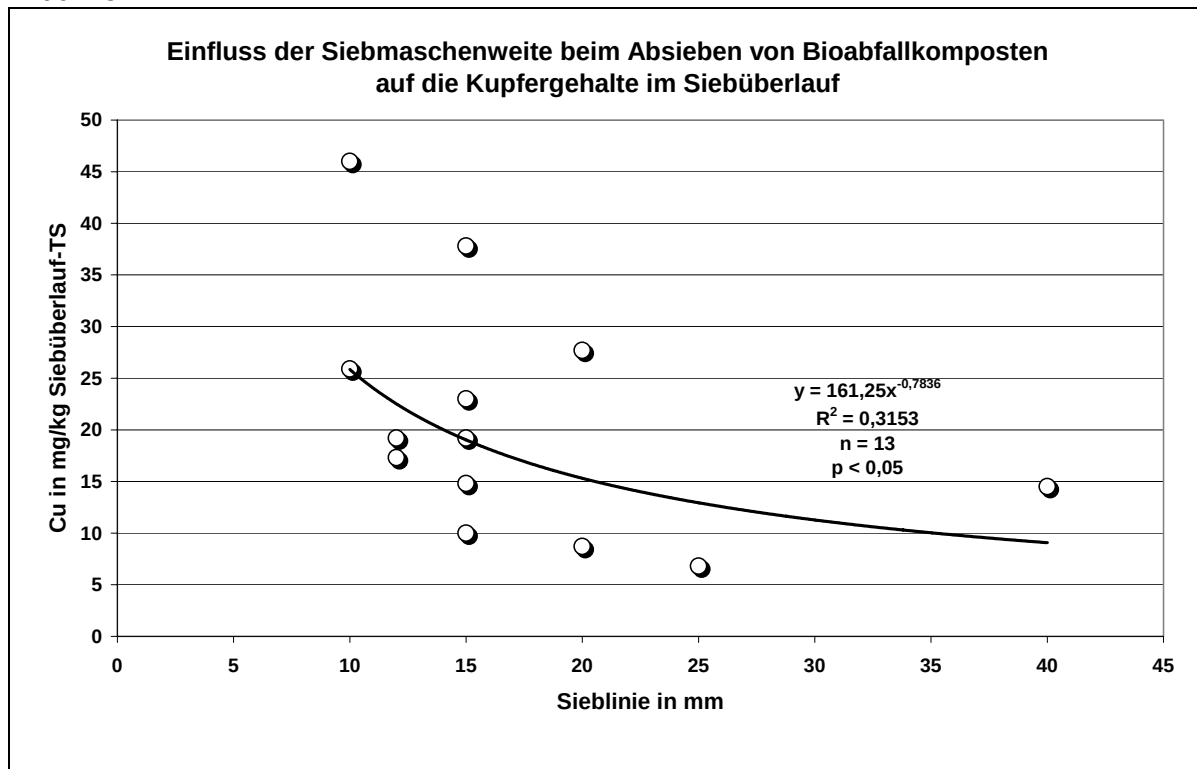
von eingesammelten, meist pflanzlichen Bioabfällen geeignet aber nicht für die daraus herstellbaren stofflichen Erzeugnisse.

Nach Rotteabschluss haben sich durch die biochemischen Umwandlungen die Kupferanteile vor allem im Feinmaterial angesiedelt. Auf diesen Effekt haben Hahn & Hoffmann (2002) bei der Behandlung von schadstoffbelasteten organischen Abfällen, insbesondere Biomüll zwecks Ausschleusung und Entfrachtung organischer und anorganischer Schadstoffe schon verwiesen.

4.3.5 Auswirkungen der Rottegutabsiebung und der Prozesswasserrückführung

Anhand der Untersuchungen von Siebüberlaufrückständen aus 13 Bioabfallbehandlungsanlagen, die beim Absieben nach Rotteabschluss in diesem F&E-Vorhaben erfolgt sind, können Auswirkungen der gewählten Siebmaschenweite (Sieblinie) auf die Kupfergehalte im Siebrückstand bestätigt werden. Es wurde ein statistisch gesicherter Zusammenhang von Sieblinie (Siebmaschenweite) und Kupfergehalten in den Siebüberlaufrückständen gefunden (siehe Abbildung 75).

Abb. 75:



Mit größerer Maschenweite der Siebe, das heißt bei grobkörnigerem Siebüberlaufrückstand wurden niedrigere Kupfergehalte im Siebüberlauf gefunden. Dabei wurden im Durchschnitt über die 13 einbezogenen Anlagen folgende Kupfermittelwerte für den Siebüberlauf und den Siebdurchgang gefunden:

- Siebdurchgang (Bioabfallkompost) 56,9 mg/kg Kompost-TS
- Siebüberlaufrückstand 20,8 mg/kg Siebüberlauf-TS

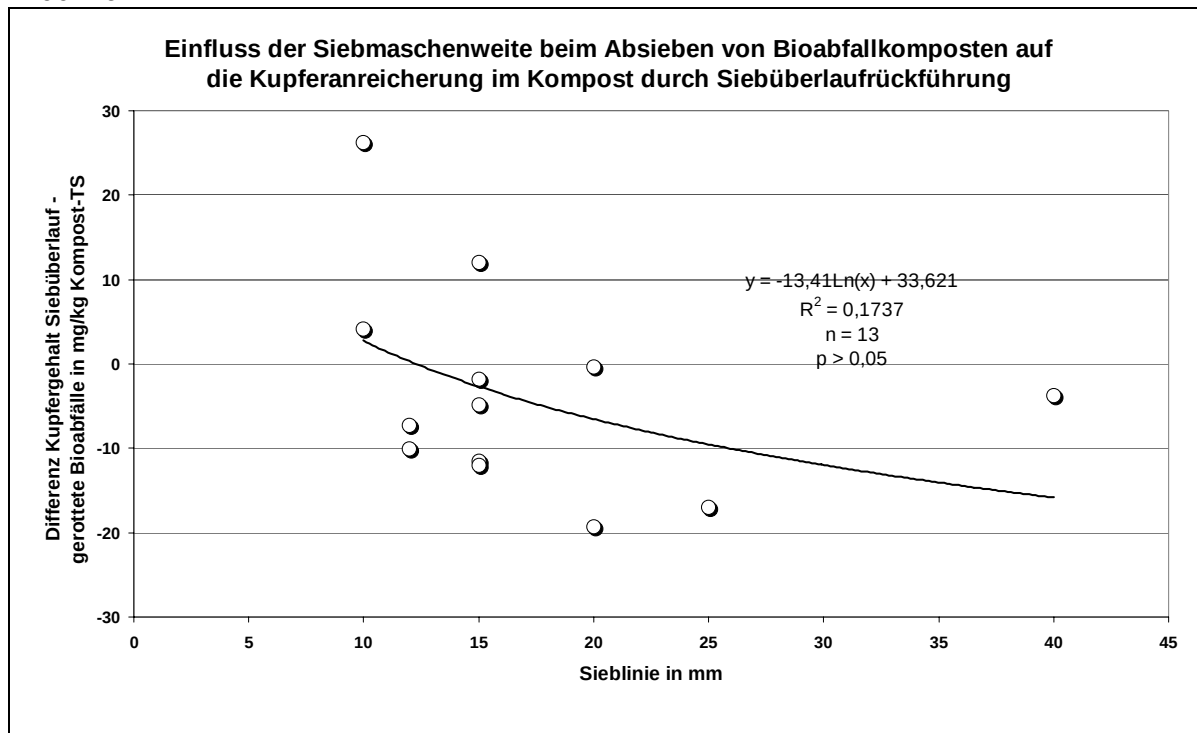
Aus diesen Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass durch ein grobmaschigeres Absieben mehr kupferarme Bestandteile im Endprodukt verbleiben und somit der Kupfergehalt im abgabefertigen Bioabfallkompost reduziert wird. Zudem werden die Menge der im Kreislauf

geführten Siebüberlaufrückstände abgesenkt und zugleich deren Kupfergehalte dem der frischen Bioabfälle angenähert. Wie weit diese Veränderung getrieben werden kann, wird in starkem Maße durch die Qualitätsanforderungen der Kompostabnehmer bestimmt. Hier kann es hilfreich sein, auf eine stärkere Bereitschaft zur Abnahme grobstrukturierter Komposte hinzuwirken.

Bei Bioabfällen mit höheren Fremdstoffanteilen (z.B. > 2 TS-%) führt eine gröbere Absiebung des Rottegutes häufig zu unzulässigen Fremdstoffgehalten im Kompost, was die Nutzung der oben beschriebenen Vorteile ausschließt. Hier kann eine Grobabsiebung (Sieblinie etwa 60 bis 80 mm) der angelieferten Biotonnenabfälle vor Rottebeginn hilfreich sein und sollte geprüft werden.

Die Auswirkungen der gewählten Siebmaschenweite auf den Einfluss einer Siebüberlaufrückführung in den Rotteprozess hinsichtlich möglicher Kupfergehaltserhöhungen in den erzeugten Komposten sollen in der Abbildung 76 verdeutlicht werden. Bei dieser Abschätzung wurde davon ausgegangen, dass die eingesetzten pflanzlichen Bioabfälle die jeweils anlagenspezifischen Prozessverlusten (mit Bodeneintrag) aufweisen und die Siebüberlaufrückstände keinen zusätzlichen Prozessverlusten mehr unterliegen.

Abb. 76:



Insgesamt konnte nur in 3 von 13 ausgewerteten Fällen eine Kupfergehaltserhöhung durch Siebüberlaufrückführungen in den Rotteprozess abgeschätzt werden. Alle anderen Auswertungsergebnisse führten zu der Aussage, dass die Bioabfälle (nach Kupferaufkonzentration durch Prozessverluste) anteilig zu höheren Kupfergehalten im Kompost führen als die Siebüberläufe. Der Zusammenhang zur Siebmaschenweite ist dabei nur angedeutet (nicht statistisch gesichert), wobei erst ab Sieblinien von 15 mm überhaupt Kupferanreicherungen in Kompost durch Siebüberlaufrückführungen aufgetreten sind.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass nur sehr geringe Maschenweiten bei der Rottegutabsiebung die Siebüberlaufrückführung als kupfergehaltserhöhenden Faktor wirksam werden lassen. Sieblinien ≥ 15 mm sind hier vorteilhaft.

Die Prozesswasserrückführung wurde in 3 der 14 untersuchten Anlagen ausgewertet. Alle anderen Anlagen betreiben keine regelmäßige Prozesswasserrückführung. Die Ergebnisse der erfassten Prozesswasserrückführungen sind in der Tabelle 31 zusammengestellt.

Tab. 31:

Kupfergehaltserhöhungen im Inputmaterial durch Prozesswasserrückführungen in das Rottegut				
Anlagen-Nr.	Inputmaterial	Cu-Gehalt im Prozesswasser		Cu-Zusatz
		mg/kg TS	mg/kg FM	mg/kg Input-TS
232	Biotonne	328,8	0,66	0,04
	Grüngut	68,7	0,34	0,02
330	Biotonne	33,2	0,38	0,36
357	Biotonne	37,3	0,21	0,07

Die Kupfergehalte in der Trockenmasse sind teilweise sehr beträchtlich, was in einer Reihe von Anlagen schon zum Verzicht auf die Nutzung von Prozesswasser für die Rottegutbefeuchtung geführt hat. Die Kupfergehalte in der Frischmasse der Prozesswässer erwiesen sich dagegen als recht ähnlich, weil die hohen Cu-TS-Gehalte in der Regel mit niedrigen TS-Gehalten in der Frischmasse verbunden sind.

Wird noch die Menge an Prozesswasserrückführung auf das angesetzte Ausgangsmaterial bezogen, so ergeben sich nur sehr geringe Kupfereinträge in des Rottegut (0,1 bis 2,5 % der pflanzlichen Kupfereinträge). Diese geringfügigen Kupfereinträge können vernachlässigt werden, zumal sie lediglich aus vorhergehenden Rottezyklen ausgetragen worden sind und damit keine echten Kupfereinträge, sondern nur deren Wirksamkeitsverzögerungen darstellen.

5. Entwicklung von Limitierungsstrategien

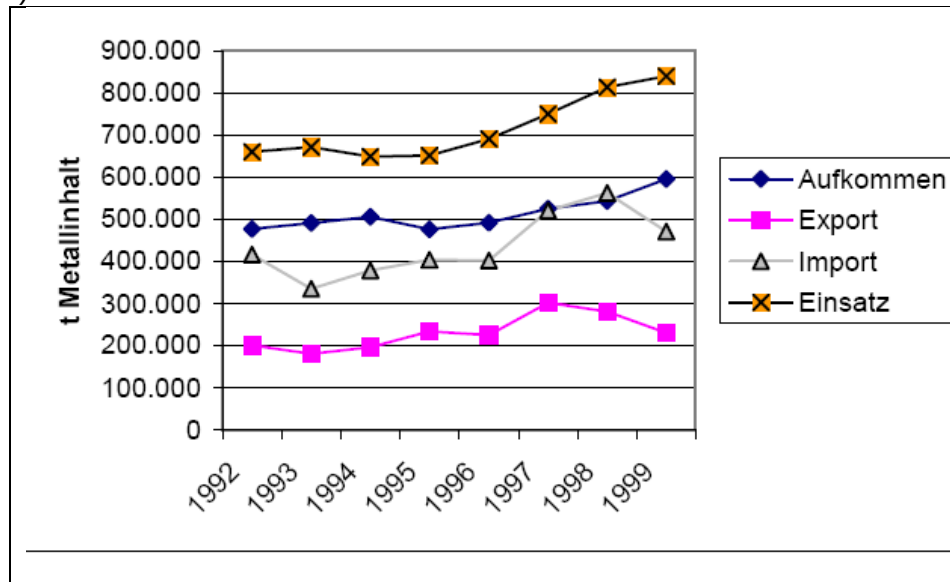
5.1 Bioabfallrelevante Stoffströme und Eintragsquellen

Für die Ableitung einer Limitierungsstrategie ist es vorab angebracht, die jährlichen Materialströme für Kupfer in Deutschland aufzuzeigen, wobei es für die Einträge in die Kompostierung nur um einen Vergleich zu den Kupferströmen in Haushalten bzw. in der Abfallwirtschaft gehen kann. Nach Erdmann et al. (2004) betrug das Aufkommen an Kupferschrott in Deutschland 596.000 t mit steigendem Trend (siehe Abbildung 77).

Mit diesen Mengen an Kupfer geht die Abfallwirtschaft in Deutschland um, erfasst sie aus Gewerbe und Haushalten, transportiert sie vom Ort des Anfalls zum Ort der Behandlung bzw. Lagerung und führt sie als Sekundärrohstoff der Kupferraffinadeerzeugung zu. Berührungspunkte zur Bioabfallbehandlung ergeben sich dabei vor allem in den privaten Haushalten, in denen sowohl Bioabfälle als auch kupferhaltige Abfälle anfallen. Zu achten ist darüber hinaus auf Verschleppungspotenziale beim Einsatz von Abfalltransportfahrzeugen. Erfolgt der Einsatz im Bereich mehrerer Abfallpfade, so ist eine intensive Reinigung der Transportflächen vor dem Bioabfalltransport erforderlich.

Nach Erdmann et al. (2004) werden jährlich schätzungsweise 17.000 t Kupfer in Siedlungsabfälle eingetragen, wobei zu den Quellen vor allem mülltonnengängige EE-Geräte und andere Kleinanwendungen wie Büroklammern und Kugelschreiberfedern gehören. Verschleppungen solcher Kupferresten durch Abfalltransportfahrzeuge müssen praktisch ausgeschlossen sein.

Abb. 77: Aufkommen, Außenhandel und Einsatz von Kupferschrott in Deutschland (Erdmann et al. 2004)



Erdmann et al. (2004) nennen auch einen Kupferbestand in Haushalten (Haushalt- und Gebrauchsgüter, wie Gefäße, Zierrat, Kleinteile u.ä.) von 40.000 – 80.000 t, dem jährlich 10.000 – 20.000 t zugeführt werden. Hier kann eine vergleichbare Menge an jährlichem Austrag aus den Haushalten angenommen werden.

Die für die Siedlungsabfallbehandlung relevanten Kupferabfallströme können also am Beispiel des Jahres 1999 wie folgt zusammengefasst werden:

- Kaum erfasste Kupferausträge aus Haushalten ≈15.000 t/a
- Kupfer in Siedlungsabfällen ≈17.000 t/a

Mit den zuletzt genannten Mengen von etwa 32.000 t Kupfer pro Jahr können die Bioabfälle (als Bestandteil der gesamten Siedlungsabfälle) über Fehlwürfe grundsätzlich in Berührung kommen, was durch eine konsequente Getrenntsammlung weitgehend zu verhindern ist.

Wie gut die Getrenntsammlung funktioniert kann nun mit einer Betrachtung aus den Ergebnissen dieses F&E-Vorhabens untersetzt werden. Dazu werden die Angaben des Statistischen Bundesamtes zur Bioabfallverarbeitung nach Biotonnenabfällen (Abfälle aus der Biotonne) und nach Grün- und Parkabfällen (biologisch abbaubare Abfälle) für das Jahr 2005 mit den in diesem Projekt gewonnenen Untersuchungsergebnissen in Verbindung gesetzt, was zu den Ergebnissen in der Tabelle 32 führt.

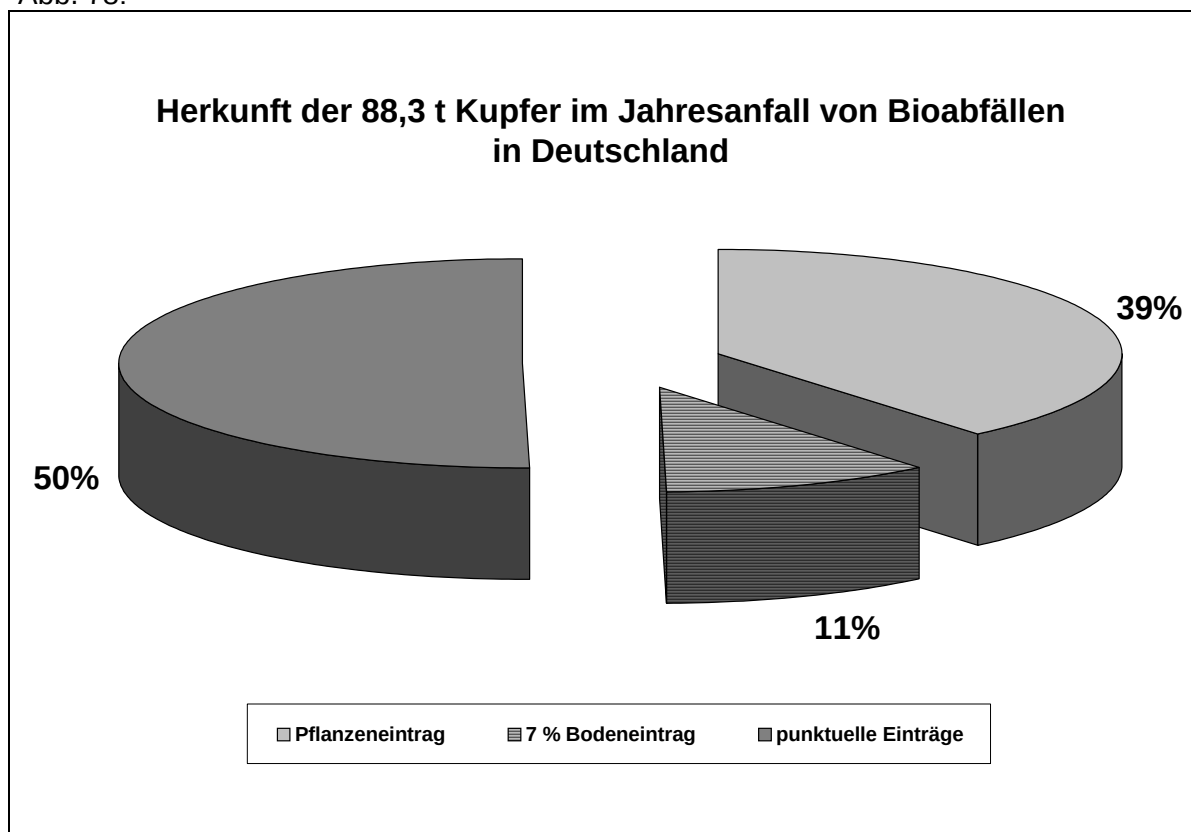
Die prozentualen Anteile der nachgewiesenen Eintragspfade an Kupfer sind in der nachfolgenden Grafik zusammengefasst (siehe Abbildung 78). Es ist darauf zu verweisen, dass es sich hierbei für die Kupfereinträge durch Bodenanhänge um Mindestwerte handelt (weil 70 % Ausschöpfung der BBodSchV-Vorsorgewerte vorausgesetzt sind) und damit die punktuellen bzw. partikulären Quellen als Höchstwerte ausgewiesen sind.

Die an dieser Stelle für alle Bioabfälle berechneten Kupfermengen von etwa 88,3 t/a können auf ihre Plausibilität an den Aussagen von Hillenbrand et al. (2005) zum Kupfereintrag durch Bioabfallkompostanwendung auf Böden geprüft werden. Dort werden 73 t Kupfer pro Jahr genannt. Die Differenz von lediglich 15,3 t Cu / a kann dahingehend gedeutet werden, dass nicht alle der für das Jahr 2005 genannten Bioabfallmengen in die stoffliche Verwertung (Kompostierung) geflossen sind. Hier sind energetische Verwertungswege (z.B. Verbrennung) immer stärker beteiligt.

Tab. 32:

Ableitung der Kupfermengen bei der Bioabfallkompostierung in Deutschland				
Datenquelle für Abfallmengen: Statistisches Bundesamt (2007)				
Datenquelle für Abfallmengen	Maßeinheit	Biotonnenabfälle	Grün- und Parkabfälle	Bioabfälle gesamt
Abfallmengen				
Aufkommen 2005	t FM/a	3823700	4074000	7897700
Wassergehalt	FM-%	63,4	51,7	57,4
Aufkommen 2005	t TS/a	1399474	1967742	3367216
Kupfergehalte				
Pflanzeneintrag	mg Cu/kg TS	11,7	9,1	10,2
Bodeneintrag		3,1	2,7	2,8
punktueller Einträge		18,2	9,6	13,2
Gesamt		33,0	21,4	54,4
Kupfermengen				
Pflanzeneintrag	t Cu/a	16,4	18,0	34,4
Bodeneintrag		4,3	5,3	9,6
punktueller Einträge		25,5	18,9	44,4
Gesamt		46,2	42,1	88,3

Abb. 78:



Direkt verglichen werden können die aus Haushalten stammenden Biotonnenabfälle mit den abfallwirtschaftlich relevanten Kupferströmen. Die Kupfermengen über die Grün- und Parkabfallkomposte sind dagegen nicht an die Eintragspfade über Haushalte gebunden. Dafür ist eher ein Vergleich zu Kupferfreisetzungen aus dem Verkehrsgeschehen, von Oberleitungen und von Dächern angebracht (Hillenbrand et al., 2005).

Betrachtungen zu Biotonnenabfällen

Die im Jahr 2005 angefallenen Biotonnenabfälle enthalten (bei Berücksichtigung der in diesem Projekt untersuchten Inputmaterialien aus 14 Anlagen) folgende eintragspfadgebundenen Kupfermengen:

Herkunft:	- pflanzliche Kupfereinträge	16,4 t/a
	- bodenbürtige Kupfereinträge (unbelastete Böden)	4,3 t/a
	- punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge	25,5 t/a

Die pflanzlichen und die bodenbürtigen Kupfereinträge können kaum mit den abfallwirtschaftlichen Kupferströmen aus Haushalten in Verbindung gebracht werden. Verbleiben somit vor allem die Kupfereinträge aus punktuellen bzw. partikulären Quellen. Daraus ergibt sich ein Mengenvergleich von siedlungsabfallrelevanten etwa 32.000 t Cu / a zu maximal 25,5 t Cu / a, die punktuell bzw. partikulär aus Haushalten in die Biotonnenabfälle gelangen. Das sind 0,08 % der in den Haushalten anfallenden Kupfereinträge. Nur dieser geringe Kupferanteil wird maximal als punktueller bzw. partikulärer Kupfereintrag über das Fehlwurfverhalten der Bürger in Biotonnenabfällen wirksam. Aus dieser Sicht kann die häusliche Getrennthaltung der Bioabfälle von Kupferabfällen als sehr erfolgreich eingeschätzt werden.

Die Kupfergehalte der pflanzlichen Materialien in den Biotonnenabfällen der untersuchten 14 Beispielsanlagen zeigen keine pflanzenphysiologischen Auffälligkeiten, d.h. sie liegen innerhalb der Normalbereiche für Kupfergehalte in Pflanzenteilen. Im Vergleich zu Datensammlungen für Bioabfallqualitäten früherer Jahre sind sogar Tendenzen in Richtung aktuell niedrigerer Kupfergehalte in Pflanzenteilen zu erkennen. Hier zeigt sich ein Rückgang von Anteilen an kupferbehandelten Inputmaterialien. Vergleichbares gilt für die unvermeidbaren Kupfereinträge über Bodenzusätze (5 bis 12 % der Frischmasse). In Gebieten mit Bodenkupfergehalten über den Vorsorgewerten der BBodSchV sind hier gewisse Einträge an Kupfer zu erwarten, die jedoch bei regionaler Kompostverwertung keine zusätzlichen Kupfereinträge in Böden verursachen können.

Unter Punkt 4.1.4 wurde für frische, unbehandelte Biotonnenabfälle aus Einsammelgebieten mit höheren Kupferanteilen im Dachbereich (vor allem Dachrinnen) eine mittlere Zunahme der Kupfergehalte um 3,6 mg/kg TS festgestellt. In diesen Gebieten kann langfristig eine Reduzierung der Kupfergehalte erreicht werden, wenn die Regenwassernutzung in den Hausgartenbereichen eingestellt wird bzw. durch Barriersysteme, besser aber durch Substitution der Kupferanteile im Dachbereich keine zusätzliche Kupferversorgung der Gartenpflanzen mehr erfolgt. Die Kupfereinträge aus Deposition reichen heute in der Regel schon für die Mindestversorgung der Pflanzen mit diesem Mikronährstoff aus. Ein Rückgang der Kupfergehalte in den Bioabfällen wird sich selbst bei vollständiger Eintragsvermeidung nur sehr allmählich einstellen können, weil die in den Böden schon langfristig akkumulierten Kupfermengen nachwirken.

Wird davon ausgegangen, dass die oben genannten 3,6 mg Cu/kg Biotonnenabfalltrocken substanz in den bei der Betroffenheitsanalyse (Punkt 2.2) ausgewiesenen 27,6 % der Inputmenge reduzierbar sind, so können durch Vermeidung von Kupferflüssen aus den Dachbereichen langfristig die Kupfereinträge in die Bioabfallbehandlung und –verwertung um etwa

3,8 t/a gesenkt werden. Das entspricht einer Gesamtreduzierung der Kupferstoffströme bei der Biotonnenabfallverwertung von 8,2 %.

Betrachtungen zu Grün- und Parkabfällen

Die im Jahr 2005 angefallenen Grün- und Parkabfälle enthalten folgende eintragspfadgebundenen Kupfermengen zu:

Herkunft:	- pflanzliche Kupfereinträge	18,0 t/a
	- bodenbürtige Kupfereinträge (unbelastete Böden)	5,3 t/a
	- punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge	18,9 t/a

Die pflanzlichen und bodenbürtigen Kupfereinträge stehen auch hier kaum zur Disposition. Ein Vergleich bietet sich aber zu den Kupferfreisetzungangaben von Hillenbrand et al. (2005) an, wo folgende urbane Quellen für Kupfereinträge in Böden genannt werden, die für die Sammelgebiete von Grün- und Parkabfällen Bedeutung haben können:

- Kraftfahrzeugverkehr (Bremsbeläge)	797 t/a
- <u>Oberleitungen (z.B. Straßenbahnen)</u>	<u>136 t/a</u>
- für Grün- und Parkabfälle potenzielle Eintragsquellen	933 t/a

Diesen 933 t Cu / a stehen 18,9 t Cu / a gegenüber, die in den Grün- und Parkabfällen als externe Einträge ermittelt worden sind. Das sind 2 % der hier als potenzielle Eintragsquellen genannten Kupfermengen. Bei diesen geringen Anteilen können auch etwas weitere Verteilungsstrecken über Staubverwehungen angenommen werden. Straßenbegleitgrün sollte dagegen in der Regel nur in die Bioabfallbehandlung einbezogen werden, wenn die in diesem Bericht genannten Vertrauensbereiche für diese pflanzlichen Inputmaterialien eingehalten werden (siehe Punkt 4.1.2).

Als Eintragsquellen kommen zudem noch Reste von behandelten Hölzern in Frage, die beim Gehölzschnitt als kleinteilige Fehlwürfe mit eingeschleppt werden können (z.B. von Einzäunungen, Parkbänken). Für die bei Grün- und Parkabfällen mit 6,1 mg Cu je kg Input-TS ausgewiesenen punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge können schon z.B. Zusätze von etwa 0,3 TS-% behandeltem Zaunholz ausreichen, um diese Menge an externen Kupfereinträgen zu untersetzen.

5.2 Reduzierungspotenziale

Die Reduzierungspotenziale für Kupfergehalte in Bioabfallkompostierungsanlagen sind in folgende drei Richtungen zu diskutieren:

- Vermeiden von Kupfereinträgen über die Inputmaterialien
- Reduzierung der Aufkonzentration von Kupfer durch Prozessverluste
- Einzelfallbezogene Reduzierungspotenziale

Bei den Biotonnenabfallkomposten fallen die Reduzierungspotenziale im Durchschnitt erwartungsgemäß deutlich höher aus, als bei den Grün- und Parkabfallkomposten. In beiden Bereichen sind jedoch Anlagen betrachtet worden, die schon den Gehalte ohne externe Kupfereinträge sehr nahe gekommen sind bzw. diese erreicht haben. Diese Anlagen sind alle der Anlagengruppe Z zugeordnet, also im Berliner Raum ansässig. Das kann eventuell im Zusammenhang mit der in Berlin deutlich geringeren Sammelquote an Biotonnenabfällen pro Kopf der Bevölkerung stehen (Gosten, 2008), was jedoch im Detail zu überprüfen wäre.

5.2.1 Vermeiden von Kupfereinträgen über die Inputmaterialien

Als wesentliche Quellen von Kupfereinträgen in die Bioabfallkomposte wurden folgende herausgearbeitet:

Punktuelle bzw. partikuläre Einträge > pflanzliche Einträge > Bodeneinträge (unbelastet)

Zusammenfassend lässt sich folgende Übersicht zu den im Projekt ermittelten Kupfereinträgen in die Bioabfallbehandlung und deren Reduzierbarkeit darstellen (siehe Tabelle 33).

Tab. 33:

Kupfereinträge bei der Bioabfallbehandlung in den 14 ausgewählten Anlagen (ohne Aufkonzentration) in mg Cu/kg Ausgangsmaterial-TS				
Anlage Nr.	Produkt	pflanzliche Einträge	Bodeneinträge (unbelastet)	punktuelle bzw. partikuläre Einträge
Biotonnenabfallbehandlung				
17	Fertigkompost	10,4	4,2	11,5
75	Fertigkompost	16,1	3,1	22,4
232	Frischkompost	17,1	2,4	17,0
262	Fertigkompost	11,7	2,9	6,2
325	Frisch- und Fertigkompost	8,5	4,0	15,5
330	Fertigkompost	13,3	2,7	8,2
347	Fertigkompost	14,2	2,4	21,5
355	Fertigkompost	10,4	2,6	16,5
357	Fertigkompost	9,0	2,6	26,9
359	Frischkompost	12,6	3,1	33,4
371	Frischkompost	9,5	3,5	18,9
371	Fertigkompost	9,5	3,5	17,3
373	Fertigkompost	10,3	2,9	21,7
Biotonnenabfall, gesamt		11,7	3,1	18,2
		kaum reduzierbar	nicht reduzierbar	nur langfristig reduzierbar
Grün- und Parkabfallbehandlung				
17	Fertigkompost	6,1	2,4	9,9
107	Fertigkompost	10,7	2,6	3,5
232	Fertigkompost	12,9	2,4	10,9
325	Fertigkompost	10,0	2,5	4,9
326	Fertigkompost	6,2	3,5	17,5
359	Fertigkompost	8,9	2,7	10,8
Grün- und Parkabfall, gesamt		9,1	2,7	9,6
		kaum reduzierbar	nicht reduzierbar	nur langfristig reduzierbar

Die Kupfereinträge über Pflanzenreste und deren Bodenanhänge weisen kaum Reduzierungspotenziale auf (ausgenommen bei Einträgen von Dächern mit Kupferelementen). Die pflanzlichen Bioabfälle liegen in ihren Kupfergehalten in der Regel weit unter den pflanzenphysiologischen Richtwerten von 30 mg Cu je kg organischer Trockensubstanz. Vereinzelt sind Ausnahmen nur bei Laubabfällen (z.B. anteilige Staubauflagen), unbehandelten Holzab-

fällen (z.B. geringfügige Verunreinigungen durch behandelte Holzreste) und bei gemischten Bioabfällen (z.B. Aufkonzentration durch Vorrotte) aufgetreten. Die erhöhten Kupfergehalte der untersuchten Pflanzenreste liegen zudem sehr weit unter den Anforderungen der Bioabfallverordnung.

Ein deutlicher Einfluss von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln auf die Kupfergehalte von pflanzlichen Bioabfällen konnte in diesem F&E-Projekt nicht erkannt werden. Die im Vergleich zu früheren Messreihen aktuell niedrigen Kupfergehalte der untersuchten Pflanzenrückstände lassen solche Vermutungen auch nicht zu.

Für die Bodenanhänge bei Bioabfällen kann in der Regel von unbelasteten Herkünften ausgegangen werden. Diese führen zwar zu einem Kupfereintrag in die Bioabfallbehandlungsanlage, können bei Rückführung in das Einsammelgebiet keine zusätzlichen Bodengehaltserhöhungen verursachen, lediglich eine geringfügige Kupferverlagerung. Das gilt auch für fallweise mögliche Anhänge von Böden mit erhöhten Kupfergehalten, wenn die dadurch kupfergehaltserhöhten Komposte in der Einsammelregion verbleiben.

Insgesamt zeigt sich, dass für die zu reduzierenden Kupfereinträge vor allem die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in Bioabfälle entscheidend sind. Um dieses regional stark differierende Kupfereintragspotenzial mindern bzw. ausschließen zu können, müssen jedoch die Kupferausträge aus den Haushalten für den getrenntsammelnden Bürger deutlich erkennbar und damit überhaupt erst beeinflussbar sein. Das ist derzeit nicht gegeben.

Unter Punkt 4.3.2.3 sind Angaben enthalten, welche geringen Zusatzmengen an kupferbelasteten Stoffen für das Beseitigen der ausgewiesenen Reduzierungspotenziale bei Biotonnenabfallfertigkomposten ausreichen (z.B. Geschenkpapier mit Golddruck 0,02 %, behandeltes Zaunaltholz 0,9 % oder Hausstaub 1,4 % in der Bioabfall-TS). Bezogen auf die nasse Bioabfallfrischmasse ergeben sich hier noch weitaus niedrigere Anteile (etwa um den Faktor 3 bis 6). Es reichen also schon unbeachtete Restmengen oder Anhaftungen, um diese kupfergehaltserhöhenden Zusätze in Bioabfällen und den daraus erzeugten Komposten auszulösen.

Sollen die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in Bioabfälle mit Sicherheit ausgeschlossen werden, ist es notwendig, die Quellen dieser Kupfereinträgen in den Haushalten zu beseitigen. Dazu ist langfristig der Neuzugang kupferhaltiger Gegenstände in die Haushalte hinein zu vermeiden bzw. eine Freisetzung von Kupfer im Bioabfallstrom nachhaltig auszuschließen (z.B. durch widerstandsfähige Beschichtung), was dann unter Berücksichtigung der jeweiligen Umschlagszeit bzw. Nutzungsdauer dieser Gegenstände zu einem allmählichen Rückgang der Kupfereinträge in Bioabfälle führt. Zu den für Kupfer vorhandenen bzw. zu entwickelnden Substitutionspotenzialen bzw. Barriersystemen gegen ungehinderte Freisetzungen in die Umwelt sei hier auf die Ausführungen von Erdmann et al. (2004) und Hillenbrand et al. (2005) verwiesen. Für die Biotonnen- sowie für die Grün- und Parkabfälle sind dabei besondere Schwerpunkte zu setzen.

Der Schwerpunkt für die Vermeidung von punktuellen und partikulären Kupfereinträgen in Biotonnenabfälle besteht in der Substitution kupferhaltiger Chemikalien und Kleinmetallgebrauchsgegenstände, die an bzw. in z.B. Textilien, Verpackungsmaterial, Büromaterial, Getränkebehältern, Pflanzenschutzmitteln oder Holzgegenständen vorkommen. Solange über solche diffusen, durch die Bürger nicht deutlich zu identifizierenden Kupfereinträge in die Haushalte deren Anstrengungen der Getrenntsammlung kontakariert werden, können die oben genannten Gehalte ohne externe Kupfereinträge für Biotonnenabfallkomposte nicht ernsthaft angestrebt werden. Neue Kupfereinträge können sogar entstehen und eine Ausweitung der punktuellen bzw. partikulären Quellen bewirken.

In diesem Zusammenhang soll hier angeregt werden, für kupferhaltige Gebrauchsgegenstände ein Qualitätssicherungssystem zu entwickeln, mit dem das Schadstoff-Verschleppungs- und -Freisetzungspotenzial von Produkten, hier bezogen auf Kupfer, für den Bürger erkennbar wird. Organische Produkte und ihre Verpackungen können damit als biotonnenfähig bzw. –gefährdend gekennzeichnet werden. Als erster Schritt wäre hier eine freiwillige Kennzeichnung denkbar. Durch solch ein Herangehen kann wesentlich die Sensibilisierung der Bevölkerung gegenüber kupferhaltigen Gebrauchs- und Ziergegenständen gefördert werden.

Für die Grün- und Parkabfälle gilt Ähnliches wie für die Biotonnenabfälle. Hier sind die Substitutions- bzw. Freisetzungsvermeidungspotenziale jedoch vor allem für den Kraftverkehrsbereich (Bremsbeläge), die Oberleitungen und den Holzschutz zu sehen, also mehr im Bereich der Wirtschaft angesiedelt.

Die oben beschriebenen, grundsätzlich vorhandenen Reduzierungspotenziale durch Vermeidung von punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträgen in die Bioabfallmaterialströme können derzeit und auch in absehbarer Frist praktisch nicht umgesetzt werden. Sie werden in diesem Projekt erfasst und ausgewiesen, können aber nicht in die Zielstellung für Strategien der Bioabfallbehandlungsanlagenbetreiber eingehen. In den weiteren Betrachtungen wird daher davon ausgegangen, dass die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge in dem derzeit gegebenen Maße mittelfristig weiter wirksam bleiben.

5.2.2 Reduzierung der Aufkonzentration von Kupfer durch Prozessverluste

Prozessverluste an organischer Substanz führen zwangsweise zu einer Aufkonzentration von Kupfergehalten im Rottegut. Die Prozessverluste beruhen einerseits auf dem mikrobiologischen Abbau von organischer Substanz (Rotteverluste) und andererseits auf der Aushaltung vorwiegend organischer Stoffe durch Fraktionierungsarbeitsgänge (z.B. Siebüberlauf).

Dazu folgende Übersicht zu den Ergebnissen für die im Projekt untersuchten 14 Bioabfallbehandlungsanlagen (siehe Tabelle 34).

Mit einer Verringerung an Prozessverlusten erfolgt zwar kaum eine Minderung der Gesamtfracht, die Relation von Kupfer (Schadstoff) zur organischen Substanz (Wertstoff) der Komposte wird jedoch deutlich verbessert. Das kann vor allem bei den Biotonnenabfallkomposten umgesetzt werden, die meist als organische NPK-Düngemittel Inverkehr gebracht werden. Für landwirtschaftliche Düngezwecke ist eine abbauintensive Prozessführung, die vor allem dem Ziel der Erzeugung abbaustabiler Ausgangsstoffe für Oberböden und Kultursubstrate dient, nicht zwingend.

Bei der Kompostierung von Grün- und Parkabfällen steht dagegen die Erzeugung von abbaustabilen organischen Zuschlagstoffen für die Oberboden- und Kultursubstratherstellung im Mittelpunkt. Eine Senkung von Prozessverlusten würde diese hochwertige Verwertung ausschließen, da dann die erforderliche Abbaustabilität der Komposte nicht zu gewährleisten ist.

So muss auch die Nutzbarkeit der Kupfergehaltsreduzierungspotenziale durch Minderung von Prozessverlusten differenziert gesehen werden. Für die Herstellung von organischen NPK-Düngern, die der einfachen Humusreproduktion und zur Nährstoffversorgung dienen sollen, können die Prozessverluste auf das für die hygienisierungsrelevante Selbsterhitzung notwendige Maß gesenkt werden. Dieser Mindestverlust kann nach Reinhold (1972) mit etwa 30 % Verlust der Trockenmasse angegeben werden. Für die 14 ausgewählten Anlagen wur-

de auf dieser Basis die praktisch mögliche Kupfergehaltsreduzierung durch Senkung der Prozessverluste ausgewiesen.

Für die Biotonnenabfallkomposte ergibt sich aus einer durch die Hygienisierungsanforderungen der BioAbfV begrenzten Aufkonzentrationsminderung ein anteiliges Reduzierungspotenzial der Kupfergehalte in Höhe von Durchschnittlich etwa 10 mg/kg Kompost-TS. Bei den Grün- und Parkabfallkomposten ist diese Gehaltsreduzierung zumeist wegen der Produktionsausrichtung auf die Substratherstellung bzw. Bodenverbesserung nicht erschließbar.

Tab. 34:

Kupferaufkonzentrationen durch Prozessverluste bei der Bioabfallbehandlung in den 14 ausgewählten Anlagen				
Anlage Nr.	Produkt	Cu-Einträge durch Inputmaterialien	Cu-Aufkonzentration durch Prozessverluste	Minderung der Aufkonzentration durch Prozessverlustsenkung auf 30 TS-%
		mg/kg Input-TS	mg/kg Kompost-TS	
Biotonnenabfallbehandlung				
17	Fertigkompost	26,1	14,7	3,5
75	Fertigkompost	41,6	6,3	0,0
232	Frischkompost	36,5	15,2	0,0
262	Fertigkompost	20,8	10,6	1,7
325	Frisch- und Fertigkompost	28,0	18,5	6,5
330	Fertigkompost	24,2	20,9	10,6
347	Fertigkompost	38,1	7,0	0,0
355	Fertigkompost	29,5	32,7	20,0
357	Fertigkompost	38,5	46,3	29,8
359	Frischkompost	49,1	33,8	12,7
371	Frischkompost	31,9	19,7	6,0
371	Fertigkompost	30,3	25,1	12,1
373	Fertigkompost	34,9	46,6	31,7
Biotonnenabfall, gesamt		33,0	22,9	10,4
		nur langfristig reduzierbar	anteilig reduzierbar	
Grün- und Parkabfallbehandlung				
17	Fertigkompost	18,4	14,3	6,4
107	Fertigkompost	16,8	15,3	8,0
232	Fertigkompost	26,2	3,9	0,0
325	Fertigkompost	17,4	12,8	5,3
326	Fertigkompost	27,2	55,2	43,6
359	Fertigkompost	22,4	10,4	0,8
Grün- und Parkabfall, gesamt		21,4	18,7	10,7
		nur langfristig reduzierbar	nicht reduzierbar	

5.2.3 Einzelfallbezogene Reduzierungspotenziale

Neben den oben beschriebenen allgemein bestehenden Reduzierungspotenzialen ergeben sich durch regionale Besonderheiten weitere fallweise möglichen Eintragspfade von Kupfer in die Bioabfallbehandlungsanlagen, die nachfolgend behandelt werden sollen. Das betrifft zum Einen Einträge über Pflanzenreste, die aus Gebieten mit erhöhtem Kupferanteil in Dachbereichen von Wohnbebauungen eingesammelt werden. Zum Anderen können in regionalen Einzelfällen durch Anhaftungen kupferhaltiger urbaner Böden bei Bioabfällen Kupfergehaltserhöhungen bei Komposten entstehen.

Für Biotonnenabfallbehandlungsanlagen, deren Einsammelgebiet durch höhere Kupferanteile in den Dachbereichen der Wohnbauten gekennzeichnet sind, können durch Vermeidung des hausgartengebundenen Wirkungspfades (Dach mit Kupferanteilen $\Rightarrow$ Regenwasserfassung/-aufbereitung $\Rightarrow$ Boden/Pflanze $\Rightarrow$ Biotonne $\Rightarrow$ Bioabfallbehandlungsanlage) langfristig weitere Reduzierungspotenziale für Kupfergehalte in den Komposten erschlossen werden. Das betrifft jedoch höchstens etwa 28 % der gesamten Biotonnenabfallkompostierung. Werden für diese Anlagen mittlere Bedingungen der Aufkonzentration von Kupfer in den Komposten infolge der aktuell festgestellten Gesamtprozessverluste berücksichtigt, ergeben sich hier folgende Reduzierungsbeiträge für die Kupfergehalte in Kompost:

- für Biotonnenabfallfrischkomposte um 5,1 mg Cu/kg Kompost.TS
- für Biotonnenabfallfertigkomposte um 6,5 mg Cu/kg Kompost.TS

Als Vermeidungsstrategien für Kupfereinträge von Dachflächen in die Bioabfälle bieten sich hier verschiedene Möglichkeiten an. Schon eine Begrünung von Kupferdächern bringt hier Reduzierungen um etwa die Hälfte der Kupfermengen (Eppel, 2003). Boller (2004), Freese et al. (2005) und Gantner (2002) empfehlen kurz- bis mittelfristig die Einbeziehung von Barriersystemen (Adsorber), die logistisch und technisch sehr unterschiedlich gestaltet werden können, wobei dezentralen Lösungen der Vorzug gegeben wird. Die bislang vorliegenden Erfahrungen an ersten Anlagen lassen eine hohe Eliminationsleistung von über 90 % erwarten (Hillenbrand et al., 2005). Die Filtermaterialien müssen aber nach Erreichen der Adsorptionskapazität jeweils umweltgerecht entsorgt oder aufbereitet werden.

Grundsätzlich sind jedoch Maßnahmen an der Kupferquelle erforderlich, was nur durch Substitution von Kupfer in Dachbereichen durch andere umweltgerechtere Materialien möglich ist. Dazu sind bei Erdmann et al. (2004), bei Hillenbrand et al. (2005) und bei Hullmann et al. (2001) umfangreiche materialspezifische Hinweise enthalten, die vorwiegend auf Umsetzung bei Neubauten bzw. Renovierungen orientieren. Aluminium, Chromnickelstahl und verzinktes Kupferblech sind bei unseren atmosphärischen Verhältnissen sehr korrosionsbeständig, was deren Nutzung als metallische Substitutionsmaterial bevorteilt. Eine Substitution durch Edelstahl oder PVC würde zu einer deutlichen Erhöhung der Umweltbelastungen in anderen Umweltkategorien führen. Zudem werden aber auch technische und architektonische Gründe genannt, wo auf Kupfer nicht verzichtet werden kann.

Bei Bodenanhänge von 15 Frischmasse-% und möglichen urbane Bodenkupfergehalte von 56 mg/kg Boden-TS können sich folgende Kupfergehaltserhöhungen in Komposten ergeben:

- für Bioabfallfertigkomposte um 23 mg/kg Kompost-TS
- für Bioabfallfrischkomposte um 18 mg/kg Kompost-TS

Diese Kupfereinträge können durch Vermeidung von Zusätzen von stark kupferhaltigen Böden zu Bioabfällen ausgeschlossen werden. Dazu müssen über die Öffentlichkeitsarbeit der zuständigen Stellen konkrete Informationen an die betroffenen Bürger ergehen, sodass hier das Trennverhalten bei der Bioabfallsammlung auch auf vermeidbare Bodenanhäufungen

ausgerichtet wird. Voraussetzung dafür sind die Erstellung und die öffentliche Bekanntmachung regionaler Belastungskataster für Bodenflächen mit erhöhten Kupfergehalten.

Auf hier nicht behandelte Kupfereintragspotenziale in Böden und damit über die Pflanzenreste auch in die Bioabfälle hinein muss kurz hingewiesen werden. Dabei handelt es sich um Kupfererzeugnisse, deren anteilige Freisetzung in die Umwelt als vorteilhaft dargestellt wird. Als Beispiel können hier die Angebote von Kupfererzeugnissen der Firma Aktiv-First GmbH (Neukam, 2007) genannt werden, deren Einbau im Dachfirstbereich eine Cu^{2+} -Freisetzung gewährleisten, um die Dachflächen frei von Algen- und Moosbildungen zu halten. Hier sollte durch ein nachgeschaltetes Barriersystem die unkontrollierte Freisetzung von Kupfer in die Umwelt verhindert werden.

Eine weitere Quelle für Kupfereinträge in Böden sind Bodenbearbeitungsgeräte aus Kupfer. Durch Abriebvorgänge gelangt hier bei der Gartenarbeit Kupfer in den Boden. Die Anbieter solcher Kupfergeräte verweisen auf diesen Abrieb wegen der Mikronährstoffwirkung als Vorteilswirkung für Boden und Pflanze (Alsen & Gehlen, 2006; Ortner, 2007). Die in der Regel flächendeckend hohen Kupfergehalte und Kupfereinträge in Böden bleiben dabei unerwähnt, sodass letztendlich nur eine weitere Quelle für Kupferanreicherungen in Böden verbrämt wird. Für die Bodenbearbeitungsgeräte aus Kupfer gelten die aus Gründen der Bodenschutzes und damit auch der umweltgerechten stofflichen Verwertung von Pflanzenresten aus Hausgärten für den Dachbereich gegebenen Substitutionsempfehlungen. Derzeit ist aus dieser Quelle von einem geringen Kupfereintrag in die Gartenpflanzen und damit in die Pflanzenabfälle bis hin zu den daraus erzeugten Komposten auszugehen, da sich die gemessenen Kupfergehalte in den Biotonnenabfällen aus Hausgärten als gering erwiesen haben.

Die Anwendung kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel (Grünkupferpräparate) wird zur Bekämpfung pilzlicher Schaderreger in Gärten noch für das Jahr 2007 zu verschiedenen Gemüse-, Obst- und Zierpflanzenkulturen amtlich empfohlen (Galli et al., 2006). Die Grünkupferpräparate werden durch Spritzen auf die Ober – und die Unterseite der Pflanzenblätter aufgebracht. Es werden Aufwandmengen von bis zu 0,45 g Kupfer je m^2 Bodenfläche genannt (das entspricht 4,5 kg Kupfer je ha), die jährlich bei Bedarf verabreicht werden können. Die so kupferbehandelten Pflanzenreste gelangen später entweder vor Ort in den Boden (z.B. im Hausgarten) oder werden in die Biotonne entsorgt. Der Ökologische Landbau ist mit 3 kg Cu/ha eine Selbstbeschränkung des Kupfereinsatzes im Pflanzenschutz eingegangen (Bode, 2003).

Wird davon ausgegangen, dass etwa 10 % der Hausgartenfläche mit Grünkupferpräparaten behandelt und die Pflanzenreste direkt oder über die Eigenkompostierung in den Gartenboden gelangen, so kann mit einem jährlichen Kupfereintrag von 0,045 g / $\text{m}^2 \cdot \text{a}$ gerechnet werden. Für den Anbau von Sonderkulturen und Weinreben sind auf diese Weise schon erhebliche Kupferanreicherungen in Böden entstanden (Shorrocks & Alloway, 1988), die letztendlich auch die Kupfergehalte in Pflanzenteilen, insbesondere in Pflanzenwurzeln erhöhen können. Auswirkungen auf die Hausgartenabfälle in Biotonnen sind damit vorprogrammiert.

Für den Ökologischen Landbau wird eingeschätzt, dass der Verzicht auf Grünkupferpräparate existenzbedrohend werden kann (Kühne & Friedrich, 2003). Hier wird vor allem zu Aufwandsreduzierungen geforscht. Der integrierte Landbau verfügt dagegen über ausreichend alternative Pflanzenschutzmittel mit fungizider Wirkung. Erst mit der Umsetzung der schon immer wieder angekündigten Streichung der Grünkupferpräparate aus der Liste der in Deutschland zugelassenen Pflanzenschutzmittel kann deren Anwendung auch in den Hausgartenbereichen ausgeschlossen werden. Die alleinige Ausrichtung der Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung der Getrenntsammlung von Bioabfällen auf eine Vermeidung der Anwendung von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln im Hausgartenbereich ist derzeit nicht sinnvoll.

Die Rückführung von Prozesswasser in den Rotteprozess hat keine Auswirkungen auf die Kupfergehalte in den Komposten (siehe Punkt 4.3.5). Somit kann hier auch kein Reduzierungspotenzial abgeleitet werden. Ähnliches gilt für die Rückführung von Siebüberlaufrückständen als Strukturmaterial.

Aus den unter Punkt 4.3.4 vorgenommen Betrachtungen zur biochemischen Umwandlung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge beim Kompostierungsprozess ergeben sich auch Hinweise auf mögliche Reduzierungspotenziale für Kupfereinträge. Die vermutete Entmischung vorwiegend partikulärer Kupfereinträge in die Bioabfälle bei der Beprobung und bei der Probenaufbereitung im Labor kann für Aufbereitungsschritte zur Separierung von Schwerstoffen vor der biologischen Behandlung der Bioabfälle im Kompostierungsprozess genutzt werden. Hier scheinen Absiebungen geeignet, diesen Entmischungsprozess anteilig nachzuvollziehen und zur Abscheidung von partikulären Metalleinträgen zu nutzen.

Zu diesem Thema wurden in der Anlage 357 durch das Bayerische Landesamt für Landwirtschaft mechanische Aufbereitungsversuche an unbehandelten Bioabfällen durchgeführt, die durch Probenahmen in diesem F&E-Vorhaben begleitet worden sind (siehe Tabelle 35).

Tab. 35: Untersuchungsergebnisse von Fraktionen zur stofflichen Verwertung von Biotonnenabfällen

Bioabfallherkunft	Sieblinie in mm	TS-Gehalt in FM-%	Glühverlust (oTS) in TS-%	Cu-Gehalt in mg/kg TS	Cu-Gehalt in mg/kg oTS
ländlich	< 10	61,1	32,6	32,9	100,9
	10 - 40	32,3	70,9	8,2	11,6
städtisch	< 10	62,5	30,9	24,1	78,0
	10 - 40	37,0	75,9	10,5	13,8

In diesem Versuch wurden zwei Biotonnenabfallherkünfte (städtisches und ländliches Einsammelgebiet) in drei Fraktionen separiert (< 10 mm, 10 – 40 mm, > 40 mm). Die Fraktion > 40 mm wurde einer thermischen Verwertung zugeführt und daher in diesem Vorhaben nicht untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse bei einer dreistufigen Absiebung von Biotonnenabfällen zeigen, dass hier eine Aushaltung von Kupfer in der Feinfraktion < 10 mm erreicht worden ist. Die Kupfergehalte der Fraktion 10 – 40 mm entsprechen den natürlichen Kupfergehalten pflanzlicher Spross- und Blattteile. Die Feinfraktion (< 10 mm) zeigt dagegen höhere Kupfergehalte und geringere organische Anteile. Das bestätigt die bisherigen Aussagen über partikuläre Kupfereinträge. Die städtischen und ländlichen Biotonnenabfallherkünfte weisen dabei kein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten auf.

6. Zusammenfassung

Kupfer ist ein wichtiger industrieller Wirtschaftsfaktor, vor allem in den Bereichen Bauwesen (37 %), Elektrotechnik und Elektronik (32 %), Maschinenbau (14 %), Fahrzeug und Verkehrstechnik (8 %) sowie Sonstiges (9 %). Für die Bioabfallwirtschaft sind folgende Mengenübersichten für Deutschland wesentlich.

Gesamtverbrauch an Kupfer	etwa 1.100.000 t/a
Kupferschrottanfall	etwa 600.000 t/a
Kupferausträge aus Haushalten (potenziell biotonnenrelevant)	etwa 32.000 t/a
Kupfereinträge aus Verkehr (grün- und parkabfallwirksam)	etwa 933 t/a
Kupfer in Bioabfällen	etwa 88 t/a

Kupfereintrag in Böden durch Kompostaufbringung

etwa

73 t/a

Diese Mengenbetrachtung zeigt, dass die Getrenntsammlung von Bioabfällen auch bei der Kupferaushaltung einerseits sehr erfolgreich ist, andererseits in den Bemühungen zur Ausgrenzung von Kupfer aus der Bioabfallverwertung nicht nachgelassen werden darf.

Seit Beginn der Bioabfallbehandlung haben die Kupfergehalte in den Komposten bis 2002 ständig zugenommen (jährlich um etwa 3,7 %), wobei Biotonnenabfälle auffälliger waren als Grün- und Parkabfälle. Alle anderen Einträge an Schwermetallen sind dagegen abgesunken (z.B. Cadmium, Blei, Quecksilber) oder stabil geblieben (z.B. Chrom, Nickel, Zink).

Um die Ursachen für die zunehmenden Kupfergehalte in Bioabfallkomposten zu ergründen, wurden im Rahmen dieses F&E-Vorhabens folgende kupferorientierte Untersuchungen und Auswertungen durchgeführt:

- Trendermittlungen für die Kupfergehalte aus der RAL-Gütesicherung bei 376 Bioabfallkompostierungsanlagen.
- Statistische Nachweisführung der Zusammenhänge von Kupfergehalten und anderen stofflichen Merkmalen der Bioabfallkomposte in 42 ausgewählten Anlagen.
- Befragungen in 33 Bioabfallkompostierungsanlagen mit auffälligen Kupfergehalten zur regionalen Gesamtentwicklung, zur Bioabfallgetrenntsammlung und zur Anlagenbewirtschaftung (einschließlich Prozessgestaltung).
- Entnahme und Untersuchung (auf Feuchte, Glühverlust, Kupfer) von folgender 737 Proben in 14 ausgewählten Bioabfallkompostierungsanlagen:

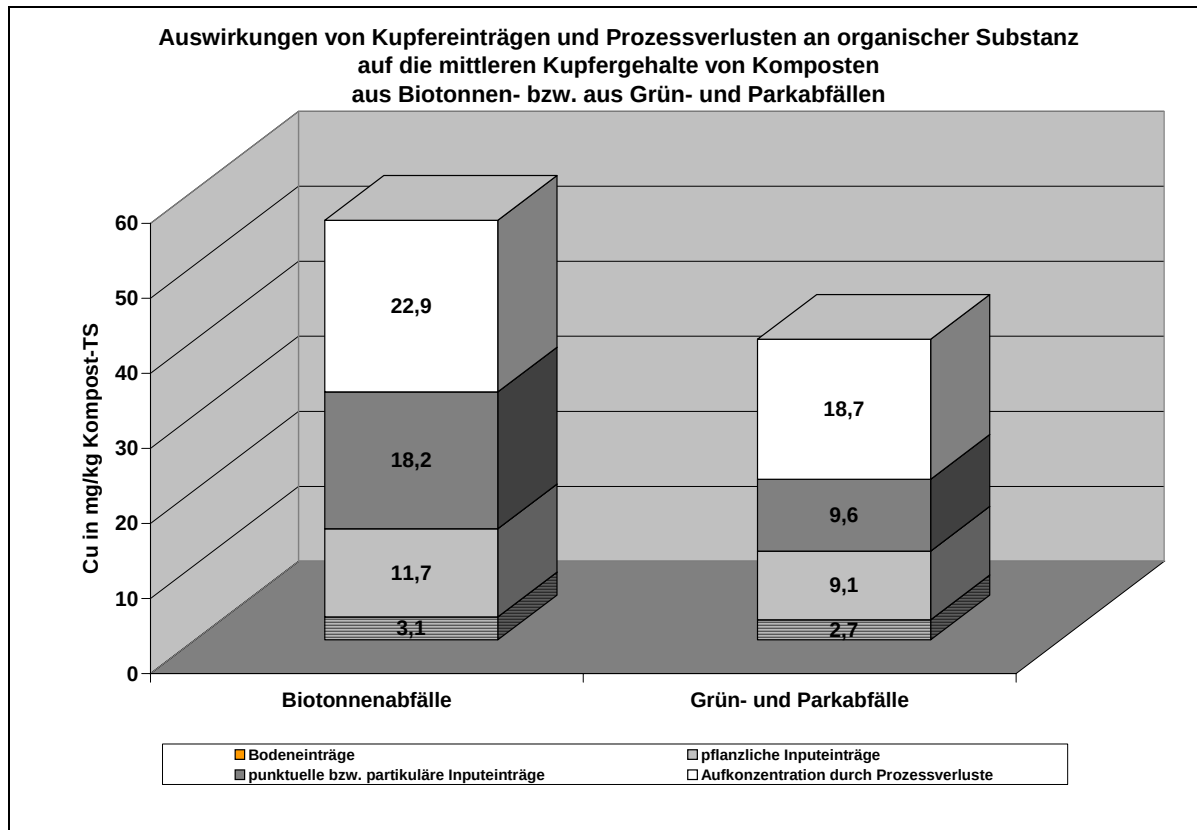
Inputmaterialien (mit Siebüberlauf)	457 Proben
Rottegut (mit Prozesswasser)	99 Proben
Komposte	181 Proben
- Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse aus den 14 ausgewählten Bioabfallbehandlungsanlagen.
- Ursachenforschung für die festgestellten Kupfereinträge und Ableitung von Limitierungsstrategien und Reduzierungspotenzialen.

Zusammenfassend wird auf folgende Ergebnisse des F&E-Vorhabens verwiesen:

- Anhand der ausgewählten Anlagen konnte nachgewiesen werden, dass in den meisten der ausgewählten Anlagen seit 2002 eine Abnahme der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten eingetreten ist.
- Die aktuellen Inputmaterialuntersuchungen lassen im Vergleich zu früheren Ergebnissen gleichbleibende Kupfergehalte bzw. einen leicht abnehmenden Trend erkennen.
- Gemische von Biotonnenabfällen sowie abgeschwächt von Grün- und Parkabfällen zeigen erhöhte Kupfergehalte, die auf beginnende Rotteverluste der organischen Substanz (z.B. auf Wertstoffhöfen) und damit verbundene Kupferaufkonzentrationen zurückzuführen sind.
- Rückführungen von Prozesswasser und Siebüberlaufrückständen führen nicht zu relevanten Kupfergehaltserhöhungen in den Komposten.

Die Auswirkungen von Kupfereinträgen aus verschiedenen Herkunftten und von Aufkonzentrationen durch Prozessverluste auf die mittleren Kupfergehalte der ausgewählten Biotonnenabfall- sowie Grün- und Parkabfallkompostierungsanlagen sind in einer grafischen Darstellung zusammengefasst (siehe Abbildung 79).

Abb. 79



Die Quellen bzw. Ursachen für die Kupfergehalte in Bioabfallkomposten konnten getrennt nach Abfallarten wie folgt abgeleitet werden:

- Die punktuellen bzw. partikulären Einträge sind die bedeutendste Kupfereintragsquelle in Bioabfallbehandlungsanlagen. Sie werden während des Rotteprozesses biochemisch umgesetzt und damit erst untersuchungstechnisch nachweisbar. Das geschieht bei den Biotonnenabfällen in der Intensivrotte. Bei Grün- und Parkabfällen reicht dieser biochemische Umwandlungsprozess bis in die Nachrotte hinein. In den Inputmaterialuntersuchungen wurden diese externen Kupfereinträge nur durch zufällige Ausreißermesswerte anteilig erfasst.
- Bei Biotonneabfallkomposten konnte eine deutliche saisonale Struktur der Kupfereinträge erkannt werden. Winteranlieferung von Biotonnenabfällen führt durch verstärkte punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge (z.B. 63 g Geschenkpapiertrockenmasse mit Goldbedruck je t Biotonnenabfallfrischmasse) zu erhöhten Kupfergehalten in den Komposten.
- Die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge können nur langfristig durch Substitution kupferhaltiger Haushalts-, Zier- und Gartengebrauchsgegenstände bzw. durch Freisetzungsbarreriesysteme vermindert werden. Durch den Ausschluss einzelner Bioabfallarten aus dem Zulassungsspektrum für die stoffliche Verwertung werden die Fragen der punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge nicht geklärt.
- Die Kupfereinträge durch Pflanzenreste und durch deren Anhaftungen an unbelasteten Böden tragen ebenfalls deutlich zur Höhe der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten bei, bieten jedoch kein Potenzial für eine Absenkung der Kupfergehalte.
- Erhöhte Kupferversorgung von Pflanzen und damit von Pflanzenabfällen aus Hausgärten (erfasst über Biotonnen) infolge von Regenwassernutzungen aus Dachbereichen mit höheren Kupferanteilen (5 bis 10 % der Dachflächen) können bei fast 28 % der Biotonnenabfallkomposte erhöhte Kupfergehalte begründen (um etwa 5 bis 6 mg Cu je kg Komposttrockenmasse)

- Bei Einträgen von urbanen Böden mit erhöhten Kupfergehalten (Bodenanträge bis 15 Frischmasse-%) können sich Kupfergehaltserhöhungen in Komposten bis zu 23 mg/kg Komposttrockenmasse ergeben.
- Den größten Einfluss auf die Höhe der Kupfergehalte hat die Aufkonzentration an Kupfer während der Bioabfallbehandlung, verursacht durch die Gesamtprozessverluste. Kupfer reichert sich im Rottegut an, ohne dass es zu einer Zunahme des Gesamtkupferbestandes in der Produktkette kommt.

Für Bioabfallkomposte können anlagenspezifische Gehalte ohne punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge abgeleitet werden, die sich aus der Vermeidung externer Kupfereinträge ergeben würden. Aus Prozessverlustbegrenzung auf 30 TS-% ergeben sich für Biotonnenabfallkomposte deutlich geringere Kupfergehalte im Kompost (z.B. durch kürzere Rottezeiten mit geringeren Trocksubstanzverlusten).

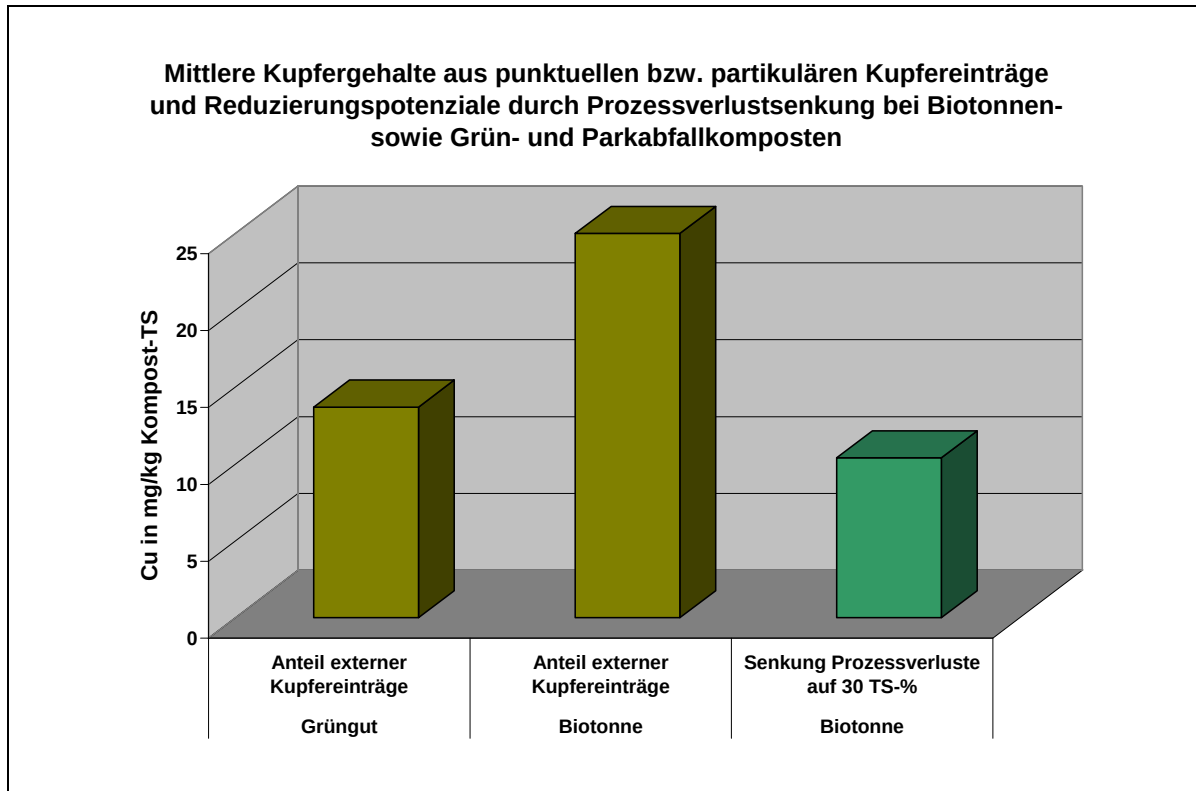
Für die Bioabfallarten lassen sich daraus folgende mittleren externen Kupfereinträge als theoretische Reduzierungspotenziale (nicht aufsummierbar) bei den Kupfergehalten (siehe Abbildung 80) ableiten. Diese Potenziale können kurz- bis mittelfristig durch anlageninterne Maßnahmen (Prozessverlustsenkung) bzw. langfristig und dann auch nur anteilig durch Einflussnahme im Einsammelgebiet der Bioabfälle (punktuelle bzw. partikuläre Kupfereinträge) erschlossen werden. Die Reduzierung der externen Kupfereinträge unterliegen dabei nicht der Einflussnahme durch die Bioabfallbehandlung, sondern ausschließlich der Kupfereintragsgestaltung in die Haushalte der Bioabfalleinsammlungsregionen.

Aus den Ergebnissen dieses F&E-Vorhabens ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für eine Kupferlimitierungsstrategie, getrennt nach den Aufgabenbereichen öffentlicher Regelungsbedarf, kommunale Öffentlichkeitsarbeit, Anlagenbetrieb und Forschungsbedarf:

Öffentlicher Regelungsbedarf

- Die Einträge diffuser Kupferquellen aus dem Verkehrsgeschehen sowie aus behandelten Holzelementen in Grün- und Parkabfälle sind zu verringern. Hier sind vor allem Maßnahmen zu Freisetzungsminderungen zu empfehlen. Friedhofsabfälle sind nur zu verwerten, wenn kupferhaltigen Gebindebestandteile unbedeutend sind.
- Die Anwendung von Grünkupferpräparaten als fungizides Pflanzenschutzmittel in Hausgärten sollte bei getrennter Erfassung von Bioabfällen eingeschränkt werden, da sonst ein Eintragspfad für Kupfer über behandelte Pflanzenreste besteht.
- Für Bioabfallbehandlungsanlagen, in deren Einsammelgebiet Kupfergehalte in den urbanen Böden auftreten, die deutlich über den Vorsorgewerten nach BBodSchV liegen, können sich durch den Wirkungspfad (kupferbelasteter Boden $\Rightarrow$ Bodenanhäufungen von Pflanzenresten $\Rightarrow$ > 5 FM-% Bodenanträge von Biotonnen- bzw. Grün- und Parkabfällen $\Rightarrow$ Bioabfallbehandlungsanlage) fallweise erhöhte Kupfergehalte in Komposte ergeben. Die entsprechenden Entscheidungsmöglichkeiten nach BioAbfV zur regionalen Verwertung von Komposten mit bodenbedingt erhöhten Kupfergehalten sind hier anzuwenden.
- Eine aussagekräftige Qualitätsbewertung der stofflichen Verwertung getrennt gesammelter Bioabfälle ist nur durch Untersuchungen in den erzeugten Komposten möglich, wobei schon hier ein Vertrauensbereich für Einzelmesswerte (Wiederholgrenze) von $\pm 22,4$ % angegeben wird (Bidlingmaier et al., 2006). Ergebnisse von Inputmaterialuntersuchungen können ohne direkte Bezugnahme auf parallele Untersuchung aller nachfolgenden Stoffströme zu erheblichen Fehlinterpretationen führen.

Abb. 80:



Kommunale Öffentlichkeitsarbeit

- Die begleitende Öffentlichkeitsarbeit sowie stichpunktartige Kontrollen zur Getrennsammlung von Bioabfällen müssen durch zuständige Stellen kontinuierlich geführt werden, wobei neue Erkenntnisse über potenzielle Schadstoffeinträge zu berücksichtigen sind. Eine auf die Inbetriebnahme einer Bioabfallbehandlungsanlage bezogene Kampagne ist nicht ausreichend.
- Für Biotonnenabfallbehandlungsanlagen, deren Einsammelgebiet durch höhere Kupferanteile in den Dachbereichen der Wohnbauten gekennzeichnet sind, können durch Eingriffe in den hausgartengebundenen Wirkungspfad (Dach mit Kupferanteilen ⇒ Regenwasserauffang/-aufbereitung ⇒ Boden/Pflanze ⇒ Biotonne ⇒ Bioabfallbehandlungsanlage) langfristig weitere Reduzierungspotenziale für Kupfergehalte in den Komposten (etwa 6 mg/kg Kompost-TS) erschlossen werden.

Anlagenbetrieb

- Im Allgemeinen sind in Bioabfällen enthaltene Mengen an Kupfer als Grundfracht zu bewerten, auf die in gegebenen Behandlungsanlagen kaum gezielt Einfluss genommen werden kann.
- Betreiber von Bioabfallbehandlungsanlagen können durch Senkung der Prozessverluste (geringer Abbaugrad der organischen Substanz) Kupfergehalte in Kompost im Einzelfall reduzieren (etwa 10 mg/kg Kompost-TS), wenn anstelle von Fertigkomposten Frischkomposte erzeugt werden. Der Kupfereintrag auf den kompostgedüngten Standorten wird dabei kaum beeinflusst.
- Eine Sichtkontrolle der in geschlossenen und großvolumigen Abfalltransportfahrzeugen angelieferten Bioabfälle im Eingangsbereich der Bioabfallbehandlungsanlage auf mögliche Kupfereinträge ist praktisch nicht durchführbar. Ordnungsgemäße Probe-

nahmen und chemische Analysen von Inputmaterialien erfassen nicht die punktuellen bzw. partikulären Kupfereinträge (etwa 50 % der Gesamteinträge).

- Im Falle erhöhter Kupfergehalte in Kompost sollte neben der absoluten Konzentration auch das Verhältnis von wertgebenden Inhaltsstoffen zu potentiellen Schadstoffen bewertet werden und/oder die tatsächliche Menge an Kupfer (Fracht), die mit Aufwandsmengen nach guter fachlicher Praxis verbunden sind.

Forschungsbedarf bei der Bioabfallbehandlung

- Die Einträge diffuser Kupferquellen über Gebrauchsgegenstände mit geringer Lebensdauer bzw. Umschlagsfrist in Haushalte sind auf Substitutionsmöglichkeiten zu prüfen. Hier ist die gemeinsame Entwicklung eines Umweltzeichens für Gebrauchsgegenstände zum Vermeiden von Kupfereinträgen in die getrennt gesammelten Bioabfälle durch den Bund und die betreffender Träger öffentlicher Belange zu empfehlen.
- Die mechanische Vorbehandlung von getrennt gesammelten Bioabfällen mit dem Ziel der Aushaltung punktueller bzw. partikulärer Kupfereinträge sollte hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf abfallwirtschaftliche Stoffströme (unter besonderer Beachtung der Abfallverwertung) unter differenzierten Bedingungen geprüft und bewertet werden.

Neben den Vorsorge- und Gefährdungsbewertungen des Umweltschutzes ist eine Ressourcenbetrachtung zur Exploration urbaner Kupferlagerstätten und damit auch bei Kupfer eine noch stärkere Orientierung auf Kreislaufwirtschaft erforderlich, wie sie von Wittmer (2006) methodisch beschrieben worden ist. Dieser Weg ist mit Freisetzungsbarreriesystemen für Kupfer in die Umwelt zu verbinden.

Literatur

- Amberger, A. (1996) Pflanzenernährung, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 4. Auflage, Stuttgart, 1996
- Alsen, W.D. & Gehlen, W.A. (2006) Kupfer in der Landwirtschaft und im täglichen Leben, ICH-BIN-Verlag, Bad Lauterberg 2006
- von Arx U. (2006) Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen. Umwelt-Wissen Nr. 0601. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. 163 S., 2006
- Bannick, C.G. et al. (2001) Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden, Umweltbundesamt, Texte 59/01, Berlin, 2001
- Bergmann, W. (1993) Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose, Dritte, erweiterte Auflage, Gustav Fischer Verlag, Jena · Stuttgart, 1993
- Bertling, S. (2005) Corrosion-induced metal runoff from external constructions and its environmental interaction. Doctoral Thesis, Universitetsservice US AB, Stockholm, 2005
- BGR (2005) Datenbestand der BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2005
- BGR, DIW (1997) Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft, Gutachten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung zum Forschungsvorhaben 26/97 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Hannover 1997
- Bidlingmaier, W. (2006) Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln, 2006
- Bode, E. (2003) Kupfer als Pflanzenschutzmittel – Zielstellung und Ergebnisse seit dem 1. Kupfer-Fachgespräch, in: Kühne & Friedrich (2003): Pflanzenschutz im Ökologischen Landbau - Probleme und Lösungsansätze - Siebtes Fachgespräch am 6. Juni 2002 in Berlin-Dahlem, "Alternativen zur Anwendung von Kupfer als Pflanzenschutzmittel", Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt Heft 118, 2003, Saphir Verlag, D-Ribbesbüttel, 2003
- Böhm, E. et al. (2000) Bilanzierung des Eintrags prioritärer Schwermetalle in Gewässer Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 298 22 243, Berlin, 2000
- Boller, M. (2004) Situation der Schwermetallreduzierung und aktuelle Entwicklungen in der Schweiz, Umweltbundesamt, Fachgespräch „Freisetzung von Schwermetallen aus Materialien in die Umwelt“, Berlin, 2004

- Bussian, B. & Reinhold, J. (2003) Bodenmaterial in der Stadt - sind die Anforderungen des § 12 BBodSchV einzuhalten? In: Verwertung von Abfällen in und auf Böden, BEW-Bildungsstätte Duisburg, 25. und 26. Juni 2003
- Domeyer, K. (2005) An- und Abreicherung von Schwermetallen in der Rhizosphäre und deren Entzug durch landwirtschaftliche Kulturpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte einer Phytosanierung, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät, Dissertation, 2005
- Elsässer, M. et al. (2004) Maßnahmenkonzept zur verunreinigungsarmen Nutzpflanzenernte Handlungsempfehlungen für die Bodenschutzbehörden für die Anordnungen von Bewirtschaftungsbeschränkungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen bei schädlichen Bodenveränderungen, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft, LABO-Projektnummer B 4.03, Aulendorf, 2004
- Eppel, J. (2003) Neue Forschungsergebnisse in der Regenwasserbewirtschaftung, fbr-Fachtagung, 4. November 2002, Frankfurt/Main
- Erdmann, L. et al. (2004) Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen - Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Werkstattbericht Nr. 68, Berlin 2004
- Freese, D.; Bens, O. & Hüttl, R.F. (2005) Versickerung von Dachablaufwässern in Böden, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, Cottbus, 2005
- Friedli, R. et al. (2002) Metalle für Dächer und Fassaden, Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes (KBOB), 2001
- Frondel, M. et al. (2005) Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen, 2005
- Galli, P. et al. (2006) Pflanzenschutz im Garten 2007 – Hinweise und Empfehlungen zu Gemüse, Obst und Zierpflanzen, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2006
- Gantner, K. (2002) Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden, Technischen Universität Berlin, Fakultät III – Prozesswissenschaften, Berlin, 2002
- Gosten, A. (2008) Perspektiven der Bioabfallsammlung und -verwertung in Berlin, Geschäftseinheit Abfallverwertung/-beseitigung der Berliner Stadtreinigung, in: Workshop der RGK Berlin – Brandenburg – Sachsen-Anhalt e.V. auf der Grünen Woche, Berlin am 25. 01. 2008
- Grün, M. et al. (1993) Schwermetalle in der Nahrungskette unter besonderer Berücksichtigung des Transfers vom Boden zur Pflanze. In: Grenzwerte für umweltrelevante Spurenstoffe – Tagungsband der DLG-Umweltgespräche, Suhl, 1993

- Hackenberg, S., Wegener, H.-R. & Eurich-Menden, B. (1996) Herkunft der Schadstoffe in Komposten - Schadstoffgehalte in Komposten und anderen Dünge- und Bodenverbesserungsmitteln - Vor- und Nachteile beim Einsatz von Komposten in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Landschafts- und Weinbau, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Forschungsbericht, Gießen 1996
- Hahn, H.H. & Hoffmann, E. (2002) Behandlung von schadstoffbelasteten organischen Abfällen, insbesondere Biomüll – Ausschleusung und Entfrachtung organischer und anorganischer Schadstoffe, Universität Fridericiana Karlsruhe (T.H.), Institut für Siedlungswasserwirtschaft, DBU-Forschungsbericht, Karlsruhe 2002
- Herms, U. & Brümmer, G. (1980) Einfluss der Bodenreaktion auf Löslichkeit und tolerierbare Gesamtgehalte an Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium und Blei in Böden und kompostierten Siedlungsabfällen, Landw. Forsch. 33, 1980
- Hillenbrand, Th. et al. (2005) Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen, Umweltbundesamt, Forschungsbericht 202 242 20/02, Dessau, 2005
- Hullmann, H.; Kraft, U. & Lichtnecker, H. (2001) Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren, hwp - hullmann, willkomm & partner GbR, Sachstandsbericht, Hannover 2001
- Hushek, G. et al. (2004) Länderübergreifende Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung der Länder, Umweltbundesamt, Forschungsbericht 201 71 244, Berlin 2004
- Kabata-Pendias, A. (2001) Trace elements in soil and plants, CRC Press Boca Raton, 3. edition, London, New York, Washington, 2001
- Kaygorodov, R. (2004) Bilanzierung von Zink und Kupfer in ausgewählten Agrarökosystemen in Nordniedersachsen, Universität Lüneburg, Institut für Ökologie und Umweltchemie, Dissertation, Lüneburg, 2004
- Kloke, A., Sauerbeck, D.R. & Vetter, H. (1984) The contamination of plants and soils with heavy metals und the transport in terrestrial food chains, in: Changing metal cycles und human health, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg - New York – Tokyo, 1984
- Kördel, W. et al. (2007) Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung, Umweltbundesamt, Forschungsbericht 202 33 305 und 202 74 271 UBA-FB 001017, Dessau, 2007
- Krauss, P. et al. (1993) Bioabfallkompostierung IV - Eintragspfade von Schadstoffen in Komposte, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, 1995
- KTBL (2000) Datensammlung für die Beurteilung organischer/Mineralischer Abfälle und Wirtschaftsdünger zur potenziellen landbaulichen Verwertung, KTBL, Darmstadt, 2000

- Kühne, S. & Friedrich, B. (2003) Pflanzenschutz im Ökologischen Landbau - Probleme und Lösungsansätze - Siebtes Fachgespräch am 6. Juni 2002 in Berlin-Dahlem, " Alternativen zur Anwendung von Kupfer als Pflanzenschutzmittel", Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt Heft 118, 2003, Saphir Verlag, D-Ribbesbüttel, 2003
- LAGA (2002) Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, LAGA PN 98 - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Stand 2002
- Lantzsch, P. & Dinkelberg, W. (1998) Datenblätter zur stofflichen Verwertung von Bioabfällen, Landesumweltamt Brandenburg, Fachbeiträge – Titelreihe Nr. 36, Potsdam, 1998
- Lapp, Ch. et al. (2007) Abfalltrennsysteme - Stand und Ausblick, Karl-Franzens-Universität Graz, Berichte aus den Umweltsystemwissenschaften 2007/01, Graz 2007
- Lehmann, R. (1995) Schwermetallbelastungen von Böden in Siedlungen, Ergebnisse einer Untersuchung in Arbon, Bischofszell, Frauenfeld, Kreuzlingen und Romanshorn, Kanton Thurgau, Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft, Bodenschutzfachstelle, 1995
- Lübben, S.. & Sauerbeck, D. (1995) Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden-Pflanze. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen, Berichte aus der ökologischen Forschung 6, 180-223., 1991
- Mengel, K. (1991) Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, Gustav Fischer Verlag, 7. Auflage, Jena, 1991
- Merian, E., Anke, M.; Inhat, M. & Stoeppler, M. (2004) Elements and their compounds in the environment, Wiley-VCH Verlag, 2. edition, 2004
- Müller, Ch. (2003) Schadstoffproblematik durch Grüngutverwertung, in: Verwertung von Grüngut aus der Landschaftspflege, Fachtagung des Institutes für Agrarökologie, ökologischen Landbau und Bodenschutz, Freising, 25.08.2003
- Müller, Ch. (2006) Schwermetalle und Spurenelemente in Gülle, in: Schweinegülle – Quelle für potentiell unerwünschte Stoffe? Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, 2006
- NA (2005) Bericht des NA-Konzerns zum vorläufigen Ergebnis des Geschäftsjahres 2004/05 – 01. Oktober 2004 bis 30. September 2005, Norddeutsche Affinerie AG, Hamburg, 2005.
- Neukam, H. (2007) Der Aktiv-First aus Kupfer auf dem Dach ganz oben – Die natürliche Dachreinigung, Aktiv-First GmbH, Münchberg, www.aktiv-first.de, 2007.

- Ortner, R.I. Wissen zu Gesundheit und Natur, Pöcking/Possenhofen, www. wige-na.de 2007.
- Pfeiffer, B. (2003) Alternativen zu Kupfer im ökologischen Obstbau - Prüfung von Pflanzenextrakten, in: Kühne, S.; Friedrich, B. Pflanzenschutz im Ökologischen Landbau - Probleme und Lösungsansätze - Siebtes Fachgespräch am 6. Juni 2002 in Berlin-Dahlem, " Alternativen zur Anwendung von Kupfer als Pflanzenschutzmittel", Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt Heft 118, 2003, Saphir Verlag, Ribbesbüttel, 2003
- Reinhold, J. (1972) Die Umwandlung fester Fäkalstoffe aus der industriemäßigen Tierproduktion durch aerobe Mietenrotte in organische Düngestoffe für den Einsatz in der Gemüseproduktion, Humboldt-Universität zu Berlin, Biowissenschaftliche Fakultät, Dissertation 1972
- Reinhold, J. (1998) Deklaration und Gewährleistung von Qualitätseigenschaften im Rahmen einer Gütesicherung, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., F&E-Bericht, Köln, 1998
- Reinhold, J. (2002) Bericht über die statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse des Umweltbundesamtes Berlin an Sandbodenmaterialien für den Landschaftsbau aus der Region Berlin-Brandenburg, Verband der Humus- und Erdenwirtschaft Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt e.V, Nächst Neuendorf, 2002
- Reinhold, J. (2004) Neubewertung von Kompostqualitäten, Umweltbundesamt Berlin, Forschungsbericht 363 01 049, UBA-FB 000610, UBA-Texte 15/2004
- Reinhold, J. et al. (1995) Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Bioabfällen – Handlungsempfehlungen aus der Sicht des Bodenschutzes, Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam 1997
- Ritschel, J. (2000) Die Bodenbelastung brandenburgischer Haus- und Kleingärten durch Schadstoffe, Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Fachbeiträge, Heft-Nr. 48, Potsdam, 2000
- Rosenkranz, D. et al. (1995) Bodenschutz - Hintergrundgehalte für anorganische und organische Stoffe in Böden, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, LABO, Bonn, 1995
- Roth-Kleyer, S. & Reinhold, J. (2005) Vorschlag für ein Regelwerk zur Qualität von Bodensubstraten im Landschaftsbau, Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Naturschutz Brandenburg, Bodenschutz-Symposium 2005, 22. April 2005 in Potsdam
- Sauerbeck, D. (1989) Der Transfer von Schwermetallen in die Pflanze. In: Dechema – Fachgespräche Umweltschutz – Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden, Frankfurt, 1989
- Severin, K. (2006) Schwermetalle und Spurenelemente: Regionale Ergebnisse und Zeitverlauf im Vergleich mit anderen Düngemitteln, Expertentagung 6. – 7.12.2006 im BMU, Bonn

- Shorrocks, V.M. & Alloway, B.J. (1988) Kupfer in der Landwirtschaft, Deutsches Kupferinstitut, Berlin, 1988
- Statistisches Bundesamt (2007) Umwelt - Abfallentsorgung, Fachserie 19 Reihe 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2007
- Stevenson F. J. (1986) Cycles of soil: The micronutrient cycle. John Wiley & Sons, New York, 1986
- Striegel, K.-H. et al. (2004) Datenblatt: Spuckstoffe und Papierschlämme aus der Papierindustrie, Landesumweltamt NRW, Düsseldorf, 2004
- Strumpf, Th. (2008) Risikobewertung von Schadelementen (Schwermetallen) im System Boden-Pflanze, Julius - Kühn – Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (BFK), in: Workshop der RGK Berlin – Brandenburg – Sachsen-Anhalt e.V. auf der Grünen Woche, Berlin am 25. 01. 2008
- Tabasaran O. & Sihler, A. (1993) Analysenübersicht von Komposten und deren Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Herkunft und Standorte, Verbundvorhaben des BMFT „Neue Techniken zur Kompostierung“, Universität Stuttgart 1993
- Terytze, K. & Vogel, I. (2006) **Kupfer und Zink im Spannungsfeld Nährstoff – Schadstoff**, Fachtagung zur Novellierung der AbfKlärV BMU, Bonn, 6./7.12.2006
- TLL (2005) Merkblatt zur Kupferdüngung in der Pflanzenproduktion, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Agrarökologie, Ackerbau und Grünland, Jena, 2005
- Trott, H. et al. (2007) Mikronährstoffe in der Landwirtschaft und im Gartenbau, Bedeutung – Mangelsymptome – Düngung, Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt (Main), 2007
- VDLUFA (2003) Eckpunkte und Begründungen der Stellungnahme des VDLUFA vom Dezember 2002 zur Konzeption von BMVEL und BMU „Gute Qualität und sichere Erträge...“ vom Juni 2002, VDLUFA, Bonn, 2003
- Vogel, I. (2008) Mündliche Mitteilung, Umweltbundesamt Dessau, 2008
- Wallinder, O. I.; Bertling, S. & Leygraf, Ch. (2005) Kupfer- und Zinkabschwemmungen von Metalldächern - Forschung schließt Wissenslücken bei realen Massenströmen, WLB 1-2; 2005, Wasser-/Abwassertechnik
- Wittmer, D.M.A.G. (2005) Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt - Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Dissertation, 2006
- Ohne Autor (1997) Kupfer – Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung, DKI – Informationsdruck, Deutsches Kupferinstitut, Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Düsseldorf, 1997

Anlagenverzeichnis

Anlage Nr.	Inhalt der Anlage
1	- Anlagenkennzeichnung nach Trend bei Kupfergehalten im Bioabfallkompost (1998-2002) - Anlagenauswahl nach Betroffenheit durch erhöhte Kupfergehalte im Bioabfallkompost - Zeitverlauf der Kupfergehalte in den Bioabfallkomposten der ausgewählten Anlagen
2	Darstellung, Aus- und Bewertung von Ergebnissen der Kupferuntersuchungen in den ausgewählten RAL-gütesicherten Anlagen
3	Fragebögen „Kupfereinträge in Kompostierungsanlagen“ für ausgewählte Bioabfallbehandlungsanlagen
4	Zusammenstellung und Bewertung der Projekt-Untersuchungen zu den ausgewählten Anlagen