

# Frachtenberechnungen für die Kompostanwendung



Herausgeber:



VHE – Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V.

Anschrift:

Kirberichshofer Weg 6  
52066 Aachen  
[www.vhe.de](http://www.vhe.de)

Ansprechpartner:

Herr Michael Schneider

Stand:

12. Januar 2012

---

Projektbearbeitung:



ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Aachen

Autoren:

Frau Dr. Silvia Lazar,  
Frau Dr. Silke Höke

Fotos Titelseite:

A. Herrmann, S. Lazar

Endbericht:

11223 / KOMP

## INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG – BERÜCKSICHTIGUNG VON MINERALISCHEN ANTEILEN BEI DER FRACHTENBERECHNUNG	3
2	RAHMENBEDINGUNGEN BEI DER BERÜCKSICHTIGUNG VON MINERALISCHEN ANTEILEN	5
3	BEISPIELHAFTE FRACHTENBERECHNUNG	9
3.1	Einflüsse unterschiedlicher Aufbringungsmengen	10
3.2	Einflüsse unterschiedlicher Schadstoffgehalte im Kompost	11
3.3	Einflüsse unterschiedlicher Bodenausgangsgelalte	12
	Exkurs: Mathematischer Nachweis der langfristigen Stoffanreicherung	14
3.4	Einflüsse der Horizontmächtigkeit	16
3.5	Einflüsse der mineralischen Anteile	17
4	SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS	18
5	LITERATUR	19

## 1 EINLEITUNG – BERÜCKSICHTIGUNG VON MINERALISCHEN ANTEILEN BEI DER FRACHTENBERECHNUNG

Durch die Düngung mit Kompost werden nicht nur Nährstoffe und organische Substanz (Humus) ausgebracht, sondern auch erhebliche Mengen an Mineralboden. Die mineralischen Anteile (Glührückstand) im getrockneten Kompost betragen im Mittel 61,8 %, die der organischen Substanz (Glühverlust) 38,2 % (BGK 2010), d.h. über die Hälfte des Kompostes besteht aus weitgehend stabilen Anteilen.

Während die organische Substanz zu größeren Anteilen mineralisiert und die Nährstoffe von den Pflanzen aufgenommen werden können, verbleiben die mineralischen Bodenpartikel dauerhaft im Boden und tragen zum Bodenaufbau bei, so dass sich, wie Abbildung 1 zeigt, Schadstoffe auf eine größere Bodenmenge verteilen.

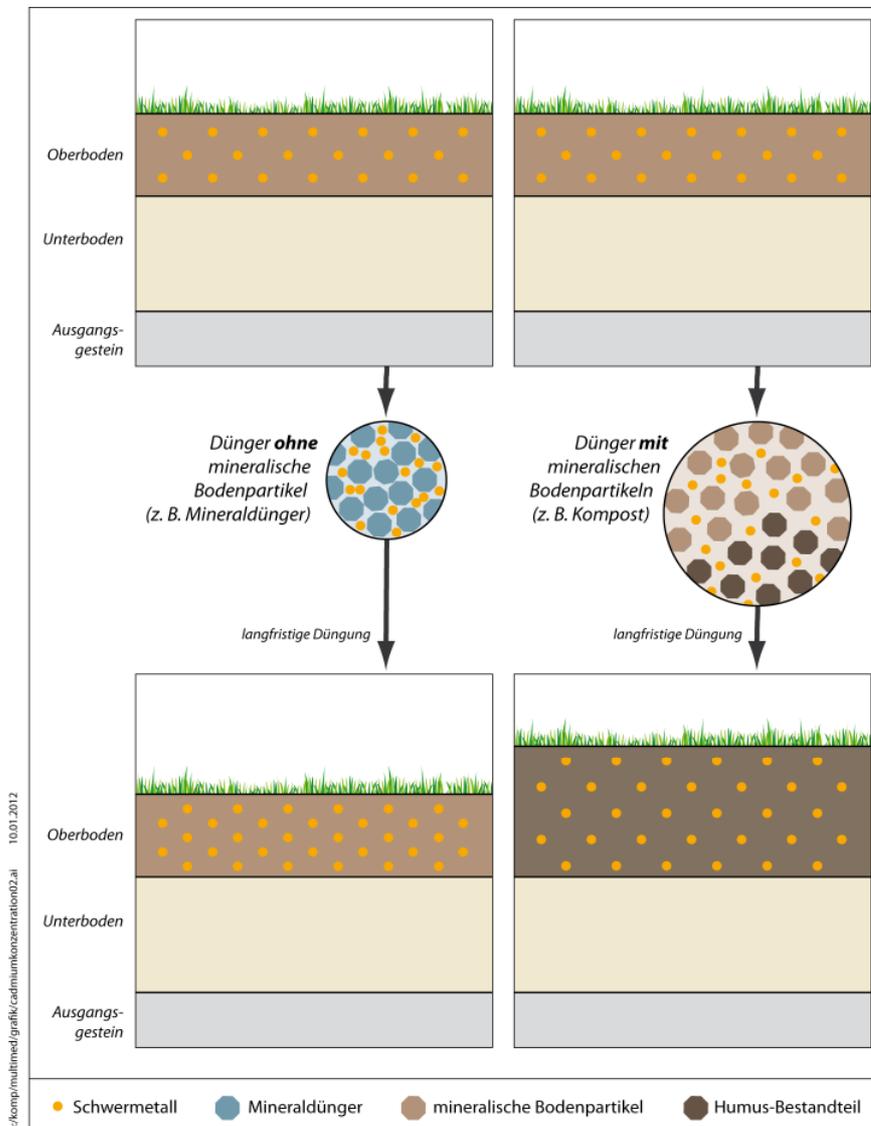


Abbildung 1: Bodenaufbau und Veränderung der Schwermetallkonzentration im Boden durch langfristige Düngung unter Berücksichtigung der mineralischen Bodenpartikel im Kompost

Diese Zufuhr von dauerhaft im Boden verbleibenden mineralischen Anteilen wird bislang bei der Berechnung von Schadstofffrachten nicht berücksichtigt. Bei über 50 % Mineralpartikeln im Kompost hat diese Massenzufuhr jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die tatsächlichen Schadstoffgehalte im Boden. So würde bei regelmäßiger Kompostanwendung der Oberbodenhorizont in 100 Jahren um 3,6 cm erhöht werden (vgl. hierzu die Berechnung im nachfolgenden Abschnitt).

Durch die Horizonterhöhung (Bodenaufbau) sind die Schadstoffanreicherungen im Boden zum Teil deutlich geringer als die mit Hilfe von reinen Schadstofffrachtenberechnungen ermittelten Konzentrationen. Ebenso sind bei höheren Ausgangsgehalten im Boden auch Abreicherungen durch die Aufbringung von Komposten möglich (vgl. Beispiele in Kap. 3).

Die mineralischen Anteile in verschiedenen Düngemitteln wurden u.a. im F+E-Vorhaben „Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragswege“ (KNAPPE et al. 2008) berücksichtigt, das über eine Stoffbilanz bundesweit die Ein- und Austräge von Schadstoffen und ihre Anreicherung in den Böden ermittelt.

Berücksichtigt werden die mineralischen Anteile im Kompost auch in den Anreicherungsszenarien von AMLINGER et al. (2006). Diese kommen zu dem Ergebnis, dass sich „durch die Einmischung in eine festgelegte Bodenschicht ... eine nicht lineare Funktion ableitet, die sich asymptotisch der Metallkonzentration im Kompost nach entsprechender Aufmineralisierung annähert.“

## 2 RAHMENBEDINGUNGEN BEI DER BERÜCKSICHTIGUNG VON MINERALISCHEN ANTEILEN

Die Einflüsse der mineralischen Anteile sind wesentlich von den getroffenen Grundannahmen abhängig und werden nachfolgend aufgezeigt. Für die Berechnungsbeispiele in Kapitel 3 werden die nachfolgend genannten Annahmen getroffen. Die grundsätzlichen Effekte zeigen sich jedoch auch bei Verwendung anderer Datengrundlagen.

- **Bodentiefe:** Die Mächtigkeit des Oberbodens wirkt sich insbesondere bei der Umrechnung von Frachten in Konzentrationen aus. In Anlehnung an verschiedene Berechnungen und Szenarien zur Ermittlung von Anreicherungen im Oberboden (vgl. KNAPPE et al. 2008; AMLINGER et al. 2006) wird für die betrachtete Nutzung Ackerbau der Ap-Horizont, d.h. die oberen 30 cm, als relevante Horizonttiefe verwendet. Diese Horizonttiefe erlaubt auch die Nutzung von Bodendaten aus vorhandenen Untersuchungen, die sich in der Regel auf den Ap-Horizont von 0 bis 30 cm als Beprobungshorizont beziehen.
- **Trockenrohdichte (TRD):** Für die weiteren Berechnungen wird von einer mittleren Trockenrohdichte von  $1,4 \text{ g/cm}^3$  in den Oberbodenhorizonten der Ackerböden ausgegangen. Diese liegt im Mittel der von SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) angegebenen Schwankungsbereiche. Bei hohen Nutzungsintensitäten kann die Trockenrohdichte auf ackerbaulich genutzten Böden auch höher liegen.
- **Hintergrundwerte** nach LABO (2003): Beispielhaft werden Frachtenberechnungen für unterschiedliche Stoffgehalte in Böden durchgeführt. Für diese Beispiele wird auf die Hintergrundwerte für Oberböden nach LABO (2003) zurückgegriffen, die nutzungs- und gebietsspezifisch für unterschiedliche Bodenausgangsgesteine vorliegen. Verwendet wird in der Regel das 50. Perzentil für Ackerbau im Gebietstyp III (ubiquitäre Gehalte im ländlichen Raum), ausnahmsweise wird zum Vergleich auch das 90. Perzentil für Ackerbau im Gebietstyp I (Ballungskern, Verdichtungsgebiete) herangezogen.
- **Ein- und Austräge:** Die u.a. in KNAPPE et al. (2008) berücksichtigten weiteren Einträge über Immissionen und eine ggf. ergänzende Mineraldüngung sowie Austräge über Erntegut und Sickerwasser werden nicht dargestellt, um die kompostbezogenen Einflüsse deutlich zu machen und von anderen Einflussfaktoren abzugrenzen.
- **Stoffgehalte:** Als Datengrundlage für die Zusammensetzung und Stoffgehalte der Komposte (hier getrocknete Frisch- und Fertigkomposte ohne Gärreste) werden Daten (Mediane) der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) aus dem Jahr 2010 verwendet (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Bestandteile in Frisch- und Fertigungskomposten (Quelle: Medianwerte nach BGK 2010)

Einheit	Frisch- und Fertigungskomposte (TS)
Mineralische Substanz im Kompost in % TS	61,8 %
Organische Substanz im Kompost (Glühverlust) in % TS	38,2 %
C <sub>org</sub> in % TS	22,1 %
Stickstoff (N in % TS)	1,4 %
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in % TS)	0,7 %
Kalium (K <sub>2</sub> O in % TS)	1,1 %
Carbonate (CaCO <sub>3</sub> in % TS, ermittelt aus CaO in % TS)	7,6 %
Langfristige Zufuhr mineralischer Bestandteile (in % TS)	51,0 %
Langfristiger Verbleib mineralischer Bestandteile bei einer Aufbringungsmenge von 10 t TS / ha pro Jahr [mineralische Substanz abzgl. Nährstoffe und Carbonate]	5,1 t TS / (ha *a)
Erhöhung des Bodenhorizonts bei 10 t TS / ha pro Jahr	0,36 mm
Cadmiumgehalt im Kompost (in mg/kg TS)	0,42 mg/kg

- Mineralische, langfristig verbleibende Anteile (Bodenaufbau):** Die mineralischen Anteile (Glührückstand) im getrockneten Kompost betragen im Mittel 61,8 %, die der organischen Substanz 38,2 %.

Ein Teil der mineralischen Substanz im Kompost liegt in Form von Nährstoffen (Stickstoff 1,4 % TS, Phosphat 0,7 % TS, Kalium 1,1 % TS, vgl. BGK 2010) sowie als Carbonate<sup>1</sup> (7,6 % TS ermittelt über CaO durch den Faktor 1,78, vgl. BGK 2010 und MLR 2010) vor (vgl. Abb. 2).

Nährstoffe und Carbonate können theoretisch bei längerfristiger Betrachtung gelöst und ausgewaschen sowie durch Pflanzen entzogen werden. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung werden daher Nährstoffe und Carbonate nicht den langfristig im Boden verbleibenden Anteilen zugeordnet.

Selbst unter diesen Voraussetzungen bestehen Komposte im Mittel mit 51 % zu mehr als der Hälfte aus stabilen, „mineralischen Bodenpartikeln“, die langfristig zum Bodenaufbau beitragen.

<sup>1</sup> Die Kalkwirkung von Kompost wird in der Regel über die basisch wirksamen Bestandteile in Form von CaO (Calciumoxid) angegeben. Der Kalk liegt im Kompost – ebenso wie im Boden – jedoch überwiegend in Carbonatform (CaCO<sub>3</sub>) vor (vgl. DLG / LLFG 2009). In der vorliegenden Studie werden daher die Anteile von CaO über den Faktor 1,78 (MLR 2010) als Carbonate (CaCO<sub>3</sub>) berücksichtigt.

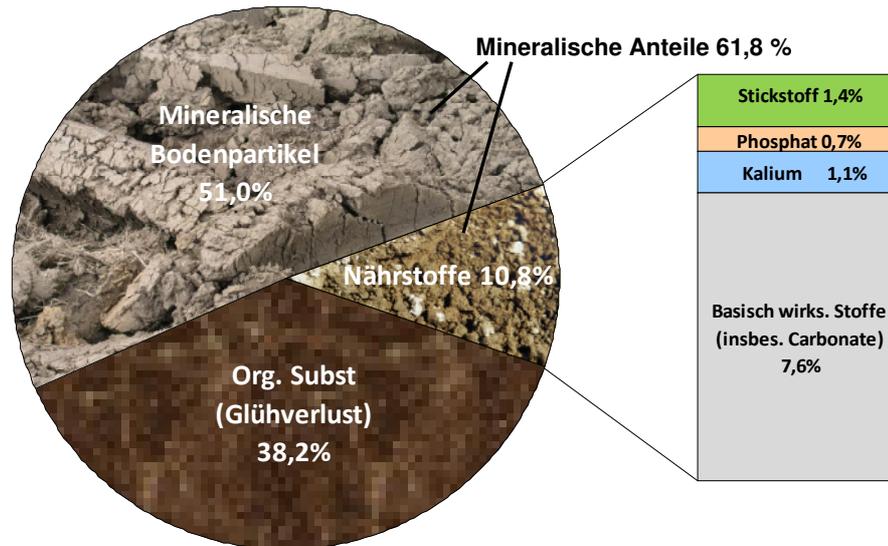


Abbildung 2: Zusammensetzung von Komposten (Frisch- und Fertigungskomposte)  
(Quelle: VHE 2011)

Nicht berücksichtigt wird bei der Betrachtung, dass auch Anteile der organischen Substanz langfristig im Boden verbleiben und ebenfalls zum Bodenaufbau beitragen. Das heißt, dass die Zufuhr an langfristig im Boden verbleibenden Anteilen höher ist als die in den Berechnungen berücksichtigten mineralischen Bodenpartikel.

Für die Ermittlung des Anteils der „stabilen organischen Substanz“ werden unterschiedliche Ansätze und Modelle diskutiert (vgl. WESSOLEK et al. 2008 und KLUGE et al. 2008). Eine sehr vereinfachte Möglichkeit ist die Verwendung von sog. „Wiederfindungsraten“, die zwischen 26 % und 59 % betragen und den Anteil der aus dem Kompost stammenden organischen Substanz angeben, die längerfristig im Boden verbleibt (vgl. REINHOLD 2008 und IFEU / ahu 2011). Bei Verwendung der geringsten Wiederfindungsrate von 26 % beträgt der Anteil der stabilen Substanzen im Kompost 60,9 % (51 % und zusätzlich 9,9 % durch die organische Substanz). Bei der höchsten Wiederfindungsrate von 59 % läge der Anteil der stabilen Substanzen im Kompost bei 73,5 % (51 % und zusätzlich 22,5 % durch die organische Substanz).

- Bodenart:** In der Literatur finden sich keine Angaben über die Zusammensetzung und Textur der im Kompost enthaltenden mineralischen Substanz. Es ist davon auszugehen, dass die Korngrößenzusammensetzung regionalspezifisch ist, da es sich bei den Anteilen der mineralischen Substanz zu hohen Anteilen um anhaftendes Bodenmaterial bei Gartenabfällen (z.B. gejätetes Unkraut) oder Grassoden handelt. Mineralische Anteile im Kompost können auch Blumenerden und Anteile aus Bausanden (Wege- und Stellplatzbau) sein.

Sofern die Vorsorgewerte der BBodSchV als Vergleichsmaßstab herangezogen werden, wird aufgrund fehlender Daten zur Bodenart exemplarisch die Bodenart Lehm / Schluff herangezogen.

- **Aufbringungsmengen:** In den folgenden Beispielen wird in der Regel von den gesetzlich zulässigen maximalen Aufbringungsmengen nach der Bioabfallverordnung (BioAbfV 1998) ausgegangen.

Gemäß BioAbfV (1998) dürfen innerhalb von drei Jahren nicht mehr als 20 t (behandelter) Bioabfall Trockenmasse (TS) pro Hektar ausgebracht werden, wobei bestimmte Grenzwerte für Schwermetalle einzuhalten sind. Die Aufbringungsmenge kann bis zu 30 t TS/(ha\*3a) betragen, wenn die strengeren Grenzwerte für Schwermetalle im Kompost nach § 4 Absatz 3 Satz 2 eingehalten werden. In den Beispielrechnungen wird davon ausgegangen, dass alle drei Jahre die maximale Menge von 30 t TS/ha Kompost ausgebracht wird. Umgerechnet in jährliche Gaben entspricht dies einer jährlichen Aufbringungsmenge von 10 t TS/(ha\*a).

Die Berechnung erfolgt mit maximal zulässigen Aufbringungsmengen, um die Anreicherungen auch bei theoretisch langjähriger Anwendung aufzuzeigen. Um die Anreicherung aufzuzeigen, wird die Entwicklung über 500 Jahre dargestellt, obwohl in der Praxis eine Aufbringung über einen solch langen Zeitraum nicht zu erwarten ist. Exemplarisch wird ebenfalls gezeigt, wie sich eine geringere Aufbringungsmenge auswirkt. Hierbei wird vereinfacht von 4 t TS/ha pro Jahr ausgegangen (vgl. Kap. 3.1).

- **Massenzufuhr:** Bei einer regelmäßigen Kompostanwendung mit einer Aufbringungsmenge von 10 t TS/ha pro Jahr beträgt die Zufuhr an langfristig im Oberboden verbleibenden, mineralischen Bestandteilen 5,1 t TS/ha pro Jahr. In 100 Jahren liegt die Massenzufuhr somit bei 510 t TS/ha, in 500 Jahren bei 2.715 t TS/ha (vgl. Tab. 1).
- **Horizonthöhung:** Bei einer regelmäßigen Kompostanwendung und langfristig im Boden verbleibenden Anteilen von 51 % (s.o.) erhöht sich der Oberbodenhorizont durch die Massenzufuhr umgerechnet pro Jahr um 0,36 mm, d.h. in 100 Jahren würde sich der Oberbodenhorizont bei regelmäßiger Kompostanwendung um 3,6 cm erhöhen, bei 500-jähriger Anwendung würde dies 18 cm entsprechen (vgl. Tab. 1).

### Berechnungsformel 1: Zunahme der Horizontmächtigkeit

$$\text{Berechnung: } h_t = \frac{(M \cdot A_{\text{lang}} \cdot ha)}{d_{\text{Komp}} \cdot 10} \cdot t$$

$h_t$	Zunahme der Horizontmächtigkeit	in mm
$t$	Zeitraum der Anwendung	in Jahren
$M$	Aufgebrachte Kompostmenge (TS)	in t/(ha*a)
$A_{\text{lang}}$	langfristig im Boden verbleibender Anteil	in %
$d_{\text{Komp}}$	Trockenrohdichte des Komposts (hier 1,4 g/cm <sup>3</sup> )	in g/cm <sup>3</sup>
$ha$	Flächengröße	in Hektar (ha)

### 3 BEISPIELHAFTE FRACHTENBERECHNUNG

Mit der Kompostanwendung werden, wie in Kapitel 1 dargestellt, nicht nur Schwermetalle zugeführt, sondern es wird der Oberboden langfristig aufgebaut. Die gängigen Frachtenberechnungen (s.u.) betrachten nur die Zufuhr an Schadstoffen und vernachlässigen die im Fall der Kompostanwendung nicht unerhebliche Massenzufuhr und den damit verbundenen Bodenaufbau.

Ob diese langfristig im Boden verbleibenden mineralischen Anteile berücksichtigt werden oder nicht, ist jedoch für die tatsächlich im Boden vorliegenden Schadstoffgehalte von wesentlicher Bedeutung, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen. Die Rahmenbedingungen und Annahmen für die Berechnung sind in Kapitel 2 zusammengefasst.

#### Gezeigt werden Beispiele für die Frachtenberechnung unter Berücksichtigung des Bodenaufbaus durch Kompost für Cadmium:

- Einfluss der Aufbringungsmenge
- Einfluss der Schadstoffkonzentration im Kompost
- Einfluss des Ausgangsgehaltes im Boden
- Einfluss der Horizontmächtigkeit
- Einfluss des Anteils der langfristig stabilen Bestandteile im Kompost

#### Berechnungsformel 2: Ohne Berücksichtigung mineralischer Anteile

$$\text{Funktion } C_{\text{Bo}_t} = \frac{(C_{\text{Komp}} \cdot M \cdot 0,1 \cdot \text{ha} \cdot t) + (C_{\text{Bo}} \cdot d \cdot 1000 \cdot h \cdot \text{ha})}{d \cdot 1000 \cdot h \cdot \text{ha}}$$

#### Berechnungsformel 3: Mit Berücksichtigung des Bodenaufbaus durch langfristig verbleibende mineralische Anteile

$$\text{Funktion } C_{\text{Bo}_t} = \frac{(C_{\text{Komp}} \cdot M \cdot 0,1 \cdot \text{ha} \cdot t) + (C_{\text{Bo}} \cdot d \cdot 1000 \cdot h \cdot \text{ha})}{(d \cdot 1000 \cdot h \cdot \text{ha}) + (M \cdot A_{\text{lang}} \cdot 0,1 \cdot \text{ha} \cdot t)}$$

t	Zeitraum der Anwendung	in Jahren
$C_{\text{Bo}}$	Stoffkonzentration in relevantem Bodenhorizont zu Beginn der Berechnung (hier Hintergrundwert nach LABO 2003)	in mg/kg TS
$C_{\text{Bo}_t}$	Stoffkonzentration in relevantem Bodenhorizont nach t Jahren	in mg/kg TS
$C_{\text{Komp}}$	Stoffkonzentration im Kompost	in mg/kg TS
ha	Flächengröße	in Hektar (ha)
h	Horizontmächtigkeit	in m
M	aufgebrachte Kompostmenge (TS)	in t/(ha*a)
$A_{\text{lang}}$	langfristig im Boden verbleibender Anteil (in Formel einfügen: 50 % = 0,50)	in %
d	Trockenrohdichte des Bodens	in g/cm <sup>3</sup>

### 3.1 Einflüsse unterschiedlicher Aufbringungsmengen

Die Änderung der Schwermetallkonzentration im Boden über die Zufuhr von Kompost ist neben der Stoffkonzentration im Kompost bzw. im Boden von der Aufbringungsmenge abhängig. Für die Beispielrechnung wird ein Cd-Gehalt im Kompost nach BGK (2010) von 0,42 mg/kg TS angenommen. Für die Cadmiumkonzentration im Boden wird der Hintergrundwert 0,36 mg/kg TS Cd (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden unter Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum in Deutschland herangezogen.

Die Aufbringungsmenge wird wie folgt variiert:

- Zum einen wird die maximal zulässige Aufbringungsmenge gemäß BioAbfV (1998) von 30 t TS/ha innerhalb von 3 Jahren verwendet, wenn entsprechende Grenzwerte für Schwermetalle eingehalten werden. Umgerechnet in jährliche Gaben entspricht dies einer Aufbringungsmenge von 10 t TS/(ha\*a) (blaue Markierung in Abb. 3).
- Zum anderen wird eine geringere Aufbringungsmenge von 4 t TS/ha pro Jahr betrachtet (grüne Markierung in Abb. 3).

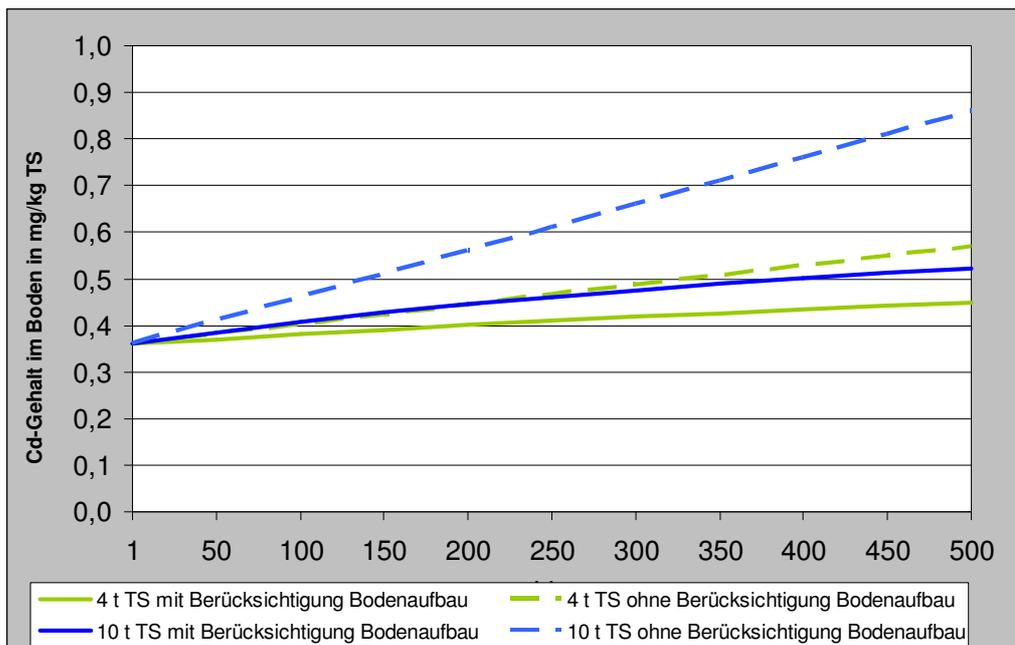


Abbildung 3: Anreicherungszenarien für Cadmium mit unterschiedlichen Kompostaufbringungsmengen mit bzw. ohne Berücksichtigung des Bodenaufbaus.

Der Ausgangsgehalt des Oberbodens beträgt 0,36 mg/kg TS Cd und entspricht dem Hintergrundwert (50. Perzentil) nach LABO 2003 von Oberböden für Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum. Der Cd-Gehalt im Kompost beträgt 0,42 mg/kg TS.

Generell zeigt sich in Abbildung 3, dass unter Berücksichtigung der mineralischen Anteile im Kompost die Anreicherung von Cadmium im Boden deutlich geringer ausfällt:

- Ohne Berücksichtigung der mineralischen Anteile wird die mit dem Kompost aufgebrachte Menge an Schadstoffen als Gesamtfracht ermittelt, die einer als konstant angenommenen Bodenmenge zugeführt wird. Hierbei würde sich bei 10 t TS/(ha\*a) der Gehalt an Cadmium im Boden von ursprünglich 0,36 mg/kg TS innerhalb von 200 Jahren auf 0,56 mg/kg TS (Erhöhung um 0,2 mg/kg TS) und nach 500 Jahren auf 0,86 mg/kg TS erhöhen.
- Wird die Massenzufuhr durch die mineralischen Anteile im Kompost und die damit verbundene Horizonterhöhung berücksichtigt, so steigt bei 10 t TS/(ha\*a) der ursprüngliche Cadmiumgehalt im Boden von 0,36 mg/kg TS in 200 Jahren lediglich auf 0,45 mg/kg TS (Erhöhung um 0,09 mg/kg TS) und in 500 Jahren auf 0,54 mg/kg TS an.

Je mehr Kompost ausgebracht wird, desto deutlicher zeigt sich der Unterschied, ob die langfristig im Boden verbleibenden Anteile berücksichtigt werden oder nicht. Bei geringeren Ausbringungsmengen (z.B. 4 t TS/(ha\*a) grün markiert in Abb. 3) ist der Unterschied weniger stark ausgeprägt.

Als allgemeiner Prozess zeigt sich, dass anstelle eines kontinuierlichen, linearen Anstiegs der Cadmiumkonzentration im Boden die Anreicherung bei Berücksichtigung des Bodenaufbaus nicht linear ist und sich asymptotisch der (ca. doppelten) Stoffkonzentration im Kompost annähert<sup>2</sup>, vgl. hierzu den mathematischen Nachweis.

### 3.2 Einflüsse unterschiedlicher Schadstoffgehalte im Kompost

Einen wesentlichen Einfluss auf die Anreicherung im Boden hat die Schadstoffkonzentration im Kompost. Nach BGK (2010) liegen die durchschnittlichen Gehalte von Cadmium in Komposten bei 0,42 mg/kg TS (blaue Markierung in Abb. 4). Zum Vergleich wird dargestellt, wie sich höhere Stoffgehalte im Kompost auswirken. Es wird beispielhaft mit 1 mg/kg TS Cd als Maximalgehalt gerechnet (orange Markierung in Abb. 4), der nach BioAbfV bei einer Aufbringungsmenge von 30 t TS/ha in drei Jahren als Höchstwert möglich ist. Die Aufbringungsmenge beträgt jeweils 10 t TS (ha\*a).

---

<sup>2</sup> Eine asymptotische Annäherung der Stoffkonzentration im Boden an die ca. doppelte Stoffkonzentration im Kompost ist durch die mit dem Kompost ausgebrachten langfristig verbleibenden mineralischen Anteile von 51 % bedingt, vgl. Exkurs.

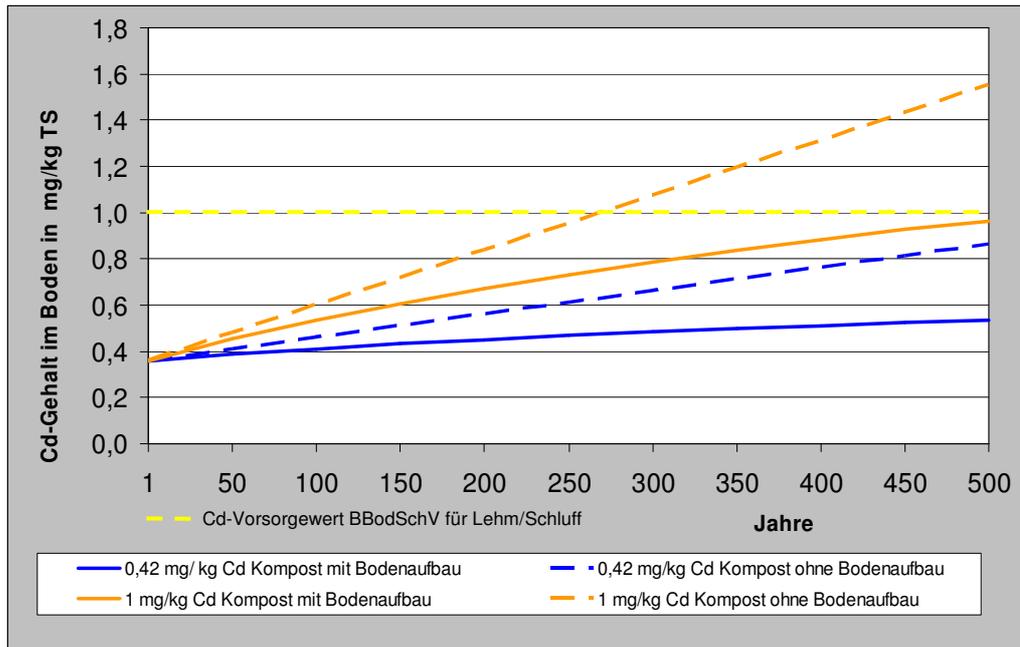


Abbildung 4: Anreicherungszenarien für Cadmium bei einem Cd-Gehalt im Kompost von 0,42 und 1 mg/kg TS  
 Der Ausgangsgehalt des Oberbodens beträgt 0,36 mg/kg TS Cd und entspricht dem Hintergrundwert (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden für Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum.

In der Beispielberechnung zeigt sich, dass bei höheren Schadstoffkonzentrationen im Kompost der Einfluss der mineralischen Anteile auf die Stoffanreicherung im Boden besonders deutlich wird. Während nach der gängigen Frachtenberechnung eine langfristige Kompostanwendung bei Konzentrationen im Kompost von 1 mg/kg TS Cd nach ca. 270 Jahren unter den genannten Voraussetzungen zu einer Überschreitung des Vorsorgewertes des BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff führen würde, zeigt sich diese unter Berücksichtigung des Bodenaufbaus durch die mineralischen Kompostbestandteile aufgrund des asymptotischen Verlaufs auch nach 500 Jahren noch nicht (vgl. hierzu Kap. 3.3).

### 3.3 Einflüsse unterschiedlicher Bodenausgangsgelalte

Die Änderung der Schwermetall-Konzentration im Boden über die Zufuhr von Kompost ist ebenfalls vom Ausgangsgehalt der Böden abhängig. So sind bei höheren Bodenausgangsgelalten auch Abreicherungen, d.h. Abnahmen der Stoffkonzentrationen im Boden möglich (vgl. Abb. 5).

- Betrachtet wird zum einen ein Ausgangsgehalt des Oberbodens von 0,15 mg/kg TS Cd (blau in Abb. 5). Dieser Wert entspricht dem Hintergrundwert (50. Perzentil) nach LABO (2003) für Ackernutzung auf Geschiebemergel/-lehm im ländlichen Raum in Deutschland.

- Zum anderen wird ein Ausgangsgehalt des Oberbodens von 1,0 mg/kg TS Cd (rosa in Abb. 5) angesetzt. Dieser Gehalt entspricht dem Hintergrundwert (90. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden für Ackernutzung auf Löss in Ballungsräumen in NRW (Gebietstyp I).

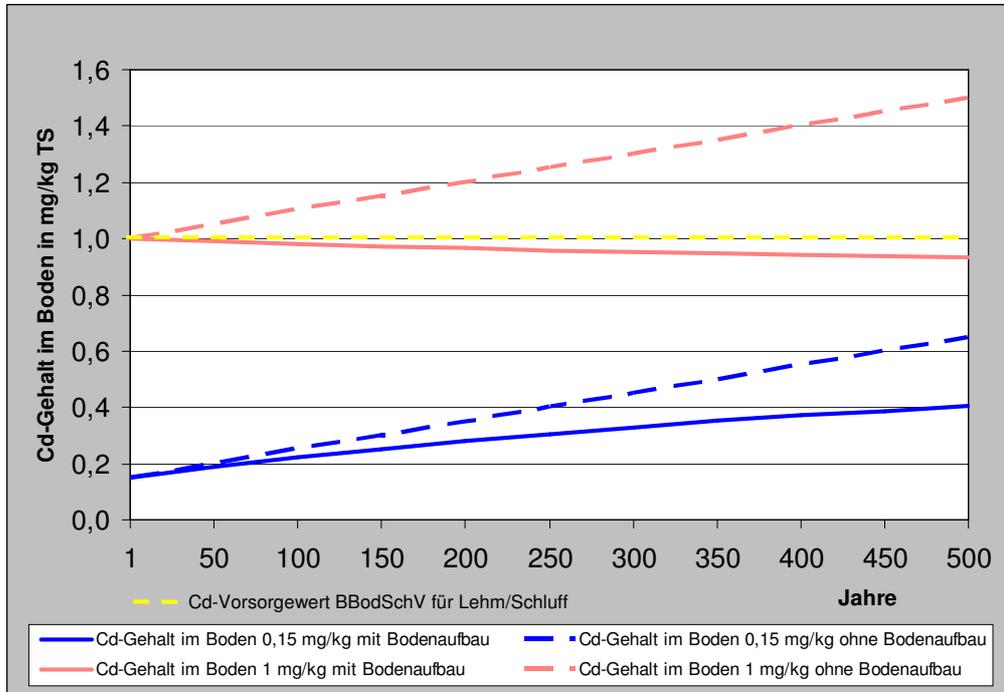


Abbildung 5: Anreicherungsszenarien für Cadmium in Abhängigkeit vom Bodenausgangsgesamt  
 Der Ausgangsgehalt des Oberbodens beträgt 0,15 mg/kg TS Cd (blau) sowie 1,0 mg/kg TS Cd (gelb). Der Cd-Gehalt im Kompost liegt bei 0,42 mg/kg TS. Die Aufbringungsmenge beträgt 10 t TS/(ha\*a).

Die Änderung der Stoffkonzentration im Boden durch die Kompostaufbringung ist vom Ausgangsgehalt des Oberbodens abhängig. Sind die ursprünglichen Gehalte im Oberboden geringer (z.B. Hintergrundwert nach LABO 2003 für Geschiebemergel und -lehme), fällt die Anreicherung höher aus. Dies gilt auch, wenn die mineralischen Anteile berücksichtigt werden. Dennoch zeigt sich auch hier ein deutlicher Unterschied zum Anreicherungsszenario, wenn die Massenzufuhr durch die mineralischen Anteile im Kompost bei der Konzentrationserhöhung berücksichtigt wird.

Liegen höhere Ausgangsgehalte im Oberboden vor, können sich Effekte einer Abreicherung einstellen (z.B. Hintergrundwert für Löss in NRW bei Ackernutzung im urbanen Raum). Eine reine Frachtenberechnung ohne Berücksichtigung der Zufuhr mineralischer Anteile würde demgegenüber zu einer Erhöhung der Konzentrationen im Oberboden führen. Tatsächlich wird jedoch durch die Zufuhr von Komposten, die im Verhältnis geringere Gehalte aufweisen, eine Verbesserung der Schadstoffgehalte im Boden erreicht (vgl. Abb. 5).

## Exkurs: Mathematischer Nachweis der langfristigen Stoffanreicherung

Mit der Kompostdüngung werden langfristig im Boden verbleibenden mineralischen Anteile aufgebracht, die zum Bodenaufbau beitragen. Die in Kap. 3 dargestellten Prozesse der An- oder Abreicherung lassen sich mathematisch durch die unten stehende Funktionsgleichung ( $C_{Bo,t}$ ) beschreiben und durch eine asymptotische Annäherung erklären.

Hierbei findet eine Annäherung des Funktionswertes von  $C_{Bo,t}$  an eine waagerechte Asymptote statt, die für  $t \rightarrow \infty$  berechnet werden kann.

**Berechnungsformel 3:** Mit Berücksichtigung des Bodenaufbaus durch langfristig verbleibende mineralische Anteile

$$\text{Funktion } C_{Bo,t} = \frac{(C_{Bo} \cdot d \cdot 1000 \cdot h \cdot ha) + (C_{Komp} \cdot M \cdot 0,1 \cdot ha \cdot t)}{(d \cdot 1000 \cdot h \cdot ha) + (M \cdot A_{lang} \cdot 0,1 \cdot ha \cdot t)}$$

t	Zeitraum der Anwendung	in Jahren
$C_{Bo}$	Stoffkonzentration in relevantem Bodenhorizont zu Beginn der Berechnung (hier Hintergrundwert nach LABO 2003)	in mg/kg TS
$C_{Bo,t}$	Stoffkonzentration in relevantem Bodenhorizont nach t Jahren	in mg/kg TS
$C_{Komp}$	Stoffkonzentration im Kompost	in mg/kg TS
ha	Flächengröße	in Hektar (ha)
h	Horizontmächtigkeit	in m
M	aufgebrachte Kompostmenge (TS)	in t/(ha*a)
$A_{lang}$	langfristig im Boden verbleibender Anteil (in Formel einfügen: 50 % = 0,50)	in %
d	Trockenrohdichte des Bodens	in g/cm <sup>3</sup>

### Ermittlung der Asymptote und Betrachtung des Funktionswertes für $t \rightarrow \infty$

(1) Funktionsgleichung wird umformuliert in zwei Quotienten, deren Entwicklung jeweils für  $t \rightarrow \infty$  betrachtet wird:

$$C_{Bo,t} = \frac{(C_{Bo} \cdot d \cdot 1000 \cdot h)}{(d \cdot 1000 \cdot h) + (M \cdot A_{lang} \cdot 0,1 \cdot t)} + \frac{(C_{Komp} \cdot M \cdot 0,1 \cdot t)}{(d \cdot 1000 \cdot h) + (M \cdot A_{lang} \cdot 0,1 \cdot t)}$$

(2) für  $t \rightarrow \infty$  geht  $\frac{(C_{Bo} \cdot d \cdot 1000 \cdot h)}{(d \cdot 1000 \cdot h) + (M \cdot A_{lang} \cdot 0,1 \cdot t)}$  (erster Quotient) gegen 0.

(3) für  $t \rightarrow \infty$  geht  $\frac{(C_{Komp} \cdot M \cdot 0,1 \cdot t)}{(d \cdot 1000 \cdot h) + (M \cdot A_{lang} \cdot 0,1 \cdot t)}$  (zweiter Quotient) gegen  $\frac{C_{Komp}}{A_{lang}}$ .

**Begründung für (3) – Entwicklung zweiter Quotient:**

$$\frac{(C\_Komp \cdot M \cdot 0,1 \cdot t)}{(d \cdot 1000 \cdot h) + (M \cdot A\_lang \cdot 0,1 \cdot t)}$$

(4) Gleichung wird erweitert mit  $\frac{1}{t}$

$$\text{daraus ergibt sich} = \frac{C\_Komp \cdot M \cdot 0,1 \cdot t}{\left(\frac{d \cdot 1000 \cdot h}{t}\right) + \left(\frac{M \cdot A\_lang \cdot 0,1 \cdot t}{t}\right)}$$

(5) Gleichung wird gekürzt,

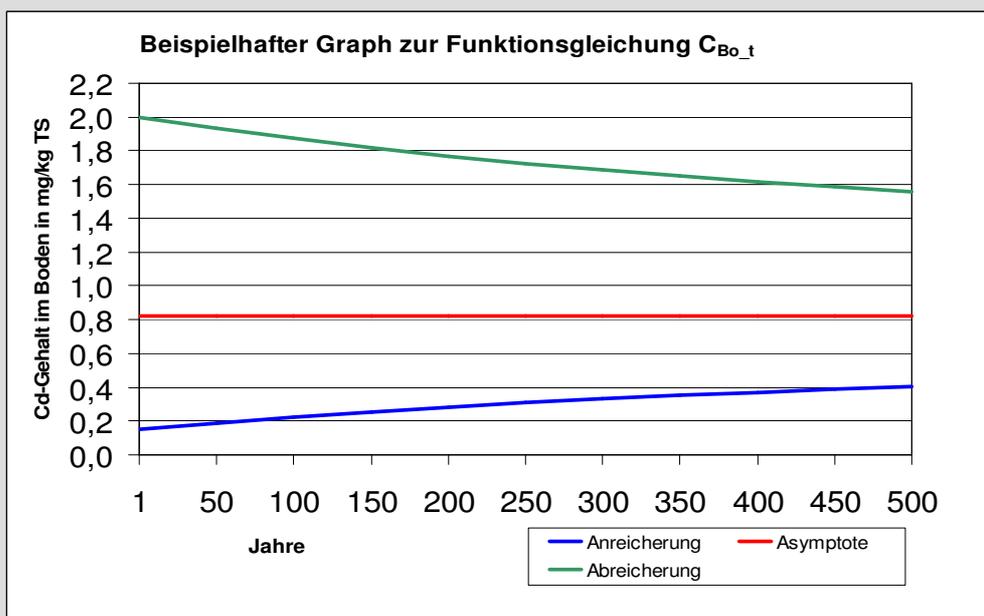
$$\text{somit verbleibt} = \frac{C\_Komp \cdot M \cdot 0,1}{\left(\frac{d \cdot 1000 \cdot h}{t}\right) + M \cdot A\_lang \cdot 0,1}$$

(6) für  $t \rightarrow \infty$  geht  $\frac{d \cdot 1000 \cdot h}{t}$  gegen 0.

(7) somit verbleibt  $\frac{C\_Komp \cdot M \cdot 0,1}{M \cdot A\_lang \cdot 0,1} = \frac{C\_Komp}{A\_lang}$ .

Daraus folgt:

Für  $t \rightarrow \infty$  nähert sich der Wert der Funktion  $C_{Bo,t}$  stets dem Wert  $\frac{C\_Komp}{A\_lang}$  an.



### 3.4 Einflüsse der Horizontmächtigkeit

Die Änderung der Schwermetallkonzentration im Boden über die Zufuhr von Kompost ist in den gängigen Frachtenberechnungen stark von der Horizontmächtigkeit abhängig. Für die Beispielrechnung wird wie in den vorangehenden Beispielen ein Cd-Gehalt im Kompost nach BGK (2010) von 0,42 mg/kg TS und ein Anteil an langfristig stabilen, mineralischen Anteilen von 51 % angenommen. Für die Cadmiumkonzentration im Boden wird der Hintergrundwert 0,36 mg/kg TS Cd (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden unter Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum in Deutschland herangezogen.

Die Horizontmächtigkeit wird wie folgt variiert:

- eine Horizonttiefe von 10 cm (hellblaue Markierung in Abb. 6),
- eine Horizonttiefe von 40 cm (dunkelgrüne Markierung in Abb. 6).

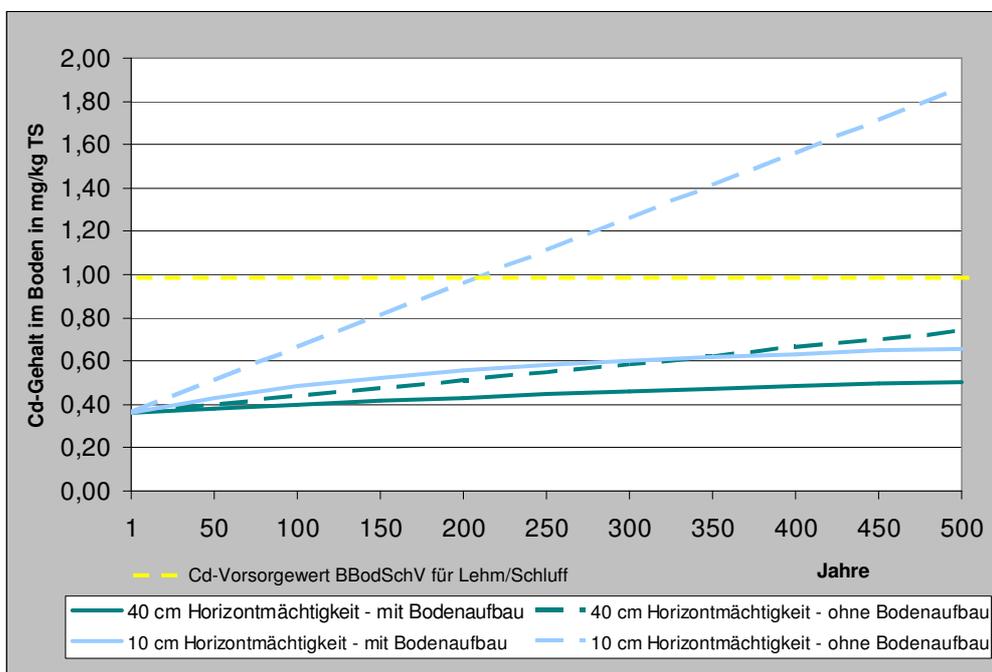


Abbildung 6: Anreicherungszenarien für Cadmium bei einem Cd-Gehalt im Kompost von 0,42 und unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten  
Der Ausgangsgehalt des Oberbodens beträgt 0,36 mg/kg Cd und entspricht dem Hintergrundwert (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden für Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum.

Abbildung 6 zeigt, dass sich die Horizontmächtigkeit bei herkömmlichen Frachtenberechnungen ohne Berücksichtigung von mineralischen Anteilen sehr deutlich auf die berechneten Stoffanreicherungen auswirkt (nach 500 Jahren 0,74 mg/kg TS Cd bei 40 cm Horizonttiefe und 1,86 mg/kg TS bei 10 cm Horizonttiefe). Dagegen ist der Unterschied mit Berücksichtigung der mineralischen Anteile nicht sehr prägnant. Die berechneten Cadmiumgehalte betragen nach 500 Jahren 0,51 mg/kg TS bei 40 cm Horizonttiefe und 0,66 mg/kg TS bei 10 cm Horizonttiefe. Die Annäherung an die Asymptote von ca. 0,82 mg/kg TS Cd ist von der Horizontmächtigkeit unabhängig, wie u.a. der mathematische Nachweis zeigt. Die Anreicherung und Annäherung erfolgt jedoch bei mächtigeren Horizonten nochmals verlangsamt.

### 3.5 Einflüsse der mineralischen Anteile

Entsprechend dem mathematischen Nachweis zur Ermittlung der Asymptote (vgl. Exkurs) ist die Entwicklung des Funktionswertes vom Anteil der stabilen mineralischen Anteile abhängig. Wie in Kapitel 2 dargestellt, liegt im Sinne einer Worst-Case-Annahme ein stabiler Mineralbodenanteil im Kompost von 51 % vor. Nicht berücksichtigt ist hierbei, dass auch ein Teil der organischen Substanz längerfristig im Boden stabil ist, der zwischen 9,9 % und 22,5 % liegen kann (vgl. Kap. 2), d.h. die stabilen Anteile im Kompost können bis zu 73,5 % betragen.

Für die Beispielrechnung in Abbildung 6 wird gezeigt, wie sich die Schadstoffkonzentration im Boden bei unterschiedlichen stabilen Anteilen verhält. Als Rahmenbedingung wird wie in den vorangehenden Beispielen ein Cd-Gehalt im Kompost nach BGK (2010) von 0,42 mg/kg TS angenommen. Für die Cadmiumkonzentration im Boden wird der Hintergrundwert 0,36 mg/kg TS Cd (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden unter Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum in Deutschland herangezogen.

Der Anteil der stabilen Substanzen wird variabel einbezogen:

- Anteil der stabilen Substanzen im Kompost von 20 % (Asymptote: 2,1),
- Anteil der stabilen Substanzen im Kompost von 51 % (Asymptote: 0,82),
- Anteil der stabilen Substanzen im Kompost von 70 % (Asymptote: 0,6).

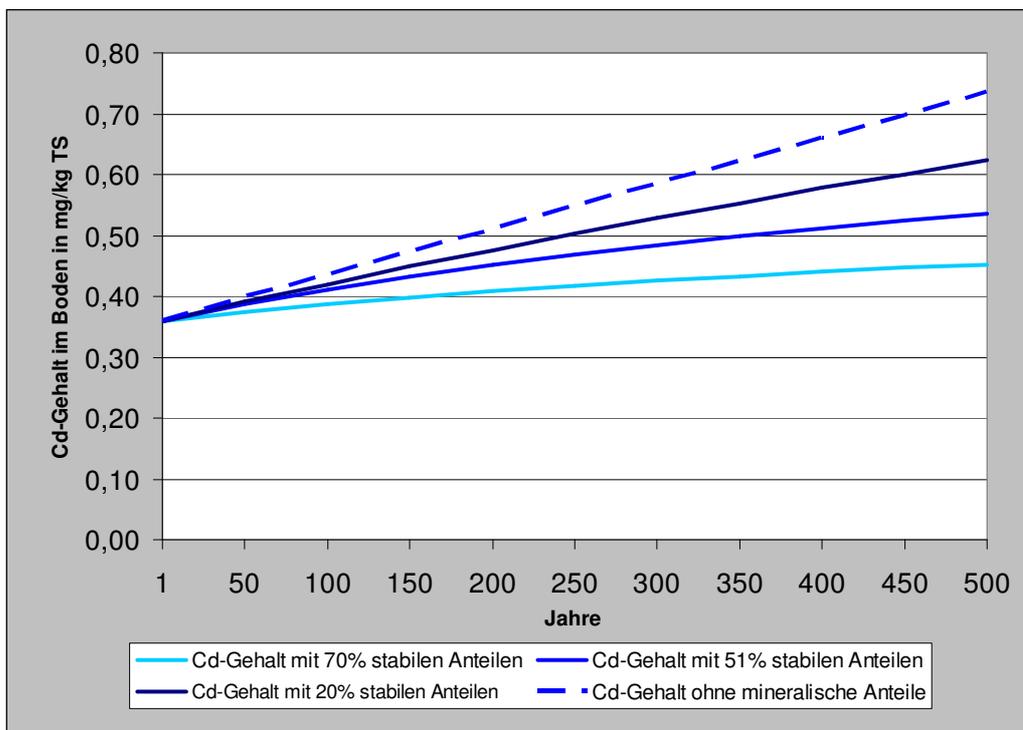


Abbildung 7: Anreicherungszenarien für Cadmium bei einem Cd-Gehalt im Kompost von 0,42 mg/kg TS und unterschiedlichen stabilen Anteilen. Der Ausgangsgehalt des Oberbodens beträgt 0,36 mg/kg TS Cd und entspricht dem Hintergrundwert (50. Perzentil) nach LABO (2003) von Oberböden für Ackernutzung auf Löss im ländlichen Raum.

Der Kurvenverlauf zeigt deutlich, wie sich der Anteil mineralischer Bestandteile im Kompost auf die Anreicherungsszenarien und die Schadstoffgehalte im Boden auswirkt.

Die Berechnungen und die folgende Abbildung 7 zeigen, dass in einem Zeitraum von 500 Jahren die berechneten Cadmiumgehalte von ursprünglich 0,36 mg/kg TS Cd

- auf 0,62 mg/kg TS Cd bei 20 % stabilen Anteilen,
  - auf 0,54 mg/kg TS bei 51 % stabilen Anteilen,
  - auf 0,45 mg/kg TS bei 70 % stabilen Anteilen sowie
  - auf 0,74 mg/kg TS ohne Berücksichtigung stabiler Anteile
- gestiegen sind.

Werden längere Zeiträume als 500 Jahre betrachtet, zeigt sich immer deutlicher die Differenz bei der Annäherung an die Asymptote. So wird bei einem stabilen Mineralbodenanteil von 51 % der Cadmiumgehalt von 0,82 mg/kg TS (Asymptote) auch bei stetiger Anwendung ( $t \rightarrow \infty$ ) nicht überschritten. Bei einem stabilen Anteil von 70 % wird der maximale Stoffgehalt bei 0,6 mg/kg TS Cd im Boden (Asymptote) nicht überschritten. Dagegen ist bei 20 % stabilen Anteilen eine Anreicherung bis 2,1 mg/kg TS möglich.

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS

Die Beispielfrachtenberechnungen zeigen, dass die Berücksichtigung von stabilen mineralischen Anteilen im Kompost von wesentlicher Bedeutung für die entstehenden Stoffkonzentrationen im Boden ist.

Konkret zeigt der mathematische Nachweis, dass unter Berücksichtigung der Daten nach BGK (2010), d.h. bei einem mittleren Cd-Gehalt im Kompost von 0,42 mg/kg TS und einem langfristig stabilen Mineralbodenanteil von 51 %, die Konzentration von 0,82 mg/kg TS Boden in keinem Fall überschritten wird, da dies die Asymptote (Annäherungsgerade) darstellt.

Die Asymptote berechnet sich aus  $\frac{C_{Komp}}{A_{lang}}$ , d.h. die maximale Stoffkonzentration ( $C_{Bo}$ ) ergibt sich aus dem Quotient der Stoffkonzentration im Düngemittel (hier Kompost:  $C_{Komp}$ ) und dem stabilen Anteil ( $A_{lang}$ ).

Bei höheren Bodenausgangsgelalten nähert sich die Konzentration im Boden ebenfalls an diesen Wert an, d.h. es findet eine Abreicherung der Stoffkonzentration statt. So kann beispielsweise bei Böden, die höhere Konzentrationen als 0,82 mg/kg TS Cd aufweisen, langfristig eine Verbesserung der Schadstoffsituation erreicht werden.

Die Beispielberechnungen zeigen, dass eine Berücksichtigung der stabilen Anteile im Kompost zur Berechnung der entstehenden Schwermetallkonzentration im Boden bei einer langfristigen Kompostanwendung fachlich sinnvoll und plausibel ist. Die häufig verwendeten Frachtenberechnungen, bei denen

ausschließlich die Schwermetallkonzentrationen im Produkt sowie die Aufwandmengen berücksichtigt werden, führen insbesondere bei organischen Düngern mit hohen Anteilen an mineralischen Bodenpartikeln zu einer meist nicht realistischen (Über-)Bewertung der Schwermetallgehalte im Boden.

## 5 LITERATUR

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Aufl., Hannover.

AMLINGER, F.; PEYR, S.; GESZTI, J.; DREHER, P.; WEINFURTNER, K.; NORTCLIFF, S. (2006): Evaluierung der nachhaltig positiven Wirkung von Kompost auf die Fruchtbarkeit und Produktivität von Böden. Literaturstudie. Herausgegeben vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz- BBodSchG), in: BGBl I 1998, Teil I, 502.

BioAbfV (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung BioAbfV) vom 21.09.1998, in: BGBl 1998, Teil I, Nr. 65, S. 2955-2981.

BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST – BGK (2010): Medianwerte gütegesicherter Komposte und Gärprodukte im Jahr 2010 (zur Verfügung gestellt von der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Februar 2011).

DLG / LLFG - DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V. / LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND GARTENBAU SACHSEN-ANHALT [Hrsg.] (2009): Hinweise zur Kalkdüngung, DLG-Merkblatt 353, Frankfurt.

DüngeVO (1996): Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen - Düngeverordnung - vom 26.01.1996, in: BGBl 1996, Teil I, Nr. 6, S. 118-121.

DüV – Düngeverordnung (2007) Verordnung über die Anwendung von Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) vom 27. Feb. 2007, BGBl I Nr. 7 vom 5.03.2007 S. 221).

IFEU / ahu (2011): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Teil 1: Wirkungsanalyse Boden, unveröffentl. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 3709 33 340.

KLUGE, R. et al. (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Hg. vom Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg – LTZ, Karlsruhe.

auch veröffentlicht in: BGK/ltz (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Thema des Abschlussprojektes Kompost-Anwendungs-

versuche Baden-Württemberg, gefördert durch das Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum BW, BGK und VHE. Nachfolgeprojekt des Verbund-Forschungsprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Laufzeit 2000-2002). Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (Hrsg.), August 2008.

KNAPPE, F.; MÖHLER, S.; OSTERMAYER, A.; LAZAR, S.; KAUFMANN, C. (2008): Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade, UBA-Forschungsbericht 203 74 275, UBA Texte 39/08, Berlin.

LABO – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden, 3. überarb. u. erg. Auflage 2003.

MLR – MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2010): Infodienst Landwirtschaft - Ernährung - Ländlicher Raum. Dünger-Umrechnungstabellen, [http://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1209715/Dnger %20Umrechnungstabelle.xls](http://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1209715/Dnger%20Umrechnungstabelle.xls).

REINHOLD, J. (2008): Anhang 2, Teil 1, zu (Kluge et al. 2008): Untersuchungen zu heißwasserlöslichen Bodengehalten an Kohlenstoff und Stickstoff sowie zur Humusreproduktion und Humusqualität. Kompost-Abschlussbericht 2008. Punkte C 2.2.1.2 und C 2.2.1.5, Ausführlicher Ergebnisbericht.

TIMMERMANN, F. et al. (2003): Nachhaltige Kompostverwertung in der Landwirtschaft, DBU-Abschlussbericht zum Verbundforschungsprojekt Praxisbezogene Anwendungsrichtlinien sowie Vermarktungskonzepte für den nachhaltigen Einsatz von gütegesicherten Komposten im landwirtschaftlichen Pflanzenbau, hg. v. der Gütegemeinschaft Kompost Region Süd e.V., Leonberg.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Heidelberg.

WESSOLEK, G. et al. (2008): Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben. FKZ 202 71 264, Berlin.