



Umweltinstitut des Landes Vorarlberg

Klärschlammkompost

Abbauverhalten von Schadstoffen während der Kompostierung

Klärschlammkompost

Abbauverhalten von Schadstoffen während der Kompostierung

Gesamtbearbeitung:

Christoph Scheffknecht

email: christoph.scheffknecht@vorarlberg.at

Probenahme und Felduntersuchung:

Wolfgang Eberhard

Hansjörg Kapeller

Werner Bader

Chemische und physikalische Untersuchungen:

Hansjörg Kapeller

Walter Hämmerle

Norbert Lerchster

Monika Schmieder

Peter Singer

Sigrid Scharf (Alkylphenoluntersuchungen; Umweltbundesamt Wien)

Besonderer Dank gilt den Komposterzeugern für die Mitarbeit:

ARA Bezau

ARA Bregenz

ARA Dornbirn

Fa. AVO

Fa. Häusle

Impressum

Herausgeber und Medieninhaber:
Amt der Vorarlberger Landesregierung
Römerstraße 16, 6900 Bregenz

Verleger:
Umweltinstitut des Landes Vorarlberg
Montfortstraße 4, 6900 Bregenz
Tel. 05574/511-42099

Bregenz, April 2005

Inhalt

Kurzfassung	3
1. Einleitung	3
2. Projektbeschreibung	3
3. Kompostierung	4
4. Untersuchte Schadstoffe und Ergebnisse	5
4.1 Übersicht	5
4.2 Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)	6
4.3 4-Nonylphenol und 4-Nonylphenoethoxylate (NP, NPEO)	7
4.4 Bisphenol A (BPA)	9
4.5 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	10
4.6 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	11
4.7 Summenparameter AOX und Kohlenwasserstoffe	12
4.8 Schwermetalle	12
5. Zusammenfassung und Ausblick	13
6. Literatur	14
7. Anhang	16
7.1 Probenahme und Probenvorbereitung	16
7.2 Parameter und Prüfanweisungen	16
7.3 Ergebnistabellen	17

Kurzfassung

Klärschlamm und Klärschlammkomposte enthalten naturgemäß verschiedenste organische Schadstoffe und Stoffgruppen aus dem häuslichen, gewerblichen und industriellen Anwendungsbereich. Das Abbauverhalten einiger dieser Stoffe, die auch als Schadstoffe bekannt sind, wurde während der Rottephase von Klärschlammkomposten beobachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass bestimmte organische Schadstoffe durch die Kompostierung deutlich verringert werden, während andere kein oder nur ein geringes Abbauverhalten zeigen. So reduzieren sich etwa die meistverwendeten und somit im Klärschlamm mengenmäßig bedeutendsten Tenside (LAS) deutlich.

1. Einleitung

In Vorarlberg erfolgt die im Sinne der Kreislaufwirtschaft ökologisch sinnvolle Verwertung von Klärschlämmen in Form von Klärschlammkomposten. Hierzu ist aber die strenge Qualitätskontrolle der verwendeten Klärschlämme und Zusatzstoffe sowie des Endprodukts eine unverzichtbare Voraussetzung [5, 6]. Die landwirtschaftliche Verwertung ist durch das Klärschlammgesetz [1] und im Detail durch die Klärschlammverordnung [2] nach strengen Bestimmungen geregelt. Die Nassschlammausbringung ist seit Ende der 90er Jahre untersagt. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ergibt sich über die Kompostverordnung [7]. Derzeit werden drei Viertel der in Vorarlberg angefallenen Klärschlämme (ca. 11400t) kompostiert und verwertet [6].

Die Belastung von Klärschlämmen mit organischen Schadstoffen wird speziell im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Verwertung in verschiedenen europäischen Ländern zunehmend diskutiert. In diesen Ländern ist allerdings bis heute die Nassschlammausbringung üblicher Standard, eine Kompostierung der Klärschlämme wie in Vorarlberg erfolgt nur vereinzelt. Während die Schwermetallproblematik gut untersucht ist, liegen über den Eintrag organischer Schadstoffe in den Boden, vor allem unter Berücksichtigung der regionalen Gegebenheiten nur wenige Informationen vor. Daher wird dieser Thematik vom Umweltinstitut verstärkt Augenmerk geschenkt.

Im Gegensatz zu Schwermetallen besteht bei organischen Substanzen grundsätzlich die Möglichkeit einer Schadstoffreduktion durch biologischen Abbau während der Kompostierung. Inwieweit sich die Gehalte ausgewählter Chemikalien während der Rottephase unter realen Bedingungen tatsächlich verringern, wurde im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit dem Umweltbundesamt Wien untersucht.

2. Projektbeschreibung

Von den fünf Vorarlberger Klärschlammkomposterzeugern wurden die Klärschlammkompostmieten jeweils zu Beginn, in der Mitte sowie am Ende der Rottephase beprobt und auf ausgewählte Schadstoffe und Summenparameter sowie Düngeparameter untersucht. Auf Kompostiersversuche im Labormaßstab wurde bewusst verzichtet, da praxisorientierte Informationen unter realen Bedingungen gewonnen werden sollten. Um auch Informationen über das Langzeitverhalten zu gewinnen, wurden ausgewählte Mieten nach einem Jahr Nachrotte zusätzlich untersucht.

3. Kompostierung

In Vorarlberg werden unterschiedliche Kompostierungsstrategien zur Erzeugung von Klärschlammkomposten angewendet. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist das Verhältnis Klärschlamm zu Strukturmaterial, wie beispielsweise Grünschnitt. Weiters werden von den Komposterzeugern verschiedene Kompostierungstechniken angewendet, die sich primär im Rotteaufbau und der Belüftungstechnik unterscheiden. Die wichtigsten Kompostierungsparameter sind in der **Tabelle 1** dargestellt.

Entnahmeort	Kompostierung	KS-Anteil [%]	Zusatzstoffe
ARA Bezau	Dreiecksmiete überdacht	90	Sägemehl
ARA Bregenz	Dreiecksmiete überdacht	33	Häckselgut, Grünschnitt
ARA Dornbirn	Dreiecksmiete	50	Grünschnitt
Fa. AVO	Betontunnel	33	Grünschnitt; Strukturmaterial
Fa. Häusle	Betontunnel	33	Grünschnitt; Strukturmaterial

Tabelle 1: Kompostierungsbedingungen



Abbildung 1: Klärschlammkompostmiete auf dem Gelände der ARA Bregenz

4. Untersuchte Schadstoffe und Ergebnisse

4.1 Übersicht

Aus der Vielzahl an potentiellen Schadstoffen wurden jene ausgewählt, welche entweder in großen Mengen im Klärschlamm vorhanden sind oder eine hohe ökotoxikologische Relevanz besitzen [4, 9, 11-18, 20, 21] und daher im Entwurf der EU-Klärschlammrichtlinie [3] als zukünftige Kontrollparameter diskutiert werden. Zusätzlich wurden die klassischen Düngeparameter sowie typische Vertreter der Schwermetalle für Referenzzwecke in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Die Analysenergebnisse sind in tabellarischer Form im Anhang unter Kapitel 7.3 dargestellt. Für eine leichtere Bewertung der erhaltenen Untersuchungsergebnisse wurden – so weit vorhanden – Grenzwerte und in der Literatur bekannte Referenzdaten mit in die Tabellen aufgenommen.

Wie die nachfolgende **Abbildung 2** zeigt, sind die festgestellten Konzentrationsbereiche für die verschiedenen Schadstoffe im nicht kompostierten Ausgangsmaterial deutlich unterschiedlich und erstrecken sich über mehrere Zehnerpotenzen. Für die Darstellung der jeweiligen Konzentrationsbereiche wurde daher eine logarithmische Skalierung gewählt. Die vorgefundenen Konzentrationsbereiche sind typisch für anaerob stabilisierte Klärschlämme, wie Vergleiche mit Literaturdaten zeigen.

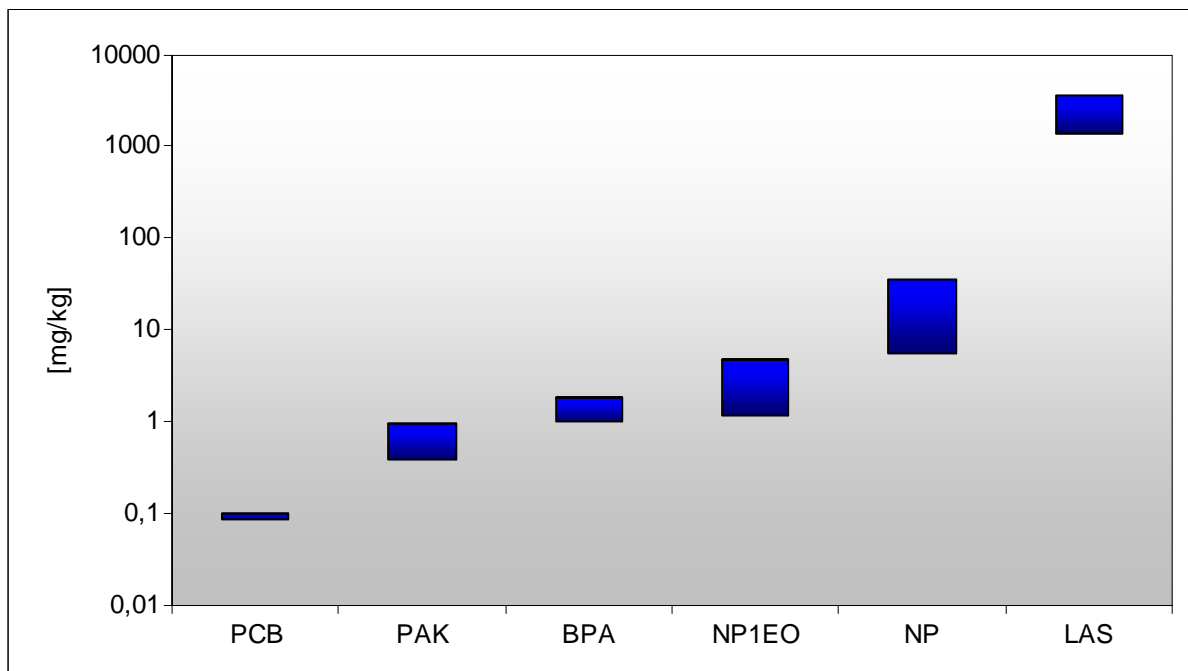


Abbildung 2: Konzentrationsbereiche im Klärschlammkompost beim Rottestart

Im Nachfolgenden werden die in **Abbildung 2** dargestellten Schadstoffgruppen hinsichtlich ihres Abbauverhaltens bei der Kompostierung diskutiert.

4.2 Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)

4.2.1 Verwendung und Eigenschaften

Die linearen Alkylbenzolsulfonate (LAS) gehören zu den “Arbeitspferden” der Tensidchemie und werden vorwiegend für die Herstellung von Waschmitteln verwendet. Sie werden neben industriellen Anwendungen vor allem in zahlreichen Produkten des täglichen Bedarfs, wie z.B. Duschgel eingesetzt. Die jährliche Jahresproduktion beträgt weltweit ca. 2 Mio t [4]. Davon werden ca. 80% im Haushalt in diversen Reinigungsmitteln und Kosmetika verwendet und 20% in der Industrie. Die LAS zählen, bedingt durch die Sulfonatgruppe, zu den anionischen Tensiden, die die wichtigste Gruppe der waschaktiven Substanzen darstellen. Die aerobe biologische Abbaubarkeit der LAS ist gut, die akute Toxizität gering. Allerdings reichern sich die LAS im Klärschlamm an und gehören zu den mengenmäßig häufigsten synthetisch hergestellten organischen Stoffen im Klärschlamm [11]. Trotz der geringen Toxizität werden daher Grenzwerte für LAS-Gehalte auf europäischer Ebene diskutiert [3]. Im dritten Entwurf zu einer europäischen Klärschlammrichtlinie wird für die LAS ein Grenzwert von 2600 mg/kg angegeben.

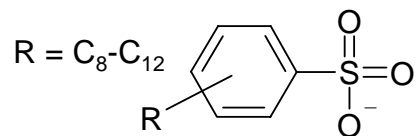


Abbildung 3: Strukturformel der linearen Alkylbenzolsulfonate (LAS)

4.2.2 Untersuchungsergebnis

Die Gehalte an linearen Alkylbenzolsulfonaten (LAS) im Ausgangsmaterial vor der Kompostierung liegen im Bereich zwischen 1400 und 3500 mg/kg (Anhang, Tabelle 3) [8]. Im internationalen Vergleich liegen die gemessenen Werte unter dem Durchschnitt [9, 12, 13, 14, 17] für anaerob stabilisierte Klärschlämme. Der im Entwurf einer europäischen Klärschlammrichtlinie diskutierte Grenzwert von 2600 mg/kg wurde aber ohne Kompostierungsprozess teilweise dennoch nicht eingehalten.

Wie die nachfolgende **Abbildung 4** deutlich zeigt, kann nach der Kompostierung dieser Grenzwert gesichert eingehalten werden, da sich die Konzentrationen durch den biologischen Abbau während der Rottephase deutlich verringern. Diese Verringerung ist auch mit relativ kurzen Rottedauern bei aktiver Belüftung möglich, wie auch bei Komposten mit hohem Klärschlammanteil.

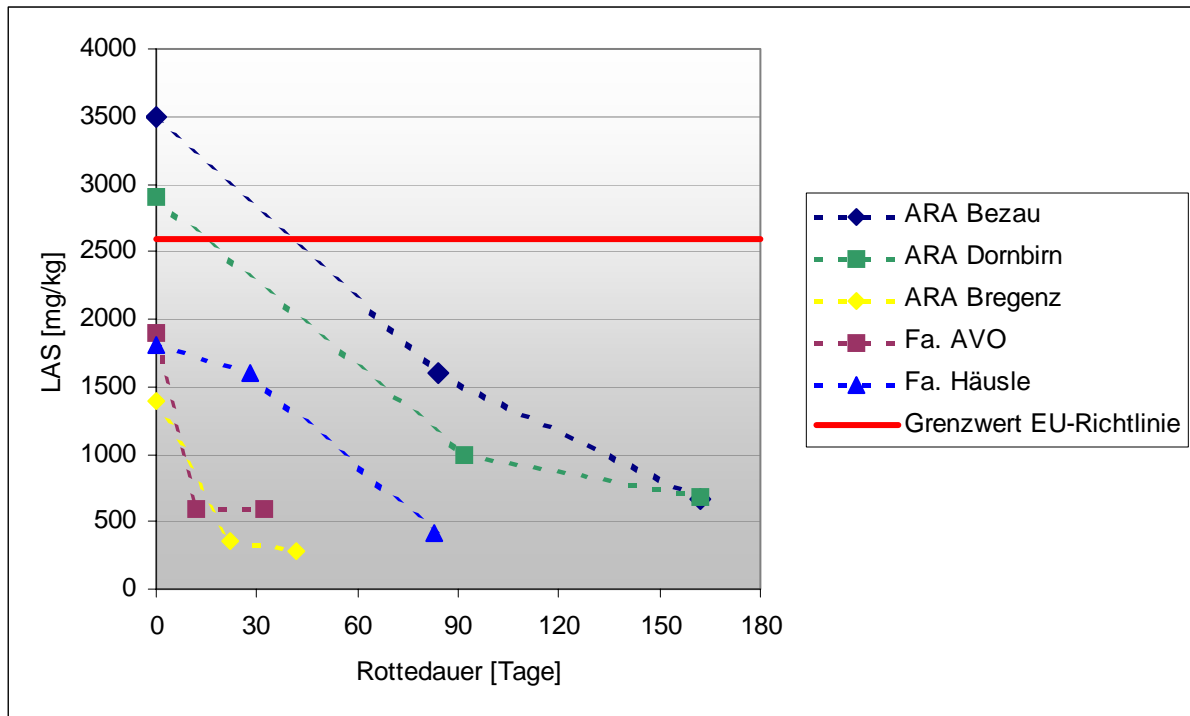


Abbildung 4: Abbau von LAS während des Kompostierprozesses

Erwähnenswert ist der Klärschlammkompost der Fa. AVO, bei dem der LAS-Abbau in der 2. Hälfte der Rottephase stagniert. Der Intensivrotte wurde in diesem Fall eine Nachrotte ohne Belüftung nachgeschaltet. Dieser Effekt wird auch beim Bisphenol A beobachtet.

4.3 4-Nonylphenol und 4-Nonylphenoethoxylate (NP, NPEO)

4.3.1 Verwendung und Eigenschaften

Nonylphenoethoxylate, kurz NPEO, sind wichtige nichtionische Tenside, die in der Industrie in großen Mengen verwendet werden. Jährlich werden weltweit ca. 500000 t hergestellt. Diese Polyethoxylate bauen sich unter aeroben Bedingungen im Belebungsbecken von biologischen Kläranlagen zur korrespondierenden Essigsäure und nachfolgender schrittweiser Kettenverkürzung insbesondere zu Nonylphenolmonoethoxylat (NP1EO) und Nonylphenoldiethoxylat (NP2EO) als Hauptabbauprodukte ab [20]. Gemeinsam mit noch nicht abgebauten längerkettigen Verbindungen und den entsprechenden Essigsäurederivaten finden sich diese Verbindungen in Kläranlagenabläufen beziehungsweise im Rohschlamm. Unter anaeroben Bedingungen im Faulturm während der Klärschlammstabilisierung bildet sich dann unter schrittweisem Verlust von Ethoxygruppen Nonylphenol (NP) (**Abbildung 5**). Wegen der schlechteren Wasserlöslichkeit von Nonylphenol und der kurzkettigen Nonylphenoethoxylate (NP1EO und NP2EO) reichern sich diese im Klärschlamm an. Es ist bekannt, dass sich Nonylphenol im Boden relativ rasch abbaut. Bezüglich Details des sehr komplexen Abbauverhaltens dieser Substanzklasse wird auf die Fachliteratur [20, 22] verwiesen.

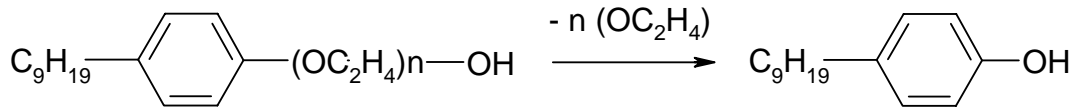


Abbildung 5: Schrittweiser Abbau von Nonylphenoethoxylat zu Nonylphenol (vereinfacht)

Kurzkettige Nonylphenoethoxylate, -carboxylate und insbesondere Nonylphenol selber zeigen eine schwach estrogene Wirkung. Dies bedeutet, dass sie wie die natürlichen oder synthetischen Estrogene hormonell wirken können, allerdings erst bei wesentlich höheren Konzentrationen. Die estrogene Wirkung steigt mit abnehmender Kettenlänge. Die 4-Nonylphenole sind in der EU-Liste der „prioritär“ gefährlich eingestuft Substanzen enthalten.

4.3.2 Untersuchungsergebnis

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass langkettige Nonylphenoethoxylate bereits vor der Kompostierung zu einem überwiegenden Teil zu Nonylphenol und Nonylphenolmonoethoxylat umgesetzt wurden (Anhang, Tabelle 4). Während der Kompostierung setzt sich der Trend zur Kettenverkürzung fort (**Abbildung 6**). In der Abbildung sind die Mittelwerte aus den verschiedenen Kompostproben dargestellt.

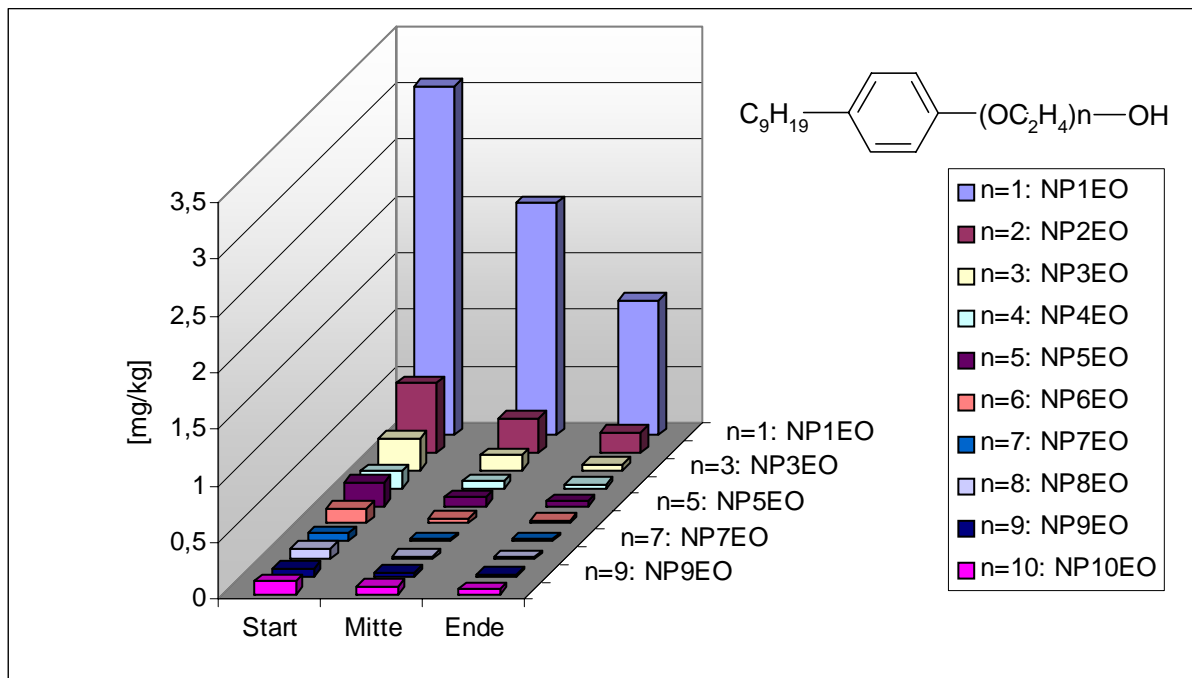


Abbildung 6: Stufenweiser Abbau der Nonylphenoethoxylate während der Kompostierung

Nach dem Abbau aller Ethoxyketten gelangt man zum Nonylphenol. Wie die nachfolgende **Abbildung 7** zeigt, ist das weitere Abbauverhalten von Nonylphenol der einzelnen untersuchten Komposte nicht einheitlich. Während bei zwei Komposten kein weiterer Abbau von Nonylphenol beobachtet werden konnte, wurde bei drei Rotteprozessen eine Reduktion der Nonylphenolgehalte festgestellt.

Die Nonylphenolkonzentrationen liegen bereits vor der Kompostierung unterhalb des diskutierten EU-Grenzwerts, allerdings ist der Abstand nicht sehr groß. Inwieweit die Reduktion von Nonylphenol durch optimierte Prozessführung während der Kompostierung noch weiter verbessert werden kann, wird in einem weiteren Detailprojekt untersucht.

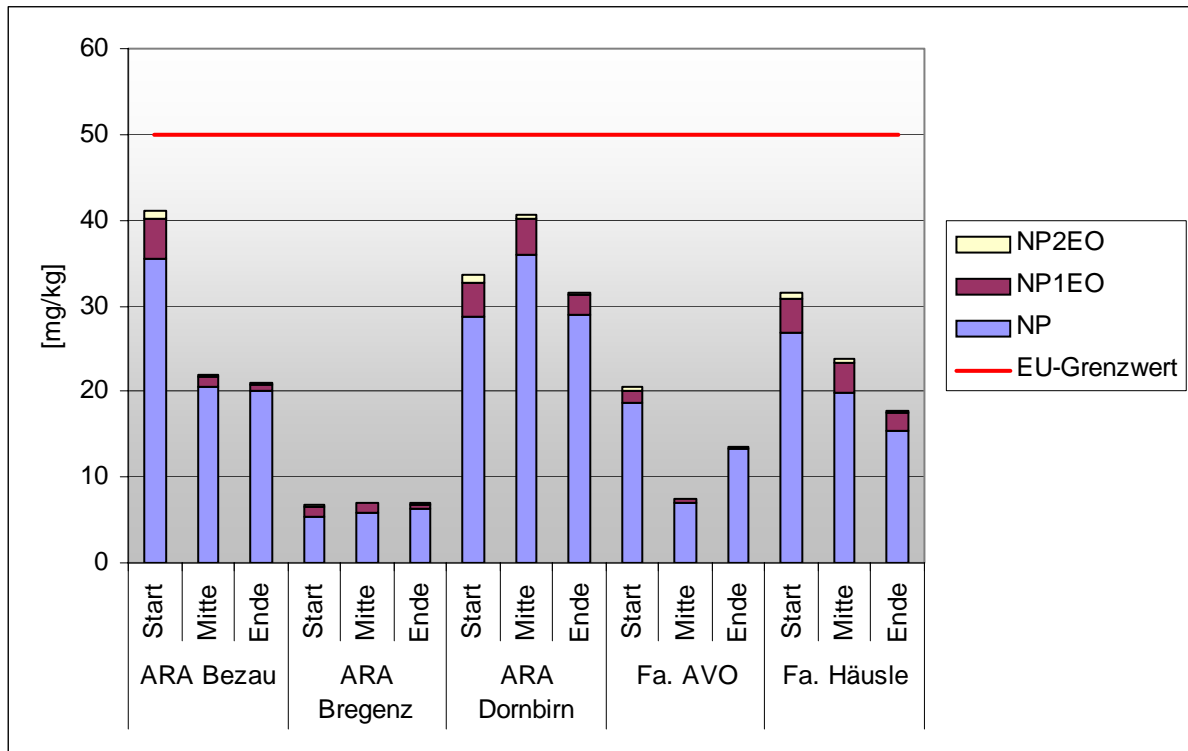


Abbildung 7: Verlauf der Nonylphenolkonzentrationen während des Kompostierungsprozesses

4.4 Bisphenol A (BPA)

4.4.1 Verwendung und Eigenschaften

Bisphenol A (BPA) ist eine wichtige Industriechemikalie von der weltweit jährlich 1,4 Millionen Tonnen erzeugt werden. Bisphenol A wird vielseitig eingesetzt: In der Kunststoffindustrie als Antioxidans für Weichmacher oder als Zwischenprodukt bei der Epoxidharz- oder Polycarbonatherstellung. BPA findet sich aber auch in der Beschichtung von verschiedenen Konservendosen. BPA kann in sehr hohen Konzentrationen estrogene Wirkungen zeigen.

4.4.2 Untersuchungsergebnis

Die Konzentrationen der Ausgangsprodukte liegen mit Ausnahme des Komposts der ARA Bregenz vergleichsweise hoch. Die Werte liegen über den Durchschnittswerten, die für Klärschlämme aus Österreich und Deutschland bekannt sind. (Anhang, Tabelle 3).

Die Messergebnisse für die kompostierten Produkte zeigen indes, dass die Gehalte an Bisphenol A bei allen untersuchten Komposten durch biologischen Abbau deutlich reduziert wurden. Dabei zeigt sich beim Abbaufaktor eine große Bandbreite. Die Bisphenol A Konzentrationen nach dem Kompostierungsprozess liegen deutlich unter den bekannten Werten für Klärschlämme in Mitteleuropa.

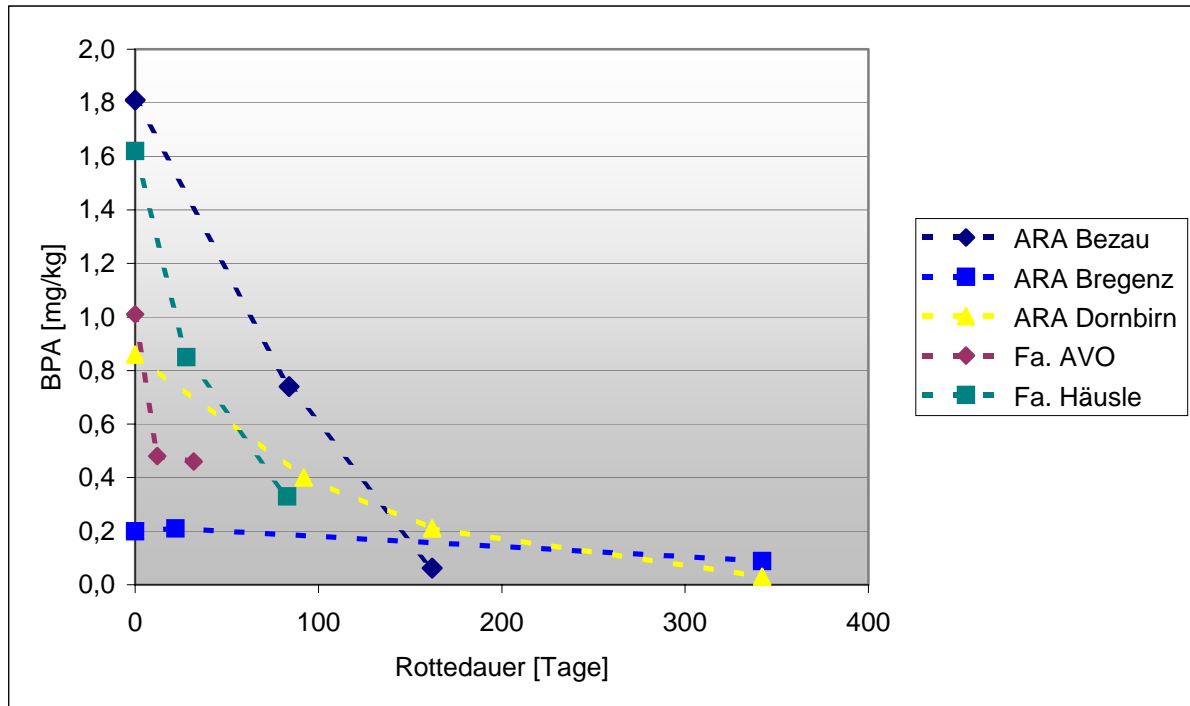
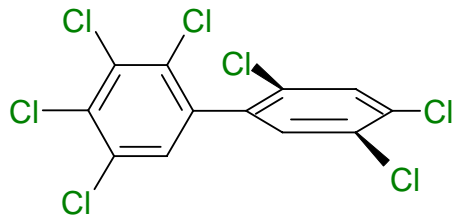


Abbildung 8: Abbau von BPA während des Kompostierprozesses

4.5 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

4.5.1 Verwendung und Eigenschaften

Seit Beginn der 1930er Jahre wurden weltweit (ohne Rußland und Osteuropa) ca. 1,2 – 1,5 Mio. Tonnen polychlorierte Biphenyle (PCB) hergestellt. In Österreich ist die Verwendung von PCB seit den 80er Jahren verboten. Die gelblichen bis farblosen, flüssigen PCB wurden vielfältig angewendet: Isolier- und Kühlflüssigkeit in Hochspannungstransformatoren und Kondensatoren, Hochdruckschmiermittel, Hydrauliköl, Additiv in Weichmachern für Kunststoffe, Lacke und Klebstoffe.



2,2',3,4,4',5,5' – Heptachlorbiphenyl

Abbildung 9: PCB 180, ein typischer Vertreter der polychlorierten Biphenyle

Zur Verbindungsklasse der PCB gehören 209 Einzelverbindungen mit 1-10 Chloratomen, die als „Congenere“ bezeichnet werden und durch eine Zahl benannt werden wie z.B. „PCB 180“. Da es sehr aufwändig wäre, alle 209 Congenere zu messen, ist es international üblich, sechs ausgewählte Congenere zu analysieren und die Summe daraus anzugeben.

Besonders die hochchlorierten PCB sind sehr gut fettlöslich und biologisch schwer abbaubar. Daher reichern sie sich über die Nahrungskette im Fettgewebe an. Diese Bioakkumulation führt zu chronischen Belastungen. PCB stehen im Verdacht krebserregend und fortpflanzungsgefährdend zu sein. Die akute Toxizität der PCB ist hingegen relativ gering [10].

4.5.2 Untersuchungsergebnis

Die PCB-Gehalte in den untersuchten Komposten liegen deutlich unter den einschlägigen Grenzwerten (Anhang, Tabelle 5). Die PCB-Gehalte werden während des Kompostierprozesses nicht signifikant verändert. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da ihre schlechte biologische Abbaubarkeit bekannt ist. Auf Grund der schlechten Abbaubarkeit wäre eine Anreicherung im Boden durch Kompostausbringung zu vermuten. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass nicht die Klärschlammkompostdüngung der alleinige Haupteintragspfad für PCB bei landwirtschaftlichen Flächen ist. Die Belastung von Böden erfolgt maßgeblich auch durch atmosphärische Deposition [15, 19]. Bei einer Studie mit Ackerflächen in Bayern konnte kein signifikanter Unterschied zwischen klärschlammgedüngten und nicht gedüngten Referenzflächen gefunden werden [16].

4.6 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

4.6.1 Verwendung und Eigenschaften

Die Vertreter der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) werden nur in sehr geringen Mengen gezielt hergestellt. Sie entstehen bei Verbrennungsprozessen aus fast allen organischen Verbindungen. Die freigesetzten Mengen hängen dabei sehr stark von den Verbrennungsbedingungen ab. Die PAK bestimmen die Gefährlichkeit (fortpflanzungsgefährdend, krebserregend) vieler Produkte, Emissionen und Stoffgemische, in denen sie vorkommen: Verkehrsemissionen, Bitumen, Teer, Räucherrauch, Tabakrauch.

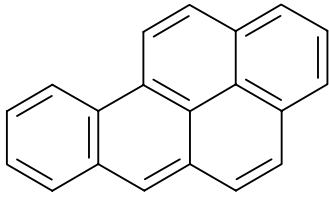


Abbildung 10: Benzo(a)pyren, einer der wichtigsten Vertreter der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe

4.6.2 Untersuchungsergebnis

Die PAK-Konzentrationen der untersuchten Komposte sind unauffällig und liegen unter den einschlägigen Grenzwerten. Die Werte liegen etwa in der Größenordnung wie sie in Böden vorgefunden werden. Die Gehalte an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen steigen während des Kompostierens leicht. Allerdings muss ein Gewichtsverlust durch Abbaumechanismen berücksichtigt werden, so dass in Summe die Gehalte etwa gleich bleiben.

Bezüglich der Belastung von Böden mit PAK bei Ausbringung von Komposten ist auch hier in Analogie zu den PCB die atmosphärische Deposition ein vergleichbarer Faktor.

4.7 Summenparameter AOX und Kohlenwasserstoffe

Der Summenparameter AOX („An Aktivkohle adsorbierbare organische Halogenverbindungen“) ist ein Maß für die Belastung der Probe mit organischen Halogenkohlenwasserstoffen, vor allem den chlorierten Kohlenwasserstoffen. Diese Verbindungen sind zumeist sehr schwer biologisch abbaubar und besitzen zum Teil beträchtliche Toxizität. Wie die vorliegenden Werte zeigen, werden die Grenzwerte eingehalten (Anhang, Tabelle 3). Erwartungsgemäß erfolgt kein Abbau während der Kompostierung.

Der Summenparameter Kohlenwasserstoffe (KW) gibt in einer ersten Näherung die Belastung mit Mineralöl und Mineralölprodukten wieder. Die Kompostverordnung [7] enthält hinsichtlich der Kohlenwasserstoffe eine Grenzwertfestlegung. Für die Beurteilung der Kohlenwasserstoffbelastung bedarf es noch analytischer Abklärungen vor allem hinsichtlich der gesicherten Erfassung des Mineralölanteils. Diesbezüglich sind Untersuchungen im Gange.

4.8 Schwermetalle

Die Einhaltung der Schwermetallgrenzwerte ist bei Vorarlberger Klärschlämgen generell seit Jahren kein Problem. Schwermetalle können nicht biologisch abgebaut werden und reichern sich im Klärschlamm an. Die Untersuchungsdaten sind im Anhang, Tabelle 7 zu finden. Eine Diskussion der Ergebnisse entfällt wegen der grundsätzlich unmöglichen Abbaubarkeit der Metalle.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gehalte an linearen Alkylbenzolsulfonaten (LAS) und Bisphenol A (BPA) durch die Kompostierung deutlich reduziert werden. Nonylphenol (NP), das sich als Abbauprodukt von Nonylphenoethoxylaten (NPEO) im Klärschlamm anreichert, wird allerdings nur in geringem Maße abgebaut. Kein Abbau erfolgt erwartungsgemäß bei den polychlorierten Biphenyle (PCB) und den polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Diese Verbindungen sind in den Komposten allerdings nur in geringen Konzentrationen deutlich unter dem einschlägigen Grenzwerten nachzuweisen.

In den Komposten werden die diskutierten Grenzwerte des Entwurfs zu einer EU-Klärschlammrichtlinie bezüglich der untersuchten Parameter eingehalten. Inwieweit eine weitere Reduktion von Schadstoffen durch eine optimierte Kompostiertechnik möglich ist, wird derzeit in einem Folgeprojekt untersucht.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die im Vorarlberger Klärschlammgesetz bereits seit 1999 vorgeschriebene Klärschlammkompostierung neben verschiedenen anderen Vorteilen aus Sicht des Bodenschutzes auch zu einer Reduktion von bedeutenden organischen Schadstoffen führt. Dadurch können auch strenge Grenzwerte eingehalten werden, wie sie gemäß dem Entwurf der EU-Klärschlammrichtlinie für die landwirtschaftliche Verwertung absehbar sind.

6. Literatur

- [1] [„Gesetz über die Ausbringung von Klärschlamm \(Klärschlammgesetz\)“](#); LGBl.Nr. 41/1985, 57/1997, 58/2001
- [2] [„Verordnung der Landesregierung über die Ausbringung von Klärschlamm \(Klärschlammverordnung\)“](#); LGBl.Nr. 75/1997, 27/2002
- [3] [„Schlämme, Arbeitsunterlage, 3. Entwurf“](#); [EU Kommission Generaldirektion Umwelt](#); 27.4.2000
- [4] R.Lerbscher; [“Evaluation of the relevance of organic micropollutants in sewage sludge, Provisional report for commenting”](#)EU; [EU Kommission Generaldirektion Umwelt](#); 2004
- [5] Josef Scherer, Christoph Scheffknecht, Dietmar Buhmann; [„Klärschlammkompost, Kontrollbericht 2002“](#); [Umweltinstitut](#); 2003
- [6] Josef Scherer; [„Klärschlammkompost, Kontrollbericht 2003“](#); [Umweltinstitut](#); 2004
- [7] [„Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen \(Kompostverordnung\)“](#) BGBl.Nr. 292/2001
- [8] Mario Hainschitz, Michael Mangeng, Christian Mattle; [„Analyse Linearer Alkylbenzolsulfonate im Klärschlamm“](#); Diplomarbeit; Höhere technische Lehranstalt für Chemieingenieurwesen, Dornbirn; 2001
- [9] Sigrid Scharf, Gerhard Hobiger, Peter Seif; [„LAS in der Umwelt“](#); Umweltbundesamt Wien, Reports Band 95; 1995
- [10] Römpp Lexikon Chemie; Georg Thieme Verlag 1999
- [11] Sigrid Scharf, Manfred Schneider, Gerhard Zethner; [„Zur Situation der Verwertung und Entsorgung des kommunalen Klärschlammes in Österreich“](#); Umweltbundesamt Wien, Monographien Band 95; 1997
- [12] Marion Gangl, Robert Sattelberger, Sigrid Scharf, Norbert Kreuzinger; [„Hormonell wirksame Substanzen in Klärschlämmen“](#); Umweltbundesamt Wien, [Monographien Band 136](#); 2001
- [13] D.C. McAvoy, W.S. Eckhoff and R.A. Rapaport; [„Fate of linear alkylbenzene sulfonate in the environment“](#); Environmental Toxicology and Chemistry, Vol.12, 977-987, 1993
- [14] J. McEvoy, W. Giger; [„Accumulation of Linear Alkylbenzenesulphonate Surfactants in Sewage Sludges“](#); Naturwissenschaften 72,1985

- [15] Ulrich Herter, Thomas Kupper, David Külling; „Risikoanalyse zur Abfalldüngerverwertung in der Landwirtschaft“; Schriftenreihe der FAL Reckenholz Band 48; 2003
- [16] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; „[Schadstoffe in Klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs](#)“; Reihe Bodenschutz Band 14; 2003
- [17] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen; „Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Teil D“; 2004
- [18] Oliver Gans et al; „Grundwassergängigkeit und Verhalten von Tensiden und deren Abbauprodukten bei der Klärschlammaufbringung bzw. Klärschlammkompostierung“; Umweltbundesamt Wien, [Monographie M-166](#); 2004
- [19] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; „Ermittlung atmosphärischer Stoffeinträge in den Boden“; 1999
- [20] Austrian Research Cooperation on Endocrine Modulators (ARCEM); “Hormonwirksame Stoffe in Österreichs Gewässer – Ein Risiko ?”, Endbericht; www.arcem.at; 2003
- [21] Sigrid Scharf, Robert Sattelberger, Walter Pichler; „Nonylphenole in der Umwelt“; Umweltbundesamt Wien, [Berichte BE-121](#); 1998
- [22] [Hans-Peter E. Kohler](#), Frederic Gabriel, Walter Giger, Daniel Rentsch; “Biodegradation of 4-Nonylphenol: A novel pathway for metabolism of 4-nonylphenol isomers“; [Workshop: Classic and Emerging Environmental Contaminants](#); Zürich; 2005

7. Anhang

7.1 Probenahme und Probenvorbereitung

Aus mindestens 20 Einzelproben wurden Mischproben erzeugt. Diese wurden auf eine Korngröße < 11,2 mm gesiebt und lyophilisiert. Nach Zerkleinern mit der Schneidemühle (<2mm) und mit der Ultrazentrifugalmühle (< 0,25mm) wurden die Proben untersucht.

7.2 Parameter und Prüfanweisungen

Die Laboruntersuchungen erfolgten durch das Umweltinstitut des Landes Vorarlberg. Die Parameter Nonylphenol, Nonylphenoethoxylate und Bisphenol A wurden von der Umweltbundesamt GmbH Wien im Rahmen eines Kooperationsprojektes untersucht.

Symbol	Name	Methode	Norm
TR	Rottegrad	Selbsterhitzungsversuch	BGK-Methode
	Trockenrückstand	Trockenschrank 105°C	EN 12880
GV	Glühverlust	Tiegelofen 550°C	EN 12879
N	Gesamtstickstoff	Chemolumineszenz	EN 13342
TOC	Organischer Kohlenstoff	Verbrennung, IR	ISO 10694
P	Gesamtphosphor	ICP-OES	EN ISO 11885
K	Kalium	ICP-OES	EN ISO 11885
AOX	AOX	Coulometrisch	DIN 38414-S18
LAS	Lineare Alkylbenzolsulfonate	HPLC	[8]
BPA	Bisphenol A	HPLC-MS	Umweltbundesamt Wien
NP	Nonylphenol	HPLC-MS	Umweltbundesamt Wien
NPxEO	Nonylphenoethoxylate	HPLC-MS	Umweltbundesamt Wien
NP1EC	Nonylphenoxyessigsäure	HPLC-MS	Umweltbundesamt Wien
PCB	Polychlorierte Biphenyle	GC-ECD	DIN 38414-S20
BaP	Benzo(a)pyren	HPLC	DIN 38414-S21
BbF	Benzo(b)fluoranthren	HPLC	DIN 38414-S21
BkF	Benzo(k)fluoranthren	HPLC	DIN 38414-S21
BP	Benzo(g,h,i)perylen	HPLC	DIN 38414-S21
F	Fluoranthren	HPLC	DIN 38414-S21
IP	Indeno(1,2,3,c,d)pyren	HPLC	DIN 38414-S21
	Königswasseraufschluss		DIN 38414-S7
Pb	Blei	ICP-OES	EN ISO 11885
Cd	Cadmium	ICP-OES	EN ISO 11885
Cr	Chrom	ICP-OES	EN ISO 11885
Cu	Kupfer	ICP-OES	EN ISO 11885
Hg	Quecksilber	Kaltdampf-AAS	ISO 5666
Ni	Nickel	ICP-OES	EN ISO 11885
Zn	Zink	ICP-OES	EN ISO 11885

Tabelle 2: Verwendete Untersuchungsmethoden

7.3 Ergebnistabellen

Entnahmeort	Dauer	Rottegrad	TR	GR	TOC	N	P	K	AOX	LAS	BPA
	[d]		[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[µg/kg]
ARA Bezau	0	IV 30,1-40,0°C	40,9	44,2	26	3,0	3,2	0,13	380	3500	1810
ARA Bezau	84	V < 30,1°C	39,5	42,3	23	2,9	3,3	0,14	350	1600	740
ARA Bezau	162	V < 30,1°C	40,0	42,5	24	2,7	3,6	0,14	310	660	62
ARA Bregenz	0	IV 30,1-40,0°C	34,5	38,3	31	2,1	1,4	0,50	100	1400	200
ARA Bregenz	22	V < 30,1°C	38,3	36,9	26	2,5	1,9	0,52	130	360	210
ARA Bregenz	42	V < 30,1°C	39,8	42,5	27	2,4	2,1	0,60	130	280	
ARA Bregenz	342	V < 30,1°C	45,1	42,5			2,5	0,53	120		88
ARA Dornbirn	0	I > 60,0°C	64,1	46,4	26	2,8	2,9	0,19	360	2900	860
ARA Dornbirn	92	IV 30,1-40,0°C	36,8	42,4	24	2,4	3,0	0,19	350	1000	400
ARA Dornbirn	162	V < 30,1°C	46,1	46,0	24	2,5	2,9	0,21	420	680	210
ARA Dornbirn	342	IV 30,1-40,0°C	52,4	47,5			3,2	0,23	400		30
Fa. AVO	0	IV 30,1-40,0°C	46,3	44,1	28	3,0	1,7	0,42	200	1900	1010
Fa. AVO	12	V < 30,1°C	48,0	46,5	22	2,4	1,6	0,41	200	590	480
Fa. AVO	32	V < 30,1°C	51,2	46,4	23	2,5	1,7	0,53	190	600	460
Fa. Häusle	0	IV 30,1-40,0°C	34,7	48,5	25	2,6	1,8	0,48	180	1800	1620
Fa. Häusle	28	V < 30,1°C	38,6	48,5	24	2,0	1,6	0,53	200	1600	850
Fa. Häusle	83	V < 30,1°C	36,3	48,5	25	1,8	1,5	0,57	150	420	330
Grenzwert KS-VO [2]		IV 30,1-40,0°C									
Grenzwert Kompost-VO [7]									500		
Grenzwert EU Entwurf [3]									500	2600	
Klärschlamm (A) [12]										52 - 13092	60 - 1100
KS-Kompost (A) [12]										36 - 130	0 - 100
Klärschlamm (CH) [14]										2900 - 11900	
Klärschlamm (D) [9]										6200	
Klärschlamm (D) [17]									208	1723	280

Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse: Düngeparameter, AOX, KW, LAS und BPA

Entnahmeort	Dauer	Σ NP& NP1,2EO	NP	NP1EO	NP2EO	NP3EO	NP4EO	NP5EO	NP6EO	NP7EO	NP8EO	NP9EO	NP10EO	NP1EC
	[d]	[mg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]
ARA Bezau	0	41170	35500	4760	910	490	280	430	260	130	160	150	220	58
ARA Bezau	84	21870	20600	1050	220	66	24	49	30	< 10	17	23	42	590
ARA Bezau	162	20930	20000	770	160	32	29	54	28	< 10	13	38	34	770
ARA Bregenz	0	6770	5360	1150	260	73	25	27	21	30	< 10	11	20	130
ARA Bregenz	22	7090	5770	1150	170	39	22	36	23	12	13	22	19	130
ARA Bregenz	42	6938	6310	530	98	27	20	21	16	< 10	10	15	22	74
ARA Bregenz	342		3800	120	< 20									
ARA Dornbirn	0	33660	28700	4060	900	480	240	340	210	100	80	94	170	120
ARA Dornbirn	92	40700	36000	4150	550	250	130	150	61	20	28	51	82	260
ARA Dornbirn	162	31600	28900	2390	310	67	32	45	33	< 10	12	28	34	510
ARA Dornbirn	342	10016	9500	480	36									
Fa. AVO	0	20430	18600	1500	330	120	86	130	110	51	64	58	120	210
Fa. AVO	12	7567	6950	530	87	62	49	57	43	15	34	45	140	130
Fa. AVO	32	13621	13300	240	81	37	23	42	28	15	< 10	16	80	150
Fa. Häusle	0	31490	26900	3910	680	280	110	130	95	42	74	78	66	110
Fa. Häusle	28	23720	19900	3340	480	260	81	85	91	23	45	45	53	130
Fa. Häusle	83	17810	15500	2040	270	97	56	61	51	< 10	39	34	43	240
Grenzwert EU Entwurf [3]		50000												
Klärschlamm (A) [12]			370 - 70000	6200	1800									
KS-Kompost (A) [12]			2500 - 7500	120 - 250										
Klärschlamm (D) [17]			21000											

Tabelle 4: Untersuchungsergebnisse: NP und NPEO

Entnahmeort	Dauer	PCB28	PCB52	PCB101	PCB138	PCB153	PCB180	Σ PCB
	[d]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]
ARA Bezau	0	< 10	10	11	27	24	14	86
ARA Bezau	84	< 10	11	12	28	27	15	93
ARA Bezau	162	< 10	< 10	11	28	26	14	79
ARA Bregenz	0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 10	< 10	< 5,0	< 5,0
ARA Bregenz	22	< 5,0	< 5,0	< 5,0	12	< 10	< 10	12
ARA Bregenz	42	< 5,0	< 10	< 5,0	12	10	< 10	22
ARA Bregenz	342	< 5,0	< 5,0	< 10	17	16	< 10	33
ARA Dornbirn	0	< 10	< 10	< 10	26	23	13	62
ARA Dornbirn	92	< 5,0	< 10	13	29	28	16	86
ARA Dornbirn	162	< 5,0	< 10	10	25	23	15	73
ARA Dornbirn	342	< 10	< 10	13	32	30	16	91
Fa. AVO	0	< 5,0	26	< 5,0	12	< 10	< 10	38
Fa. AVO	12	< 5,0	21	< 5,0	10	< 10	< 10	31
Fa. AVO	32	< 10	42	< 10	19	15	< 10	76
Fa. Häusle	0	< 5,0	< 10	< 10	17	14	< 10	31
Fa. Häusle	28	< 5,0	< 10	< 10	19	14	10	43
Fa. Häusle	83	< 5,0	< 10	< 10	23	19	13	55
Grenzwert KS-VO [2]		200	200	200	200	200	200	1200
Grenzwert Kompost-VO [7]								1000
Grenzwert EU KS Entwurf [3]								800
Klärschlamm (D) [17]								91

Tabelle 5: Untersuchungsergebnisse: PCB

Entnahmeort	Dauer	PAK-BaP	PAK-BbF	PAK-BkF	PAK-BP	PAK-F	PAK-IP	Σ PAK (6)	Σ PAK (16)
	[d]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]
ARA Bezau	0	160	110	65	100	420	85	940	
ARA Bezau	84	160	120	73	120	460	50	983	
ARA Bezau	162	260	120	77	110	560	55	1182	
ARA Bregenz	0	69	73	51	42	330	39	604	
ARA Bregenz	22	78	92	59	48	520	37	834	
ARA Bregenz	42	120	120	84	120	490	67	1001	
ARA Dornbirn	0	98	120	67	120	340	80	825	
ARA Dornbirn	92	130	130	76	140	360	110	946	
ARA Dornbirn	162	130	120	69	130	330	92	871	
Fa. AVO	0	32	47	< 25	36	180	88	383	
Fa. AVO	12	62	77	48	58	460	< 25	705	
Fa. AVO	32	61	78	47	46	660	< 25	892	
Fa. Häusle	0	72	78	50	52	240	83	575	
Fa. Häusle	28	120	230	140	< 25	1600	n.b.		
Fa. Häusle	83	120	130	83	120	560	31	1044	
Grenzwert Kompost-VO [7]									6000
Grenzwert EU KS Entwurf [3]								6000*	

* Summe aus 9 PAK's

Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse: PAK

Entnahmeort	Dauer	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cd	Hg
	[d]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
ARA Bezau	0	55	310	31	910	45	2,0	0,66
ARA Bezau	84	56	310	33	960	45	1,6	1,2
ARA Bezau	162	57	290	29	1000	41	1,5	1,3
ARA Bezau	349	67	300	40	1000	46	1,5	0,64
ARA Bregenz	0	37	90	18	390	29	0,84	0,46
ARA Bregenz	22	43	120	20	520	37	1,1	0,64
ARA Bregenz	42	45	130	21	570	41	1,1	0,71
ARA Bregenz	342	160	170	79	760	51	0,97	1,0
ARA Dornbirn	0	51	310	36	880	49	2,0	0,62
ARA Dornbirn	92	60	310	42	870	47	1,6	1,0
ARA Dornbirn	162	52	310	38	860	47	1,6	0,99
ARA Dornbirn	342	85	350	61	970	58	1,8	0,81
Fa. AVO	0	100	140	53	360	44	0,95	0,37
Fa. AVO	12	66	120	34	360	40	0,9	0,38
Fa. AVO	32	70	130	36	370	40	0,83	0,41
Fa. Häusle	0	110	140	28	550	39	1,1	0,57
Fa. Häusle	28	96	130	27	500	51	0,99	0,54
Fa. Häusle	83	91	130	28	500	41	0,76	0,72
Grenzwert KS-VO [2]		300	500	100	1800	150	4	4
Grenzwert Kompost-VO B [7]		250	500	100	1800	200	3	3
Kompost-VO A [7]		70	150	60	500	120	1	0,7
Kompost-VO A+ [7]		70	70	25	200	45	0,7	0,7
EU KS Vorschlag [3]		1000	1000	300	750	750	10	10

Tabelle 7: Untersuchungsergebnisse: Schwermetalle