

TOC-Grenzwerte (Eluat) für das nachsorgearme Deponieren von Restabfällen

Bewertung von Eluaten und Sickerwässern (organische Stoffe) aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung und der anschließenden Deponierung der Reststoffe/vorbehandelten Abfälle

ATV-Projekt Nr. 26/97, Dezember 1997

Dr. Uwe Lahl, Dipl.-Biol. Barbara Zeschmar-Lahl
BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH
Lindenstr. 33
D - 28876 Oytten
BZLGMBH@AOL.COM

Zusammenfassung

Bei den bisher vorliegenden Untersuchungen des Eluats von mechanisch-biologisch aufbereitetem Siedlungsabfall wurde ein zu kleines Spektrum des TOC (bzw. DOC) im Eluat erfaßt (hydrophobe Einzelstoffe). Als Beurteilungsgrundlage für eine schutzzielkonforme Grenzwertmodifikation der TA Siedlungsabfall (TASI) reichen sie daher nicht aus. Mithilfe orientierender analytischer Untersuchungen wurde versucht zu klären, ob der TOC des Eluats von MBA-Output überwiegend aus (unproblematischen) Huminstoffen besteht. Ergebnis: Nur nach relativ intensiven und langen biologischen Behandlungszeiten (16 Wochen) steigt der Humifizierungsgrad des Eluat-TOCs auf ein beachtliches Niveau. Kurze biologische Behandlungsverfahren (< 8 Wochen) führen hingegen zu unbefriedigenden Ergebnissen. Da das Einzelstoffpotential im Restabfall toxikologisch nicht unproblematisch ist und das Risiko für die Anwesenheit toxischer Verbindungen verbleibt, kann einer pauschalen Grenzwetheraufsetzung der TA Siedlungsabfall (auf 200 oder 300 mg TOC/l) nicht zugestimmt werden. Es erscheint zielführender, einen definierten Humifizierungsgrad des Eluat-TOCs festzulegen. Auf die Bedeutung für die Direkt- und Indirekteinleitung von Deponiesickerwässern ist hinzuweisen.

Schlagworte

MBA, TOC, Eluat, Grenzwert TASI, Huminstoffe, Humifizierungsgrad, Deponiesickerwässer

1 Einführung

Hausmüll bzw. Restabfall ist als eine der Schadstoffsenken des in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegenen „Chemisierungsgrads“ aller Lebens- und Arbeitsbereiche anzusehen. Zwar zählt die separate Sonderabfallentsorgung mittlerweile bei vielen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern zum Standardbaustein ihres Abfallwirtschaftskonzeptes. Gleichwohl reicht diese Maßnahme der Schadstoffentfrachtung nicht aus, um den verbliebenen Restabfall - noch immer ein Vielstoffgemisch - ohne Vorbehandlung schadlos für heutige und nachfolgende Generationen deponieren zu können.

Die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASI) verfolgt Schutzziele, die im Kern auf die Verhinderung von neuen Altlasten durch Schaffung nachsorgearmer (weitgehend nachsorgefreier) Deponien zielen. Zu diesem Zweck soll der Austrag von Stoffen durch Minimierung der Sickerwasser- und Deponiegasemissionen weitestgehend verhindert werden. Siedlungsabfälle müssen daher spätestens ab dem 1. Juni 2005 vor der Ablagerung entsprechend vorbehandelt werden, um diesen Vorgaben zu genügen. Die genannten Zielvorstellungen gelten als erfüllt, wenn ein umfangreicher Grenzwertkatalog für die abzulagernden Abfälle selbst (Feststoff) und für deren Eluat eingehalten wird (TASI, Anhang B).

Einer dieser Eluatgrenzwerte, der zu unterschreiten ist, erfaßt den gesamten organischen Kohlenstoff (**TOC = Total Organic Carbon**, nach DEV S4). Der TOC-Grenzwert für die Deponiekategorie 2 ist mit 100 mg/l Eluat fixiert. Aus der Sicht des Gewässerschutzes wird dieser Grenzwert als Operationalisierung des „Besorgnisgrundsatzes“ des § 19 g WHG angesehen [1].

Im Rahmen einer allgemeinen Diskussion über eine mögliche Novellierung dieses Grenzwertkatalogs, die auch dadurch motiviert ist, der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) nach 2005 eine Marktchance zu erhalten, wird dieser Grenzwert ob seiner vermeintlichen Schärfe bzw. seiner Verhältnismäßigkeit kritisch hinterfragt.

So sind neue Grenzwertvorschläge veröffentlicht oder Behördenentscheidungen getroffen worden, die eine Erhöhung auf 200 oder gar auf 300 mg TOC/l vorschlagen [2] bzw. genehmigungsrechtlich festschreiben [3].

Aus der Sicht des Gewässerschutzes ist diesem Ansinnen entgegenzuhalten, daß durch eine Aufweichung des Grenzwertes Berufungsfälle auch in anderen Bereichen des Grundwasserschutzes eintreten werden, und daß die Schwierigkeiten, die Errungenschaften des Wasserrechts aufrechtzuerhalten, zunehmen werden [1].

Die Grenzwerte der TASI werden generell dahingehend kritisiert, daß ihr Zustandekommen nicht bzw. nicht in jedem Fall wissenschaftlich nachvollzogen werden könne. Nun berechtigt diese Kritik sicherlich nicht dazu, die vorgeschlagenen Grenzwerverhöhungen ohne ausreichende wissenschaftliche Begründung in der Fachöffentlichkeit oder behördlicherseits umzusetzen.

Die im Anhang B aufgeführten Grenzwerte stehen, folgt man den Bekunden des Vorschriftengebers, in engem Zusammenhang mit den Schutzzielen der TASI. Diese Schutzziele (nachsorgearme Deponien, s.o.) sind unter den Diskutanten breit akzeptiert und können daher eine Basis darstellen, die strittigen Fragen einer Beantwortung zuzuführen.

Im vorliegenden Fall (TOC-Grenzwert im Eluat) ist das Anliegen des Vorschriftengebers bzw. das detaillierte Schutzziel die Lösung des Sickerwasserproblems (und Deponiegasproblems). Die Abfallvorbehandlung soll so weitgehend sein, daß das in der Deponie anfallende Sickerwasser möglichst wenig Schadstoffe enthält (also die Unterschreitung der genannten Grenzwerte), um damit auf eine dauerhafte (kostenintensive) Sickerwasserbehandlung bzw. Sickerwasservorbehandlung verzichten zu können. Auf die Problematik der Indirekteinleitung von Sickerwässern sei an dieser Stelle insbesondere verwiesen.

Für die nachsorgearme Deponie spielt die organische Belastung des Sickerwassers eine wesentliche Rolle. Unabhängig von den Zweifeln an der Begründung des Eluatgrenzwerts der TASI für organische Belastung kann das Ziel eines geringen Nachsorgebedarfs mit niedrigeren Grenzwerten eher erreicht werden als mit höheren.

In einer Studie für die ATV [4] wurde daher untersucht, welche Bedeutung die Fixierung der Eluatbegrenzung für organische Stoffe hat. In diesem Zusammenhang wurde auch die Frage untersucht, ob die Beurteilungsbasis ausreichend ist, Grenzwerverhöhungen für TOC wissenschaftlich ableiten zu können.

2 Emissionspotential

Die Analyse des Emissions-/Eluatverhaltens von MBA-Output sollte auf das Stoffpotential im Input, dem Restabfall, aufbauen. Im Hinblick auf die diskutierte Grenzwerthöhung für den Summenparameter TOC ist insbesondere die Frage nach den mengenmäßig und/oder toxiologisch relevanten organischen Einzelstoffe zu beantworten. Für diese kann auf eine umfangreiche Literaturstudie zurückgegriffen werden [5, 6]. Allerdings ist es in vielen Fällen nicht möglich, relevante Schadstoffe auf einzelne Produktgruppen oder Produkte als alleinige Quelle zurückzuführen.

Restabfall enthält, je nach vorhandener Sammellogistik im Entsorgungsgebiet, bis zu einem knappen halben Gewichtsprozent an Problemabfällen. Diese enthalten eine Vielzahl von Schadstoffen wie u.a. organische Schwefel-, Stickstoff-, Nitro-, Chlor- und Phosphorverbindungen sowie Organohalogenverbindungen [7]. Allerdings reicht eine die Restabfallbehandlung ergänzende separate Sonderabfallkleinmengenerfassung nicht aus, um den Restabfall so weitgehend von Schadstoffen zu entfrachten, daß die Emissionen der folgenden Behandlung (MBA oder MVA) unbeachtlich wären.

2.1 Relevante Stoffgruppen

Tab. 1 aggregiert die aus heutiger Sicht für Eluatuntersuchungen von MBA-Output relevanten Stoffgruppen. Bislang wurde MBA-Eluat auf derartige Verbindungen nicht gezielt untersucht.

2.2 Sonderfall Kunststoffe und Kunststoffadditive

Bisher wurde angenommen, daß die Altkunststoffe, die im Restabfall in erheblichen Mengen enthalten sind, als inert anzusehen sind. Untersuchungen von Turk [8] zeigen nun, daß gerade die biologische Behandlung in der MBA die Kunststoffmatrix derartig stark angreift, daß sich das Aussehen und die physikalische Konsistenz der Materialien verändert. Einher mit dieser optischen Veränderung gehen chemische Prozesse, die auf eine Verfügbarmachung organischer Kunststoffinhaltsstoffe schließen lassen. Turk mißt in der Kunststofffraktion einer lediglich 24 Stunden intensiv gerotteten Probe TOC-Werte oberhalb von 500 mg/l. Bei der Langzeitrotte stellt Turk fest, daß die hauptsächliche Organikfracht aus der Kunststofffraktion kommt.

Tab. 1: Relevante Stoffgruppen (Organik) im Eluat von MBA-Output

Stoffgruppe	Verbindungen	Bemerkungen
Pflanzenbehandlungs- und -schutzmittel (PBSM)	sinnvollerweise zu untersuchen: s-Triazine, Phenylharnstoffherbizide, Phenoxy-carbonsäureester und weitere aktuelle relevante Einzelstoffe (Glyphosat) sowie bekannte Metabolite mit z.T. nachgewiesener endokriner Wirksamkeit (z.B. der Diuron-Metabolit 3,4-Dichloranilin [9])	bislang nur Altpestizide untersucht
Aromatische Sulfonate	insbesondere Naphthalin-di- und -trisulfonate sowie höhermolekulare kondensierte Naphthalinsulfonate	Mittlerweile sind über zwanzig dieser Verbindungen in europäischen Flüssen nachgewiesen worden, einige gelangen bis ins Trinkwasser. Ihr Entstehen durch biologischen Abbau verschiedener im Abfall enthaltener Ausgangsstoffe (Aufheller, organische Farbstoffe, Kunststoffadditive (s.o.) etc.) ist möglich.
Aromatische Stickstoffverbindungen	Nitrobenzol, Nitro-, Dinitrotoluole, auch Chlor- oder Amino-substituiert, Chlornitrobenzole, 3,4-Dichloranilin, Dimethyl- und Diethylaniline	in Rhein und Elbe nachgewiesener Konzentrationsbereich: < 0,01 bis > 1 µg N/l pro Einzelsubstanz [10]
Aliphatische Alkohole und Ether		Lösemittel für Farben und Lacke, auch Einsatz als Kunststoffadditiv, Korrosionsschutz- und Kühlmittel
Phenylsulfonamide	n-Buthylphenylsulfonamid, HPS	Additiv (Weichmacher) in Kunststoffen (n-Buthylphenylsulfonamid) oder Zusatz in Korrosionsschutzmitteln (HPS)
Aliphatische Amine und Aminoalkohole		Papier- und Textilhilfsmittel, Pharmazeutika, Korrosionsschutzmittel, Photochemikalie uvm.
Synthetische organische Komplexbildner	NTA, EDTA, CDTA, DTPA, ADA, PDTA, DHEG, HEDTA, HEIDA; Poly- und Aminopolyphosphonsäuren: ATMP, HEDP, PBTC, EDTMP	in Publikumsprodukten, aber auch in industriellen Vorprodukten; Eintrag ins Trinkwasser für EDTA und NTA ist dokumentiert [11]
Tenside	LAS, APEO	teilweise toxischere Metabolite, auch endokrines Wirkungspotential
Organische Siliziumverbindungen (Siloxane)	Hexamethyldisiloxan, Cyclohexa-, Cyclopenta-, Cyclo-, Cyclotetra- und Octamethylcyclotetrasiloxan	<ul style="list-style-type: none"> • Siliconöle: Gleitmittel, Hydrauliköl, Lacke, Textilhilfsmittel, Antischaummittel, Kosmetika etc. • Siliconkautschuk: Dichtungen etc. • Siliconharze: vor allem Isoliermaterial in der Elektrotechnik. Nachweis im Deponiegas [12] und MBA-Rohgas [13]
Organozinnverbindungen	TBTO	Stabilisator in Kunststoffen, Fungizid u.a. in Lacken und Anstrichstoffen (Altlast)
Phthalate	DEHP, DBP, BBP, DINP, DIDP	Weichmacher in PVC-Produkten; Nachweis im Umfeld von Deponien [19]
Phosphorsäureester, chlor. Chlorparaffine	TCEP langkettige CP	Weichmacher in PU-Kunststoffen Weichmacher und Flammschutzmittel in Kunststoffen

Kunststoffprodukte bestehen i.d.R. nicht nur aus dem reinen Polymer bzw. einem Polymergemisch, sondern enthalten eine Vielzahl von sog. **Additiven**, die die Verarbeitung der Kunststoffe erleichtern und/oder die Materialeigenschaften verbessern sollen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Kunststoffadditive. Exakte Angaben über Mengen und Einsatzbereiche sind nicht verfügbar [14]. Da das Mengenverhältnis Polymer zu Additiv, je nach Kunststoff, im Bereich von $> 10 : 1$ bis $< 1 : 1$ (z.B. Weich-PVC) schwankt, kann allenfalls eine Bandbreite des Eintrags in den Abfall abgeschätzt werden, die von wenigen Tausend bis > 100.000 Mg/a reicht (Bezug: 6,9 Mio. Mg Kunststoff-Werkstoffe pro Jahr).

Tab. 2: Kunststoffadditive - eine Auswahl (u.a. nach [15])

Additiv	Stoffe (Beispiel)
Antioxidantien	sterisch gehinderte Amine bzw. Phenole (Thiobisphenole); Thioether, Phosphite, Phosphonite
Metalldesaktivatoren	Chelatbildner (z.B. N,N'-Dibenzaloxalsäuredihydrazid, Diacylhydrazin; 1,2,4-Triazolderivate)
Lichtschutzmittel/UV-Stabilisatoren	<ul style="list-style-type: none"> • UV-Adsorber: Hydroxyphenylbenzotriazole, Aktivruß, Zimtsäure • Quencher: Nickel-Chelat • Radikalfänger: Ni-organische Verbindungen
Weichmacher	Phthalsäureester (Phthalate, z.B. DOP/DEHP), Carbonsäureester, Phosphorsäureester (TECP = Tris-2-chlorethylphosphat), Polyester, Chlorparaffine
Gleitmittel	Fettsäure (C ₁₄ - C ₁₈), Fettalkohol (C ₁₄ - C ₁₈), Montansäure, Wachse, Metallseifen: Blei-, Cadmium-, Zinkverbindungen
Flammschutzmittel	Organobromverbindungen (Tetrabrombisphenol A), Antimontrioxid, HET-Säure, Phosphorsäureverbindungen (Tricresylphosphat), Chlorparaffine
Farbstoffe	anorganische Pigmente, organische Farbstoffe
Antistatika	Polyglykolether, quartäre Ammoniumverbindungen
Treibmittel	Halogenalkane (R11), Kohlenwasserstoffe (Pentan, Petrolether)

Für die Restabfallbehandlung stellt sich die Frage des Verbleibs nicht nur der Polymeren, sondern insbesondere der Additive. Während die Polymeren überwiegend als biologisch nur langsam abbaubar einzustufen sind, gilt dies nicht gleichermaßen auch für die Additive. Sie können durch physikalische und/oder andere Prozesse aus dem Kunststoff migrieren und stehen dann einem biologischen Abbau zur Verfügung; Additive und ihre Metaboliten können infolgedessen auch ins Sickerwasser/Eluat gelangen.

2.2.1 Beispiel Phthalsäureester

Phthalsäureester (Phthalate) sind von der ortho-Phthalsäure (=1,2-Benzol-dicarbonsäure) abgeleitete Ester mit unverzweigten oder verzweigten Seitenketten. 1994/95 wurden in Deutschland etwa 400.000 Mg Phthalate produziert [16]. Die Bundesregierung geht für diesen Zeitraum von einem Einsatz in Deutschland von 205.000 Mg aus [17]. Nach [16] entfielen von den 400.000 Mg auf DEHP ca. 250.000 Mg, auf DBP ca. 21.000 Mg und auf BBP ca. 9.000 Mg. Der größte Teil aller verbrauchten Phthalate (ca. 90 %) wird als **Weichmacher in PVC-Produkten** eingesetzt; ca. 90 % des verbrauchten DEHP, 60 % des BBP und 25 % des DBP wurden für diesen Zweck verwendet [16]. Weich-PVC-Produkte wie Kabel, Weichprofile, Kunstlederbezüge, Duschmatten, Möbel, Tapeten, aber auch Kinderspielzeug und andere Kinderartikeln (Wickelaufgaben u.ä.:.) können zu über 60 % aus Phthalaten bestehen.

Die Phthalate gasen, je nach chemisch-physikalischen Eigenschaften, der Verarbeitung des Kunststoffes (z.B. Geliergrad) und äußeren Bedingungen, im Lauf Zeit in mehr oder weniger großen Umfang aus den Produkten aus (sog. Migration). Die Flüchtigkeit der Phthalate aus ihrer polymeren Matrix (hier: PVC) kann ganz beträchtliche Ausmaße annehmen (bis zu 44% des Phthalats in PVC [18]). Im Wasser lagern sich die Phthalate vor allem an Schwebstoffen an, in der Luft adsorbieren und sedimentieren mit dem Staub.

Wenn weichgemachte Produkte in den Restabfall gelangen, enthalten sie i.d.R. noch beträchtliche Mengen an Phthalaten. Diese migrieren im Verlauf der Rotte/Ablagerung anteilig in die Luft bzw. ins Sickerwasser. So haben z.B. Untersuchungen von Boden- und Wasserproben im Umfeld von Deponien (Niederlande) konstant den Nachweis von Dibutylphthalat (DBP) (bis max. 12 ppm) und Diisooctylphthalat (DIOP) (bis max. 70 - 100 ppm) ergeben [19].

Neuere Untersuchungen bestätigen die oben bereits angesprochene **Migration von Phthalat-Weichmachern im Verlauf der Restabfallbehandlung**. Mersiowsky und Stegmann [20] untersuchten im Auftrag verschiedener Verbände (u.a. ECVM, European Council of Vinyl Manufacturers) das Verhalten weichgemachter und stabilisierter PVC-Produkte im Verlauf der Ablagerung. Bei mit DINA (Di-isononyladipat) und DIDP (Diisodecylphthalat) weichgemachten und mit Bleisulfat stabilisierten Kabeln konnten nach siebenmonatiger Inkubation keine Alterungserscheinungen festgestellt werden. Demhingegen zeigten Fußbodenbeläge, die mit DEHP und BBP (n-Butylbenzylphthalat) weichgemacht und sowohl mit Ca/Zn und epoxidiertem Sojaöl als auch mit Butylzinn-Verbindungen stabilisiert waren, deutliche Weichmacher-Freisetzungen. Nach sieben Monaten Inkubation betrugen die Weichmacherverluste 10 % beim DEHP und 12 % beim BBP, bezogen auf den Ausgangsgehalt. Insbesondere das weniger lipophile BBP war in deutlich erhöhten Konzentrationen (im Vergleich zum Blindwert) im Eluat des Lysimeters nachweisbar. Auch die Organozinn-Stabilisatoren waren in der Größenordnung von Mikrogramm pro Liter im Eluat nachweisbar.

Bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung dürfte dieser Migrationseffekt, insbesondere in der Phase der mechanischen Behandlung und Heißrottephase, ebenfalls auftreten. Der Nachweis von Phthalaten in der MBA-Abluft (gasförmig/staubgebunden) und im Sickerwasser/Eluat des behandelten Restabfalls ist daher wahrscheinlich.

2.2.2 Andere Additive

Als Weichmacher und Flammschutzmittel werden **Phosphorsäureester**, insbesondere ihre chlorierten Vertreter, eingesetzt. Der mengenmäßig relevanteste Phosphorsäureester ist Tris-(2-chlorethyl)-phosphat (TCEP); er dient in erster Linie als Weichmacher für Polyurethan-Kunststoffe. PU- oder PUR-Kunststoffe finden vielfältigen Einsatz in der Möbel-, Textil- und Bauindustrie, werden aber auch für zahllose Bauteile und Gebrauchsgegenstände verwendet. Die Phosphorsäureester, speziell TCEP, dürften aufgrund ihres verbreiteten Einsatzes in PU-Kunststoffen und ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften (Polarität) bzw. Verhaltens (Flüchtigkeit aus PU-Kunststoffen) ebenfalls als sickerwasserrelevanter Parameter für die mechanisch-biologische Restabfallbehandlung gelten.

Als Weichmacher und Flammschutzmittel kommen weiterhin **Chlorparaffine** (CP) zum Einsatz, insbesondere mittel- (C_{14} - C_{17}) und langkettige (C_{18} - C_{30}) CP. Die kurzkettigen (C_{10} - C_{13}) CP dienen vor allem als Bestandteil von Kühlschmierstoffen für die industrielle Metallbearbeitung. Mit steigendem Chlorierungsgrad (liegt zwischen 10 und 75 %) nimmt die Lipophilie der CP zu und ihre biologische Abbaubarkeit ab. CP können ebenfalls aus dem Kunststoff migrieren und ins Eluat gelangen, ggf. adsorbiert an Schwebstoffe. So zeigen Untersuchungen von Gewässersedimenten CP-Gehalte im Bereich von 25 - 125 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Sediment [21]. In der Umwelt können schwer wasserlösliche längerkettige CP in kürzerkettige, besser wasserlösliche CP zerfallen.

Neben Chlorparaffinen werden auch andere schwer abbaubare Verbindungen als Flammschutzmittel in Kunststoffen und Gummiwaren eingesetzt. Der Verbrauch an Flammschutzmitteln betrug in Deutschland in 1995 ca. 96.000 Mg [22], davon entfielen knapp ein Drittel auf **organische Halogenverbindungen** (Chlorparaffine, chloriertes Phosphorpolyol, chlorierte Phosphatester, Tetrabrombisphenol A (TBBA), DBDE (Decabromdiphenylether), Bis-(Tribromphenoxy)ethan, HET-Säure (Hexachlor-endo-methylen-tetrahydrophthalsäure)). Die Einsatzmengen von Flammschutzmitteln in Kunststoffprodukten schwanken zwischen 5 und > 20 % [22].

2.3 Fazit Emissionspotential

Die obigen Ausführungen zeigen, daß das Schadstoffpotential an hydrophoben und insbesondere an hydrophilen organischen Einzelstoffen deutlich höher ist als das, was bisher im Eluattest von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen untersucht wurde. Derartige Untersuchungen von Restabfallchargen konzentrieren sich bislang insbesondere auf die Substanzklasse der FCKW und CKW sowie andere leichtflüchtige und vor allem lipophile organische Verbindungen [23].

3 Emissionen (Wasserpfad) - Eluatverhalten auf der Deponie

Die Prüfung des Eluatverhaltens von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restabfall stößt ebenfalls auf methodische Probleme. Hintergrund sind analytische Fragen, da mit den gängigen, bisher eingesetzten Methoden nur ein sehr kleiner Teil der zu erwartenden organischen Schadstoffe im Eluat erfaßt werden kann (analytisches Fenster). So wurden gut wasserlösliche (hydrophile) organische Xenobiotika bislang nicht im MBA-Eluat untersucht.

3.1 Eluatbelastung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle

Zur Eluatbelastung vorbehandelter Abfälle sind Daten verschiedener Meßkampagnen verfügbar. Tabelle 3 zeigt eine Auswahl dieser Untersuchungsergebnisse.

Man erkennt aus Tabelle 3 zunächst, daß die Grenzwerte des Anhangs B der TASI für die toxikologisch relevanten Schwermetalle problemlos eingehalten werden, das Material somit, vom TOC-Grenzwert einmal abstrahiert, deponierbar wäre.

Tabelle 4 zeigt aktuelle Untersuchungen aus Simulationsreaktoren und aus Großlysimetern.

Tab. 3: Eluatbelastung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen

	Arsen (µg/l)	Cadmium (µg/l)	Quecksilber (µg/l)	TOC (mg/l)	Lit.
Eluat nach 10 Mon. bis 2 J. Extensivrotte (Hausmüll)	< 25	< 0,5 - 2	< 1	11 - 79	[24]
Eluat von Restmüll/Klärschlamm, ausgerottet	10 - 38	< 1	0,6	161 - 318	[25]
Eluat von Rottematerial, div. Rottezeiten	< 0,5 - 56	< 5	0,7 - 9	590 - 1.387	[26]
Eluat von Trockenstabilat nach Rottebox (Mittelwert)*	10	2 - 10	4	611 - > 1.000	[27]
Zuordnungswert TASI (Klasse II)	< 500	< 100	< 20	< 100	
* Behandlungsziel hier ist nicht Ablagerung					

Tab. 4: Vergleich von Emissionsfrachten, nach Bidlingmaier et al., aus Deponie-Simulationsreaktoren [28] und Sickerwasserkonzentrationen nach Nienhaus und Polednik [29] aus Deponie-Großlysimeter (100 m³) (Beobachtungszeitraum 2 Jahre nach Einbau) mit unterschiedlich vorbehandelten Abfällen; Tabelle zit. in [30]

Bidlingmaier et al. (28)	Emissionsfrachten pro kg TS aus Deponien		
	mit rohen Siedlungsabfällen	mit MBA-Abfällen	mit MVA-Rostschlacke
CSB im Sickerwasser	25.000 - 40.000 mg	1.000 - 3.000 mg	200 - 500 mg
TOC im Sickerwasser	8.000 - 15.000 mg	500 - 1.000 mg	80 - 200 mg
NH ₄ -N im Sickerwasser	1.000 - 2.000 mg	100 - 200 mg	10 - 20 mg
Deponiegas	150 - 200 NI	0 - 20 NI	≈ 0
Zeitraum bis zum Erreichen nicht mehr behandlungsbedürftiger Emissionen	250 - 400 a	ca. 50 a	??
Nienhaus/Polednik (29)	Konzentration (mg/l)		
CSB im Sickerwasser	55.000 - 3.000	2.000 - 1.000	500 - 100
TOC im Sickerwasser	20.000 - 1.000	900 - 300	100 - 10
TKN im Sickerwasser	3.000 - 700	400 - 150	50 - 10
CSB im Eluat	2.140	170	39
TOC im Eluat	824	n.b.	21

Es wird deutlich, daß die organische Eluatbelastung von Rohmüll durch die mechanisch-biologische Vorbehandlung deutlich reduziert wird, aber nicht das Niveau z.B. von Verbrennungsschlacken erreicht.

Weiter ist anzumerken, daß die Sickerwasserdaten aus großtechnischen Deponien für MBA-Output nicht konsistent sind. So wird z.B. für die MBA Schaffhausen eine Organikbelastung des Sickerwassers von 1.400 - 5.000 mg/l (DOC) berichtet (eingehauste Mieta, 4 Wochen Rottedauer) [31], für die Deponie Meisenheim (Kaminzugverfahren, bis zu 30 Wochen) jedoch TOC-Werte im Sickerwasser von nur 130 - 160 mg/l [32]. Wir verweisen in diesem Zusammenhang auf die Schwierigkeit der repräsentativen Probenahme eines heterogenen Untersuchungsobjekts

3.2 TOC und Einzelstoffe im MBA-Eluat

Tabelle 5 zeigt, welche organischen Einzelstoffe im Eluat von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen festgestellt wurden. Der geringe Umfang der Tabelle erklärt sich damit, daß in der verfügbaren Literatur Eluat-Untersuchungen sich in der Regel auf die Summenparameter TOC, AOX und/oder Phenole beschränkten. Einzelstoffbestimmungen wurden nur in wenigen Fällen durchgeführt bzw. sind zugänglich.

Man erkennt, daß die aufgeführten Einzelstoffe in sehr geringen Konzentrationen vorhanden sind.

Eine Gegenüberstellung der jeweiligen TOC-Werte und der festgestellten Einzelstoffkonzentrationen zeigt, daß die Aufklärungsquote des TOC über die Einzelstoffanalyse in den verfügbaren Untersuchungen in der Regel unter 1% beträgt. Dies bedeutet, daß bislang mengenmäßig bedeutende eluatrelevante Organika nicht erkannt bzw. bestimmt worden sind.

Dies wird auch aus einfachen Erfahrungssätzen und Plausibilitätsüberlegungen der „Wasserchemie“ verständlich. Der TOC erfaßt als Parameter **alle** organischen Kohlenstoffverbindungen, die im Wasser enthalten sind (als C). Hierbei wird nicht unterschieden zwischen gut wasserlöslichen (polaren bzw. hydrophilen und dissoziierten ionischen) und schlecht wasserlöslichen (unpolaren bzw. hydrophoben) Verbindungen.

Die in der Regel eingesetzte Einzelstoffanalytik erfaßt, hinterfragt man die verwendeten Untersuchungsmethoden, aus methodisch-analytischen Gründen insbesondere oder ausschließlich die hydrophoben Stoffe. Verbindungen, die im Übergangsbereich zwischen hydrophil und hydrophob liegen, werden, je nach Testmethode, anteilig erfaßt. Die Hauptmenge eines Eluates mit 100 bis mehrere 1.000 mg/l an TOC wird zu den polaren, gut wasserlöslichen organischen Stoffen gehören. Diese Stoffe werden mit den eingesetzten Einzelstoffanalytik aber nicht erfaßt.

Tab. 5: Organische Einzelstoffe im Eluat von vorbehandelten Abfällen aus der MBA [33]

Substanz	Konzentration (Mikrogramm/l)	
	Restmüll mit Klärschlamm	Hydrolyserest mit Klärschlamm
Σ Chlorphenole	1,21	0,5
Σ Trichlorphenole	0,18	0,1
ΣTetrachlorphenole	0,2	0,1
Pentachlorphenol	0,83	0,3
Σ EPA-PAK	2,98	2,23
Naphthalin	n.n.	n.n.
Acenaphthylen	0,5	n.n.
Acenaphten	0,2	0,36
Fluoren	0,02	0,04
Phenanthren	0,17	0,21
Anthracen	n.n.	n.n.
Fluoranthen	0,14	0,14
Pyren	0,08	0,09
Benzo(a)anthracen	0,1	0,14
Chrysen	0,05	0,09
Benzo(b)fluoranthen	0,23	0,19
Benzo(k)fluoranthen	0,11	0,12
Benzo(a)pyren	0,1	0,07
Dibenzo(ah)anthracen	1,8	0,65
Benzo(ghi)perylen	0,01	0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,09	0,11

Da unpolare, hydrophobe Stoffe im Wasser schlecht löslich sind, ist selbst beim Vorhandensein derartiger Verbindungen im Abfall mit nur geringen Konzentrationen im Eluat zu rechnen. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß die hydrophoben Einzelstoffe partikelgebunden in einem Eluat enthalten sind. Da die Analysenvorschriften eine Abtrennung dieser Fraktion vor der eigentlichen Untersuchung verlangen [34], würde dieser Anteil der partikelgebundenen unpolaren Organik ebenfalls nicht erfaßt werden. D.h. der TOC ist eigentlich nur ein **DOC**.

Genaugenommen werden maximal die Löslichkeitsprodukte bzw. -konzentrationen eingestellt, die für die Stoffgruppe der unpolaren Verbindungen niedrig bis sehr niedrig liegen. Gerade für Verbindungen wie PAK, PCB, DDT, PCDD/F und andere höher chlorierte Verbindungen usw. (vgl. Tab. 5), dürfte eher deren geringe Löslichkeit in Wasser als deren Verfügbarkeit im Abfall für die niedrigen Konzentrationen im Eluat verantwortlich sein.

3.3 TOC und Huminstoffe im MBA-Eluat

Als Begründung für o.g. geringe Aufklärungsquote für organische Einzelstoffe im MBA-Eluat wird diskutiert, daß der TOC im Eluat aus der MBA sich hauptsächlich aus **Huminstoffen** zusammensetzt. Da Huminstoffe auch natürlicherweise im Gewässer vorkommen und dort die Hauptmenge des TOCs bilden, wäre hiermit nicht nur der TOC weitgehend aufgeklärt, sondern auch eine nachvollziehbare und wissenschaftlich fundierte Begründung vorhanden, hier eine Grenzwertmodifikation (Erhöhung TOC-Wert im Anhang B der TASI) abzuleiten.

Huminstoffe unterliegen zwar auch dem biologischen Abbau, aber sehr verlangsamt. Sie sind vielmehr, wie Untersuchungen an Komposten [35] und Kläranlagen [36] zeigen, die ersten einigermaßen stabilen Verbindungen, die auf (mikro-)biologischem Weg im Zuge der Abbau organischer Substanz gebildet werden. Die Bildung von Huminstoffen ist auch im Verlauf des Behandlungsprozesses einer MBA zu erwarten.

Allerdings sind derartige exakte Untersuchungen über den Huminstoffanteil im Eluat aus MBA-Proben bislang nicht verfügbar bzw. durchgeführt [37]. Untersuchungen von Deponiesickerwässern zeigten, daß hier der Huminstoffanteil eher gering ist [38]. Kögel-Knabner und Pichler [39] haben mittels Feststoffanalytik diese Frage an MBA-Material untersucht und konnten keine Hinweise auf die Neusynthese huminstoffähnlicher Verbindungen finden. Es ist dennoch zu erwarten, daß im Verlauf intensiver biologischer Abfallbehandlung, ähnlich wie dies von über Kläranlagen ins Gewässer eingeleiteter Organik berichtet wird [36], Huminstoffe gebildet werden. Es ist aber unklar, nach welcher Behandlungszeit und -intensität dies geschieht. Unklar ist auch, ob es zutreffend ist, den Huminstoffen per definitionem positive Eigenschaften zu unterstellen [1]. In diesem Zusammenhang wird problematisiert, daß Huminstoffe oder bestimmte Teilfraktionen möglicherweise Carrierfunktion für Schadstoffe beim Weg aus der Deponie ins Grund- und Oberflächenwasser übernehmen können.

Weiter zeigt die Erfahrung z.B. an Gewässerproben, daß trotz hoher Huminstoffanteile im TOC auch problematische Stoffe enthalten sein können. Zu den problematischen Stoffen im wäßrigen Milieu gehören auch die hydrophilen Stoffe. Sie weisen zwar i.d.R. keine Bioakkumulationswirkung auf, was eine Anreicherung in der aquatischen Nahrungskette ausschließt. Sie können aber, wenn sie eine gewisse Persistenz gegenüber biologischem Abbau zeigen und, sofern sie ins Grund- oder Oberflächenwasser gelangen, die Schutzbarrieren der Trinkwasseraufbereitung durchbrechen und den Menschen erreichen.

Hinzu kommt eine grundsätzliche Einschätzung in diesem Zusammenhang, die eher zu vorsichtigem Umgang mit einer neuen Begrenzung der Eluatbelastung mit organischen Stoffen nach MBA anraten läßt. Die biologische Behandlung stellt im Kern einen Oxidationsprozeß dar, der im Falle der Unvollständigkeit des Abbaus chemisch gesehen tendenziell in Richtung hydrophiler, persistenterer Metabolite geht. Für diese These (Persistenz) spricht u.a., daß sich das BSB₅/CSB-Verhältnis während des Rotteverlaufs von ca. 0,5 auf unter 0,1 reduziert [40].

3.4 Orientierende Untersuchungen nach mechanisch-biologischer Vorbehandlung von Restabfall

Im Rahmen einer von der ATV beauftragten Literaturstudie zur toxikologischen Relevanz von MBA-Sickerwässern/Eluaten wurden Eluatproben von einer im Routinebetrieb arbeitenden technischen MBA (Lüneburg), die eine mehrwöchige Intensivbiologie betreibt, untersucht. Aufgrund dieser Anlagenkonzeption konnten Eluate nach kurzer, mittlerer und nach langer Behandlungsdauer gewonnen werden. Für die Untersuchung des Eluates war dankenswerterweise das DOC-Labor Dr. Huber in Karlsruhe bereit, dessen Leiter das LC-OCD Verfahren mitentwickelt hat und der über umfassende Kenntnisse und Erfahrungen auf diesem Gebiet verfügt [41, 42, 43, 44, 45].

Es wurden drei Proben untersucht. Probe A entsprach dem frisch mechanisch aufbereiteten Abfall. Probe B und C entsprachen einem Material, was bereits 8 (B) bzw. 16 Wochen (C) Intensivbiologie hinter sich hatte. Die Aufbereitung des Materials fand entsprechend der in der MBA Lüneburg installierten Verfahrensweise statt [46]. Die Eluate wurden nach dem LC-OCD Verfahren untersucht und zusätzlich auf gängige Summenparameter und ausgewählte Einzelstoffe analysiert [47].

Es zeigte sich, daß der TOC im Verlauf der 16-wöchigen Intensivbiologie um rund eine Größenordnung abnahm, allerdings selbst nach dieser sehr langen Intensivbehandlung den in der Diskussion befindlichen erhöhten Eluatgrenzwert von 300 mg TOC/l noch nicht unterschreiten konnte. Im Eluat des frisch aufbereiteten Restabfalls waren erwartungsgemäß keine Huminstoffe nachzuweisen. Aber auch nach einer immerhin achtwöchigen Intensivbiologie betrug der Anteil der Huminstoffe bezogen auf den TOC weniger als 5 % und erreichte erst nach 16-wöchiger Behandlung einen Wert von über 60 %. Allerdings unterscheiden sich die im Verlauf der mechanisch-biologischen Behandlung gebildeten Huminstoffe von den in aquatischen Systemen entstehenden Huminstoffen (Fulvinsäuren). Eine Ursache hierfür könnte darin bestehen, daß die Huminstoffbildung in der MBA in der ungesättigten Zone der Feststoffe stattfindet (ähnlich wie im Boden). Der Anteil der niedermolekularen Säuren ist nach 16 Wochen auf einen sehr kleinen Restbestand geschrumpft. Die verbleibende Organik ist daher vermutlich eher aus höhermolekularen organischen Verbindungen zusammengesetzt, was Spielraum eröffnet für die Frage nach dem Anteil an anthropogenen, möglicherweise gefährlichen Verbindungen, die sich einem Abbau bislang haben widersetzen können.

Weiterhin wurden aromatische Sulfonate im Bereich von 2 - 15 µg/l nachgewiesen; sie alle stammten aus der Gruppe der Naphthalinsulfonate. Benzol- und Anthrachinonsulfonate (NWG: 0,2 µg/l) waren ebensowenig nachweisbar wie Stilbensulfonate (NWG: 0,5 µg/l). Für einige der nachgewiesenen Naphthalinsulfonate (nur Mono- und Disulfonate) war die positive Korrelation zwischen Rottezeit und Konzentration hochsignifikant.

Ebenfalls nachgewiesen wurden die synthetischen Komplexbildner EDTA und NTA. Die anfängliche NTA-Belastung des Eluats von 90 µg/l nahm nach 8 Wochen auf 74 µg/l ab, nach 16 Wochen war NTA im Eluat nicht mehr nachweisbar. EDTA verhielt sich ähnlich: eingangs 180 µg/l, nach 8 Wochen 80 µg/l, nach 16 Wochen nicht nachweisbar. Die beiden Substanzen wurden folglich abgebaut oder aber komplex gebunden (z.B. in der Huminstruktur).

Auf die begrenzte Aussagefähigkeit dieser orientierenden Untersuchung (nur 3 Proben!) wird an dieser Stelle noch einmal explizit verwiesen.

3.5 Fazit Eluate

Erste systematische Untersuchungen, die in der MBA Lüneburg durchgeführt wurden, zeigen, daß selbst nach gut 4 Monaten Intensivrotte der Wert von 100 mg/l für TOC nicht erreichbar ist. Müller et al. unterstellen, daß dieser Wert nach mehr als 6 Monaten Rottezeit einzuhalten sein dürfte [48]. Allerdings zeigen diese ersten großtechnischen Untersuchungen auch, daß bei den in vielen MBAs üblichen kürzeren Rottezeiten (2 bis 6 Wochen) der vorgeschlagene erhöhte TOC-Grenzwert von 300 mg/l auch nicht annähernd erreicht wird.

Nur nach relativ intensiven und langen biologischen Behandlungszeiten steigt der Humifizierungsgrad des Eluat-TOCs in befriedigendem Umfang. Kurze biologische Behandlungsverfahren (< 8 Wochen) führen zu unbefriedigenden Ergebnissen.

4 Zusammenfassung und Gesamtbewertung

Will man das sog. Multibarrierenkonzept zur Realisierung weitgehend nachsorgefreier bzw. nachsorgearmer Deponien erreichen und dem Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltsgesetz § 19 g Rechnung tragen, kann man den Eluatgrenzwert der TA Siedlungsabfall von 100 mg/l TOC (korrekterweise: DOC) sicherlich nicht als überzogen ansehen.

Schlacken aus der thermischen Abfallbehandlung können diese Zielvorgabe in der Regel einhalten. Demhingegen erreichen in einer MBA behandelte Abfälle dieses Ziel selbst nach langer biologischer Behandlung in der Regel **nicht**. Daher wird für die MBA eine Grenzwertaussetzung oder -erhöhung auf 200 bzw. 300 mg/l vorgeschlagen.

Die vorliegende Studie [4] belegt, daß Restabfälle aus Siedlungsabfällen, ja nach Art und Herkunft, als Senke für gefährliche Stoffe anzusehen sind. Weiter zeigen aktuelle Untersuchungen, daß Kunststoffadditive durch die MBA verfügbar bzw. eluierbar werden. Daher kann vor dem Hintergrund einer allgemein akzeptierten Schutzzielausrichtung der nachsorgearmen Deponie eine Grenzwertmodifikation **ohne das Vorliegen ausreichender Beurteilungsgrundlagen** nicht empfohlen werden.

Bei den bisher vorliegenden Untersuchungen, die als Beurteilungsgrundlage für eine Grenzwertmodifikation herangezogen werden, zeigt sich, daß aufgrund der für diese Aufgabe unzureichenden analytischen Methoden ein viel zu kleines Spektrum des TOC (bzw. DOC) im Eluat erfaßt wurde (hydrophobe Einzelstoffe). Daher können die bisher vorliegenden Daten als Beurteilungsgrundlage **nicht ausreichen**, um eine schutzzielkonforme Grenzwertmodifikation wissenschaftlich abzuleiten.

Die Hypothese, daß der TOC des Eluats von MBA-Output sich überwiegend aus (unproblematischen) Huminstoffen zusammensetzt, konnte anhand der durchgeführten orientierenden analytischen Untersuchungen nur teilweise bestätigt werden. So erwiesen sich die Huminstoffe erst nach einer relativ langen gesteuerten Intensivrotte (16 Wochen) als mengenmäßig dominierender Anteil in der Organik des Eluats. Es verbleibt aber auch hier die Frage nach dem Vorhandensein weiterer, ggf. ökologisch und/oder ökotoxikologisch bedeutsamer organischer Schadstoffe. Zur Abklärung dieser Frage sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Das Einzelstoffpotential im Restabfall ist toxikologisch nicht unproblematisch. Daher kann einer pauschalen Grenzwertheraufsetzung der TA Siedlungsabfall (auf 200 oder 300 mg TOC/l) in dieser Form nicht zugestimmt werden. Es erscheint uns vielmehr zielführender bzw. schutzzielkonformer, einen definierten Humifizierungsgrad des TOC-Eluats festzulegen.

5 Danksagung

Wir danken der **Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) e.V.** für die Finanzierung der Studie TOC-Grenzwerte (Eluat) für das nachsorgearme Deponieren von Restabfällen.

Weiter danken wir dem **ISAH der Universität Hannover** und der **Ingenieurgesellschaft für Abfallwirtschaft (IBA)** Hannover/Dr. **Ketel Ketelsen** für die Bereitstellung der Proben und die Erstellung der MBA-Reststoff-Eluate nach DEV S4.

Für die Durchführung der analytischen Arbeiten, speziell der DOC-Chromatographie, danken wir **Herrn Dr. Stefan Huber, DOC-Labor Dr. Huber**, Karlsruhe.

Für seinen wertvollen Hinweise und kritischen Anmerkungen zu unserer Studie danken wir insbesondere auch **Nik Geiler** vom Arbeitskreis Wasser im BBU, Freiburg.

Literatur

- 1 Geiler N. (AK Wasser im BBU): pers. Mitt., 25.9.1997
- 2 Müller W., Fricke K., Turk T., Lechner P., Doedens H., in Zusammenarbeit mit der BWK-Arbeitsgruppe Restabfallbehandlung: Ermittlung von Prüfmethode zur Beschreibung des Stabilisierungsgrades der organischen Substanz in mechanisch-biologisch behandeltem Restabfall. In: Wiemer K., Kern M. (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung III. Kompostierung - Anaerobtechnik - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung - Klärschlammverwertung. Witzhausen 1996, S. 907 - 950
- 3 Bezirksregierung Hannover, 6.6.1997: Änderung des Bescheides der Bezirksregierung Hannover vom 12.06.1995 über die 11. Änderung des Planfeststellungsbeschlusses gemäß § 7 AbfG der Bezirksregierung Hannover vom 25.09.1978 - 502.2-62811/01M/10
- 4 Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: TOC-Grenzwerte (Eluat) für das nachsorgearme Deponieren von Restabfällen. Bewertung von Eluaten und Sickerwässern (organische Stoffe) aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung und der anschließenden Deponierung der Reststoffe/vorbehandelten Abfälle. ATV-Projekt Nr. 26/97, Dezember 1997
- 5 Scheidl K., Lahl U., Mostbauer P., Scharf W., Konrad W., Zeschmar-Lahl B.: Abluftemissionen aus der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes Wien, 1997; Veröffentlichung in Vorbereitung
- 6 Lahl U., Scheidl K., Zeschmar-Lahl B.: Emissionen aus den verschiedenen mechanisch-biologischen Aufbereitungssystemen - Ergebnisse und Vergleichbarkeit. 10. Kasseler Abfallforum „Bio- und Restabfallbehandlung“, Kassel, 21.-23.4.1998
- 7 Ergänzende Empfehlungen des BMU zur TA Siedlungsabfall, hier: Anhang 2. Hösel G., von Lersner H.: Recht der Abfallbeseitigung, Kennzeichen 1087a, 50. Erg.-Lfg. XI/94
- 8 Turk M.: Verhalten sich Kunststoffe in gerottetem Abfall wirklich inert? Abfallwirtschaftsjournal 5/97, S. 21 - 24
- 9 Allner B.: Effekte von endokrin wirksamen Substanzen auf Fische - dargestellt am Beispiel der Wirkung von 3,4-Dichloranilin auf den Androgenmetabolismus des Stichlings; siehe UBA-Texte 65/95 (s.o.), S. 69 - 76
- 10 Bethmann D., Sacher F., Brauch H.-J.: SPON (Solid Phase extractable Organic Nitrogen) - ein Gruppenparameter zur Bestimmung von aromatischen Stickstoffverbindungen in Wasser. Vom Wasser 87, 171 - 185, 1996
- 11 Ruffer H.: Zusammenfassende Berichte über einige ökotoxikologisch gefährliche Stoffe. ATV: Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis 20, 1989
- 12 Bettermann D.: Problem der Deponiegas-Vewertung. Informationen zur Deponiegasbehandlung nach dem PHYTEC-Verfahren. Vortrag auf der VDI-Tagung am 6./7.10.1993, Düsseldorf
- 13 Cuhls C., Poschmann F., Doedens H., Levsen K.: Screening und Bilanzierung von Umweltchemikalien bei der Restabfallbehandlung. BMBF-Verbundvorhaben Mechanisch-Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen. Beiträge der 1. Tagung, 13./14. März 1996, Potsdam

- 14 pers. Mitteilung von Herrn Schlotter, VKE, am 13.5.1997
- 15 Fehringer R., Brunner P.H.: Kunststoffflüsse und Möglichkeiten der Kunststoffverwertung in Österreich. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, Monographien Bd. 80, Wien, 1997
- 16 Leisewitz A.: Stoffströme wichtiger hormonell wirkender Substanzen. UBA-Projekt Nr. 10601076 (in Vorbereitung); zit. in: UBA-Texte 46/97: Substanzen mit endokriner Wirkung in Oberflächengewässern
- 17 Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Dr. Jürgen Rochlitz und die Fraktion Bündnis 90/DIE GRÜNEN, Ds. 13/3400, 27.12.1995
- 18 Korte F. (Hrsg.): Lehrbuch der Ökologischen Chemie. 2. Auflage, hier S. 268/269, 1987
- 19 zit. nach Kemper F.H., Lüpke N.-P.: Phthalsäuredialkylester. Pharmakologische und toxikologische Aspekte. Hrsg.: Verband der Kunststoffherstellenden Industrie (VKE), Frankfurt, 1983, hier S. 24/25
- 20 Mesiowsky I., Stegmann R.: Long-term behaviour of PVC-products under soil-buried and landfill conditions. TU Hamburg-Harburg, 1997
- 21 GREENPEACE Fakten: Chlorparaffin-Untersuchungsprogramm „Gewässersedimente“. 17. Mai 1995
- 22 Schramm E., Buchert M., Bunke D. et al.: Stoffflüsse ausgewählter umweltrelevanter chemischer Stoffe: Beispiele für ein Produktliniencontrolling. UBA-Texte 80/96, 1996
- 23 Reinhardt T., Jäger J.: Schadstoffbelastung der Abluft bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung und anschließenden Deponierung. Wiemer K., Kern M. (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung III. Kompostierung - Anaerobtechnik - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung - Klärschlammverwertung. Witzhausen 1996, 845 - 906
- 24 Spillmann P.: Praktische Beispiele der biologischen Vorbehandlung beurteilt nach den Kriterien der TA Siedlungsabfall. Forschungsinstitute für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) Aachen/Bonn: Tagungsband „Kalte“ Vorbehandlung von Restmüll - Königsweg, Übergangslösung oder Sackgasse, 24.3.1993 in Hürth/Erftkreis, 30 - 45, 1993
- 25 Müller W., Fricke K.: Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Berücksichtigung der Aerob- und Anaerobtechnik. In: Fricke K., Thomé-Kozmiensky K.J., Neumüller G. (Hrsg.): Integrierte Abfallwirtschaft im ländlichen Raum, EF-Verlag Berlin, 259 - 523, 1994
- 26 Lahmeyer International: Modellversuch Freiburg (Deponie Eichelbuck); Antragsunterlagen zur Planfeststellung, Ordner 3a von 12, Dezember 1994
- 27 Messungen in Aßlar; zit. in: Bericht der HerHof-Umwelttechnik GmbH vom 31. Juli 1995, darin eingeschlossen: Witzhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie, Prof. Wiemer und Partner: Großversuche zum Trockenstabilisatverfahren mit dem System HerHof-Box, Juli 1995, sowie MPU GmbH: Untersuchungsprogramm zur Restabfallbehandlung mit dem System HerHof, Bericht SB-MT-9504-6004.1, 14. April 1995

- 28 Bidlingmaier W. et al.: Was ist mit mechanisch-biologischer Behandlung erreichbar? Teilbericht der BWK-Arbeitsgruppe „Restabfall“, zur Veröffentlichung eingereicht als Beiheft zu Müll und Abfall 1997; zit. in MURL NRW: Leitfaden, s.u.; *Anmerkung: im erschienenen MuA-Beiheft Nr. 33 taucht diese Aufstellung im Beitrag von Bidlingmaier, Scheelhase, Leikam und Rieger nicht mehr auf.*
- 29 Nienhaus U., Polednik I.: Verringerung der Sickerwasserbelastung durch Abfallvorbehandlung. Ergebnisse aus Lysimeterversuchen. Abwassertechnik 2, 12 - 15, 1997
- 30 MURL NRW (Hrsg.): Leitfaden Integration der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung in ein kommunales Abfallwirtschaftskonzept. 1998
- 31 Loosli 1996, nach MURL NRW: Leitfaden, s.o.
- 32 Turk, M.: Aerob-Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung (AMBRA) auf der Deponie Wilhelmshaven-Nord. In: Mechanisch-biologische Behandlung von Abfällen. Hrsg.: Zentrum für Abfallforschung (ZAF) der TU Braunschweig, Heft 10, S. 195 - 211, 1995
- 33 ITU: Untersuchung von Feststoffen aus der Kompostierung im Auftrag der IGW Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen, 29.7.1993, Prüfbericht (Endbericht)
- 34 „DEV S4“: DIN (Hrsg.): DIN 38414 - S4, Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser; Ausgabe Oktober 1984; Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (DEV)
- 35 Balzer F.M.: Physikalische, chemische und biologische Beurteilung von Komposten. ANS Heft 9, 108 - 115, 1986
- 36 Link J., Gilbert E., Eberle H.: Untersuchungen über die Art und Menge der Reststoffe in den Abläufen biologischer Kläranlagen. Vom Wasser 72, 349 - 370, 1989
- 37 Pichler M., Lehrstuhl für Bodenkunde, TU München, pers. Mitt., 12.11.1997
- 38 Huber S.A., Frimmel F.H.: Gelchromatographische Charakterisierung von Deponiesickerwasser mit UV-, DOC-, Fluoreszenz- und N_{org}-Detektion. Gewässerschutz, Wasser, Abwasser 136, 83 - 105, 1992
- 39 Kögel-Knabner I., Pichler M. (Lehrstuhl für Bodenkunde, TU München): Analyse von Huminstoffen in Restmüll-Feststoffen. Abstract zum Vortrag auf der Analytica 98
- 40 Fricke K., Müller W., Ganser G., Kölbl R., Turk T.: Massenbilanz, Stabilität der organischen Substanz und Qualität des Eluats bei der Mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung am Beispiel der Anlage Quarzbichl. EntsorgungsPraxis 10, 28 - 37, 1995
- 41 Wechselwirkungen zwischen Huminstoffen und Xenobiotika. BMFT-Vorhaben 89137, 1989
- 42 Huber S., Gremm T., Frimmel F.H.: Chromatographische Trennung natürlicher organischer Wasserinhaltsstoffe mit UV-, Fluoreszenz- und DOC/TOC-Detektion ohne Probenvoranreicherung: Auswahl geeigneter Trennsysteme. Vom Wasser 75, 331 - 342, 1989
- 43 Huber S.A., Frimmel F.H.: Flow injection analysis of organic and inorganic carbon in the low-ppb range. Anal. Chem. 63, 2122 - 2130, 1991
- 44 Huber S.A., Frimmel F.H.: A liquid chromatographic system with multi-detection für the direct analysis of hydrophilic organic compounds in natural waters. Fresen. J. Anal. Chem. 342, 198 - 200, 1991

- 45 Huber S.A., Frimmel F.H.: Characterization and quantification of marine dissolved organic carbon with a direct chromatographic method. Environ. Sci. Technol. 28, 1194 - 1197, 1996
- 46 Bröker E., Ketelsen K., Ringe H., Tegtmeier E.: MBA Lüneburg. In: BWK-Arbeitsgruppe Restabfallbehandlung (Hrsg.): Mechanisch-biologische Verfahren zur stoffspezifischen Abfallbeseitigung, Beihefte zu Müll und Abfall Nr. 33, 114 - 118, 1997
- 47 DOC-Labor Dr. Huber, Karlsruhe: Bericht vom 4.8.1997, Projekt-Nr. BZL_1
- 48 Müller W., Fricke K., Lechner P. Doedens H.: Prüfmethode zur Beschreibung der biologischen Stabilität. In: BWK-Arbeitsgruppe Restabfallbehandlung (Hrsg.): Mechanisch-biologische Verfahren zur stoffspezifischen Abfallbeseitigung, Beihefte zu Müll und Abfall Nr. 33, 66 - 86, 1997