Eidg. Technische Hochschule, Zürich – Fortbildungskurs der EAWAG, 1964

Möglichkeiten der biologischen Behandlung von festen Abfallstoffen

Von R. BRAUN, EAWAG, Zürich

1. Zweck der biologischen Behandlung

Aus hinlänglich bekannten Gründen bieten die meisten festen und schlammförmigen Abfallstoffe vorwiegend organischer Natur beträchtliche Unannehmlichkeiten und Schäden, wenn man sie ohne Vorbehandlung im Gelände ablagert.

Die Aufgabe der Abfallbeseitigungstechnik besteht darin, die schädlichen Abfallstoffe mit Hilfe technischer Verfahren erstens in weitgehend unschädliche, hygienisch und ästhetisch einwandfreie Form überzuführen, so dass sie im Gelände abgelagert werden können, und zweitens, sie im Volumen möglichst stark zu reduzieren. Diese Aufgabe kann mit Hilfe der Verbrennung oder mit Hilfe einer biologischen Behandlung gelöst werden. Da in unserem Fortbildungskurs vorwiegend die biologischen Aspekte der verschiedenen Verfahren zur Sprache kommen, müssen wir auf die rein verbrennungstechnischen Fragen verzichten.

Der Stoffkreislauf in der Natur ist gekennzeichnet durch Werden und Vergehen, durch Aufbau und Abbau organischer Stoffe als Ausdruck der Lebenstätigkeit der Organismen. Gelangen organische Abfälle pflanzlichen oder tierischen Ursprungs auf oder in den Boden, so unterliegen sie einem Abbau- und Umwandlungsprozess, der in erster Linie von Mikroorganismen (Bakterien und Pilzen) ausgelöst und vollzogen wird. Sauerstoffarme, energiereiche Kohlenstoffverbindungen der organischen Substanz werden dabei in niedermolekulare Verbindungen umgewandelt, was unter Abgabe von Energie geschieht, die von den Mikroorganismen zum Teil ausgenützt wird. Hier zeigt sich also schon die Bedeutung des organisch gebundenen Kohlenstoffs als Energieträger. Im Endstadium dieses Abbauprozesses entstehen schliesslich Kohlensäure, Wasser und Mineralsalze.

Geschieht dieser Prozess unter Anwesenheit des Sauerstoffs, so spricht man von aerober Zersetzung oder Verrottung. Erfolgt der Abbauprozess unter Luftabschluss, also ohne Sauerstoff, so handelt es sich um eine anaerobe Zersetzung oder Fäulnis. Beide Vorgänge laufen bei der Umwandlung organischer Stoffe unter natürlichen Bedingungen im Boden nebeneinander her. Bald überwiegt der eine, bald der andere Prozess, je nach der Durchlüftung des Bodens.

Die Tätigkeit der Mikroorganismen bei diesen Umwandlungsprozessen ist äusserst kompliziert und z. T. noch sehr wenig erforscht. Einerseits wandeln sie dabei mit Hilfe spezifischer Enzyme komplizierte organische Verbindungen in einfache Stoffe um und gewinnen dabei die für ihre Lebensprozesse notwendige Energie. Wird dieser Abbau zu Ende geführt, d. h. bis zur Bildung von Mineralsalzen, Kohlensäure und Wasser, so spricht man von Mineralisation. Andererseits aber verwenden die Mikroorganismen bereits abgebaute oder frische organische Substanz als Nahrung zum Aufbau ihrer Körpersubstanz, wobei wieder der umgekehrte Vorgang eintritt: einfache organische oder anorganische Stoffe werden in komplizierte neue organische Verbindungen, nämlich in Bau- und Betriebsstoffe der Organismenleiber, umgewandelt.

Die organische Substanz, wie sie als Abfälle auf oder in den Boden gelangt, besteht aus zahlreichen, teils leicht, teils schwer zersetzbaren chemischen Verbindungen. So sind Kohlehydrate (Zucker, Stärke, Zellulose, Hemicellulosen, Pektin), ferner Eiweisse und Eiweissderivate leicht, dagegen Lignin, manche Fette, Wachse und Harze schwer zersetzlich, bzw. angreifbar durch Mikroorganismen.

Wenn auch gewisse Abbaustufen nur von ganz bestimmten Mikroben, von Spezialisten, vorgenommen werden, so geschieht der Gesamtabbau der organischen Substanz durch ein unübersehbares Heer verschiedenster Organismen. So sind in einem Gramm einer Mischung von Müll und Klärschlamm beispielsweise mehrere Milliarden Keime vorhanden ([2], 1959). Bei diesem Abbauprozess handelt es sich um eine Art Kettenreaktion, um eine Arbeit am laufenden Band, wobei eine bestimmte Organismenart die Stoffe bis zu einem gewissen Punkt verarbeitet und dann das Produkt an andere Arten weiterleitet, wenn wir uns dieser bildlichen Sprache bedienen dürfen.

Früher bezeichnete man die Summe der zwischen Ausgangssubstanz und den mineralisierten Endstoffen auftretenden Zwischenprodukte als Humus. Man hat indessen erkannt, dass der Humus nicht nur aus diesen Zwischenprodukten besteht, sondern dass durch komplizierte biochemische Vor-

gänge z.T. unbekannter Natur neue Stoffe, die sog. echten Humusstoffe entstehen, eine ganze Gruppe hochmolekularer, gegen mikrobiellen Angriff relativ stabiler Verbindungen, die im Boden in grossen Mengen vorkommen und ihm seine charakteristische braune Farbe verleihen.

Bei diesem Abbauprozess der organischen Substanz tritt eine beträchtliche Verminderung des ursprünglichen Volumens ein, deren Ausmass abhängig ist vom Grad der Zersetzung. Die grösste Volumenreduktion wird bei der vollständigen Mineralisation erreicht.

Die Endprodukte des biologischen Abbaues, nämlich humusähnliche oder mineralisierte Stoffe, können als weitgehend unschädlich bezeichnet werden. Die beiden in der Einleitung erwähnten Aufgaben, nämlich Unschädlichmachung und Volumenreduktion, wären somit erfüllt. Aufgabe der Technik ist es, diese natürlichen Vorgänge örtlich und zeitlich zu konzentrieren.

2. Anaerobe Verfahren

2.1 *Behandlung im Faulraum*

Der anaerobe Abbauprozess findet seit Bestehen der Abwasserreinigungstechnik Verwendung in der Ausfäulung des Klärschlammes, worüber ein spezielles Referat orientiert. Es war naheliegend, zu prüfen, ob nicht auch feste organische Abfälle, z.B. Hausmüll, mit Hilfe des anaeroben Prozesses unschädlich gemacht werden könnten, indem man sie gemeinsam mit Klärschlamm im Faulraum behandelt. Dass dies technisch prinzipiell möglich ist, hat Prof. PÖPEL, Stuttgart, auf Grund umfangreicher Untersuchungen schon vor mehr als 25 Jahren bewiesen. Aus verschiedenen Gründen hat sich dieses Verfahren in der Praxis jedoch nicht durchgesetzt. Hingegen hat die Mitverarbeitung von Küchenabfällen, die in den Haushaltungen durch spezielle, im Spültrog der Küche angebrachte Apparate (sog. Küchenmühlen) fein zerkleinert werden und mit den übrigen häuslichen Abwässern via Kanalisation in die Kläranlage gelangen, da und dort Fuss gefasst. Die Zulassung solcher Küchenmühlen kann jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen verantwortet werden [3].

2.2 *Biovergasung*

Unter dieser Bezeichnung hat sich seit einigen Jahren ein Verfahren durchgesetzt, bei welchem gewisse feste organische Abfälle einem anaeroben Abbauprozess unterworfen werden, wobei einerseits Methangas, anderseits ein humusähnliches Produkt gewonnen wird. Um die Entwicklung dieses Verfahrens hat sich insbesondere Prof. LIEBMANN, München, verdient ge-

macht. Es wird vorwiegend für die Behandlung von Stallmist und anderen organischen Stoffen in grösseren, abgelegenen Bauernhöfen eingesetzt, die sowohl das produzierte Methangas als Energiequelle als auch den organischen Dünger im eigenen Betrieb verwerten können.

3. Aerobe Verfahren

Die hauptsächlichste praktische Anwendung des aeroben Verrottungsvorgangs finden wir in der Kompostierung fester Abfallstoffe. Damit kommen wir zum eigentlichen Hauptthema unseres Referats.

Die folgenden Ausführungen möchten wir in drei Teile gliedern. Im ersten, mehr theoretischen Teil sollen einige Gesetzmässigkeiten erläutert werden, wobei insbesondere die für den Verrottungsvorgang wichtigen Voraussetzungen genannt werden. Daraus sollen – im zweiten Teil – die Schlussfolgerungen für die Praxis der Kompostierung gezogen werden. Im dritten Teil möchten wir in Form einiger Bemerkungen die technischen Möglichkeiten erwähnen, mit deren Hilfe die Abfallkompostierung rationell durchgeführt werden kann.

3.1 *Der Verrottungsvorgang als Grundlage für die Kompostierung fester organischer Abfallstoffe*

Die Aufgabe der Technik ist es, den Verrottungsvorgang, wie er sich in jedem Naturboden abspielt, örtlich und zeitlich zu konzentrieren. Es gilt daher, die Natur zu kopieren und den Rotteorganismen optimale Lebensbedingungen zu bieten. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen jedoch die Voraussetzungen für den reibungslosen Ablauf dieser Prozesse berücksichtigt werden.

3.II Die Voraussetzungen für den Rotteprozess

3.III *Chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.* Der Rotteprozess stellt ein schwer übersehbares Neben- und Ineinanderwirken einer grossen Zahl von Einzelprozessen dar, die von Mikroorganismen ausgelöst und vollzogen werden. Es handelt sich dabei um einen exothermen Prozess, bei welchem der organisch gebundene Kohlenstoff von den Mikroben mit Hilfe des Sauerstoffs veratmet wird. Der Kohlenstoff spielt also eine grosse Rolle als Energiestoff. Daneben benötigen die Mikroorganismen in erster Linie Stickstoff, Phosphor und Kali als Stoffe zum Aufbau ihrer Körpersubstanz, wobei auch Spurenelemente bei der Ernährung eine wichtige Rolle spielen. Alle diese Stoffe müssen in einem zu verrottenden Material in genügender Menge vorhanden sein. Hingegen dürfen darin keine toxisch wirkenden

Verbindungen enthalten sein, welche eine Mikrobentätigkeit verzögern oder gar verhindern. Auch zu hohe Salzkonzentrationen und ein zu saures oder zu alkalisches Milieu wirken sich auf den Rotteprozess hemmend aus oder können ihn sogar verunmöglichen. Dieser Tatsache muss namentlich bei der Kompostierung industrieller und gewerblicher organischer Abfälle Rechnung getragen werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Verrottungsvorgang am günstigsten verläuft, wenn das Verhältnis zwischen Kohlenstoff und Stickstoff (C:N-Verhältnis) in den zu verarbeitenden Abfallstoffen zwischen 20 und 30 liegt. Ist das Verhältnis grösser als 30, so werden die Abbauprozesse verlangsamt. Ist es jedoch zu eng, d.h. unter 10, so wird der nicht als Zellbaustoff benötigte Stickstoff als Ammoniak abgespalten und geht in die Luft verloren.

3.112 *Mikroorganismen*. Ein grosser Teil der beim aeroben Abbauprozess erzeugten Energie wird als Wärme frei, weshalb der Verrottungsprozess stets mit einer starken Wärmeentwicklung verbunden ist. In einer Müllkompostmiete entstehen Temperaturen bis zu 80°C. Diese Selbsterhitzung infolge intensiver Mikrobentätigkeit wurde in den letzten Jahren eingehend untersucht, insbesondere von GLATHE ([2], 1962) und NIESE ([5], 1963). Dabei konnten in den mikrobiologischen Prozessen in einer Kompostmiete drei charakteristische Phasen unterschieden werden:

1. die Phase des Temperaturanstiegs,
2. die thermophile Phase (hoher Temperaturbereich),
3. die Phase der Abkühlung.

Die erste Phase ist charakterisiert durch eine sehr starke Vermehrung der mesophilen Bakterien. Leicht abbaubare organische Stoffe dienen dabei als Energiequelle, so dass eine deutliche Verminderung des Gehalts an organischer Substanz festgestellt werden kann (s. Abb. 1 und 2). Bei etwa 50°C wird der Temperaturanstieg verzögert, die Zahl der mesophilen Keime nimmt ab, hingegen vermehren sich nun die thermophilen (wärmeliebenden) Bakterien sehr rasch (= thermophile Phase). Steigt die Temperatur über 65°C, so nimmt die biologische Aktivität ab und kommt bei etwa 75–80°C fast gänzlich zum Stillstand. Die Phase der Abkühlung ist wiederum charakterisiert durch die starke Entwicklung der mesophilen Keime. Je höher die Organismenzahl, desto rascher ist die Selbsterhitzung. Aus diesem Grunde – neben der Zufuhr von Nährstoffen – hat die Mitverarbeitung des Klärschlammes bei der Müllkompostierung einen intensivierenden Einfluss auf den Rotteprozess.

Mit der Phase der Abkühlung ist auch der wesentlichste Teil des Stoffabbaus abgeschlossen und eine gewisse Reife des Materials erreicht. Je nach

Abbildung 1

Stoffverluste bei 42tägiger Rottezeit unter optimalen Bedingungen in Plastikkörben, Sommermüll (Küsnacht).

Abbildung 2

Phosphataseaktivität, gemessen in γ Phenol pro g abbaubarer organischer Substanz während der Verrottung von zerkleinertem Frischmüll (Küsnacht). Mietenhöhe: 1,0 m.

Art der Ausgangsstoffe ist dieser Zustand nach 3–4 Monaten bei der Mietenkompostierung erreicht.

Unter den pflanzlichen Mikroorganismen sind es insbesondere Bakterien, Aktinomyzeten und Pilze, die massgeblich bei der Verrottung organischer Stoffe beteiligt sind. NIESE ([5], 1963) und GLATHE ([2], 1962) haben die Bakterienflora, vor allem diejenige der thermophilen Phase, näher untersucht und dabei interessante Gesetzmässigkeiten in bezug auf die Gesamtkeimzahl festgestellt. Das Verhältnis der thermophilen zu den mesophilen Keimen, das normalerweise im Müll weit unter 1 liegt, steigt bei der Erhitzung der Kompostmieten über 45 °C rasch an und bleibt auch nach der Abkühlungsphase auf Werten über 1. Damit kann auch in Reifkomposten noch nachgewiesen werden, ob eine genügende Selbsterhitzung, die wir aus hygienischen Gründen fordern müssen, wirklich stattgefunden hat. v. KLOPOTEK [4] hat die Besiedlung des Müllkompostes durch Pilze eingehend erforscht. Die drei erwähnten thermischen Phasen der Kompostierung lassen sich auch in der Pilzflora erkennen. In der thermophilen Phase treten einige wenige dominierende Arten hervor, hingegen konnten in der Abkühlungsphase eine grosse Zahl von Arten isoliert werden. Auch mit Hilfe der Pilzanalyse lassen sich wertvolle Rückschlüsse auf Art und Intensität des abgelaufenen Rottevorganges ziehen.

Eine vollständige Hygienisierung des Abfallmaterials wird bei einer richtig geführten Kompostmiete sichergestellt, einerseits durch die erhöhten Temperaturen, anderseits durch antibiotisch wirkende Ausscheidungsprodukte der Rotteorganismen. Über die hygienischen Belange bei der Abfallkompostierung wird ein spezielles Referat orientieren.

3.113 *Belüftung*. Bei der Müllkompostierung wird ein aerober Rotteprozess angestrebt. Ein anaerober Fäulnisprozess (ohne Luftsauerstoff) hätte nicht nur längere Abbauzeiten und Entwicklung übler Gerüche zur Folge, sondern bietet auch keine Garantie in bezug auf die Hygienisierung des Abfallmaterials, da der anaerobe Prozess nicht mit der Entwicklung hoher Temperaturen verbunden ist. Die Rotteorganismen benötigen daher ein Mindestmass an Sauerstoff. Das zu verrottende Material muss folglich eine Lockerstruktur besitzen, so dass möglichst alle Teile wenigstens zeitweise mit Luft in Berührung kommen.

3.114 *Feuchtigkeit*. Die Mikroorganismen benötigen, wie jedes Lebewesen, eine bestimmte Menge Wasser. Sie können ihre Nahrung zur Hauptsache nur in gelöster Form durch die semipermeable Zellwand in sich aufnehmen. Folglich muss die Oberfläche der abzubauenden organischen Stoffe mit einem Wasserfilm umgeben sein. In der Praxis wird für die Aufrechterhal-

tung möglichst intensiver, aerober Rotteverhältnisse ein Wassergehalt des zu kompostierenden Materials von 40–55% empfohlen.

3.12 Der chemisch-biologische Nachweis des Rottevorganges und dessen Messung

Der von den Rotteorganismen vollzogene Stoffabbau ist erstaunlich gross, wenn man ihnen optimale Lebensbedingungen bietet. Abb. 1 zeigt die Resultate eines Verrottungsversuches mit zerkleinertem Frischmüll, der in gelochten Plastikkörben unter optimalen Bedingungen in bezug auf Luft, Feuchtigkeit und Nährstoffe durchgeführt wurde:

Innerhalb von 14 Tagen wurde dabei von 100 g Ausgangssubstanz (Trockensubstanz) mehr als die Hälfte von den Mikroorganismen abgebaut, bzw. veratmet. Eine Verlängerung des Versuches auf 42 Tage ergab nur noch eine geringfügige zusätzliche Abbauleistung. Wie aus der Darstellung ersichtlich ist, wurden dabei hauptsächlich Zellulose und zelluloseähnliche, d. h. in Schweizer Reagens lösliche sowie ätherbenzollösliche Stoffe erfasst.

Dieser Stoffabbau kann jedoch nicht nur durch die chemische Analyse, sondern auch durch die mikrobielle Aktivität direkt nachgewiesen, bzw. verfolgt werden. Unter anderem kann auch die Selbsterhitzungsfähigkeit, von der wir bereits gesprochen haben, als Ausdruck der biologischen Aktivität verwendet werden.

In den letzten Jahren wurden insbesondere von bodenkundlichen Instituten verschiedene Methoden entwickelt, um die Enzymbildung der Bodenmikroben zu messen und sie als Ausdruck der biologischen Aktivität zu interpretieren. Unsere Anstalt versucht, mit Hilfe der Bestimmung der Phosphatase ein Mass dieser biologischen Aktivität der Mikroorganismen im rottenden Müll zu gewinnen, in der Hoffnung, damit die Möglichkeit einer biologischen Erfassung des Reifegrades des Müllkompostes zu finden. Diese Versuche sind noch im Gange. Es zeigten sich dabei interessante Zusammenhänge zwischen dem chemisch bestimmten Stoffabbau einerseits und der biologischen Aktivität andererseits, die wir kurz erwähnen möchten.

Die Phosphatase ist ein im Energiestoffwechsel fast aller Mikroorganismen vorkommendes Enzym. Es ist befähigt, die energiereichen Glukosephosphatverbindungen zu spalten und damit dem Organismus Energie zu liefern. Je aktiver die Mikroorganismenflora ist, desto höher ist ihr Phosphatasegehalt und desto grösser ist die Abbauleistung. Den Mechanismus stellt man sich, stark vereinfacht, folgendermassen vor:

Die Messung der Phosphatase beruht auf einem einfachen Prinzip: man

gibt Phenylphosphat und Puffer zu einer Kompostprobe, bebrütet diese während einer gewissen Zeit und bestimmt dann die durch die Phosphatase abgespaltene Menge Phenol.

Verfolgt man die so gemessene Phosphataseaktivität im Laufe der Verrottung, so ergibt sich das in Abb. 2 dargestellte Bild. Die Phosphatase steigt zuerst schwach, dann stärker an, bleibt einige Zeit auf hohen Werten, um dann wieder abzusinken. Wesentlich anders verläuft der Abbau der organischen Substanz, die zuerst stark, dann immer schwächer abnimmt. Diese widersprüchlich verlaufenden Kurven sind so zu erklären: In der ersten Zeit der Verrottung werden die leicht abbaubaren organischen Stoffe sehr rasch abgebaut; dann folgen die schwer angreifbaren Verbindungen, die bedeutend langsamer zersetzt werden. Umgekehrt vermehren sich die Mikroorganismen zuerst langsam, dann stark beschleunigt. Die sich entwickelnde Mikroflora benötigt anfangs weniger, bald aber bedeutend mehr Energie, um die im Substrat noch verbleibenden, schwer abbaubaren Stoffe zu zersetzen. So wird der Energiestoffwechsel und damit die Phosphataseaktivität stark intensiviert, bis ein Punkt erreicht ist, bei welchem die wesentlichen Nährstoffe aufgebracht sind und der Abbau dann nur noch sehr reduziert weitergeht. Damit ist ein gewisser Reifegrad erreicht, die intensive und mit starker Wärmeentwicklung verbundene Verrottung ist beendet und das Material kann als Reifkompost bezeichnet werden.

3.2 *Schlussfolgerungen für die Praxis*

3.21 Die Beschleunigung des Rotteprozesses

3.211 *Durch Vorzerkleinerung der Abfälle.* Unzerkleinerter, in Mieten aufgeschichteter Rohmüll benötigt für seine Verrottung einen bedeutend längeren Zeitraum als vorzerkleinerter Müll. Durch die Zerkleinerung wird die Angriffsfläche für die Rotteorganismen vergrößert und zugleich das Material besser vermischt und homogenisiert, als dies beim unzerkleinerten Müll der Fall ist. Die Vorzerkleinerung darf jedoch nicht zu weit getrieben werden, da sonst die Sauerstoffversorgung im Innern der Miete erschwert ist.

3.212 *Durch Zufuhr von Luft.* Um den von den Rotteorganismen verbrauchten Sauerstoff wieder zu ergänzen, bestehen verschiedene technische Möglichkeiten. Die bekannteste ist die mechanische Umschichtung der Kompostmieten mit Schaufelladern oder speziellen Umsetzgeräten. Durch den damit erzielten Lufteintrag werden die Abbauvorgänge bedeutend intensiviert, was sich unmittelbar nach der Umschichtung in einem neuerlichen Anstieg der Mientemperatur zeigt. Die in grossen Mieten be-

stehende Gefahr der Bildung anaerober Fäulniszonen kann ebenfalls durch häufiges Umschichten vermieden werden.

Wie stark sich eine periodische Umschichtung auf die Beschleunigung des Rotteprozesses auswirkt, zeigte folgender kleiner Versuch:

Aus verrottetem Müll wurden am gleichen Tag 3 verschiedene Mieten aufgeschichtet, die eine auf 5 m Höhe, die beiden anderen auf je 1 m Höhe. Die grosse Miete und eine der beiden kleinen Mieten wurden während der nachfolgenden Rottezeit von 60 Tagen nicht umgearbeitet. Die zweite kleine Miete hingegen wurde periodisch umgeschichtet. Nach 60 Tagen wurden von jeder Miete Proben entnommen und damit ein Wachstumstest mit Weizenpflanzen vorgenommen. Resultat: Das Kompostmaterial der beiden nicht umgearbeiteten Mieten war noch nicht ausgereift und zeigte daher bei den Versuchspflanzen auch eine entsprechende Wachstumshemmung, die beim Material der grossen Miete noch weit ausgeprägter war als bei demjenigen der kleinen. Der Kompost der periodisch umgearbeiteten Miete hingegen war ausgereift und zeigte die normale wachstumsfördernde Wirkung.

Eine andere Möglichkeit, den Rottevorgang mittels Sauerstoffzufuhr zu beschleunigen, besteht im Einblasen oder Einsaugen von Luft in die Mie-

Abbildung 3

Versuche mit künstlicher Mietenbelüftung. Verlauf der Temperatur ($=^{\circ}\text{C}$), des Kohlensäuregehaltes (CO_2) und des Sauerstoffgehaltes (O_2) in der belüfteten und unbelüfteten Miete.

Material: Zerkleinerter Frischmüll (Küsnacht), Luftmenge normal: 1 m^3 Luft pro m^3 Material pro Stunde, Mietenhöhe: 3,0 m; Messpunkt: 1,5 m Tiefe, Luftmenge erhöht: 5 m^3 Luft pro m^3 Material pro Stunde.

ten, wie dies beispielsweise im Kompostwerk Baden-Baden und beim Verfahren Biotank gebräuchlich ist. Damit erübrigt sich eine mechanische Umsetzung.

Unsere Anstalt führt gegenwärtig Versuche mit künstlicher Mietenbelüftung durch. Wir erhoffen uns durch diese Belüftung nicht nur eine Beschleunigung des Rotteprozesses, sondern vor allem eine Einsparung an kostspieligem Mietenplatzareal. Die bisherigen Versuche zeigten, dass es möglich sein sollte, künstlich belüftete Mieten bis auf eine Höhe von 5 m aufzuschichten (anstelle der bisher üblichen 2–3 m Höhe), ohne dass die Gefahr der Bildung grösserer anaerober Zonen besteht. Ausserdem würde durch den Wegfall der mechanischen Umschichtung auch eine Einsparung an Arbeitskräften erzielt. Bei der im Bau begriffenen, kombinierten Abfallkompostierungsanlage der Region Olten soll diese Belüftung zum erstenmal im technischen Maßstab ausgeführt werden, wobei auch der Austrag des vorverrotteten Materials aus der Anlage zum Mietenplatz sowie das Aufschichten der Mieten vollautomatisch erfolgen soll.

Den Einfluss einer künstlichen Mietenbelüftung auf den Verlauf des Rotteprozesses erkennen wir durch Verfolgung der Mientemperatur und des Kohlensäure- und Sauerstoffgehaltes (Abb. 3). Aus frisch zerkleinertem Müll der Anlage Küsnacht wurden 2 Mieten von gleicher Form und Grösse aufgeschichtet. Die eine Miete wurde mit einer stündlichen Luftmenge von 1 m³ pro m³ Müllmaterial behandelt. Die Luftzugabe begann am zweiten Tag nach der Aufschichtung.

Die Temperatur in der unbelüfteten Miete bewegte sich während der ganzen Versuchszeit um 30 °C herum. Offensichtlich war die Sauerstoffzufuhr ungenügend, so dass die aeroben Abbauvorgänge sich stark verlangsamten oder sogar in anaerobe Fäulnis umschlugen. In der belüfteten Miete hingegen stieg die Temperatur bis auf 80 °C sehr rasch an. Während einiger Stunden wurde die Luftmenge auf 5 m³ erhöht, was eine schockartige Abkühlung zur Folge hatte. Sobald die Luftmenge wieder auf 1 m³ gedrosselt wurde, stellten sich die hohen Temperaturen wieder ein. Einen entsprechenden Verlauf nahmen auch die Kurven des Kohlensäure- und des Sauerstoffgehaltes. Sauerstoff konnte in der unbelüfteten Miete nicht oder nur in Spuren nachgewiesen werden.

3.213 *Durch Verbesserung der physikalischen Struktur und der Nährstoffverhältnisse.* Es wurde bereits auf die Tatsache hingewiesen, dass der aerobe Abbauprozess am günstigsten verläuft, wenn das C:N-Verhältnis im Rohmaterial zwischen 20 und 30 liegt. In manchen Abfallstoffen ist jedoch dieses C:N-Verhältnis weit höher, z. B. in Wintermüll mit einem sehr hohen Ge-

halt an Papier, Karton und Holz. Dadurch verlangsamten sich die Abbauvorgänge beträchtlich. Extrem ligninreiches Material (z. B. Waldabfälle, Laub und Reisig) mit einem C:N-Verhältnis über 60 benötigt für die Verrottung 2–3 Jahre! Durch eine Verengung des C:N-Verhältnisses in Form einer Stickstoffzugabe können diese langen Rottezeiten auf einen Bruchteil abgekürzt werden, wie folgender Versuch zeigt (Abb. 4–6):

Aus Waldabfällen (Mischung aus Laub, und Reisig) erstellten wir 3 Mieten gleicher Form und Grösse. Die Miete RLo bestand aus gleichen Volumteilen Laub und kurzgeschnittenem Reisig. Beide Materialien wurden nach der in der Forstwirtschaft bisher üblichen Methode lagenweise aufgeschichtet, von Zeit zu Zeit umgearbeitet und kompostiert. Die punktierte Kurve RLo in Abb. 4 zeigt den Temperaturverlauf dieser Miete, wobei zu beachten ist, dass die Höchsttemperatur kaum 40 °C erreichte. Es handelte sich also um eine stark verlangsamte Verrottung, die in der Praxis aus den oben genannten Gründen erst nach wenigstens 2 Jahren abgeschlossen wäre.

Eine zweite Miete RL wurde aus dem gleichen Ausgangsmaterial erstellt, mit dem Unterschied, dass die zur Schichtbildung neigenden, damit aber die Durchlüftung erschwerenden Laubblätter zerhackt wurden. Durch diese Verbesserung der physikalischen Struktur wurde eine zwar geringfügige, aber deutlich sichtbare Verbesserung des Rottevorganges erzielt, wie dies aus der gestrichelten Temperaturkurve RL in Abb. 4 hervorgeht. Die Höchsttemperatur erreichte immerhin 50 °C; sie fiel jedoch nach kurzer Zeit wieder ab.

Abbildung 4
Temperaturverlauf in den Mieten RLo, RL + N und RL (nach SURBER, BRAUN UND PETER, 1959).

Abbildung 5

Kompost der Miete RLo nach 140 Tagen. Verrottung läuft erst an (nach SURBER, BRAUN und PETER, 1959).

Abbildung 6

Kompost der Miete RL + N nach 140 Tagen. Verrottung ist abgeschlossen (nach SURBER, BRAUN und PETER, 1959).

Was eine Verbesserung, bzw. Verengung des C:N-Verhältnisses, also eine Stickstoffzugabe zur Folge haben kann, zeigt uns die ausgezogene Kurve RL + N (Abb. 4). Das Material dieser Miete war genau dasselbe wie in Miete RL, aber mit Zusatz von Harnstoff. Schon nach wenigen Tagen erreichte die Mientemperatur eine Höhe von 60°C. Der Verlauf dieser

Temperaturkurve weist auf einen normalen Ablauf der Rottevorgänge hin, die nach etwa 5 Monaten abgeschlossen waren. Die Abb. 5 und 6 (Durchlichtphotos der Komposte von Miete RLo und RL + N im Alter von 140 Tagen) dokumentieren das Gesagte noch deutlicher.

Die Zugabe von Stickstoff, gegebenenfalls auch von Phosphor, ist dann am Platze, wenn es sich um die Kompostierung von chemisch einseitig zusammengesetzten Abfallstoffen handelt, wie z. B. bei den erwähnten Waldabfällen oder bei gewissen organischen, stickstoffarmen Industrieabfällen.

Als ausgezeichnete Ausgleich eines eventuellen Nährstoffmangels im Ausgangsmaterial hat sich Klärschlamm erwiesen, dank seines Gehaltes an Stickstoff und Phosphor und leicht abbaubarer organischer Substanz. Besteht die Möglichkeit, in einem Müllkompostwerk den Schlamm mit zu verarbeiten, bedeutet dies nicht nur eine qualitative Verbesserung des Endproduktes, sondern man hat auch die Gewissheit, dass bei nährstoffarmem Müll und bei Mitverarbeitung gewisser organischer Industrieabfälle der Rotteprozess reibungslos verläuft.

In den letzten Jahren hörte man immer wieder von Zusatzstoffen, von mit grosser Reklame angepriesenen Präparaten, die den Rotteprozess beschleunigen sollen. Einige technische Verfahren verwenden sogar Impfpräparate, bestehend aus getrockneten Kulturen bestimmter Bakterienarten und weiteren Zusätzen, die angeblich den Rotteverlauf verbessern und in eine gewünschte Richtung lenken sollen. Eingehende Versuche unserer Anstalt [6] und der Arbeitsgemeinschaft Giessen/Baden-Baden [1] haben jedoch eindeutig ergeben, dass der Anwendung solcher Präparate bei der betriebsmässig üblichen Mietenkompostierung keine praktische Bedeutung zukommt. Der Mehraufwand an Kosten und Arbeit steht in keinem Verhältnis zur Wirkung dieser Präparate. Als bester und wirksamster Zusatz hat sich immer wieder der Klärschlamm erwiesen!

3.3 *Bemerkungen zur Technik der Kompostierung*

3.3.1 Allgemeines

In der Schweiz besteht die primäre Aufgabe der Kompostierungstechnik darin, wie eingangs erwähnt, die schädlichen Abfallstoffe mit Hilfe der Verrottung in ein unschädliches, deponierbares Endprodukt, in Humus, umzuwandeln. Von sekundärer Bedeutung ist die Verwendung, bzw. der Verkauf dieses Produktes, im Gegensatz zu denjenigen Ländern, deren landwirtschaftlich genutzte Böden einen ausgesprochenen Humusmangel aufweisen, so dass dem Müllkompost eine beträchtliche wirtschaftliche Bedeutung zukommt, wie etwa in Holland und in subtropischen und tropischen Ländern.

Es gibt jedoch auch in der Schweiz zahlreiche Gegenden, wo eine Verwendung des Müllkompostes als organisches Bodenverbesserungsmittel in den verschiedenen Sparten des Pflanzenbaus durchaus sinnvoll ist und wo ein Absatz gesichert ist. Über diese Frage wird das nachfolgende Referat orientieren. In solchen Fällen plant man bewusst eine technische Aufbereitungsanlage, die ein hochwertiges, attraktives Endprodukt herstellt, das auch zu einem guten Preis verkauft werden kann.

Wir müssen also unterscheiden zwischen technischen Anlagen, in denen Müll, Klärschlamm und andere vorwiegend organische Abfallstoffe kompostiert werden mit dem einzigen Zweck, ein unschädliches Produkt für die Ablagerung im Gelände herzustellen, und Anlagen, in denen ein hochwertiges, verkaufsfähiges Endprodukt hergestellt wird. Im ersten Fall sprechen wir von Homogenisierungsanlagen, im zweiten Fall von Kompostierungsanlagen. Eine Kompostierungsanlage ist grundsätzlich nichts anderes als eine technisch verfeinerte Homogenisierungsanlage.

3.32 Homogenisierungsanlagen

In einer solchen Anlage werden die Abfallstoffe vorerst aufbereitet, d. h. zerkleinert und gemischt, um die im ersten Teil unseres Referates genannten Voraussetzungen für einen reibungslosen Ablauf des Rotteprozesses zu schaffen. Diese Aufbereitung kann auf rein mechanischem Wege mit Hilfe von Hammermühlen oder Siebraspeln erfolgen, oder auf mechanisch-biologischem Wege in belüfteten Gärzellen, in denen das Material bewegt wird.

Mit dieser Aufbereitung wird neben der eigentlichen Homogenisierung auch eine bedeutende Verminderung des Volumens der Abfälle erreicht (mechanische Zerkleinerung sperriger Stoffe).

Das derart aufbereitete homogenisierte Material kann unter gewissen Umständen direkt im Gelände abgelagert werden (z. B. in grundwasserfreien Zonen) oder es kann auf einem Mietenplatz verrottet, ausgereift, damit auch hygienisiert und anschliessend erst deponiert werden. An dieses Material brauchen keine besonderen Anforderungen in bezug auf Inhaltsstoffe, Struktur, störende Fremdstoffe usw. gestellt zu werden, da es ja nur für die Ablagerung bestimmt ist.

Gegenüber der geordneten Ablagerung unzerkleinerter Abfälle bietet die Homogenisierung folgende Vorteile:

- Bedeutende Verminderung des Volumens, daher bessere Ausnützung der bestehenden Ablagerungsplätze.
- Das abgelagerte homogenisierte Material, insbesondere, wenn es verrottet

- ist, braucht nicht mehr abgedeckt zu werden, da es weder Geruchsbildung noch Brandgefahr verursachen kann und kein Ungeziefer mehr anzieht.
- Homogenisiertes und ausgereiftes Material kann auch innerhalb des Siedlungsgebietes abgelagert werden (Einsparung an Transportkosten).
 - Falls sich doch eine wenn auch nur geringe Nachfrage nach Kompost zeigen sollte, kann ein Teil des homogenisierten Materials mit relativ einfachen Mitteln zu einem verkaufsfähigen Produkt aufbereitet werden.

3.33 Kompostierungsanlagen

In einer eigentlichen Kompostierungsanlage werden die Abfallstoffe in ähnlicher Form aufbereitet und verrottet wie in einer Homogenisierungsanlage. Hingegen müssen an das Endprodukt gewisse Anforderungen in bezug auf chemische und physikalische Qualität gestellt werden.

Was die chemische Qualität anbetrifft, so sollte das Endprodukt einen Mindestgehalt an organischen Stoffen aufweisen, damit es wirklich zu einem guten Preis verkauft werden kann. Der Gehalt an Pflanzennährstoffen ist von sekundärer Bedeutung. Die chemische Qualität ist abhängig von der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und kann durch das technische Verfahren der Kompostierung nicht beeinflusst werden, es sei denn mit Hilfe von Zusatzstoffen. Ein grösstädtischer Wintermüll, der 70% Hausbrandasche enthält, kann durchaus homogenisiert und verrottet werden, hingegen ist der daraus hergestellte Kompost minderwertig. Ebenso kann Klärschlamm, der grössere Mengen Metallsalze aus Industrieabwässern enthält, mit Müll zusammen homogenisiert und verrottet, hingegen nicht als Kompost verwendet werden, da er unter Umständen pflanzenschädigend wirkt. Einen gewissen Hinweis auf das zu wählende technische Verfahren, d.h. über die Frage Homogenisierung oder Kompostierung, geben also bereits die Voruntersuchungen, die bei der Planung der Abfallbeseitigung unbedingt durchgeführt werden sollen.

Die physikalische Qualität bezieht sich auf die Struktur (Korngrösse der einzelnen Teile) und auf den Gehalt des Kompostes an störenden Fremdstoffen (Glas- und Keramikscherben, Kunststoffetzen usw.). Bei der Herstellung eines verkaufsfähigen Produktes müssen je nach dessen Verwendung weitgehende Forderungen bezüglich physikalischer Qualität gestellt werden.

Gegenüber der Homogenisierungsanlage muss also in einer Kompostierungsanlage ein bedeutend grösserer Aufwand für die Aufbereitung in Kauf genommen werden, besonders was die Abtrennung oder Pulverisierung störender Fremdstoffe anbetrifft.

Die Anforderungen, die heute von der Praxis (namentlich vom Intensivbau) an die Kompostqualität gestellt werden, sind bedeutend höher als früher. Ferner sollten in einer Kompostierungsanlage neben dem eigentlichen Hausmüll auch gewisse Sperrgüter, Gartenabfälle und vor allem Klärschlamm mit verarbeitet werden können. Diese neue Situation führt dazu, dass eine solche Anlage gegenüber früher technisch komplizierter gestaltet werden muss, um allen diesen Anforderungen zu genügen.

Es hat sich nun gezeigt, dass durch Kombination von verschiedenen, ursprünglich sich konkurrenzierender Verfahren ein bedeutender Fortschritt erzielt werden kann, indem dadurch gewisse Nachteile der einzelnen Verfahren eliminiert und die Vorteile summiert werden können.

Eine neuzeitliche Kompostierungsanlage sollte unseres Erachtens grundsätzlich aus folgenden Aggregaten bestehen (neben den notwendigen Stapel-, Förder- und Siebeinrichtungen):

- Maschinen zur mechanischen Zerkleinerung der Abfälle,
- künstlich belüftete Gärzelle,
- Ofenanlage,
- Mietenplatz.

Zu diesen Aggregaten sei folgendes bemerkt:

Maschinen zur mechanischen Zerkleinerung. Hierzu werden heute meistens Hammermühlen, Prallmühlen oder Siebraspeln verwendet, eventuell in Kombination. Damit werden grössere, sperrige Stoffe zerkleinert, Papier, Küchen- und Gartenabfälle zerrieben, zerfetzt oder zerschlagen, um die nachfolgende Durchmischung zu erleichtern. Glas- und Keramikscherben werden heute vorwiegend in Hammermühlen pulverisiert. Grosse Sperrgüter können gegebenenfalls in Spezialmaschinen (Hammer- oder Prallmühlen, Scheren usw.) zerschlagen, bzw. zerdrückt werden.

Künstlich belüftete Gärzellen. In der Praxis am besten bewährt haben sich bis heute rotierende Gärtrommeln, in denen das Material infolge der Drehbewegung der Trommel ständig bewegt und dadurch zerrieben wird. Sie dienen nicht nur zur vollkommenen Durchmischung von Müll, weiteren Abfallstoffen und Klärschlamm, sondern auch zur Vorverrottung und weitgehenden Hygienisierung des Abfallmaterials. In den Gärzellen findet ein intensivierter, kontrollierbarer und steuerbarer Rotteprozess mit Temperaturen von 50–60 °C statt, der auch eine mechanisch-biologische Zerkleinerung der kompostierbaren Stoffe, wie Papier, Karton, pflanzliche und tierische Abfälle, bewirkt. Durch die künstliche Belüftung der Gärzelle und die damit erzielten hohen Temperaturen ist es möglich, eine beträchtliche Menge Wasser aus dem Abfallmaterial in Dampfform auszutreiben. Daher

sind solche Gärzellen namentlich dort am Platze, wo Klärschlamm, Metzgerei- und Schlachthofabfälle sowie weitere, sehr wasserhaltige Abfallstoffe mit verarbeitet werden müssen. Gerade bei diesen genannten Stoffen ist die Frage der Hygienisierung von grösster Wichtigkeit. Und diese Hygienisierung ist zweifellos sicherer und einfacher zu erreichen in einer Gärzelle als mit Hilfe der offenen Mietenkompostierung.

Das nach 2–4 Tagen der Gärzelle entnommene Material hat kompostähnliches Aussehen und kann als weitgehend hygienisiert bezeichnet werden. Es benötigt daher bei der anschliessenden Ausreifung auf dem Mietenplatz eine weniger sorgfältige Behandlung als nur mechanisch zerkleinerte Abfallstoffe. Da Papierfetzen und andere kleine Abfallteile zu einer braunen, krümeligen Masse von torfähnlichem Aussehen zerfallen sind, ist auch keine Belästigung der Umgebung durch Windverwehungen zu befürchten. Das vorverrottete Material wirkt auch nicht mehr anziehend auf Insekten, Ratten und Vögel.

Ofenanlage. Bei jeder Kompostierung entsteht ein Siebrest, bestehend aus verschiedenen Kunststoffteilen, Gummi und schwer abbaubaren Textilien. Dieser Siebrest, dessen Menge zwischen 10 und 20 Gew.-% des Rohmülls beträgt, kann im Gelände deponiert und mit Reifkompost abgedeckt werden. Wir sind jedoch der Ansicht, dass eine moderne, grössere Kompostierungsanlage auch mit einer genügend dimensionierten Ofenanlage ausgestattet werden sollte, die nicht nur in der Lage ist, den Siebrest, sondern gegebenenfalls auch Abfallöle, sperrige Stoffe, die sich schlecht kompostieren lassen, und gewisse Industrieabfälle zu verarbeiten.

Mietenplatz. Das aufbereitete Abfallmaterial wird auf einen mit einem Gefälle von mindestens 4% versehenen, befestigten Mietenplatz in Form dach- oder trapezförmiger Mieten von etwa 2 bis höchstens 3 m Höhe gelagert und ausgereift, wobei es üblicherweise 1–2mal mit einem Schaufelader umgearbeitet wird. Das Gefälle soll verhindern, dass sich Regenwasser ansammelt und Tümpel bildet.

Wie wir bereits erwähnten, erhoffen wir uns von der künstlichen Mietenbelüftung eine Vereinfachung und vor allem eine Kostenersparnis durch höhere, automatisch aufgeschichtete Mieten und durch Wegfall der mechanischen Umarbeitung. Auch in bezug auf das Geruchsproblem sollte sich diese Belüftung positiv auswirken, und zwar aus folgenden Gründen:

Eine Kompostierung ist nie gänzlich geruchlos. Schon in der Gärzelle bilden sich Gase, die zum Teil Geruchsträger sind. Diese leicht säuerlichen, typischen Gerüche sind jedoch nicht vergleichbar mit dem eigentlichen Fäulnisgestank, der beim anaeroben Abbau entsteht. Die in der Gärzelle

sich entwickelnden Geruchsgase können heute in Erdfiltern auf einfache und befriedigende Weise unschädlich gemacht werden, wie dies in der Anlage Villette bei Genf durch Ing. Maystre zum erstenmal durchgeführt wurde.

Auch in den Mieten entstehen in den ersten Wochen der Lagerung gewisse geruchsbildende Gase, da in der ersten Zeit der Sauerstoffverbrauch im rottenden Material ausserordentlich hoch ist, was zu lokalen, schwach anaeroben Verhältnissen im Innern der Mieten führt. Diese Gerüche treten jedoch nur ins Freie, wenn die Mieten umgearbeitet werden. Wir hoffen, dass es möglich ist, durch die künstliche Belüftung von Anfang an in den Mieten vollkommen aerobe Bedingungen zu schaffen, womit auch das Geruchsproblem auf dem Mietenplatz gelöst wäre.

Ein Beispiel einer kombinierten Abfallkompostierungsanlage werden Sie morgen in Hinwil sehen. Nach ähnlichem Prinzip, technisch noch etwas erweitert, arbeiten die im Bau begriffene Anlage der Region Olten und die kurz vor Baubeginn stehende Anlage der Region Biel.

Alle diese kombinierten Anlagen sind, wir erwähnten es bereits, technisch raffinierter ausgebaut und aufwendiger als die bisherigen kleineren Kompostierungsanlagen. Sie vermögen jedoch ein bedeutend breiteres Spektrum der Abfallstoffe zu erfassen als die konventionellen Anlagen.

Schlussbemerkung

Ging es in früheren Jahren ausschliesslich darum, nur das eigentliche Hausmüllproblem zu lösen, also den Inhalt des Mülleimers mit Hilfe der Verbrennung oder der Kompostierung zu beseitigen, so stehen wir heute vor einer ganz anderen Situation, wenn dies auch gewisse Kreise noch nicht wahr haben wollen. Der Hausmüll ist nur ein Teil der zu beseitigenden Abfallstoffe. Wir sind gezwungen, inskünftig nicht nur Müllbeseitigungs-, sondern allgemein Abfallbeseitigungsanlagen zu erstellen, in denen neben dem Müll auch häusliches Sperrgut, Gartenabraum, Klärschlamm aus Gemeindekläranlagen sowie feste und schlammförmige Abfälle aus Industrie und Gewerbe verarbeitet werden können. Ebenso muss die Frage der Kadaververnichtung und der Unschädlichmachung von ölhaltigen Abfällen (Abfallöle, Rückstände aus Mineralölabscheidern, Öltankschlämme) befriedigend gelöst werden, was bis heute keineswegs der Fall ist.

Es ist eine Illusion, zu glauben, das Gesamtabfallproblem in *einer* Anlage lösen zu können. Es gibt weder eine Kompostierungs- noch eine Verbrennungsanlage, die wahllos alles verarbeiten kann. Für gewisse Stoffe, nament-

lich für feste und schlammförmige Industrieabfälle, benötigen wir Spezialaggregate, in denen diese Stoffe bei hohen Temperaturen unschädlich gemacht werden können. Auch auf diesem Gebiet ist die technische Entwicklung in vollem Gange. Wir sind heute jedoch nicht in der Lage, hierüber befriedigende Auskunft zu erteilen.

Wir müssen auf die Lösung des Gesamtabfallproblems tendieren. Wir sind gezwungen, möglichst viele Abfälle mit Hilfe der Kompostierung und der Verbrennung unschädlich zu machen, aus dem einfachen Grunde, weil wir die wenigen bestehenden oder inskünftig noch verfügbaren Ablagerungsmöglichkeiten im Gelände für die Ablagerung von Verbrennungsrückständen und für diejenigen Abfallstoffe freihalten müssen, die weder brennbar noch kompostierbar sind.

Es ist naheliegend, dass die beschriebenen kombinierten, technisch verfeinerten Anlagen aus wirtschaftlichen Gründen nur für relativ grosse Einwohnerzahlen realisiert werden können. So ideal und vernünftig der Bau und Betrieb grosser regionaler Abfallbeseitigungsanlagen an und für sich ist, muss man sich doch vor Augen halten, dass es auch heute noch in der Schweiz Fälle gibt, wo kleinere, einfach konzipierte Kompostwerke oder Homogenisierungsanlagen durchaus berechtigt sind. Der regionalen Zusammenfassung verschiedener Gemeinden stellen sich häufig grosse politische, verkehrstechnische und andere Schwierigkeiten in den Weg. Man muss sich dann wirklich fragen, wie dem Gewässerschutz, dem Landschaftsschutz und der Volkshygiene besser gedient sei, wenn eine oder mehrere kleinere Gemeinden in allernächster Zukunft eine einfache Kompostierungs- oder Homogenisierungsanlage bauen, um wenigstens ihr Müll- und Klärschlammproblem zu lösen, oder ob man Jahre und Jahre warten soll, bis die betreffenden Gemeinden sich an einer grossräumigen regionalen Lösung beteiligen können.

Wir sind uns alle darüber einig, dass es mit der Realisierung eines allgemeinen Gewässer- und Landschaftschutzes höchste Zeit ist. Deshalb sollten wir nicht aus Gründen eines an sich durchaus positiv zu wertenden technischen Perfektionismus den Bau von kleineren, einfachen, nur Teilprobleme lösenden Anlagen verzögern, in der Hoffnung, dass einst in ferner Zukunft eine regionale Grossanlage technisch und wirtschaftlich günstigere Lösungen verspricht.

Man verstehe uns bitte nicht falsch! Wir vertreten den Standpunkt, dass das allgemeine Abfallproblem *wenn immer möglich auf regionaler Basis und technisch grosszügig* gelöst werden soll. Wir dürfen jedoch diese These nicht stur dort anwenden, wo diese Lösung aus verschiedenen Gründen

eben nicht oder nur mit grossen Schwierigkeiten – und mit grosser zeitlicher Verzögerung – möglich ist.

Zusammenfassung

Die Aufgabe der Abfallbeseitigungstechnik besteht darin, die festen und schlammförmigen Abfälle aus Haushalt, Gewerbe und Industrie mit Hilfe technischer Verfahren der Verbrennung oder der biologischen Behandlung in eine volumenmässig stark reduzierte, unschädliche, hygienisch und ästhetisch einwandfreie Form überzuführen, so dass die Endprodukte dieser Verarbeitung entweder im Gelände deponiert oder in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden können.

Als Grundlage für die biologische Verarbeitungstechnik dient der in der Natur überall verbreitete mikrobielle Abbau der organischen Substanz. Gelangen Abfälle pflanzlichen oder tierischen Ursprunges auf oder in den Boden, so unterliegen sie einem Abbau- und Umwandlungsprozess, der in erster Linie von Mikroorganismen (Bakterien und Pilzen) ausgelöst und vollzogen wird. Im Endstadium dieses Prozesses entstehen schliesslich Kohlensäure, Wasser und Mineralsalze (= Mineralisation). Dieser Abbau kann auf anaerobem Wege, d. h. ohne Anwesenheit von Luftsauerstoff, oder aerob mit Sauerstoff erfolgen. Im ersten Fall handelt es sich um Fäulnis, im zweiten um Verrottung. Beide Vorgänge laufen bei der Umwandlung organischer Stoffe unter natürlichen Bedingungen im Boden nebeneinander her. Je nach der Durchlüftung des Bodens überwiegt bald der eine, bald der andere Vorgang.

Als Zwischenprodukte des mikrobiellen Stoffabbaus, teilweise aber auch durch komplizierte biochemische Synthese, entstehen im Boden dunkelgefärbte Humusstoffe, eine ganze Gruppe hochmolekularer, gegen mikrobiellen Angriff relativ stabile Verbindungen, die dem Boden seine charakteristische braune Farbe verleihen.

Beim Abbauprozess der organischen Substanz tritt eine beträchtliche Verminderung des ursprünglichen Volumens ein, deren Ausmass abhängig ist vom Grad der Zersetzung. Die Endprodukte sind als weitgehend unschädlich zu bezeichnen.

In der Technik wird sowohl der anaerobe als auch der aerobe Abbauprozess angewendet. Beispiele für den anaeroben Prozess: Ausfäulung des Klärschlammes; Behandlung gewisser fester Abfälle in Form der «Biovergäsurung». Die wichtigste technische Anwendung des aeroben Prozesses stellt die Abfallkompostierung dar. Sie hat die Aufgabe, die natürlichen Verrottungsvorgänge örtlich und zeitlich zu konzentrieren, wobei die Vor-

aussetzungen für diesen Prozess berücksichtigt werden müssen. Der aerobe Abbauprozess ist grundsätzlich von folgenden Faktoren abhängig: vom chemischen Aufbau der organischen Stoffe (Mindestgehalt an veratembarem Kohlenstoff als Energieträger und an Nährstoffen); vom physikalischen Zustand und von äusseren Faktoren, welche die Aktivität der Mikroorganismen beeinflussen, wie Temperatur, Wassergehalt, pH-Wert, Gehalt an hemmenden oder toxischen Stoffen.

Der aerobe, exotherme Rotteprozess ist mit der Entwicklung hoher Temperaturen verbunden, die – zusammen mit antibiotisch wirkenden Ausscheidungsprodukten der Rotteorganismen – eine Hygienisierung der Abfallstoffe gewährleisten.

Eine Beschleunigung des Verrottungsvorganges kann mit technischen Hilfsmitteln erreicht werden, z. B. durch Luftzufuhr mit Hilfe der mechanischen Umarbeitung der Kompostmieten oder durch künstliche Mietenbelüftung, ferner durch Behandlung des Abfallmaterials in künstlich belüfteten Gärzellen und durch Verbesserung der physikalischen Struktur und der Nährstoffverhältnisse.

Wir unterscheiden in der Technik der Abfallkompostierung zwischen Anlagen, in denen Müll, Klärschlamm und andere Abfälle kompostiert werden mit dem einzigen Zweck, ein unschädliches Produkt für die Ablagerung im Gelände herzustellen (= Homogenisierungsanlagen), und solchen Anlagen, in denen ein hochwertiges, verkaufsfähiges Produkt hergestellt wird (= Kompostierungsanlagen). Eine Kompostierungsanlage ist grundsätzlich eine technisch verfeinerte und aufwendigere Homogenisierungsanlage.

In Homogenisierungsanlagen werden die Abfälle vorerst aufbereitet, d. h. zerkleinert und gemischt, um die Voraussetzungen für einen reibungslosen Ablauf des Rotteprozesses zu schaffen. Diese Aufbereitung kann nur mechanisch (mit Hammermühlen oder Siebraspeln) oder mechanisch-biologisch (in belüfteten Gärzellen) erfolgen. Anschliessend werden die aufbereiteten Abfälle auf einem Mietenplatz ausgereift und damit hygienisiert, damit sie schadlos im Gelände deponiert werden können.

In Kompostierungsanlagen werden die Abfälle in ähnlicher Form aufbereitet und verrottet, hingegen müssen an das Endprodukt gewisse Anforderungen in bezug auf chemische und vor allem physikalische Qualität gestellt werden. Namentlich mit Hinsicht auf die physikalische Qualität (möglichst geringer Gehalt an störenden Fremdstoffen) muss ein erheblich grösserer technischer Aufwand in Kauf genommen werden als in einer Homogenisierungsanlage.

Eine moderne Abfallkompostierungsanlage, die neben Hausmüll, gewissen Sperrgütern und organischen Industrieabfällen vor allem auch Klärschlamm mit verarbeiten sollte, besteht zweckmässigerweise aus folgenden Aggregaten (neben den notwendigen Stapel-, Förder- und Siebeinrichtungen): Maschinen zur mechanischen Zerkleinerung der Abfälle; künstlich belüftete Gärzelle; Ofenanlage und Mietenplatz.

In Anbetracht der Knappheit der Ablagerungsmöglichkeiten im Gelände müssen wir heute darauf tendieren, das Gesamtabfallproblem, nicht nur das Müllproblem, zu lösen. Dieses Ziel ist noch nicht erreicht. Wir sind gezwungen, möglichst viele Abfallstoffe zu kompostieren oder zu verbrennen, um die bestehenden Ablagerungsplätze für die Ablagerung von Verbrennungsrückständen sowie für Abfälle, die weder brenn- noch kompostierbar sind, freizuhalten.

RÉSUMÉ

L'évacuation des déchets doit viser à transformer les déchets solides et liquides d'origine domestique ou industrielle par l'incinération ou le traitement biologique, le volume des déchets est ainsi fortement réduit et le produit final est hygiénique, inoffensif et irréprochable du point de vue esthétique, il peut être déposé sur des terrains en plein air ou rendu au métabolisme naturel de la matière.

Les techniques de transformation biologique sont basées sur la *décomposition microbienne des substances organiques*, telle qu'elle existe dans la nature même. Lorsque des déchets végétaux ou animaux tombent sur le sol ou y sont incorporés, ces déchets sont soumis à un processus de décomposition et de transformation enclenché et poursuivi par des micro-organismes (bactéries et champignons). Au stade final de ce processus, il y a production de gaz carbonique, d'eau et de sels minéraux (= minéralisation). La décomposition est soit anaérobie (elle se passe sans air) soit aérobie (avec de l'oxygène). Dans le premier cas on parlera de putréfaction, alors que dans le second cas, il s'agit de pourriture. Les deux processus se déroulent simultanément dans le sol dans des conditions naturelles au cours de la transformation de substances organiques. Selon le degré d'aération du sol, l'un ou l'autre processus prévaudra.

Les produits intermédiaires de la décomposition microbienne consistent en des substances foncées qui proviennent également de certaines synthèses chimiques complexes. Il s'agit d'un groupe de composés à grande molécule assez stables envers l'attaque des microbes et qui donnent au sol sa teinte brun foncé caractéristique.

Au cours de la décomposition, le volume original des déchets subit une réduction considérable, qui dépend du degré de décomposition. De façon générale, on peut considérer que les produits finaux ne présentent plus aucun danger.

Du point de vue technique, on utilise tant le procédé aérobie que le procédé anaérobie. A titre d'exemples de décomposition anaérobie, citons la putréfaction de la boue d'épuration, la « biogáséification » en tant que traitement s'appliquant à certains déchets solides. Les principales applications techniques du processus aérobie

se trouvent dans le compostage des déchets. En effet, ce compostage concentre dans le temps et le lieu la pourriture naturelle des substances tout en respectant les conditions requises pour une telle transformation. La décomposition aérobique dépend essentiellement des conditions suivantes: composition chimique des substances organiques (teneur minimum en carbone volatile source énergétique et en éléments nutritifs); état physique et facteurs externes, qui influencent l'activité des micro-organismes tels que la température, la teneur en eau, la valeur pH, la teneur en substances inhibitrices ou toxiques.

Le processus de pourriture aérobique, exothermique, est relié avec le développement de températures élevées qui, avec les produits d'excrétion des organes de pourriture à effet antibiotique, garantissent l'état hygiénique des déchets.

Il est possible, par des moyens techniques, d'accélérer le processus de pourriture notamment par l'aération, en retournant mécaniquement les tas de compost ou par l'aération artificielle des tas, ou encore en traitant les déchets dans des chambres de fermentation aérées artificiellement pour en améliorer la structure physique et les conditions régissant les éléments nutritifs.

Dans la technique du compostage des déchets, nous distinguons deux types d'installations: celles dans lesquelles on composte des ordures ménagères, de la boue d'épuration et d'autres déchets dans le seul but d'obtenir un produit final inoffensif que l'on peut déposer en plein air, il s'agit alors d'installations d'homogénéisation et celles qui produisent un compost de grande valeur, vendable, que l'on appelle des installations de compostage.

Ces dernières sont des installations d'homogénéisation plus développées du point de vue technique et plus complexes.

Dans les *installations d'homogénéisation*, les déchets sont tout d'abord préparés, c'est-à-dire réduits dans leurs dimensions et mélangés afin de créer les conditions requises pour que le processus de pourriture se développe normalement. Cette préparation ne peut se faire que mécaniquement (au moyen d'un moulin à marteaux ou de râpes-tamis) ou mécaniquement-biologiquement (dans des chambres de fermentation aérées artificiellement). Ensuite les déchets préparés sont déposés en tas et mûrissent, ce qui les hygiénise, puis ils peuvent être déposés sur des terrains adéquats et sont inoffensifs.

Dans une *installation de compostage* les déchets sont préparés et soumis à la pourriture selon le même principe, mais le produit final doit répondre à certaines exigences pour ce qui est de ses qualités chimique et physique surtout. Afin d'obtenir la qualité physique requise (teneur la plus basse possible en substances étrangères) les moyens techniques sont beaucoup plus importants que dans une installation d'homogénéisation.

Une installation moderne de compostage transformant non seulement des ordures ménagères mais également des matières encombrantes et des déchets organiques industriels et plus particulièrement la boue d'épuration, se compose des éléments suivants (outre l'équipement nécessaire pour l'emménagement, le transport et le tamisage): machines pour la réduction mécanique des déchets; chambres de fermentation aérées artificiellement; fours et espace suffisants pour la mise en tas.

Vu le manque d'espace où déposer ces produits en plein air, nos efforts doivent tendre aujourd'hui vers des solutions du problème global des déchets, non seulement vers des solutions intéressant les ordures ménagères. Nous sommes loin d'avoir at-

teint ce but. Nous nous voyons obligés de composter ou d'incinérer autant de déchets que possible afin de réserver les dépôts aux résidus d'incinération ou aux déchets qui ne sont ni combustibles ni compostables.

SUMMARY

Garbage disposal techniques must aim at processing solid and liquid waste of domestic and industrial origin through incineration or biological treatment, thus largely reducing its volume and transforming such waste into a final product sanitary, harmless and not objectionable, likely to be dumped on adequate grounds or returned to the natural metabolism of substance.

Biological processing techniques are based upon the microbial degradation of organic matter as it exists everywhere in nature. If vegetal or animal waste falls to or into the ground, such waste is submitted to a process of degradation and transformation triggered and achieved by micro-organisms (bacteria and fungi). In the final stage of these processes carbon dioxide, water and mineral salts are produced (= mineralisation). Degradation is either anaerobic (without the presence of oxygen) or aerobic (with oxygen). In the former case, we speak of putrefaction, in the latter of rotting. Both processes occur simultaneously in the soil under natural conditions during the transformation of organic substances. According to the degree of soil aeration, now the one, now the other process prevails.

Dark humus substances are created in the soil as intermediary product of microbial degradation and partly of complex chemical syntheses; they are a group of high molecular bindings rather stable against the attack of microbes and give the soil its characteristic brown colour.

During the degradation process, the original volume is considerably reduced and the degree of reduction depends on the degree of decomposition. Generally speaking the final products can be considered as harmless.

Technically, both anaerobic and aerobic degradation apply. Examples of anaerobic degradation: putrefaction of purification sludge, "biogasification" as a treatment of some solid waste. The major technical application of the aerobic process is the composting of waste which concentrates in time and place the natural rotting process while respecting the conditions required for such transformation.

The aerobic degradation depends essentially on the following conditions: chemical composition of the organic substances (minimum content of volatile carbon as source of power and of nutrients); physical condition and external factors influencing the activity of micro-organisms, such as temperature, water content, pH, content of inhibiting or toxic substances.

The aerobic, exothermal rotting process is connected with the development of high temperatures which, together with antibiotically effective excretion products from rotting organisms, guarantees the sanitary condition of waste.

Technical means can activate the rotting process, namely aeration through mechanical breaking up of the compost heaps or through artificial aeration of the heaps, or else by treating the waste in artificially aerated fermentation chambers and improving the physical structure and nutrient conditions.

We distinguish between two types of plants concerned with the technique of waste composting: plants composting garbage, sludge and other waste material in view of obtaining a harmless end product to be dumped in the open called homogenisation plants and plants producing a compost most valuable and salesworthy called composting plants. The latter plants are more evolved and technically more complex homogenisation plants.

In a homogenisation plant the waste is first of all prepared, that is reduced in size and mixed, in order to create those conditions required for an adequate development of the rotting process. Such preparation is mechanical (in hammer-mills or sieve-rasps) or mechanical and biological (in aerated fermentation chambers). The processed waste is then dumped into heaps to mature and thus becomes sanitary, so that it can eventually be dumped out in the open and be harmless.

In a *composting plant* the waste is prepared and rotted along the same principles, the end product, however, must respond to certain requirements in respect of its chemical and especially of its physical quality. In order to achieve the physical quality required (lowest possible content of foreign substances) the technical requirements are far greater than in a homogenisation plant.

A modern waste composting plant processing not only domestic garbage but also some bulky materials and organic industrial waste and more particularly purification sludge, consists essentially of the following complex (in addition to the required storage, conveying and screening equipment): machines to reduce the volume of the waste, artificially aerated fermentation chambers, kilns and dumping places for the heaps.

Considering the shortage of dumping spaces out in the open, our efforts must tend today towards solutions to the total waste problem, and not only to the garbage problems. The goal is far from being reached. We are compelled to compost or to incinerate as many waste substances as possible in order to reserve those dumping places available for the deposit of incineration residues and waste that can be neither composted nor incinerated.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] FARKASDI, G., *Versuche über die Wirkung verschiedener Zusatzstoffe bei der Mietenkompostierung von Müll und Klärschlamm*, Informationsblatt Nr. 19 der IAM, Zürich (1963).
- [2] GLATHE, H., *Biologische Vorgänge bei der Kompostierung von Müll*, I. Intern. Kongress der IAM, 1959, Scheveningen (1959). — *Mikrobiologische Vorgänge bei der Kompostierung und ihre Auswirkungen in physikalisch-chemischer Hinsicht*, II. Intern. Kongress der IAM, 1962, Essen (1962).
- [3] HÖRLER, A., *Zur Frage der Zulassung von Küchenabfallzerkleinerungsapparaten, Küchenmühlen*, Schweiz. Z. Hydrol. 17, Fasc. 2 (1955).

- [4] KLOPOTEK, A.v., *Schimmelpilze und Müll*, Informationsblatt Nr. 19 der IAM, Zürich (1963).
- [5] NIESE, G., *Versuche zur Bestimmung des Rottegrades von Müllkomposten mit Hilfe der Selbsterhitzungsfähigkeit*, Informationsblatt Nr. 17 der IAM, Zürich (1963).
- [6] OBRIST, W., *Versuche über die Wirkung von Zusatzstoffen bei der Mietenkompostierung zerkleinerter häuslicher Abfallstoffe*, Informationsblatt Nr. 19 der IAM, Zürich (1963).
- [7] PÖPEL, F., *Grundsätzliche Fragen bei der Behandlung von Siedlungsabfällen*, Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft kommunale Abfallwirtschaft, Düsseldorf, Vortragsheft (1957).
- [8] SURBER, E., BRAUN, R., PETER, E., *Versuche zur Beschleunigung der Kompostbereitung*, Mitt. Schweiz. Anstalt f. d. forstl. Versuchswesen 35, H. 6 (1959).