



A-1040 Wien, Karlsgasse 11



#43-1-58801-26701



#43-1-58801-26799



[www.ifip.tuwien.ac.at](http://www.ifip.tuwien.ac.at)

---

# Working Paper Nr.: 3/2000

Werner Frühwirth, Helmut Wöginger (GUA)  
Gernot Döberl, Renate Huber (AWS)  
Michael Eder, Roger Pierrard (IFIP)

## Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie

### AUFTRAGGEBER

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung  
Amt der Steiermärkischen Landesregierung  
Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 22  
Umweltbundesamt GmbH



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY



# **Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie**

Executive Summary

## **AUFTRAGNEHMER**

GUA Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft der TU Wien  
Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt - AWS

IFIP - Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik der TU Wien

## **AUFTRAGGEBER**

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung  
Amt der Steiermärkischen Landesregierung  
Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 22  
Umweltbundesamt GmbH

Wien, November 2000

### **Wissenschaftliche Leitung**

Harald Hutterer (GUA - Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH)  
Paul H. Brunner (TU Wien, AWS - Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt)  
Wilfried Schönböck (TU Wien, IFIP - Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik)

### **Bearbeitung**

Werner Frühwirth, Helmut Wöginger (GUA)  
Gernot Döberl, Renate Huber (AWS)  
Michael Eder, Roger Pierrard (IFIP)

### **Unter Mitarbeit von**

Heribert Hutterer, Wolfgang Stark (GUA)  
Andreas Baumeler, Helmut Rechberger (AWS)  
Stephan Faßbender, Christoph Prinz (IFIP)

### **Impressum**

GUA Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH  
Sechshauser Straße 83, A-1150 Wien  
Tel.: +431 / 892 08 14 Fax: +431 / 892 08 82 E-Mail: [office@gua-group.com](mailto:office@gua-group.com)

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft der TU Wien  
Karlsplatz 13/226, A-1040 Wien  
Tel.: +431 / 58801-226 40 Fax: +431 / 504 22 34 E-Mail: [aws@awsnt.tuwien.ac.at](mailto:aws@awsnt.tuwien.ac.at)

Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik der TU Wien  
Karlsplatz 11/2, A-1040 Wien  
Tel.: +431 / 58801-267 01 Fax: +431 / 58801-267 99 E-Mail: [ifip@email.tuwien.ac.at](mailto:ifip@email.tuwien.ac.at)

## KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie „Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie (BEWEND)“ vergleicht und bewertet verschiedene abfallwirtschaftliche Maßnahmen unter besonderer Berücksichtigung ihrer langfristigen Auswirkungen. Es wurde untersucht, welche der betrachteten Maßnahmenfälle unter Berücksichtigung der langfristigen Verträglichkeit und der volkswirtschaftlichen Kosten die Ziele des österreichischen Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG) bestmöglich erfüllen.

Als Grundlage diente ein im Rahmen der Studie „Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtungen in Österreich“ (GUA & IFIP, 1998) erarbeitetes Modell der österreichischen Abfallwirtschaft, das den speziellen Anforderungen entsprechend überarbeitet und ergänzt wurde. Der Systeminput in dieses Modell wurde mit Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie kommunalem Klärschlamm festgelegt. Die Studie bedient sich der Methodik der Maßnahmenfalltechnik, wobei folgende Maßnahmenfälle untersucht und dem Planungsnullfall P0 (Status-quo-Fortschreibung) gegenübergestellt wurden:

M1	Maximum Deponierung unbehandelter Abfälle
M2a	Maximum Müllverbrennung (MVA) ohne Nachbehandlung der Reststoffe
M2b	Maximum Müllverbrennung (MVA) mit Verfestigung der Reststoffe
M2c	Maximum Hochtemperatur-Verfahren
M3a	Maximum mechanisch-biologische Behandlung (MBA) - Leichtfraktion in die Wirbelschicht
M3b	Maximum mechanisch-biologische Behandlung (MBA) - Leichtfraktion in das Zementdrehrohr
M3c	Maximum MBA - höherkalorische Schwerfraktion in die MVA, Leichtfraktion in die Wirbelschicht
M3d	Maximum MBA - höherkalorische Schwerfraktion in die MVA, Leichtfraktion in das Zementdrehrohr

Um dem im AWG verankerten Vorsorgeprinzip Rechnung tragen zu können, wurde das kurz-, mittel- und langfristige Deponieverhalten der in den jeweiligen Maßnahmenfällen zu Ablagerung gelangenden Reststoffe modelliert.

Als Bewertungsmethode wurde einerseits die volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) verwendet, andererseits wurde eine neue Bewertungsmethode, die modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA), entwickelt. Sie ermöglicht es, auch langfristige Auswirkungen der untersuchten Maßnahmenfälle - vor allem jene, die durch Deponierung von Reststoffen der Abfallbehandlung bedingt sind - zu erfassen und zu bewerten, die klassischen volkswirtschaftlichen Analyseinstrumenten wie der KNA nicht zugänglich sind.

Das Ergebnis der mKWA zeigt, daß - unabhängig von der Gewichtung der AWG-Ziele - die Maßnahmenfallgruppe 2 (Thermische Verfahren) deutlich am besten (2c vor 2a und 2b) und der Maßnahmenfall 1 (Direktdeponierung) deutlich am schlechtesten zu bewerten ist. Die Maßnahmenfälle 3a und 3b (Maximum MBA) sind knapp besser, die Maßnahmenfälle 3c und 3d (Maximum MBA mit thermischer Verwertung der Leicht- und höherkalorischen Schwerfraktion) deutlich besser als der Planungsnullfall zu bewerten.

Das Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse entspricht weitgehend dem Ergebnis der mKWA. Die Maßnahmenfallgruppe 2 ist am besten zu bewerten, gefolgt von der Maßnahmenfallgruppe 3, dem Planungsnullfall und dem Maßnahmenfall 1. Innerhalb dieser Maßnahmenfallgruppen weicht die Reihung jedoch von der Reihung auf Basis der mKWA ab. Insgesamt weist Maßnahmenfall 2a den geringsten volkswirtschaftlichen Verlust aller Maßnahmenfälle auf. Da in der KNA nicht alle Effekte, die in den einzelnen Maßnahmenfällen auftreten, miteinbezogen werden konnten, ist die Aussagekraft des Ergebnisses der mKWA höher zu bewerten.

Beide volkswirtschaftlichen Analysen zeigen somit, daß den thermischen Abfallbehandlungsverfahren gegenüber mechanisch-biologischen und vor allem gegenüber der direkten Deponierung unbehandelten Abfalls der Vorzug zu geben ist.

## INHALTSVERZEICHNIS

---

<a href="#">KURZFASSUNG</a> .....	I
<a href="#">INHALTSVERZEICHNIS</a> .....	II
<a href="#">1 MOTIVATION ZUR ERSTELLUNG DER ARBEIT</a> .....	3
<a href="#">2 ARBEITSZIEL</a> .....	4
<a href="#">3 SYSTEMDEFINITION</a> .....	5
<a href="#">4 MAßNAHMENFÄLLE VOR DER DEPONIERUNG UND SITUIERUNG DER REGIONALEN VERHÄLTNISSE FÜR WIEN, STEIERMARK UND OBERÖSTERREICH</a> .....	6
<a href="#">5 SUBSYSTEME VOR DER DEPONIERUNG</a> .....	8
<a href="#">6 SUBSYSTEM DEPONIERUNG</a> .....	9
<a href="#">7 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE</a> .....	11
<a href="#">8 ERGEBNISSE</a> .....	14
<a href="#">9 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN</a> .....	16
<a href="#">10 LITERATUR</a> .....	22

# 1 MOTIVATION ZUR ERSTELLUNG DER ARBEIT

---

Die Motivation zur Erstellung der gegenständlichen Arbeit besteht darin, daß keine Klarheit darüber besteht, auf welche Weise dem im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz als **zentrales Ziel** verankerten **Vorsorgeprinzip** Genüge getan werden soll. Die Deponieverordnung in der derzeit gültigen Fassung stellt zweifellos einen Schritt in diese Richtung dar. Es fehlt jedoch an vielen wissenschaftlichen Grundlagen, um die Effizienz dieses ersten Schrittes überhaupt analysieren und bewerten zu können.

Im wesentlichen sind es drei Bereiche, in denen Wissensdefizite bestehen:

## Defizit in der Erfüllung des Vorsorgeprinzips

Im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz ist als wesentliches Ziel festgeschrieben, "daß nur solche Stoffe als Abfälle zurückbleiben, deren Ablagerung kein Gefährdungspotential für nachfolgende Generationen darstellt (**Vorsorgeprinzip**)". Das bedeutet, daß in Zukunft anstelle „herkömmlicher“ Deponien sogenannte **Endlager** entsehen sollen. Hauptziel des Endlagerkonzeptes ist eine nachsorgefreie Deponie, die im Gegensatz zu anderen Deponietypen nach Abschluß der Ablagerung nicht mehr betreut werden muß. „**Endlagerqualität**“ haben Güter, die über kurze (1-10a), mittlere (10-100a) und lange (100-10.000a) Zeiträume nur umweltverträgliche Stoffflüsse abgeben. Güter mit Endlagerqualität sind also gekennzeichnet durch einen Zustand sehr geringer Reaktivität, durch sie bedingte Stoffflüsse in die Umwelt sollen die natürlichen Stoffflüsse und Lager auch langfristig nicht verändern.

Das Neue an der vorliegenden Aufgabenstellung besteht darin, daß Stoff- und Energieströme von Verfahren über zum Teil sehr lange Zeiträume verfolgt werden müssen, um die Erfüllung des Vorsorgeprinzips dementsprechend bewerten zu können.

## Defizite im naturwissenschaftlichen und technischen Wissensstand

Für eine profunde Bearbeitung der gegenständlichen Aufgabenstellung fehlt es an einer Reihe von naturwissenschaftlichen und technischen Kenntnissen.

Die Mängel bestehen einerseits in Defiziten, die einzelne Bausteine des anzustrebenden optimierten Gesamtsystems betreffen. Andererseits wurde bisher kein Gesamtmodell der Abfallwirtschaft erstellt, das die langfristige Hinterlassenschaft in Form von Lagern in Produkten und Deponiemengen in geeigneter Form mit einschließt.

GUA und IFIP haben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie ein groß angelegtes Rechenmodell für die Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen in Österreich erstellt. Im Rahmen dieser Arbeit zeigte sich deutlich, daß die genannten Lücken im Wissensstand bestehen und deshalb die Problematik der Erfüllung des Vorsorgeprinzips ohne weiterführende Arbeiten nicht in geeigneter Form untersucht werden kann.

Aufbauend auf die in der genannten Arbeit vorgenommene Modellierung eines Teilbereichs der österreichischen Abfallwirtschaft ist eine **erweiterte Modellierung** vorzunehmen, die die **langfristige Hinterlassenschaft in Form von Lagern in Deponiemengen** und nach Möglichkeit auch jene in Form von Lagern in ausgewählten Produkten in geeigneter Form mit einschließt.

## Defizite im Bereich der ökonomischen Rahmenbedingungen

Für die Erarbeitung objektivierbarer Entscheidungsgrundlagen zur Festlegung einer zielführenden Strategie zur Realisierung des Vorsorgeprinzips eignet sich neben anderen Methoden insbesondere die Anwendung einer volkswirtschaftlichen **Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)**. In einer solchen Analyse werden u. a. neben den betriebswirtschaftlichen Kosten auch externe Aufwendungen an Ressourcen und Energie, sowie u. a. die durch den Energieträgereinsatz und aus Prozessen entstehenden externen Effekte, z. B. Emissionen von Luftschadstoffen, in Form monetarisierter Größen berücksichtigt.

Für die gegenständliche Aufgabenstellung existieren dazu Defizite in zwei Bereichen. Einerseits fehlen betriebswirtschaftliche Daten zu Prozessen, die wegen der Unklarheiten im Hinblick auf die Realisierung des Vorsorgeprinzips bisher nicht realisiert wurden oder nur in Vorüberlegungen existieren. Andererseits stellt die Frage der extrem langfristigen Betrachtung über Jahrtausende teilweise finanzwissenschaftliches Neuland dar.

Aufgrund dessen können mit Hilfe der KNA nicht alle Aspekte berücksichtigt werden. Für eine ganzheitliche Betrachtung ist daher die Verwendung einer weiteren Methode notwendig. Für die gegenständliche Studie wurde ein Hybridverfahren aus Kosten-Wirksamkeits-Analyse und Nutzwertanalyse, die „**modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA)**“ entwickelt.

## 2 ARBEITSZIEL

---

Ziel einer nachhaltigen Abfallwirtschaftspolitik muß es sein, Vorgaben zu definieren, die zu einer aus gesamtwirtschaftlicher Sicht optimalen Abfallbewirtschaftung führen. Dazu muß bekannt sein, durch welche Abfallbewirtschaftungstechniken das angestrebte Ziel erreicht werden kann.

Zu diesem Zwecke müssen alle positiven und negativen Effekte der Bewirtschaftung von Abfällen erfaßt, bewertet und einander gegenübergestellt werden. Die verschiedenen Abfallbewirtschaftungsverfahren können von der aus vordergründiger Sicht billigsten Lösung, der direkten Deponierung von Abfällen, bis hin zu technisch aufwendigsten Verfahren, wie z. B. der Hochtemperaturbehandlung von Reststoffen aus der Müllverbrennung, reichen. Der Vergleich der heute anfallenden Kosten mit jenen Folgewirkungen, die durch die Anwendung der einzelnen Behandlungsoptionen hervorgerufen werden, ist Ziel der vorliegenden Untersuchung.

Neben der Erfassung und Bewertung aller heute anfallenden Schad- und Nutzeffekte ist es erforderlich, auch die langfristigen Effekte, die sich aus der Deponierung der Restabfälle ergeben, zu berücksichtigen. Dazu muß in einer auf naturwissenschaftlichen Kriterien aufbauenden Wirkungsanalyse abgeschätzt werden, welches Gefährdungspotential von den je nach Behandlungsmethode unterschiedlichen Deponieinhalten ausgeht. Ein operationalisierbares Kriterium ist z. B., ob, wann und in welcher Form es notwendig sein wird, auf das Emissionsverhalten der verschiedenen Deponieinhalte zu reagieren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Auffinden der hinsichtlich eines Zielsystems, welches auf den Zielen des AWG aufbaut, günstigsten Kombination technischer Verfahren zur Verwertung, Vorbehandlung und Ablagerung von festen Abfällen.

In der Regel steigt der Aufwand zur Vorbehandlung des abzulagernden Materials mit dessen ökologischer Qualität an. In der Phase des Übergangs von der Hausmülldeponie zum Endlager stellen sich insbesondere folgende Fragen:

- Inwiefern erzeugen verschiedene Verfahren der Abfallbehandlung und -verwertung letztlich Reststoffe, die der Endlagerqualität nahekommen?
- Welche Kosten für die Behandlung und die Nachsorge entstehen?
- Welche Restflüsse gelangen langfristig in die Umwelt und wie sind diese zu bewerten?

Nur wenn diese Fragen beantwortbar sind, können unterschiedliche Verfahren der Abfallwirtschaft miteinander verglichen werden, wobei für eine umfassende Bewertung alle anderen Güter- und Stoffströme (wiederverwertbare Produkte, Emissionen) mit einzubeziehen sind.

Auf Basis einer neu zu erarbeitenden Methodik soll ein **Simulations- und Prognosemodell** geschaffen werden, das Aussagen darüber erlaubt, welches Konzept der Bewirtschaftung von Abfällen der Zielsetzung von „endlagerfähigen Reststoffen“ zu den geringsten Kosten am nächsten kommt. Damit sollen Antworten beispielsweise auf folgende Fragen ermöglicht werden:



- Wie stellen sich die langfristigen Perspektiven der Deponierung dar? Welche Ansprüche sollte man in Zukunft an die Qualität abzulagernder Abfälle und die hierfür erforderlichen Behandlungsverfahren stellen?
- Welches Ausmaß an Zusatzbehandlungen der Sekundärprodukte ist bei der thermischen Abfallbehandlung am günstigsten?
- Inwieweit soll die Qualität abzulagernder Abfälle der Endlagerqualität angenähert werden?
- Wie sind die abzulagernden Reststoffe der auf Basis der gültigen Deponieverordnung zulässigen Verfahrensalternativen im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip zu bewerten?

Erst mit Hilfe eines solchen Rechenmodells wird es möglich sein, die derzeit hochaktuelle Auseinandersetzung über die Frage thermische oder mechanisch-biologische Behandlung auf Basis objektiver Entscheidungsgrundlagen zu diskutieren.

Das Simulations- und Prognosemodell bedient sich der **Maßnahmenfalltechnik** und nimmt in den unsicheren Bereichen zweckdienliche **Sensitivitätsuntersuchungen** vor.

### 3 SYSTEMDEFINITION

---

Der gegenständlichen Arbeit liegt eine systemische Betrachtungsweise der Abfallwirtschaft Österreichs zugrunde. Innerhalb dieses Systems werden für Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie für kommunalen Klärschlamm sämtliche Güter-, Energie- und Geldflüsse sowie ausgewählte Emissionen abgebildet. Dazu wird eine Stoffflußanalyse nach Baccini & Brunner (1991) für acht ausgewählte Stoffe (C, N, S, Cl, Hg, Cd, Pb, Zn) und deren für die modellierten Prozesse wesentlichen Verbindungen durchgeführt.

Die abfallwirtschaftlichen Prozesse sind zu den Subsystemen Sammlung, Sortierung, Verwertung, Behandlung (in der Folge auch mit „Subsysteme vor der Deponierung“ bezeichnet) sowie dem Subsystem Deponierung zusammengefaßt.

Ausgangspunkt der Systemmodellierung ist das für die Studie „Gesamtwirtschaftliche Kosten und Nutzen der Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtungen in Österreich“ (GUA & IFIP, 1998) erarbeitete Berechnungsmodell. Dieses Modell kann für den Bereich der Systemabfälle alle relevanten abfallwirtschaftlichen Prozesse bis zur Übernahme auf Deponien abbilden (Sammlung, Sortierung, Verwertung, Behandlung und Ermittlung der zu deponierenden Mengen). Für die vorliegende Arbeit wurde es in folgenden Punkten erheblich erweitert und ausgebaut:

- Beschreibung des „Deponieverhaltens“ über lange Zeiträume unter Berücksichtigung der Reaktionen im Deponiekörper und der Wechselwirkungen mit der Deponieumgebung.
- Detailliertere Modellierung der thermischen Verfahren: Betrachtung von Verfahren zur Herstellung unterschiedlicher Qualitäten von Reststoffen der thermischen Verfahren und Einbeziehung verschiedener Varianten der Nachbehandlung von Reststoffen.
- Detailliertere Modellierung der mechanisch-biologischen Behandlung: Basierend auf den aktuellsten zur Verfügung stehenden Daten wurden die Prozesse der mechanisch-biologischen Behandlung neu modelliert, um auch hier die Bilanzierung von Stoffen zu ermöglichen.
- Erweiterung der Bewertungsmethode, um auch nicht monetarisierbare Größen berücksichtigen zu können.

Als Systeminput werden **Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen** sowie **kommunaler Klärschlamm** betrachtet. Der Einsatz von Klärschlamm in der Landwirtschaft ist nicht Teil des definierten Systems.

Als Systemexporte treten Emissionen, Sekundärprodukte und für Untertagedeponien bestimmte gefährliche Abfälle auf. Die Deponiekörper verbleiben im System und bewirken eine Lagerbildung.

Abfallimporte und –exporte über die österreichische Staatsgrenze werden mit Ausnahme der für Untertagedeponien bestimmten gefährlichen Abfälle aufgrund ihrer geringen Bedeutung nicht betrachtet.

Es werden nach heutigem Wissensstand für den Bereich der Abfallwirtschaft besonders relevante Emissionen ausgewählt und ermittelt. Kriterien für diese Auswahl sind die Datenverfügbarkeit und die Kenntnis über die Bedeutung einzelner Emissionen für die Ermittlung von Schadeffekten.

Für jeden Prozeß wird eine vollständige Energiebilanz durchgeführt, deren Ergebnis als Aufwand und Gewinn ausgewiesen wird. Analog zur Vorgangsweise bei den Emissionen wird auch hier die Substitution von Energieträgern berücksichtigt.

Die betriebswirtschaftliche Kostenkalkulation basiert auf konkret definierten Anlagen. Dabei werden Investitionskosten sowie fixe und proportionale Betriebskosten ermittelt.

Einen Überblick über das betrachtete System gibt Abbildung 3-1.

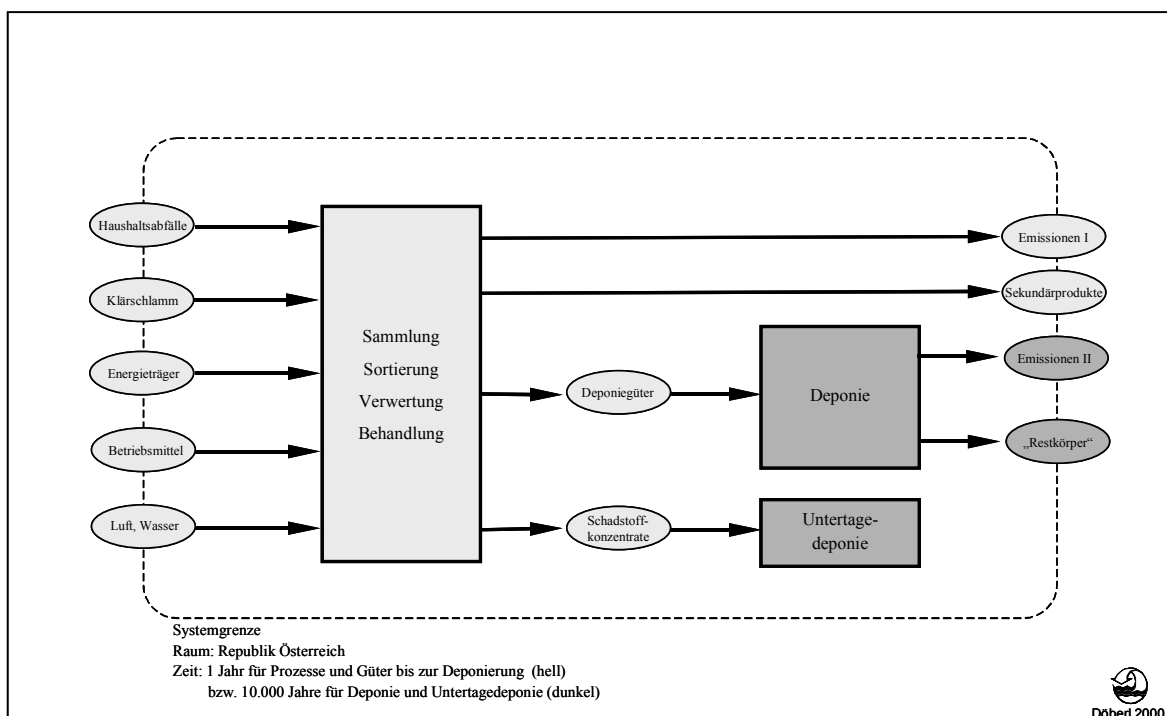


Abbildung 3-1: Überblick über das betrachtete System

## 4 BETRACHTETE MAßNAHMENFÄLLE UND SITUIERUNG DER REGIONALEN VERHÄLTNISSE FÜR WIEN, STEIERMARK UND OBERÖSTERREICH

Für die Prozesse vor der Deponie werden die in der anschließenden Tabelle angeführten Maßnahmenfälle bzw. Maßnahmenfallgruppen festgelegt, die jeweils eine bestimmte ökologische Qualität des abzulagernden Materials gewährleisten und einen jeweils unterschiedlichen Aufwand vor der Deponierung aufweisen.

Tabelle 4-1: Festlegung der Maßnahmenfälle vor der Deponierung

Nr	Maßnahmenfall(gruppe)	Kurzname
0	Status-quo-Fortschreibung (Planungsnullfall)	P0
1	Keine Vorbehandlung, Direktdeponierung	M1
2a	Maximum thermische Behandlung Rostfeuerung ohne Nachbehandlung der Sekundärprodukte	M2a
2b	Maximum thermische Behandlung Rostfeuerung mit Zementverfestigung der Sekundärprodukte	M2b
2c	Maximum thermische Behandlung Von-Roll-RCP-Verfahren (Hochtemperaturverfahren)	M2c
3a	Maximum MBA Leichtfraktion in industrielle Wirbelschicht	M3a
3b	Maximum MBA Leichtfraktion in Zementdrehrohr	M3b
3c	Maximum MBA höherkalorischer Teil der Schwerfraktion in MVA, Leichtfraktion in industrielle Wirbelschicht	M3c
3d	Maximum MBA höherkalorischer Teil der Schwerfraktion in MVA, Leichtfraktion in Zementdrehrohr	M3d

Den Systeminput für alle zur Diskussion stehenden Maßnahmenfälle bilden identische Abfallmengen und –zusammensetzungen.

Als **Referenz-Maßnahmenfall** wird **Maßnahmenfall 0** verwendet, der die Fortschreibung des Status quo nach verfügbarer Datenlage darstellt. Mit diesem Maßnahmenfall werden unter Berücksichtigung der auf den Deponien auftretenden Effekte die übrigen Maßnahmenfälle verglichen, um deren Effizienz analysieren und bewerten zu können.

Im **Maßnahmenfall 1** werden unbehandelter Restmüll und Klärschlamm auf Restmüll- bzw. Klärschlammdeponien direkt deponiert.

Die **Maßnahmenfallgruppe 2** umfaßt Maßnahmenfälle, bei denen die Restmüllbehandlung durch thermische Behandlungsverfahren erfolgt. Betrachtet werden dabei die Standard-Rostfeuerung ohne Nachbehandlung der Sekundärprodukte (M2a) sowie mit Zementverfestigung der Sekundärprodukte (M2b). Als Vertreter der sogenannten „innovativen“ Verfahren wurde aufgrund der im Vergleich zu anderen Vertretern dieser Gruppe relativ guten Datenlage das Von-Roll-RCP-Verfahren ausgewählt (M2c). Kommunaler Klärschlamm wird in einer Wirbelschichtanlage verbrannt.

Bei **Maßnahmenfallgruppe 3** wird verstärkt auf die mechanisch-biologische Behandlung gesetzt. Der gesamte Restmüll wird gemeinsam mit Klärschlamm in mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen behandelt. Die ausgeschleuste Leichtfraktion wird entweder in einer Wirbelschichtanlage (M3a) oder im Zementdrehrohr (M3b) verbrannt, die Schwerfraktion (Rottereststoff) wird nach der biologischen Behandlung jeweils deponiert. Die anfallenden Sortierabfälle werden einer Hausmülldeponie zugeführt. Dieses Vorgehen wurde deshalb gewählt, um in diesen beiden Maßnahmenfällen die Auswirkungen mechanisch-biologischer Anlagen sowohl in stofflicher als auch in betriebswirtschaftlicher Hinsicht nicht durch das Vorhandensein thermischer Behandlungsanlagen zu verfälschen. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, daß diese Vorgangsweise ab dem Jahre 2004 nicht gesetzeskonform ist.

Bei den Maßnahmenfällen 3c und 3d ist die Anlagenzuteilung von Restmüll und Klärschlamm analog zu den Maßnahmenfällen 3a und 3b. Der Unterschied besteht darin, daß hier das Endprodukt der Rotte (Rottereststoff) noch einmal aufgeteilt wird in eine höherkalorische Fraktion, die wiederum thermisch verwertet wird, und einer kohlenstoffarmen Fraktion, die der Deponierung zugeführt wird. Die Sortierabfälle können bei diesen beiden Maßnahmenfällen ebenfalls thermisch behandelt werden.

Um die Unterschiede zwischen den Maßnahmenfällen klarer analysieren zu können, wird das Subsystem Verwertung im wesentlichen konstant gehalten. In weiterer Folge werden Wege und Ausmaß der getrennten Erfassung und stofflichen Verwertung in jenen Fällen variiert, in denen sie Auswirkungen auf das gegenständliche Optimierungsziel aufweisen. Die Güter- und Energiebilanzen der Maßnahmenfälle liefern als Resultat die Eingangsparameter für die anschließende Deponierung.

Der Vergleich der Situation der betrachteten Maßnahmenfälle mit dem Status-quo der beauftragenden Bundesländer läßt sich wie folgt zusammenfassen: Die Situation in Wien entspricht am ehesten dem Maßnahmenfall 2b (MVA Spittelau und Flötzersteig), diejenige in der Steiermark dem Maßnahmenfall 1 (keine MVA, geringer Anteil MBA) und die Situation in Oberösterreich durch das Vorhandensein der MVA Wels dem Planungsnullfall.

## 5 SUBSYSTEME VOR DER DEPONIERUNG

Die Modellierung der Subsysteme vor der Deponierung wurde - mit Ausnahme des Subsystems Behandlung, das zur Gänze neu modelliert wurde - zu weiten Teilen aus der Studie "Gesamtwirtschaftliche Kosten und Nutzen der Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtungen in Österreich" (GUA & IFIP 1998) (unveröffentlicht) übernommen. Folgende Prozesse wurden modelliert:

### Subsystem Sortierung

1. Sortierung Papier	Anlagenkapazität in t/a	25.000
2. Sortierung Leichtverpackungen	Anlagenkapazität in m <sup>3</sup> /a	150.000, 300.000
3. Sortierung Metallverpackungen	Anlagenkapazität in m <sup>3</sup> /a	150.000, 300.000
4. Sortierung Sperrmüll	Anlagenkapazität in m <sup>3</sup> /a	150.000, 300.000
5. Sortierung Glas	Anlagenkapazität in t/a	150.000
6. Sortierung Textilien	Anlagenkapazität in t/a	3.000

### Subsystem Verwertung

7. Stoffliche Verwertung Papier	Anlagenkapazität in t/a	370.000
8. Landwirtschaftliche Kompostierung	Anlagenkapazität in t/a	5.000, 10.000, 20.000
9. Low-Tech Kompostierung	Anlagenkapazität in t/a	5.000, 10.000
10. High-Tech Kompostierung	Anlagenkapazität in t/a	20.000
11. Anaerobes Verfahren	Anlagenkapazität in t/a	15.000, 40.000
12. Stoffliche Verwertung Kunststoffe	Anlagenkapazität in t/a	5.400
13. Stoffliche Verwertung NE-Metalle	Anlagenkapazität in t/a	34.400
14. Stoffliche Verwertung Fe-Metalle	Anlagenkapazität in t/a	337.500
15. Verwertung Glas	Anlagenkapazität in t/a	56.700

### Behandlung: Mechanisch-biologische Behandlung (MBA)

16. Mechanische Trennung	Anlagenkapazität in t/a	80.000
17. Biologie	Anlagenkapazität in t/a	48.000

### Behandlung: Thermische Verfahren

18. Wirbelschicht Klärschlamm	Anlagenkapazität in MW	60
-------------------------------	------------------------	----

19. Zementdrehrohr	Anlagenkapazität in t/a	24.000
20. Wirbelschicht	Anlagenkapazität in MW	60
21. Rostfeuerung ohne integr. Nachbeh.	Anlagenkapazität in t/a	60.000, 150.000, 300.000
22. Rostfeuerung mit Zementverfestigung	Anlagenkapazität in t/a	60.000, 150.000, 300.000
23. RCP-Verfahren	Anlagenkapazität in t/a	67.500, 150.000

Gänzlich neu wurde das Subsystem Behandlung, also die Prozesse MVA mit und ohne Verfestigung der Reststoffe, Von-Roll-RCP-Verfahren, MBA, Wirbelschicht, Wirbelschicht Klärschlamm und Zementdrehrohr modelliert.

## 6 SUBSYSTEM DEPONIERUNG

Im Subsystem Deponierung werden die Menge der abzulagernden „Reststoffe“ aus den vorangehenden Subsystemen übernommen und folgenden Deponietypen zugeordnet.

Tabelle 6-1: Zuordnung der zu deponierenden Güter zu den Deponietypen

Art der Vorbehandlung	Gut	Deponietyp
<b>Keine Vorbehandlung</b>	Restmüll	„Restmülldeponie“
	Kommunaler Klärschlamm	„Klärschlammdeponie“
<b>Thermische Verfahren</b>		
Konventionelle Rostfeuerung	Schlacke & Filterasche	Reststoffdeponie
	MVA-Filterkuchen	Untertagedeponie
Rostfeuerung mit Zementverfestigung	Schlacke & Filterasche verfestigt	Reststoffdeponie
	MVA-Filterkuchen	Untertagedeponie
Von-Roll-RCP-Verfahren	Schmelzgranulat (RCP-Granulat)	Reststoffdeponie
	Schwermetallkonzentrat	Untertagedeponie
	Gipskuchen	Baurestmassendeponie
Wirbelschichtfeuerung	Asche & Schlacke der Wirbelschicht	Reststoffdeponie
	Filterkuchen der Wirbelschicht	Untertagedeponie
	Gipskuchen der Wirbelschicht	Baurestmassendeponie
Zementdrehrohrfen	Klinker – Betonabbruch *	Baurestmassendeponie
<b>Mechanisch-biologische Verfahren</b>		
Restmüllsplitting	Rottereststoff	Massenabfalldeponie
<b>Abfälle aus Sortierung &amp; Verwertung</b>	Abfall Eisenschmelze	- **
	Sortierabfälle (sofern nicht thermisch verwertet)	„Restmülldeponie“

\* Aus dem Klinker wird Zement und in weiterer Folge Beton hergestellt. Das aus diesem Beton hergestellte Gebäude hat eine Lebensdauer von 500 Jahren, danach wird der Abbruch auf einer Baurestmassendeponie abgelagert.

\*\* Da diese Abfälle aus dem Eisenrecycling in sehr geringen Mengen und in allen Maßnahmenfällen in ähnlichen Mengen anfallen, werden sie in der Studie nicht weiter betrachtet.

Zur Berechnung der Emissionen über 10.000 Jahre werden ausschließlich Monodeponien betrachtet, die mit dem jeweiligen Gut verfüllt werden. Sämtliche Modelldeponien werden baulich nach Deponieverordnung (1996) ausgeführt. Dabei wurden im wesentlichen folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- (1) Die mittel- und langfristig jährlich anfallende Sickerwassermenge wird als Differenz einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge für Österreich und einer durchschnittlichen jährlichen Evapotranspirationsrate für rekultivierte Deponieoberflächen angenommen.
- (2) Die Funktionstüchtigkeit von technischen Einrichtungen, Oberflächen- und Basisabdichtungen wird mit 100 Jahren begrenzt, ebenso die durchlässigkeithemmende Wirkung der geologischen Barriere. Die schwermetallbindende Funktion der geologischen Barriere im Sinne einer „geochemischen Barriere“ bleibt hingegen über den gesamten Betrachtungszeitraum wirksam.
- (3) Zur Beschreibung der Abbaureaktionen wird von einem *homogen* reagierenden Block ohne bevorzugte (präferentielle) Sickerwege ausgegangen.

Die Berechnung der Deponieemissionen folgt den unten abgebildeten Emissionsschemata.

**Emissionsschema „organische“ Deponietypen**

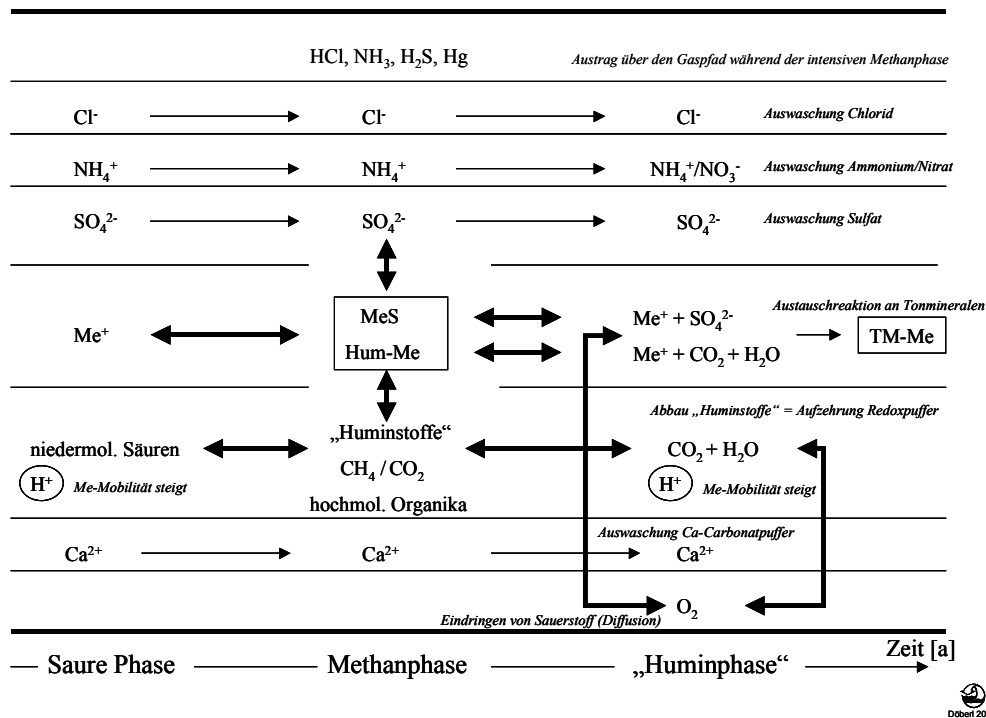


Abbildung 6-1: Emissionsschema für „organische“ Deponietypen. Doppelpfeil: Reaktionen; Einfachpfeil: andere Prozesse; Me=Metalle; Hum=„Huminstoffe“

### Emissionsschema „anorganische“ Deponietypen

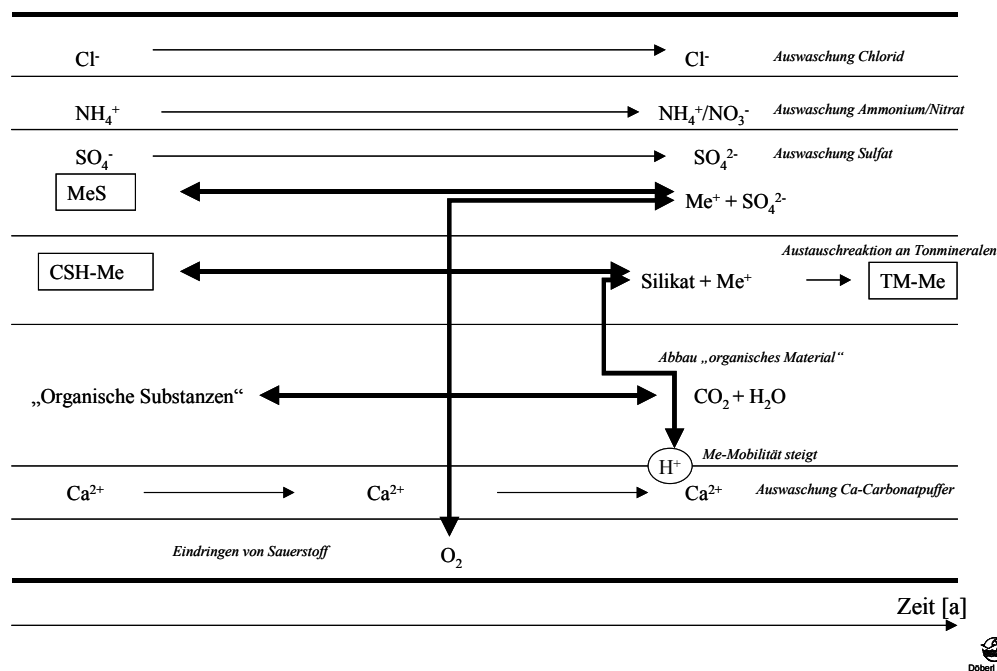


Abbildung 6-2: Emissionsschema für „anorganische“ Deponietypen. Doppelpfeil: Reaktionen; Einpfeil: andere Prozesse

Die eigentliche Berechnung erfolgt mittels aus der Literatur entnommenen und für den speziellen Zweck zum Teil an natürlichen Analoga adaptierten Berechnungsmodellen. Für die Sickerwasseremissionen sind dies die Modelle von BELEVI & BACCINI (1989) bzw. das Emissionsschema aus AGW (1992), für die Gasemissionen das Modell von MARTICORENA et al. (1998)

Berechnet wird auch die Verdünnung von Sickerwasseremissionen in einem hydrogeologisch genau definierten Grundwasserkörper sowie die Anreicherung von Schwermetallen im Deponieuntergrund (nach Versagen der technischen Barrieren). Die jeweils berechneten Werte dienen der Definition eines eventuellen Sanierungs- oder Sicherungsbedarfes. Im Subsystem werden Kosten und Zeitpunkt für diese Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen berechnet, zusätzlich natürlich auch die betriebswirtschaftlichen Kosten für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Nachsorge der modellierten Deponien.

## 7 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE

Im Rahmen der volkswirtschaftlichen Analyse wird einerseits eine klassische Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) durchgeführt. Andererseits wurde eine neu entwickelte Methode, die „modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse“ (mKWA) angewandt. Als Haupteingangsdaten fungieren eine betriebswirtschaftliche Kostenbilanz, eine Güterbilanz, eine Emissionsbilanz sowie eine Energiebilanz der untersuchten Abfallbewirtschaftungsprozesse.

Aus der gewählten Bewertungsmethodik ergeben sich prinzipiell drei Möglichkeiten zur Quantifizierung von Entscheidungsindikatoren: Kosten-Nutzen-Saldo, Barwertrate und Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis. Durch den gewählten Ansatz, der Implementierung beider Verfahren, besteht einerseits der Vorteil, daß für die gut monetarisierbaren Eingangsvariablen, deren Wertigkeiten im Rahmen der KNA korrekt wiedergegeben werden können und andererseits die Möglichkeit, die nicht von der KNA abbildbaren Effekte adäquat mittels der mKWA einbeziehen zu können. Im Rahmen der



mKWA wurde zusätzlich eine Gewichtung als Element der Berücksichtigung der gesellschaftlichen Präferenzen vorgenommen, welche variiert wurde, damit die Sensitivität überprüft und die Entscheidungsrelevanz einzelner Indikatoren identifiziert werden konnte.

Bei der KNA wurden die betriebswirtschaftlichen Kosten und die Kosten externer Effekte (z. B. Emissionen) den durch die Abfallbewirtschaftung induzierten Nutzeffekten (substituierte Primärgüter- und –energieproduktion und deren externe Effekte) gegenübergestellt und die Kosten-Nutzen-Saldi sowie die Barwertraten errechnet und als Grundlagen für die Reihung der untersuchten Fälle herangezogen. Monetarisiert wurden folgende externe Effekte: Emissionen von klassischen Luftschadstoffen und Treibhaussubstanzen sowie Emissionen wasserverunreinigender Substanzen in Oberflächengewässer. Emissionen grundwasser- und bodenverunreinigender Substanzen gingen indirekt über die Kosten von Sicherungs- und/oder Sanierungsmaßnahmen ein. Folgende Effekte erwiesen sich als nicht monetarisierbar (intangible Effekte): Emissionen von ozonabbauenden Substanzen, Dioxinen, Chlorid, Sulfat, Schwefelwasserstoff, Chlorwasserstoff und Ammoniak aufgrund fehlender Vermeidungskosten, Substitution von Primärrohstoffen durch einige Sekundärrohstoffe aufgrund fehlender Kostendaten (aufbereitete Problemstoffe, Gips, Reißtextilien etc.), die Dissipation (Verteilung von Stoffen in der Umwelt, ohne daß Grenzwerte überschritten werden), die Schonung von Ressourcen (Marktpreise für Rohstoffe und Zwischenprodukte bilden die langfristige Verfügbarkeit dieser Güter gar nicht oder zumindest nur unvollständig ab) und die Nachsorgefreiheit von Deponien (wird nur in geringem Ausmaß durch Sanierungskosten berücksichtigt).

Aufgrund des sehr langen Betrachtungszeitraumes, der Entsprechung des Vorsorgeprinzips und der Nichtabschätzbarkeit des technischen Fortschritts, wurde für die Kosten-Nutzen-Analyse ein Diskontierungszinssatz von 0 gewählt.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der KNA wurden folgende Parameter variiert: Externe Kosten der Schadstoffe, Deponiesanierungskosten, Altlastensanierungsbeitrag sowie Marktpreise vergleichbarer Produkte bzw. Zwischenprodukte, die aus Primärrohstoffen hergestellt wurden.

Die mKWA stellt einerseits die Kosten eines Maßnahmenfalles dar, andererseits werden die Wirkungen hinsichtlich der Erreichung gesetzter Ziele nicht nur dargestellt, sondern, ähnlich wie bei der Nutzwertanalyse, zu einer Gesamtwirksamkeit zusammengeführt. Ergebnis der Berechnungen ist das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis, anhand dessen eine Reihung der Maßnahmenfälle vorgenommen werden kann.

Grundlage für die mKWA bildet eine Zielhierarchie, die aus den Zielen des AWG abgeleitet wurde (siehe Abbildung 7-1). Diese Ziele wurden von den Auftraggebern der gegenständlichen Studie gewichtet, um gesellschaftliche Präferenzen mit einfließen zu lassen. Die Gewichtung erfolgte bis zur Ebene der Unterziele top-down und/oder bottom-up.

Unter der Ebene der Unterziele existiert eine weitere Ebene – diejenige der operationalisierbaren Ziele (z. B. sind dem Unterziel „Verminderung von Schäden durch regional wirkende Schadstoffe“ die operationalisierbaren Ziele „Verträglichkeit von Kohlenmonoxidemissionen“, „Verträglichkeit von Schwefeldioxidemissionen“ etc. zugeordnet). Auf dieser untersten Ebene wurden insgesamt 110 Ziele festgelegt und je ein integratives Zielkriterium (eine naturwissenschaftliche Bewertungsgröße; im Falle der operationalisierbaren Ziele des Unterzieles „Verminderung von Schäden durch regional wirkende Schadstoffe“ etwa das kritische Luftvolumen) definiert. Zum Einsatz kommende integrative Zielkriterien sind Kohlendioxidäquivalente, CFC11-Äquivalente, kritische Wasser- und Bodenvolumina, verbrauchte Fläche, statistische Rohstoffverfügbarkeit, Stoffkonzentrierungseffizienz (SKE) und Energiemengen. Für jedes Zielkriterium wird ein Sollwert festgelegt und in der Folge der Grad der Zielerreichung des jeweils betrachteten Maßnahmenfalls ermittelt. Daraus ergibt sich der Zielertrag, der den Bezug zum Planungsnullfall herstellt und der in den Wirksamkeitswert transformiert wird (siehe Abbildung 7-2). Die Wirksamkeitswerte eines Maßnahmenfalles werden auf Ebene der Unterziele aggregiert und dort gewichtet. Die Summe der gewichteten Wirksamkeitswerte wird zu einem maßnahmenfallbezogenen Gesamtwirksamkeitswert transformiert, die Kosten des Maßnahmenfalls auf die Kosten des



Planungsnullfall normiert und je Maßnahmenfall ein Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis ermittelt.

Oberziel	Ziele	Unterziele
Schutz des Menschen und der Umwelt	Erhaltung der Luftqualität	Verminderung von Schäden durch regional wirkende Schadstoffe
		Verminderung des Treibhauseffekts
		Verminderung von Schäden an der Ozonschicht
	Erhaltung der Wasserqualität	Verträglichkeit von Immissionen in Oberflächengewässern (Fließgewässern)
		Verträglichkeit von Immissionen in Grundwässern
	Erhaltung der Bodenqualität	Verträglichkeit der Schadstoffanreicherung in Oberflächeböden
Verträglichkeit der Schadstoffanreicherung in tiefen Bodenschichten		
Schonung der Ressourcen	Schonung der Ressource Fläche	Minimierung des Flächenbedarfs für Deponien
	Schonung stofflicher Ressourcen zur Produktgewinnung (Rohstoffe)	Minimierung des Ressourcenverbrauchs durch hohen Grad stofflicher Verwertung
		Maximierung der Schaffung neuer Ressourcen
Schonung materieller Ressourcen zur Energiegewinnung	Saldo der Energiemengen aus den Zielen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substitution von Primärenergieträgern durch Energieträger der Abfallwirtschaft</li> <li>Minimierung des Energieeinsatzes für die Abfallbewirtschaftung</li> <li>Minimierung des Einsatzes von Energieträgern bei der Primärproduktion durch den Einsatz von Abfällen bei der Sekundärproduktion</li> </ul>
Nachsorgefreiheit von Deponien (Vorsorgeprinzip)	Langfristige Verträglichkeit der Stoffflüsse in die Umwelt	Minimierung des langfristigen Reaktionspotentials und der langfristigen Schadstoffverfügbarkeit im Deponiekörper
		Minimierung der Schadstoffmenge im Deponiekörper
		Zuordnung unterschiedlicher Abfallarten zu den jeweils geeigneten Deponietypen

Abbildung 7-1: Darstellung des Zielsystems für die mKWA (IFIP; 2000).

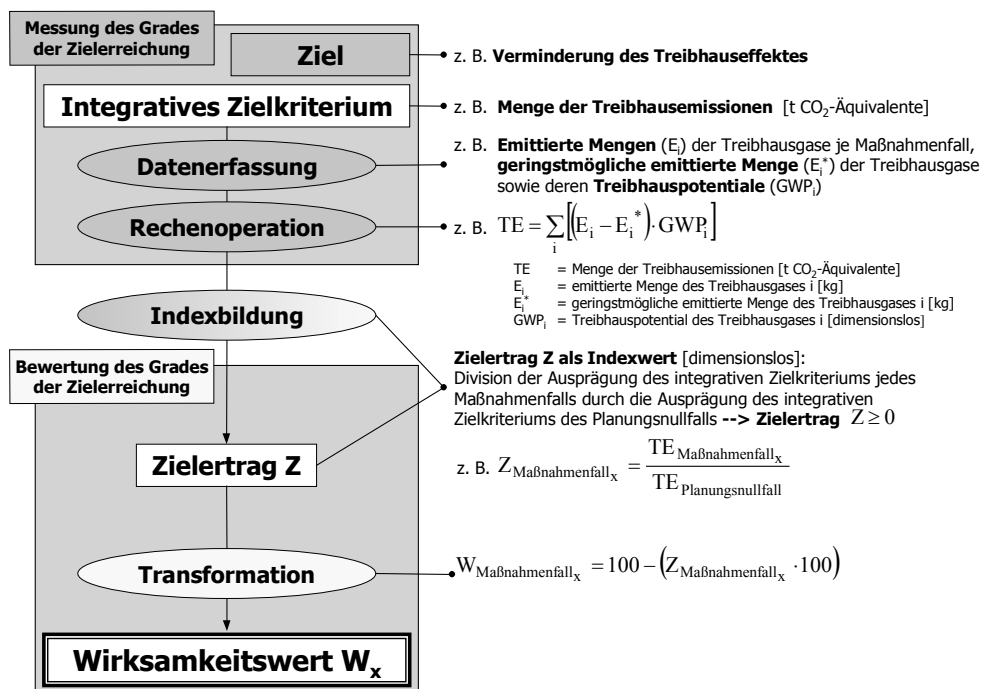


Abbildung 7-2: Darstellung der Methodik der Wirksamkeitsmessung im Rahmen der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse (IFIP, 2000)

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden vor allem die Gewichtung der Ziele variiert. Die Nichtmitembeziehung des Altlastensanierungsbeitrags in die Kostenanalyse in der Standardberechnung erfolgte aufgrund der Annahme, daß der Altlastensanierungsbeitrag keinen Ressourcenverzehr in ökonomischer Sicht darstellt. Um den Einfluß dieser Annahme auf das Gesamtergebnis zu untersuchen, wurde der Altlastensanierungsbeitrag ebenfalls in die Sensitivitätsanalyse miteinbezogen.

## 8 ERGEBNISSE

### Kosten-Nutzen-Analyse

Die Reihung der Fälle nach den beiden Ergebnisvariablen Kosten-Nutzen-Saldo und Barwertrate stimmt weitgehend überein, nur der Planungsnullfall und Maßnahmenfall 3a wechseln die Plätze. Den niedrigsten volkswirtschaftlichen Verlust weist Maßnahmenfall 2a auf, gefolgt von 2b und 2c. Generell weisen die Verbrennungsverfahren das beste Ergebnis auf, der Maßnahmenfall 1, maximale Direktdeponierung weist den mit Abstand höchsten volkswirtschaftlichen Verlust und die schlechteste Barwertrate auf.

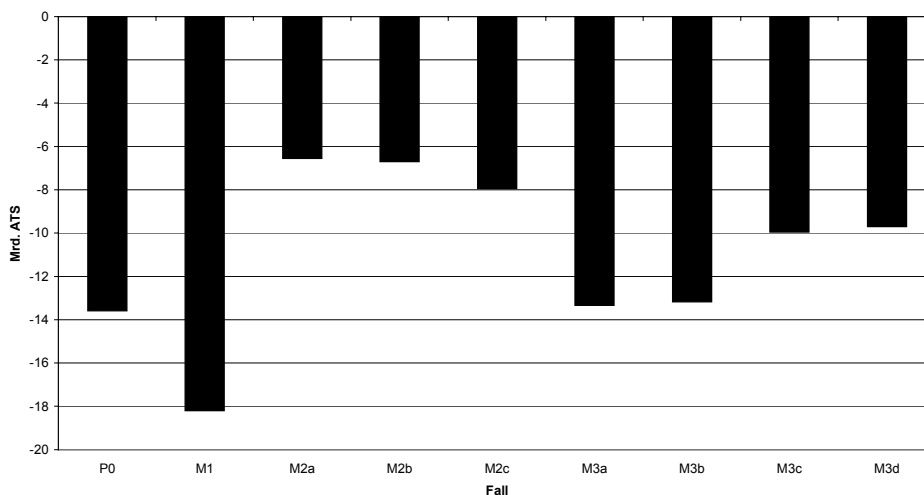


Abbildung 8-1: Vergleich der Kosten-Nutzen-Saldi (volkswirtschaftlicher Verlust) der untersuchten Fälle der Bewirtschaftung von Abfällen in Österreich

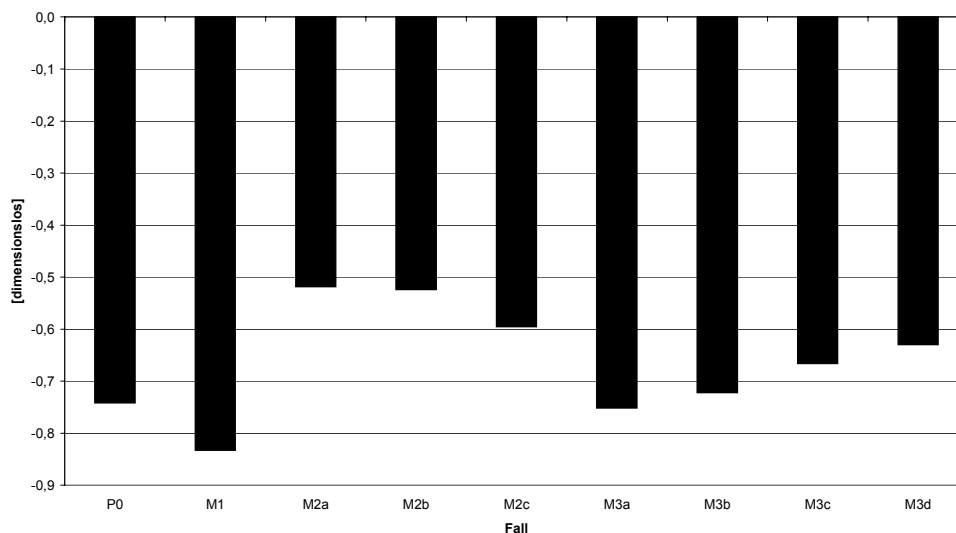


Abbildung 8-2: Vergleich der Barwertrate der untersuchten Fälle der Bewirtschaftung von Abfällen in Österreich

#### „Modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse“

Abbildung 8-3 zeigt die Grundlage für die Reihung der untersuchten Fälle der Bewirtschaftung von Abfällen in Österreich: Das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis. Dieses Verhältnis ist mit 1,88 am höchsten (und damit am besten) für Maßnahmenfall 2c, die Maximierung der Behandlung von Abfällen in einem Hochtemperaturverfahren. Danach folgen die Maßnahmenfälle 2a (1,65) und 2b (1,63). Generell läßt sich also feststellen, daß die Maßnahmenfälle, in denen ein Maximum an thermischer Behandlung der Abfälle vorliegt, am besten abschneiden. Maßnahmenfall 3c und 3d liegen mit einem Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis von 1,40 bzw. 1,41 noch vor den Maßnahmenfällen 3a und 3b mit jeweils 1,12. Die Maßnahmenfallgruppe 3 liegt aber noch über dem Planungsnullfall, das bedeutet daß sowohl die Maximierung der thermischen Behandlung als auch die Maximierung der mechanisch-biologischen Behandlung (vorzugsweise mit thermischer Verwertung und Behandlung der Leicht- und Mittelfraktion) dem derzeitigen Status-quo in Österreich zu bevorzugen ist. Maßnahmenfall 1, eine Maximierung der Direktdeponierung von Abfällen, weist zwar die geringsten Kosten auf, der Gesamtwirksamkeitswert und das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis liegt aber deutlich unter den Werten des Planungsnullfalls, das bedeutet, das dieser Maßnahmenfall eine Verschlechterung gegenüber dem Status-quo darstellt.

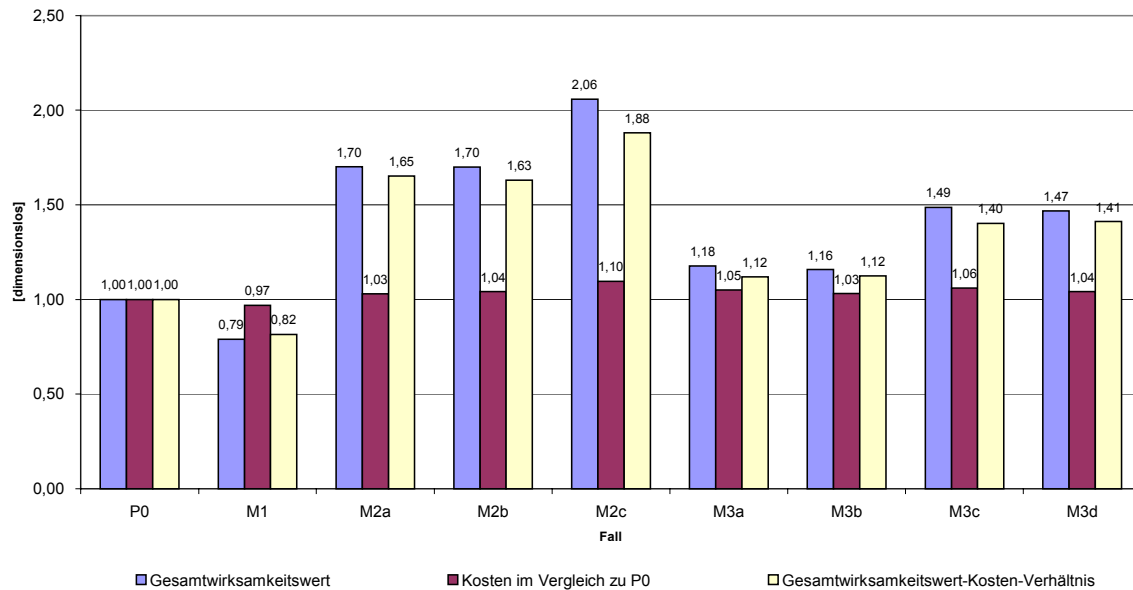


Abbildung 8-3 Gesamtwirksamkeitswert, auf den Planungsnullfall normierte Kosten und Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis der untersuchten Fälle der Bewirtschaftung von Abfällen in Österreich - Mittelwert der Gewichtungen aller Auftraggeber, Betrachtungszeitraum 10.000 Jahre

Zusammengeführte Ergebnisse

Tabelle 8-1: Reihung der Maßnahmenfälle auf Basis der mKWA und der KNA

Fall	P0	M1	M2a	M2b	M2c	M3a	M3b	M3c	M3d
Reihung auf Basis der mKWA	8	9	2	3	1	7	6	5	4
Reihung auf Basis des Kosten-Nutzen-Saldos	8	9	1	2	3	7	6	5	4
Reihung auf Basis der Barwertrate	7	9	1	2	3	8	6	5	4

Generell läßt sich feststellen, daß die Maßnahmenfallgruppe 2 in allen Reihungen die ersten Plätze einnimmt. Danach folgen die Maßnahmenfälle 3d und 3c und 3b. Der Maßnahmenfall 1 ist in jedem Fall der schlechteste, Maßnahmenfall 3a liegt zweimal vor, einmal hinter dem Planungsnullfall.

Innerhalb der Maßnahmenfallgruppe 2 weicht das Ergebnis der mKWA von dem Ergebnis der KNA ab, auf Basis der mKWA liegt Maßnahmenfall 2c vor Maßnahmenfall 2a und Maßnahmenfall 2b, auf Basis der KNA dominiert Maßnahmenfall 2a die Maßnahmenfälle 2b und 2c.

Aufgrund dessen, daß in der Kosten-Nutzen-Analyse vor allem Emissionen in Grundwasser und Böden nicht bzw. nur in Form von allfällig auftretenden Sanierungskosten berücksichtigt wurden und Immissionen, die unter festgelegten Grenzwerten liegen, sich der Bewertung entziehen, wird das Ergebnis der mKWA als das „vollständigere“ Ergebnis angesehen.

## 9 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

### INHALTLICHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im folgenden werden die zu Beginn aufgeworfenen Fragestellungen beantwortet.

- *Inwiefern erzeugen verschiedene Verfahren der Abfallbehandlung und -verwertung letztlich Reststoffe, die der Endlagerqualität nahekommen?*

„Endlagerqualität“ haben Güter, die über kurz-, mittel- und langfristige Zeiträume nur umweltverträgliche Stoffflüsse in die Umwelt abgeben, oder anders ausgedrückt: Güter mit Endlagerqualität sollten nur Stoffflüsse verursachen, die in derselben Größenordnung wie natürliche Stoffflüsse. Als Vergleichswert können Konzentrationen in natürlich vorkommenden Ablagerungen bzw. Gesteinen, also sogenannte geogene Referenzwerte, herangezogen werden.

Im Falle „organischer“ Güter (unbehandelter Restmüll, Rottereststoff, entwässerter Klärschlamm) ist vor allem der hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff dafür verantwortlich, das bei diesen Gütern nicht von Endlagerqualität gesprochen werden kann. Ebenso sind die Emissionen löslicher Salze erst nach einem bis mehreren Jahrhunderten umweltverträglich. Zusätzlich sind die Schwermetallgehalte, sowohl in Restmüll als auch in Rottereststoff, um ein bis zwei Größenordnungen über denen in natürlichen Böden bzw. Gesteinen. Diese Schwermetalle sind unter den sich langfristig einstellenden Deponiebedingungen potentiell mobilisierbar.

Schlacken aus der Müllverbrennung weisen - trotz der deutlichen Reduzierung des organischen Kohlenstoffgehaltes durch die thermische Behandlung – einen im Vergleich zu „ähnlich entstandenen“ Gesteinen (z. B. Pyroklastika) sehr hohen TOC-Gehalt auf.

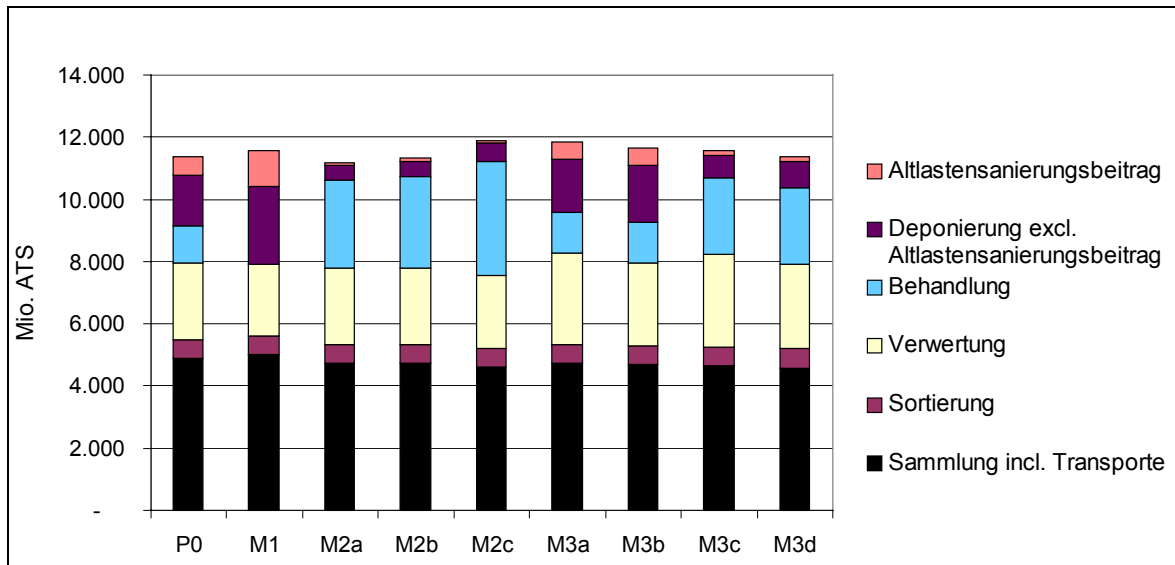
An löslichen anorganischen Salzen ist bei Chlorid und Sulfat mit Nachsorgephasen von zumindest einigen Generationen zu rechnen. Was den Schwermetallgehalt in MVA-Schlacken betrifft, so liegt er ein bis zwei Größenordnungen über natürlichen Gehalten in Gesteinen und ein bis drei Größenordnungen unter entsprechenden Erzgehalten. Aufgrund der Einbindung der Schwermetalle in schwer lösliche Silikatminerale sowie aufgrund der hohen Pufferkapazität sind kurz- und mittelfristig niedrigere Schwermetallemissionen zu erwarten. Langfristig ist durch den Abbau des Carbonatpuffers mit erhöhten Schwermetallkonzentrationen und einer verstärkten Anreicherung der mobilisierten Schwermetalle im Deponieuntergrund zu rechnen.

Durch Verfestigung der Verbrennungsprodukte mit Zement kann die Aufzehrung der Pufferkapazität erheblich verzögert werden – im Modell über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Einer (theoretischen) Endlagerqualität am nächsten kommt das sogenannte „Glasgranulat“ aus dem Von-Roll-RCP-Verfahren. In diesem Produkt liegen die Gehalte an den untersuchten Elementen alle im Bereich natürlicher Gesteine.

- *Welche Kosten für die Behandlung und die Nachsorge entstehen?*

Generell ist festzustellen, daß je höher die Kosten für die Behandlung (Behandlung im Sinne der Konditionierung der Abfälle vor der Deponierung, z. B. in einer Müllverbrennungsanlage) sind, desto niedriger sind die Kosten für die Nachsorge. Einen Überblick über die Kosten gibt die folgende Tabelle, in der die betriebswirtschaftlichen Kosten der untersuchten Fälle nach Subsystemen gegliedert sind.



- *Wie sind die langfristigen Restflüsse in die Umwelt zu bewerten?*

Die Bewertung der Emissionen erfolgte einerseits mit der für diese Studie neu entwickelten modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA), andererseits auch mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA). In der mKWA wurden sowohl die Emissionen, die bei den Prozessen vor der Deponierung entstehen als auch diejenigen Emissionen, die langfristig aus dem Deponiekörper in die verschiedenen Umweltkompartimente gelangen, mit der Methode der kritischen Volumina erfaßt. Aufgrund fehlender Bewertungssätze für Emissionen in Grundwässern und Böden können diese Emissionen bei der KNA lediglich indirekt über die Ermittlung von Sicherungs- und Sanierungskosten erfaßt werden.

- *Welche Ansprüche sollte man in Zukunft an die Qualität abzulagernder Abfälle und die hierfür erforderlichen Behandlungsverfahren stellen?*

Der Qualität abzulagernder Abfälle wird vom Gesetzgeber im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz große Bedeutung zugemessen, was sich in den Zielvorstellungen dieses Gesetzes manifestiert (Vorsorgeprinzip). Zusätzlich wurde 1996 eine Deponieverordnung erlassen, die - mit einer Ausnahme für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle - eine der Deponierung vorangehende thermische Behandlung von Hausmüll ab dem Jahr 2004 (in einigen Bundesländern 2008) praktisch zwingend vorschreibt. Der Gesetzgeber hat also, z.T. in Anlehnung an ausländische Vorbilder, schon früh erkannt, welche vorrangige Rolle die Qualität abzulagernder Abfälle bzw. Reststoffe in bezug auf eventuelle Gefährdungspotentiale für nachfolgende Generationen spielt. Diesen gesetzlichen Regelungen muß zwangsläufig die (wissenschaftlich im übrigen belegbare) Erkenntnis zugrunde liegen, daß erstens Emissionen aus Abfalldeponien ein generationenübergreifendes Problem darstellen und zweitens diese Emissionen langfristig aufgrund der zeitlich begrenzten Funktionstüchtigkeit technischer Maßnahmen (Oberflächen- und Basisabdichtungen, Sickerwasser- und Gasfassungen) nicht kontrollierbar sind, und daher eine potentielle Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen können. Andernfalls wären sowohl die Forderung nach nachsorgefreien Deponien im AWG als auch die Begrenzung des TOC-Gehaltes in abzulagernden Abfällen in der DeponieVO, als eine der logischen Folgemaßnahmen zur Verkürzung eben dieser Nachsorgephase, nicht schlüssig nachvollziehbar.

Obwohl die betriebswirtschaftlichen Kosten der direkten Deponierung unbehandelten Restmülls sehr niedrig sind, konnte sie sich gegenüber den teureren, dafür mittel- und langfristig emissionsärmeren Verfahren in der gesamtwirtschaftlichen Bewertung nicht durchsetzen. Es zeigt sich deutlich der Trend, daß die Verfahren, deren zu deponierende Güter der Endlagerqualität näher kommen, auch in der gesamtwirtschaftlichen Bewertung besser abschneiden als solche, die z. B. TOC-reiche Deponiegüter

produzieren und damit ein größeres Reaktionspotential hinterlassen – daß also thermische Abfallbehandlungsverfahren gesamtwirtschaftlicher günstiger sind als MBA-Verfahren.

- *Welches Ausmaß an Zusatzbehandlungen der Sekundärprodukte ist bei der thermischen Abfallbehandlung am günstigsten?*

Eine der Standardrostfeuerung nachgeschaltete Verfestigung der Verbrennungsprodukte bedingt zwar langfristig etwas geringere Deponieemissionen, was aber gesamtwirtschaftlich den im Vergleich zur Rostfeuerung ohne Nachbehandlung größeren energetischen Aufwand nicht aufwiegt.

Das Ergebnis der Studie zeigt deutlich, daß das Von-Roll-RCP-Verfahren gesamtwirtschaftlich langfristig, trotz hoher Investitionskosten und hohen primären energetischen Aufwandes, aufgrund sehr niedriger Emissionen in den Prozessen vor und vor allem nach der Deponierung besser abschneidet als konventionelle Rostfeuerungen.

## **Methodische Schlußfolgerungen**

---

Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) dient vor allem zur Beantwortung der Fragen, ob ein Projekt, und wenn ja, welche Projektalternative, realisiert werden soll. Ziel der Untersuchung ist der effiziente Einsatz knapper Ressourcen. Hierbei werden nicht nur mit Marktpreisen bewertete Kosten- und Nutzenkomponenten, sondern auch durch die Individuen bereits implizit bewertete Güter miteinbezogen. Gelingt es, alle Kosten- und Nutzenströme, die durch ein Projekt hervorgerufen werden, zu monetarisieren, ist das Ergebnis der KNA eine sehr gut geeignete Grundlage zur Abgabe von Empfehlungen, ob ein Projekt, und wenn ja, welches, durchgeführt werden soll. Übersteigen die Nutzen, die ein Projekt stiftet, die Kosten desselben, ist dieses Projekt positiv zu bewerten.

Obwohl die Ergebnisse aus der Kosten-Nutzen-Analyse und der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA) in ihren Grundaussagen zum gleichen Ergebnis kommen (Bevorzugung von Verbrennungsverfahren) kann daraus nicht geschlossen werden, daß beide Methoden im gegenständlichen Projekt als gleichwertig anzusehen sind. Da die, im Rahmen der KNA, berücksichtigten internen und externen Effekte nur solche sein können, welche monetär bewertbar sind, zeigt sich gerade im gegenständlichen Projekt, daß viele relevante, zumeist negative, externe Effekte durch die KNA nicht berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 7). Insbesondere umweltbezogene negative externe Effekte entziehen sich dem KNA-Kalkül, weil eine Monetarisierung dieser Effekte erhebliche Probleme bereitet.

Als Alternative dazu bieten sich Verfahren an, die geeignet sind auf einer nicht-monetären Basis ein Projekt zu bewerten. Die mKWA, welche vom Projektteam im Rahmen des gegenständlichen Projektes aus der klassischen Kosten-Wirksamkeits-Analyse entwickelt wurde stellt ein solches dar. Dabei werden, aus den im Abfallwirtschaftsgesetz vorgegebenen Zielen der österreichischen Abfallwirtschaft, Unterziele entwickelt, welche nach naturwissenschaftlichen Methoden meßbare Bewertungsgrößen besitzen. Dadurch wird auf der untersten Ebene, also jener der operationalisierbaren Ziele das maximal erreichbare Ausmaß an Objektivität, unter den gegebenen Voraussetzungen, gewährleistet. Die Anwendung von naturwissenschaftlich begründbaren Meßgrößen ermöglicht des weiteren eine Aggregation der Unterziele auf der übergeordneten Zielebene.

Die anschließend erfolgende Gewichtung, welche als das Einbringen eines gesellschaftlichen Willens, aufbauend auf den gesetzlichen Vorgaben, angesehen werden kann, ermöglicht in der Folge eine Aggregation bis hin zur obersten Zielebene, also im vorliegenden Fall der im AWG verankerte Ziele der österreichischen Abfallwirtschaft, welche sich an die Methodik der Nutzwertanalyse anlehnt. Durch die Anwendung der mKWA im gegenständlichen Projekt ist es somit gelungen, nahezu alle in der KNA nicht vorliegenden intangiblen Effekte, insbesondere jene im Zusammenhang mit Einflüssen auf die Umwelt stehenden, zu bewerten.



Nach Ansicht des Projektteams ermöglicht die mKWA nicht nur die Einbeziehung von monetär nicht bewertbaren Effekten. Sie stellt auch eine für den politischen Entscheidungsträger leichter verwertbare Entscheidungsgrundlage dar, als jene welche die klassische Kosten-Wirksamkeits-Analyse liefert, da diese den Entscheidungsträger, zumindest im gegenständlichen Projekt, mit einer Fülle an Daten (Wirksamkeiten für ca. 140 Ziele der untersten Zielebene, sowie Kosten für jeden Maßnahmenfälle) „allein“ lässt.

## Empfehlungen

---

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Studie werden an dieser Stelle Empfehlungen zur zukünftigen Entwicklung der Österreichischen Abfallwirtschaft an die Auftraggeber abgegeben.

- *Der thermischen Restmüll- und Klärschlammbehandlung ist gegenüber anderen Behandlungsverfahren der Vorzug zu geben.*

In der vorliegenden Studie wird nachvollziehbar dargelegt, daß jene von den untersuchten Verfahren gesamtwirtschaftlich am besten abschneiden, die der Endlagerqualität nahekommende Deponiegüter erzeugen (MVA und Hochtemperaturverfahren). Diese Aussage ist nicht an einen bestimmten Zeithorizont gebunden, da das Ergebnis über die Betrachtungszeiträume von Jahren, Jahrzehnten, Jahrhunderten oder Jahrtausenden hinweg unverändert bleibt. Je länger der Betrachtungszeitraum gewählt wird, desto deutlicher wird der Vorteil thermischer Verfahren. Die Ergebnisse des Projektes zeigen, daß Hochtemperaturverfahren, vor allem das als Vertreter dieser Verfahrensgruppe untersuchte Von-Roll-RCP-Verfahren, ein Potential zur Erzeugung von Deponiegütern mit hoher Qualität besitzen und daher gesamtwirtschaftlich sogar besser abschneiden als konventionelle thermische Verfahren. Der großtechnische Einsatz dieses Verfahrens ist zur Zeit noch nicht sehr verbreitet, weshalb die verwendeten Daten als nicht 100%ig abgesichert bezeichnet werden können. Das Verfahren ist zwar mit hohen Investitions- und Betriebskosten behaftet, diese werden aber durch geringe Nachsorgekosten, sowie die im Vergleich zu anderen Verfahren sehr niedrigen Deponieemissionen gesamtwirtschaftlich kompensiert. Da außerdem damit zu rechnen ist, daß die Kosten der Hochtemperaturverfahren mit der Weiterentwicklung sinken, stellt sich die Entwicklung der Abfallbehandlung in Richtung Hochtemperaturverfahren als realistische Alternative für die Zukunft dar, der verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

- *Die Restmüll- und Klärschlammbehandlung in mechanisch-biologischen Anlagen (MBA) ist nur mit möglichst weitgehender thermischer Verwertung der abgetrennten Fraktionen sinnvoll.*

Die mechanisch-biologische Behandlung von Restmüll und Klärschlamm ist der thermischen Behandlung, sowohl was die Emissionen als auch die gesamtwirtschaftliche Situation betrifft unterlegen, schneidet aber im Vergleich zum Planungsnullfall (Weiterführung des durchschnittlichen österreichischen Status-quo) besser ab.

Die derzeit in Österreich oft geübte Praxis, die im Zuge der mechanischen Stufe abgetrennten Fraktionen ebenfalls zu deponieren, entspricht weder den Zielen des AWG noch denen des Verfahrens. Je weitergehender die thermische Verwertung abgetrennter Fraktionen betrieben wird, desto besser wird das gesamtwirtschaftliche Abschneiden des Verfahrens.

Der gesamtwirtschaftliche Vergleich der Leichtfraktionsverwertung in den industriellen Anlagen Wirbelschicht und Zementdrehrohr ergibt keinen signifikanten Unterschied. Der Variante Wirbelschicht ist aber aus stoffstrompolitischen Überlegungen eher der Vorzug zu geben, da die durch das Zementdrehrohr hervorgerufene Schwermetalldissipation in die Umwelt - unzureichende Quecksilberrückhal-



tung aufgrund nicht entsprechend ausgelegter Rauchgasreinigungstechnologie in Zementwerken und vor allem die praktisch nicht steuerbaren langfristigen Emissionen aus Zementprodukten - in dieser Hinsicht negativ zu bewerten sind.

- *Deponieverordnungsrelevante Empfehlungen*

Laut Vorgaben der Deponieverordnung dürfen ab dem Jahr 2004 nur noch solche Abfälle zur Ablagerung gelangen, welche einen maximalen TOC von 5 M-% aufweisen, also thermisch vorbehandelt wurden, oder aber einen so geringen Heizwert aufweisen, daß sie trotz höheren TOC-Gehaltes nach der Rotte in mechanisch-biologischen Anlagen auf Massenabfalldeponien abgelagert werden dürfen.

*Der Termin 2004 ist - soweit noch möglich - unbedingt einzuhalten.*

Da die Ergebnisse dieser Studie eindeutig zeigen, daß die Direktdeponierung unbehandelten Restmülls und Klärschlammes schon bei kurzen Betrachtungszeiträumen die ungeeignetste Variante darstellt, sollte der Termin 2004 unbedingt eingehalten und Übergangsfristen zur ordnungsgemäßen Ablagerung laut Deponieverordnung so kurz wie möglich gehalten werden.

*Die Ausnahmeregelung für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle muß überdacht werden.*

Durch mechanisch-biologische Vorbehandlung kann zwar das organische Reaktionspotential im Vergleich zu unbehandeltem Restmüll reduziert werden, doch belegt die Studie eindeutig, daß die fast vollständige Reduktion dieses Reaktionspotentials durch thermische Behandlung mit einem gesamtwirtschaftlich deutlich besseren Abschneiden korreliert werden kann und somit auch die Ziele des AWG durch thermische Behandlung besser erfüllt werden.

*Die derzeit vorgeschriebene Praxis Deponien mit aufwendigen Oberflächenabdichtungen auszustatten muß überdacht werden.*

Gas- und Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien stellen ein langfristiges Problem dar, welches auch durch Deponieabdichtungsmaßnahmen nur vorübergehend gelöst werden kann, da man davon ausgehen muß, daß jegliche Abdichtung nur eine begrenzte Lebensdauer aufweist. Die „Kapselung“ einer Deponie bedeutet also nur eine Verschiebung des Emissionsproblems in die Zukunft. Die Sinnhaftigkeit einer Oberflächenabdichtung wird in Frage gestellt, wenn man davon ausgeht, daß ohne oberflächliche Abdichtung mehr Sickerwasser in den Deponiekörper eindringen könnte, was bei gleichbleibenden hydraulischen Eigenschaften des Abfalls eine Erhöhung der über das Sickerwasser transportierten Schadstofffracht zu Folge hätte. Solange also die Basisabdichtung intakt ist, könnte ohne Oberflächenabdichtung mehr belastetes Sickerwasser einer kontrollierten Entsorgung zugeführt und der Deponiekörper daher unter „sicheren Bedingungen“ weitgehender entfrachtet werden.

## 10 LITERATUR

---

- AGW (1992): Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke (Projekt EKESA). Endbericht. MBT Umwelttechnik AG und EAWAG, Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt, AMT FÜR GEWÄSSERSCHUTZ UND WASSERBAU DES KANTONS Zürich (Auftraggeber), Zürich und Dübendorf.
- AWG: Abfallwirtschaftsgesetz. BGBl. Nr. 325/1990.
- BACCINI, P. & BRUNNER, P.H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- BELEVI, H. & BACCINI, P. (1989): Long-Term Behaviour of Municipal Solid Waste Landfills. Waste Management & Research, 7/89: 43 - 56.
- DeponieVO: Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung). BGBl 1996/164.
- GUA & IFIP (1998): Gesamtwirtschaftliche Kosten und Nutzen der Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtungen in Österreich. Endbericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, unveröffentlicht.
- MARTICORENA, B., ATTAL, A., CAMACHO, P., MANEM, J., HESNAULT, D. & SALMON, P. (1993): Prediction Rules for Biogas Valorisation in Municipal Solid Waste Landfills, Wat. Sci. Tech., 27/2.