

# **Deponieverhalten mineralischer Abfälle auf Deponien der Klassen I und II nach 2005**

**Adi Heindl<sup>1</sup> und Soraya Heuss-Aßbichler<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien FES, Schwabach

<sup>2</sup>Department für Geo- und Umweltwissenschaften, LM-Universität München

## **Dumping behavior of mineralized waste in landfills of dump category I and II after 2005**

### **Abstract**

In Bavaria, annually about 200.000 t of mineralized waste are disposed in landfills of dump category I and II. They mainly consist of wastes generated by the construction industry (Waste code 17). The other main parts of the waste accrue by burning and pyrolysis (WC 19), by waste incineration (WC 10) or as road rubbish (WC 20).

In most cases these wastes are not allowed to be landfilled in dump category 0, due to their leachability of one or some of the components like TOC, BTEX, HC; HVHC, PAH, PCB, ammonium, arsenic, lead, chromium (Cr-VI), fluoride or zinc. In general, the leachates of dumped mineralized wastes accomplish the guideline for affluent treatment. However, an unfavorable disposal of charged wastes within the dump may dramatically increase the mass of pollutants extracted with the liquid phase. The management of waste disposal in landfills may positively influence the emission properties of the landfill and avoid incrustation within the pipelines. For example wastes with low pollution charge or even high adsorption capacity, e.g. substances with oxide or hydroxide surfaces, should be disposed at the bottom of the landfill, and leachable waste at the top. Possible problems may arise when tapping the full potential for TOC in the dump for one specific type of organic group, e.g. BTEX, HVHC, PAH, PCB. Due to their partially volatile and soluble properties, BTEX and HVHC may migrate and thus may be emitted to the atmosphere.

### **Abstract deutsch**

Jährlich werden in Bayern ca. 200.000 t mineralischer Abfälle auf Deponien der Klassen I und II abgelagert: ca. 65% aus der Gruppe der „Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 17), ca. 20% Abfälle aus der Verbrennung und Pyrolyse von Abfällen (AS 19), sowie zu je 5% Abfälle aus thermischen Prozessen (AS 10) und Straßenkehrschutt (AS 20). In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle bewirken erhöhte Eluatkonzentrationen eines oder einiger weniger Parameter wie TOC, BTEX, KW, LHKW, PAK, PCB, Ammonium, Arsen, Blei, Chrom (zumeist als Chrom-VI), Fluorid oder Zink, dass eine Verwertung oder eine Ablagerung mineralischer Abfälle auf Deponien der Klasse 0 nicht zulässig ist. In der Regel ist die Sickerwasserqualität mineralischer Abfälle ausreichend, um es ohne Vorbehandlung in einer Kläranlage behandeln zu können. Eine ungünstige Ablagerung höher belasteter Abfälle, insbesondere bzgl. der Parameter Arsen und Chrom-VI, kann jedoch dazu führen, dass die Anforderungen für eine Indirekteinleitung nicht eingehalten werden können. Die Sickerwasserqualität von Deponien mineralischer Abfälle kann optimiert werden, wenn gering belastete Abfälle basisnah und höher belastete Abfälle oberflächennah abgelagert werden. Dadurch lassen sich ebenso Inkrustatio-

nen in Sickerrohren vermeiden. Beispielsweise sollten Abfälle mit gutem Adsorptionsvermögen, wie z.B. Abfälle, die größere Anteile Metalloxid- bzw. Hydroxidoberflächen enthalten, basisnah abgelagert werden. Auch sollte eine alleinige Ausschöpfung des Zuordnungswertes für den TOC von 1 bzw. 3 % durch eine einzige spezielle organische Stoffgruppe im Abfall (z.B. BTEX, LHKW, PAK, PCB) vermieden werden. So sind BTEX und LHKW teilweise volatil und bedingt wasserlöslich und können ohne Gaserfassung über den Gaspfad bzw. Sickerwasserpfad an die Atmosphäre abgegeben werden.

### Keywords

mineralische Abfälle, Deponien der Klassen I und II, Deponieverhalten

## 1 Einführung

Das Abfallablagerungsverhalten auf Deponien hat sich in Deutschland seit Juni 2005 entscheidend verändert, da die unbehandelte Ablagerung von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Klärschlämmen und anderen Abfällen mit hohen organischen Anteilen nicht mehr zulässig ist [ABFABLV, 2001]. Es ist mit einer deutlichen Erhöhung des Anteils mineralischer Abfälle aus thermischen Prozessen (Aschen aus der Hausmüllverbrennung) zu rechnen, die verwertet oder auf Reststoffdeponien abgelagert werden. Darüber hinaus fallen weiterhin Abfälle aus chemischen Prozessen, metallhaltige Abfälle und Bau- und Abbruchabfälle an.

Die „*Entscheidung des Rates zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen und Abfalldeponien*“ sieht gegenüber der Deponieverordnung zusätzliche Untersuchungsparameter bzw. teilweise eine Veränderung der Zuordnungswerte vor [RICHTLINIE 1999/31/EG, 2003] (Tabelle 1 und 2). Daher ist bei der Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht eine Verschiebung bei den bisherigen Zuordnungen von Abfällen zu den oberirdischen Deponieklassen 0, I, II und III zu erwarten.

**Tabelle 1** Zuordnungswerte für Feststoffe (Angaben in Massen-%)

Parameter (mg/l)	AbfAbIV		EU DepR - nicht gefährliche Abfälle (ngA)*
	Deponiekategorie I	Deponiekategorie II	
Glühverlust	≤ 3	≤ 5	
TOC des Trockenrückstandes der Originalsubstanz	≤ 1	≤ 3	≤ 5*
Extrahierbare lipophile Stoffe der Originalsubstanz	≤ 0,4	≤ 0,8	-
pH	-	-	≥ 6*
Säureneutralisationskapazität	-	-	zu ermitteln*

**Tabelle 2** Zuordnungswerte für Eluat, Angaben in mg/l

Parameter/(mg/l)	AbfAbIV		EU-DepR - nicht gefährliche Abfälle (ngA)*
	Deponieklasse I	Deponieklasse II	
pH/-	5,5-13,0	5,5-13,0	-
Leitf./( $\mu$ S/cm)	$\leq 10.000$	$\leq 50.000$	-
TOC	$\leq 20$	$\leq 100$	$\leq 80/DOC$
Phenole	$\leq 0,2$	$\leq 50$	-
Antimon (Sb)	-	-	$\leq 0,07$
Arsen (As)	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$
Barium (Ba)	-	-	$\leq 10$
Blei (Pb)	$\leq 0,2$	$\leq 1$	$\leq 1$
Cadmium (Cd)	$\leq 0,05$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Chrom (Cr)	-	-	$\leq 1$
Chrom-VI (Cr-VI)	$\leq 0,05$	$\leq 0,1$	-
Kupfer (Cu)	$\leq 1$	$\leq 5$	$\leq 5$
Molybdän (Mo)	-	-	$\leq 1$
Nickel (Ni)	$\leq 0,2$	$\leq 1$	$\leq 1$
Quecksilber (Hg)	$\leq 0,005$	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$
Selen (Se)	-	-	$\leq 0,05$
Zink (Zn)	$\leq 2$	$\leq 5$	$\leq 5$
Fluorid	$\leq 5$	$\leq 25$	$\leq 15$
Ammoniumstick-	$\leq 4$	$\leq 200$	-
Cyanide, leicht	$\leq 0,1$	$\leq 0,5$	-
AOX	$\leq 0,3$	$\leq 1,5$	-
Abdampfrück-	$\leq 3.000$	$\leq 6.000$	$\leq 6.000$
Chlorid	-	-	$\leq 1.500$
Sulfat	-	-	$\leq 2.000$

\*) gilt für die Ablagerung von gefährlichen Abfällen auf Deponien für nicht gefährliche Abfälle; Wird der TOC-Wert nicht eingehalten, so kann von der zuständigen Behörde ein höherer Grenzwert zugelassen werden, sofern für den DOC der Grenzwert von 80 mg/l eingehalten wird.

Für diese neu entstehenden Deponietypen bzw. Deponieabschnitte fehlen bislang Erfahrungen über das Deponieverhalten. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund des begrenzten Anteils organischer Inhaltsstoffe eine Deponiegasbildung durch mikrobielle Abbaureaktion nicht mehr erfolgen wird, die Belastung des Sickerwassers mit organischen Inhaltsstoffen gering sein wird bzw. Setzungen als Folge eines biologischen Abbaus von organischen Abfällen nur in einem geringen Umfang auftreten. Teile der mineralischen Abfälle liegen in thermodynamisch instabilen Phasen vor, und können unter Deponiebedingungen ( $\sim 25$  °C, 1 bar, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Kohlendioxidangebot in der Atmosphäre) ein hohes Reaktionspotential aufzeigen. Die verschiedenen Lösungsprozesse sowie Um- und Neumineralisationen in den mineralischen Abfällen kön-

nen eine Reihe unterschiedlicher Prozesse verursachen, wie Wärmeentwicklung, abiotische Gasbildung (z.B. Wasserstoff- oder Ammoniakbildung) oder ein Austrag löslicher mineralischer Anteile (z.B. Neutralsalze oder toxische Schwermetallverbindungen). Speziell die Fracht der im Sickerwasser gelösten Spezies ist ausschlaggebend für die Zeitdauer der Nachsorgephase.

Im Rahmen der ab 2005 zu erwartenden Verlagerungen im Abfallaufkommen soll daher sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen die Reduzierung der Belastung des Sickerwassers mit Schadstoffen im Vordergrund stehen. Für eine langfristig sichere und gleichzeitig kostengünstige Abfallablagerung spielen die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Abfalltypen und deren Auswirkung auf das Sickerwasser eine zentrale Rolle. Anzustreben ist, die Abfälle derart einzubauen, dass ihre Kapazität, Schadstoffe im Deponiekörper langfristig fixieren zu können, verstärkt wird, so dass die Emissionswerte bereits während der Betriebsphase gering sind und damit die Nachsorgephase deutlich verkürzt werden kann. Nach §3 Absatz 4 der AbfAbIV ist die „*Vermischung von Abfällen untereinander oder mit anderen Materialien zur Erreichung der Zuordnungskriterien des Anhanges 1 für die jeweilige Deponieklasse*“ untersagt. Eine gezielte gemeinsame Ablagerung von Abfällen in einzelnen Deponieabschnitten bzw. ein vermischter Einbau, z.B. durch Schichteneinbau oder Vermischung vor dem Einbau, ist von diesem Vermischungsverbot jedoch nicht betroffen, solange die in Betracht zu ziehenden Abfälle die Zuordnungskriterien jede für sich erfüllen.

Ziel dieses Vorhabens ist es, mittels Bilanzierung Art und Menge der mineralischen Abfälle zu ermitteln, die aktuell und zukünftig auf Deponien der Klassen I und II abgelagert werden. Durch die Charakterisierung der Abfälle und auf Basis ihres Elutionverhaltens soll eine Strategie zur Ablagerung der Abfälle erarbeitet werden, um 1) eine abiotische Gasproduktion zu verhindern, 2) den Schadstoffaustrag über den Sickerwasserpfad zu minimieren und 3) die Sickerwasserqualität zu optimieren und somit eine kostengünstige Entsorgung zu ermöglichen.

## 2 Datenerhebung

Zur Beschreibung des Ablagerungsverhaltens mineralischer Abfälle wurden folgende Deponien ausgewählt:

- es war bekannt, dass dort in den letzten Jahren größere Mengen mineralischer Abfälle abgelagert wurden, oder
- es liegen Bauabschnitte vor, in denen mineralische Abfälle getrennt von Hausmüllablagerungen bzw. auf bereits weitgehend inertisierten Hausmüllabfällen eingebaut werden.

Als mineralisch wurden nur diejenigen Abfälle eingestuft, von denen zu erwarten ist, dass sie seit dem 01.06.2005 noch abgelagert werden können. Insgesamt wurden Deponiejahrbücher von 48 bayerischen Hausmülldeponien auf die Mengenangaben mineralischen Abfällen hin untersucht.

Die Abfälle wurden – gemäß den Deponiejahrbüchern - in folgende Gruppen unterschieden: Hausmüll, Sperrmüll, Hausmüll ähnlich, kommunaler Klärschlamm, Reststoffe aus Kompostierung, Reststoffe aus Sortierung, sonstige Abfälle und Fremdmüll. Bei der Gruppe Fremdmüll handelt es sich um Abfall aus benachbarten Landkreisen bzw. Abfallzweckverbänden. Die Gruppe der sonstigen Abfälle sind, besonders in den aktuelleren Deponiejahrbüchern, oftmals in die einzelnen Abfallarten der Abfallverzeichnisverordnung nach AVV aufgeschlüsselt [AVV, 2001]. Hierdurch war eine Unterscheidung zwischen überwachungsbedürftigen und besonders überwachungsbedürftigen Abfällen möglich. Aus der Aufschlüsselung der einzelnen Abfallarten kann eine Zuordnung in überwiegend mineralische Abfälle und solche mit erhöhten Anteilen organischer Inhaltsstoffe durchgeführt werden. Für die Einstufung in „mineralischer Abfall“ bzw. „nicht mineralischer Abfall“ war der organische Anteil im Feststoff (TOC) von ca. < 3% nicht ausschließlich entscheidend. Zusätzlich war zu prüfen, ob ein Abfall mit einem organischen Anteil größer 3% auch nach 2005 auf Deponien der Klassen I und II abgelagert werden kann. In der Bilanz wurden folgende Abfallgruppen nicht berücksichtigt:

- Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen und Pappe (AS 03)
- Abfälle aus organisch-chemischen Prozessen (AS 07)
- Ölabbfälle und Abfälle aus flüssigen Brennstoffen (außer Speiseöl und Ölabbfälle, die unter AS 05, AS 12 und AS 19 fallen) (AS 13)
- Abfälle aus organischen Lösemitteln, Kühlmitteln und Treibgasen (außer AS 07 und AS 08) (AS 14)
- Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte (AS 17 03)
- Holz (20 01 37 und 20 01 38), biologisch abbaubare Abfälle (20 20 01), gemischte Siedlungsabfälle (20 03 01), Marktabfälle (20 03 02), Sperrmüll (20 03 07), Siedlungsabfälle (20 03 99)

Insgesamt entfielen bei der Erfassung der aufgeschlüsselten Abfälle in den Jahren 1999 bis 2003 80 % der Gesamtmenge auf mineralische Abfälle und 20 % auf nicht mineralische Abfälle. Bei den als nicht mineralisch eingestuften Abfällen entfielen 15 % auf gemischte Siedlungsabfälle (20 03 01) und ca. 4 % auf Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte (17 03). Das restliche 1 % teilte sich auf die übrigen genannten Abfallarten auf. Im Falle von kohlenteerhaltigen Bitumengemischen (Straßenaufbruch auf Abfallforschungstage 2006 [www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)

Asphaltbasis, 17 03 01\*) ist bei „geringfügiger Überschreitung des Glühverlusts oder Feststoff-TOC“ eine Ablagerung nach der aktuell gültigen AbfAbIV möglich. Für diese Stoffe gilt der Zuordnungswert für „extrahierbaren lipophilen Stoffe der Originalsubstanz“ bzgl. DK I und II nicht. Da diese Abfälle oftmals erhöhte PAK-Gehalte im Feststoff aufweisen, ist eine zukünftige Ablagerung zu diskutieren.

### **3 Ablagerung mineralischer Abfallarten**

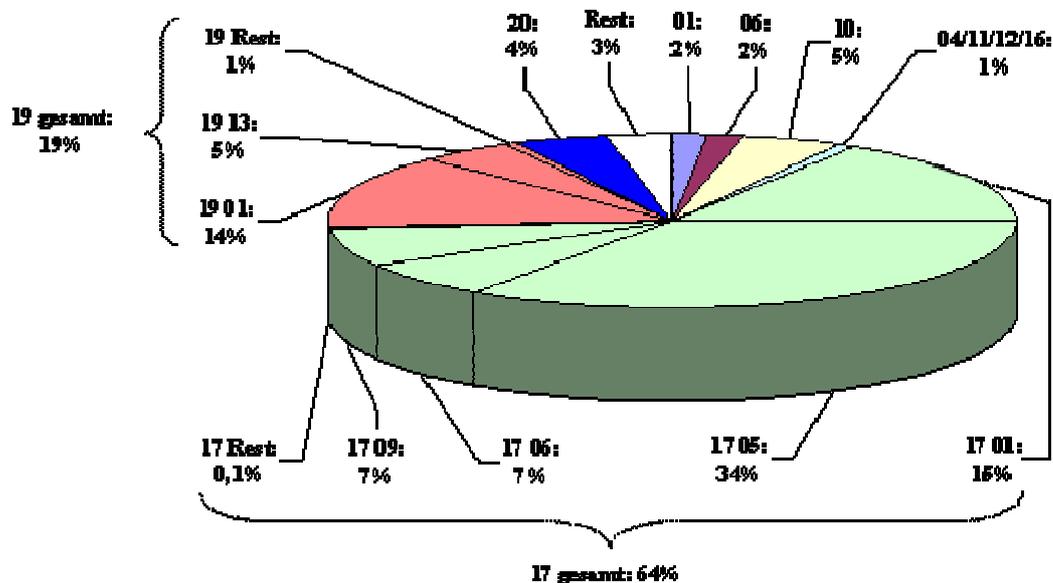
#### **3.1 Abfallarten und -mengen**

Zwischen 1999 und 2003 wurden in Bayern jährlich ca. 200.000 t mineralischer Abfälle und ca. 370.000 t sonstiger Abfälle abgelagert (Deponien der Klassen I und II). Ablagerungen auf Deponien der Klassen 0 und III bzw. Verwertungsmaßnahmen wurden nicht berücksichtigt. Die jährlich anfallenden Mengen können starken Schwankungen unterliegen. Künftig ist von einer jährlichen Mindestmenge von ca. 100.000 t und einer jährlichen Maximalmenge von ca. 270.000 t auszugehen. Zwischen den einzelnen Deponien variiert die Menge der mineralischen Abfälle jährlich zwischen 1.000 und 10.000 t. Der Durchschnitt liegt bei ca. 5.000 t jährlich. Aufgrund von örtlich und saisonal schwankenden Straßenbau-, Sanierungs- und Abbruchtätigkeiten können insbesondere in der AS 17 starke jährliche Schwankungen entstehen.

Mineralische Abfälle, die bislang und auch zukünftig auf Deponien der Klassen I und II abgelagert werden, sind zu ca. 2/3 der Gruppe „Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten), (AS 17)“ zuzuordnen. Hier sind vor allem die Untergruppen „Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik (AS 17 01)“, „Boden (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten), Steine und Baggergut (AS 17 05)“, „Dämmmaterial und asbesthaltige Baustoffe (AS 17 06)“ sowie „Sonstige Bau- und Abbruchabfälle (AS 17 09)“ vertreten. Etwa die Hälfte der Menge der Abfälle aus der Gruppe 17 ist dem Abfallschlüssel 17 05 (Boden und Steine, Baggergut und Gleisschotter) zuzuordnen. Das restliche Drittel der abgelagerten mineralischen Abfälle verteilt sich zu ca. 20 % auf den Abfallschlüssel 19 (Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke, und hier in erster Linie auf Abfälle aus der Verbrennung und Pyrolyse von Abfällen) und zu je ca. 5 % auf die Abfallschlüssel 10 (Abfälle aus thermischen Prozessen) und 20 (Siedlungsabfälle, und hier in erster Linie Straßenkehricht). Die prozentualen Anteile der jeweiligen Abfallschlüssel sind in Abb. 1 dargestellt.

### 3.2 Eluat und Sickerwasserverhalten

Die mineralischen Abfälle besitzen in der Regel nur geringe Gehalte organischer Inhaltsstoffe und weisen daher entsprechend geringe Glühverluste, TOC-Gehalte und extrahierbare lipophile Stoffe im Feststoff auf. Ein erhöhter Glühverlust in Einzelproben bzw. für Mischabfälle ist nicht notwendigerweise auf organische Anteile zurückzuführen.



**Abbildung 1** Prozentuale Aufteilung der abgelagerten mineralischen Abfälle in 48 Hausmülldeponien nach dem Abfallschlüssel

Bei einzelnen Abfallarten sind spezifische organische Stoffgruppen wie BTEX, Kohlenwasserstoffe, LHKW, PAK und PCB auffällig. Für diese organischen Stoffgruppen sind nach AbfAbIV ebenso wie für Schwermetalle keine Zuordnungswerte vorgesehen, jedoch nach LAGA M20 [LAGA], dem LfU-LfW-Merkblatt zur „Umsetzung der Deponieverordnung für Inertabfalldeponien“ (DK 0) [LfU-LfW-MERKBLATT, 2003A] und dem LfU-LfW-Merkblatt „Anforderungen an die Entsorgung von Gleisschotter“ [LfU-LfW-MERKBLATT, 2003B]. Hierdurch kann eine Verwertung bzw. Ablagerung dieser Materialien auf Inertabfalldeponien unterbunden werden. Bei Bau- und Abbruchabfällen können durch Separierung ausgewählter Bestandteile diese Zuordnungswerte eingehalten werden, mit Ausnahme von kohlenteeerhaltigen Bitumengemischen (17 03 01\*), Kohlenteeer und teeerhaltigen Produkten (17 03 03\*). Für diese Abfälle treten PAK-Gehalte bis 2.000 mg/kg und höher auf. Diese Stoffgruppen zeigen eine geringe Wasserlöslichkeit. Daher trägt der organische Anteil im Feststoff nur geringfügig zur TOC im wässrigen Eluat bei. Nur einzelne LHKW, wie z.B. Dichlormethan, sind begrenzt wasserlöslich, so dass in Einzelfällen ein AOX oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 mg/l ermittelt werden kann. Im Falle persistenter organischer Schadstoffe (POP), PCB und DDT, ist der Gehalt in Abfällen auf maximal 50mg/kg beschränkt [MBU, 2004]. Bei den im Rahmen dieses

Vorhabens erfassten Abfällen, betrug der Maximalgehalt für PCB 1 mg/kg und für DDT 25 mg/kg.

Die Elution der Schwermetalle ist bei der Mehrzahl der untersuchten Stoffgruppen weit unterhalb der Zuordnungswerte für die Deponieklasse I, auch bei mit Schwermetallen belasteten Böden. Bei produktspezifischen Abfällen aus den Abfallschlüsseln 10 und 12 waren im Eluat zum Teil erhöhte Blei-, Nickel- und Zinkkonzentrationen vertreten. Insbesondere bei Rost- und Kesselaschen (Holzaschen) aus dem AS 10 können erhöhte Belastungen an Chrom, oftmals in Form des Chromats, auftreten. Rost- und Kesselaschen aus dem Schlüssel 19 sowie unterschiedliche Schlämme aus dem AS 19 können je nach Herkunft unterschiedliche Schwermetallbelastungen im Eluat aufweisen. Das Eluat des untersuchten Straßenkehrichts (AS 20 30 03) erwies sich bzgl. der Schwermetalle als sehr gering belastet. Die weiteren Zuordnungsparameter der AbfAbIV (Fluorid, Ammoniumstickstoff und Cyanide, leicht freisetzbar) waren durchgängig an der Bestimmungsgrenze bzw. maximal in der Größenordnung des Zuordnungswertes für die DK I. In nur wenigen Fällen war aufgrund dieser Parameter eine Zuordnung in DK II erforderlich. Der wasserlösliche Anteil kann bei einigen Rost- und Kesselaschen die Zuordnungswerte von 3 bzw. 6 Masse-% erreichen und in Einzelfällen auch übersteigen. Bei der überwiegenden Mehrheit der Abfälle liegt er jedoch deutlich unter 1 %.

Der überwiegende Anteil der abgelagerten mineralischen Abfälle verhält sich bzgl. der Mehrzahl der Zuordnungsparameter inert. Meist ist nur bzgl. eines oder weniger Parameter eine Zuordnung in DK I bzw. DK II erforderlich. Bei der mengenmäßig größten Gruppe der Abfälle aus dem AS 17 waren primär die organischen Stoffgruppen GV bzw. TOC, Kohlenwasserstoffe und PAK dafür verantwortlich, dass eine Ablagerung auf Deponien der DK I oder II notwendig wurde. Eine gemeinsame Ablagerung von verschiedenen Abfällen, bei denen jeweils unterschiedliche Parameter eine Deponierung auf Deponien der DK I bzw. II erforderlich machen, kann zu einem Verdünnungseffekt beitragen. Dies bewirkt, dass - bezogen auf den gesamten Abfallkörper - die Zuordnungswerte für die Feststoff- bzw. für Eluatparameter nur zu maximal 10 bis 20 % ausgeschöpft wird.

Die Sickerwasserqualität mineralischer Abfälle kann bislang nur in Einzelfällen konkret beurteilt werden, da in der Mehrzahl der Deponien mineralische Abfälle gemeinsam mit Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen abgelagert wurden. Auf Deponien, auf denen seit längerer Zeit keine Hausmüllablagerung stattfand, bzw. überwiegend mineralische Abfälle abgelagert wurden, wurde für die Sickerwässer eine gute Qualität festgestellt. Organische Inhaltsstoffe in Form des CSB und AOX liegen unterhalb der Anforderungswerte von 400 bzw. 0,5 mg/l für eine Indirekteinleitung nach Anhang 51 der Abwasserverordnung [ANHANG 51, 2004]. Nur in wenigen Deponien wurde die Bestimmungsgrenze für organische Stoffgruppen, wie z.B. PAK, im Sickerwasser über-

schritten. Die Schwermetallgehalte im Sickerwasser sind durchgängig als gering anzusehen und liegen in der Regel deutlich unterhalb der Anforderungskriterien des Anhangs 51. Bei einer gemischten Ablagerung mit Hausmüll waren zum Teil die Parameter Arsen (bedingt durch das reduzierende anaerobe Milieu beim mikrobiellen Abbau) und Chrom erhöht. Zum jetzigen Erkenntnisstand ist davon auszugehen, dass Sickerwasser aus rein mineralischen Abfällen in der Regel die Anforderungen für eine Indirekteinleitung erfüllen wird.

### **3.3 Deponieverhalten**

Eine abiotische Gasbildung bei mineralischen Abfällen, insbesondere von Ammoniak und Wasserstoff, ist im stark alkalischen Milieu denkbar. Wasserstoffbildung wurde bislang nur auf einer Monodeponie für MV-Schlacken beobachtet (MAGEL, 2003). Die Bildung von Schwefelwasserstoff ist bei der gemeinsamen Ablagerung von Gipsabfällen mit biologisch abbaubaren Abfällen möglich, wurde jedoch bisher nur in Einzelfällen festgestellt.

Deponieabschnitte mit weitgehend umgesetzten Hausmüllabfällen bzw. überwiegend mineralischen Anteilen weisen bislang eine geringe Tendenz zur Inkrustation auf. Aufgrund fehlender organischer Stoffumsetzungen wird im Abfallkörper mineralischer Abfälle kein Kohlendioxid gebildet und damit auch kein Carbonat für die Ausfällung von Kalk. Lösliche anorganische Carbonatanteile werden in den Eluaten der Abfälle in der Regel nicht ermittelt, sind jedoch bei speziellen Abfallarten, insbesondere in Holzaschen (Kaliumcarbonat, Pottasche), anzutreffen. Gleiches gilt für lösliche sulfatische Anteile, die zu einer Ausfällung von Gips beitragen können. Lediglich in einer Quartalsprobe wurde im Sickerwasser das Löslichkeitsprodukt von Gips knapp erreicht. Daher ist generell nur in Ausnahmefällen mit Gipsinkrustationen zu rechnen, wenn größere Mengen gipshaltiger Abfälle (Baustoffe auf Gipsbasis (AS 1708), Abfälle aus der Herstellung von Zement, Branntkalk, Gips und Erzeugnissen aus diesen (AS 10 13) abgelagert werden.

Temperaturerhöhungen traten nur im Zusammenhang mit der Ablagerung von alkalischen Rost- und Kesselaschen auf. Dabei stiegen die Temperaturen an der Deponiebasis nicht über 50 °C an. Setzungen, die auf die Ablagerung rein mineralischer Abfälle zurückzuführen sind, waren bislang nicht erkennbar.

Mikrobielle Stoffumsetzungen und eine damit verbundene Deponiegasproduktion sind bei einer Limitierung des TOC auf 3 % nicht zu erwarten, zumal der Maximalwert in vielen Abfällen weit unterschritten ist und daher ein starker Verdünnungseffekt gegeben ist. Eine Deponiegasbildung wurde bislang bei Abfällen mit organischen Anteilen kleiner gleich 3 % nicht beobachtet. Die Umsetzung der abbaubaren organischen Restmengen ist zu gering, um zu einem merklichen Anteil an Methangas zu führen (HEINDL et al.,

2004). Eine Deponiegaserfassung wird daher für mineralische Bauabschnitte nicht erforderlich sein.

### **3.4 Umsetzung der EU-Deponierichtlinie**

Die Umsetzung der EU-Deponierichtlinie in nationales Recht kann bzgl. der Zuordnung der Abfälle zu den Deponieklassen zu Verschiebungen führen. Insbesondere für den Parameter Antimon und Arsen ist eine Zuordnung in höhere Deponieklassen zu erwarten. Aber auch Abfälle, die bislang noch den Anforderungen der DK 0 genügten, können durch die strengen Vorgaben für den Parameter Antimon zukünftig als DK I eingestuft werden.

## **4 Vorläufiger Leitfaden zur Ablagerung mineralischer Abfälle**

Aufgrund des inerten Verhaltens einer Vielzahl von mineralischen Abfällen in Bezug auf eine Alterung und wässrige Elution sind für eine Ablagerung nur wenige Kriterien zu erfüllen, um folgende Vorgaben zu erreichen:

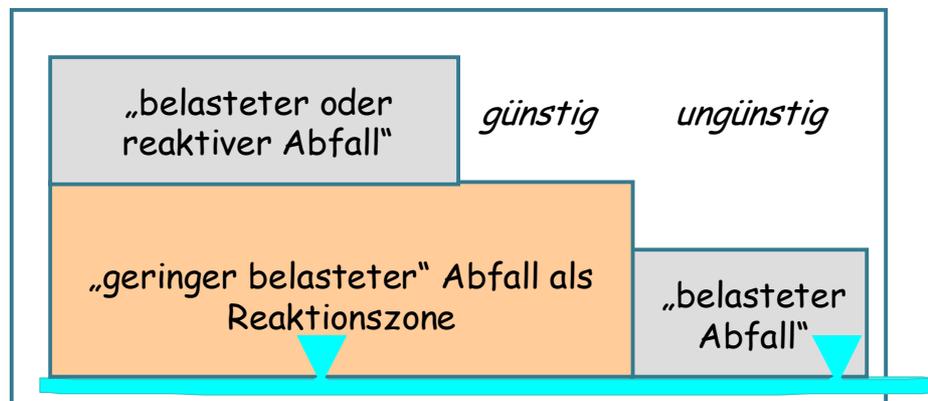
- keine abiotische Gasbildung
- eine nur geringe Ausbildung von Inkrustationen in den Sickerrohren
- eine gute Sickerwasserqualität, die den Anforderungen einer Indirekteinleitung genügt
- eine möglichst kurzfristige Stilllegungs- und Nachsorgephase

In der Regel ist ein Abfall nur bzgl. eines oder weniger Zuordnungsparameter belastet. D.h. bei der vermischten Ablagerung entwickelt sich aufgrund des Verdünnungseffektes ein Abfallkörper, der eine geringe durchschnittliche Belastung bzgl. der Zuordnungsparameter aufweist. Qualitativ betrachtet wird die durchschnittliche Sickerwasserqualität besser sein als dies für die einzelnen Zuordnungsparameter im Eluat der Abfallgruppen der Fall sein würde, obwohl das Flüssig-Fest-Verhältnis (Sickerwasser zu Abfall) kleiner als im Eluat ist.

Prinzipiell wirkt sich ein großer Abfallkörper und eine vermischte Ablagerung (schichtenweise Ablagerung) positiv auf Fixierungsprozesse aus, da hierdurch die Zahl der Reaktionspartner erhöht wird und mehr Reaktionszone zur Verfügung stehen. Das Prinzip einer vorteilhaften Ablagerung zur Optimierung der Sickerwasserqualität ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abfälle mit inerten Eigenschaften bzgl. einer wässrigen Elution sind bevorzugt basisnah abzulagern. Größere Mengen mineralischer Abfälle mit erhöhten Konzentrationen für einzelne Eluatparameter (in der Größe der Zuordnungswerte bzw. bei tolerierbaren Überschreitungen) sollten so weit als möglich nicht basisnah abgelagert werden. Dadurch

kann verhindert werden, dass diese Stoffe ungehindert in das Sickerwasser eingetragen werden, und so unmittelbar den Abfallkörper verlassen können. Der Einbau dieser Abfälle sollte, soweit möglich, oberflächennah erfolgen, bevorzugt oberhalb von Abfällen,



**Abbildung 2** Einfluss des Ablagerungsortes geringer und höher belasteter Abfälle auf die Sickerwasserqualität.

die über Kapazitäten zur Fixierung (z.B. durch Adsorption, Fällung, pH-Milieu) der löslichen Bestandteile verfügen. Dies sind z.B. Eisenhydroxidschlämme, die zur Fällung von Schwermetallen in der Regel im Überschuss eingesetzt werden und ein hohes Restbindungsvermögen für Sickerwasserinhaltsstoffe sowohl für Schwermetalle als auch für LHKW und PCB aufweisen [GADE ET AL, 2002, BIRKE ET AL, 2004].

Eine Fixierung von Schadstoffen im Abfallkörper wird durch Feuchtigkeit Zutritt begünstigt, da die chemisch-physikalischen Mineralumbildungsprozesse Porenwasser als Reaktionsmedium benötigen. Ein zeitlich begrenzter Niederschlagszutritt verbessert daher langfristig die Sickerwasserqualität. Hierdurch wird der Austrag leichtlöslicher Salze beschleunigt und die Bildung von Inkrustationen, aufgrund eines weniger konzentrierten Sickerwassers, gehemmt.

Rost- und Kesselaschen sind, bedingt durch ihren stark alkalischen Charakter und ihren vergleichsweise hohen Anteil löslicher Salze, bevorzugt oberflächennah abzulagern. Eine abiotische Wasserstoffbildung tritt bei Vorliegen metallischen Aluminiums oder Zinks und bei gleichzeitig stark alkalischem Milieu auf [LECHNER ET AL. 1997, MAGEL, 2003]. Gefördert wird die Wasserstoffbildung durch hohe Salzgehalte im Sickerwasser [HEUSS-ABIBCHLER ET AL, 2005]. Sollten größere Mengen stark alkalischer Abfälle abgelagert werden und gleichzeitig metallisches Aluminium und Zink nicht ausgeschlossen werden können, empfiehlt es sich den alkalischen pH der Abfälle durch Zwischenlagerung an Luft (Carbonatisierung) auf  $\text{pH} < 10$  abzusenken. Das Wasserstoffbildungspotenzial eines Abfalls kann im Labor schnell und einfach durch Zugabe von 1-N Natronlauge ermittelt werden [GADE ET AL., 1999].

Ammoniak wird bei  $\text{pH} > 11$  merklich aus Ammoniumverbindungen freigesetzt. Ammoniumverbindungen sind in der Regel gut wasserlöslich. Abfälle mit erhöhten Ammoniumkonzentrationen im Eluat (200 mg/l Ammonium im Eluat entsprechen 20 g/kg Ammonium im Feststoff und einem Ammoniakvolumen von  $28 \text{ m}^3$  pro Tonne Abfall) sollten nicht zusammen mit alkalischen Abfällen abgelagert werden bzw. mit stark alkalischen Sickerwässern in Kontakt treten.

Sulfidische Abfälle (z.B. Natriumsulfid aus der Abwasserbehandlung und der Gerberei, Calciumsulfid in Schlacken oder auch gefällte Schwermetallsulfide) werden im leicht sauren Milieu ( $\text{pH} < 6$ ) angegriffen und setzen Schwefelwasserstoff frei. Im Falle des Calciumsulfids (CaS) erfolgt bereits im feuchten, neutralen Milieu (Staunässe) eine Hydrolyse und somit die Freisetzung des gasförmigen Schwefelwasserstoffs. Größere Mengen leicht saurer Abfälle ( $\text{pH} 5,5$ ) sollten daher nicht zusammen mit sulfidischen Abfällen abgelagert werden.

Gipshaltige Abfälle (Baustoffe auf Gipsbasis (17 08), Abfälle aus der Herstellung von Zement, Branntkalk, Gips und Erzeugnissen aus diesen (10 13)) sind nur in solchen Abschnitten abzulagern, in denen keine biologisch abbaubaren Abfälle vorliegen, da ansonsten durch ubiquitär vorkommende sulfatreduzierende Bakterien (Desulfurikanten) verstärkt Schwefelwasserstoff gebildet wird. Bei diesem Vorgang handelt es sich jedoch um eine biotisch bedingte Gasbildung.

Um möglichen Inkrustationen aus Gips (Löslichkeit um  $2,5 \text{ g/l}$ ) in den Sickerrohren vorzubeugen, ist es sinnvoll bei sulfathaltigen bzw. gipshaltigen Abfällen die Calcium- und Sulfatkonzentration im Eluat zusätzlich zu ermitteln. Es sollten nur solche Abfälle in unmittelbarer Nachbarschaft zu gipshaltigen Abfällen abgelagert werden, deren Calciumkonzentration im Eluat  $500 \text{ mg/l}$  nicht überschreitet. Eine Ablagerung von Abfällen mit erhöhten Sulfatgehalten im Eluat ( $> 500 \text{ mg/l}$ ) sollte oberflächennah und nicht basisnah erfolgen.

Bei Ablagerung stark alkalischer Aschen (z.B. Holzaschen bzw. Aschen aus Biomasseverbrennungsanlagen) ist die Bestimmung von löslichem Carbonat (TIC-Bestimmung im Eluat) zu empfehlen, um Kalkinkrustationen zu vermeiden. Speziell in Basisnähe der Deponie kann eine Ablagerung von Abfällen mit erhöhten Carbonatkonzentrationen im Eluat ( $> 20 \text{ mg/l}$ ) mit dem allgegenwärtigen Calcium im Sickerwasser (meist liegen die Calciumkonzentrationen bei  $200 \text{ mg/l}$  und höher) reagieren. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Calciumcarbonat um  $20 \text{ mg/l}$  kann es zu Ausfällungen von Calciumcarbonat kommen [GADE & WESTERMANN, 1998].

Bei größeren Mengen von Abfällen, die organische Anteile um 3% in Form mikrobiell abbaubarer Stoffe enthalten (z.B. Kohlenwasserstoffe), kann ein anaerober Abbau dieser Stoffe zu einer merklichen Methan- und evtl. auch Schwefelwasserstoffbildung füh-

ren. Für diese Materialien kann eine aerobe Zwischenlagerung erfolgen, um einen vglw. schnellen aeroben Abbau zu Kohlendioxid zu erhalten bzw. können diese Abfälle auch auf Bauabschnitten mit bereits abgelagertem Hausmüll und Gaserfassungssystemen eingebaut werden. Abfälle mit erhöhten PAK-Gehalten sind möglichst nicht basisnah abzulagern, um einen Austrag partikulär gebundener PAK zu vermeiden.

Sickerwasser aus mineralischen Bauabschnitten bzw. aus bereits weitgehend mikrobiell umgesetzttem Hausmüll kann in der Regel durch eine Indirekteinleitung in eine Kläranlage behandelt werden. Ist eine getrennte Erfassung und Zwischenspeicherung von Sickerwasser besserer Qualität aus entsprechenden Bauabschnitten realisierbar und kann so eine Vermischung in einem einzigen Sickerwassersammelbecken, in dem Sickerwasser mit geringerer Qualität einfließt, umgangen werden, so können die Sickerwasserbehandlungskosten reduziert werden.

Chromate und leicht freisetzbare Cyanide werden nur schwer und sehr langsam im Abfallkörper fixiert. Hier sollte so weit als möglich vor der Ablagerung eine Entgiftung stattfinden bzw. Überschreitungen der Zuordnungswerte nur in begründeten Einzelfällen zugelassen werden. Auch für diese Abfälle ist bei größeren Mengen eine basisnahe Ablagerungen nicht zu empfehlen.

Für das Deponieverhalten der mineralischen Abfälle ist nicht allein der Chemismus der anorganischen Parameter von Interesse. Mineralische Anteile enthalten zum Teil zulässige Restanteile organischer Inhaltsstoffe (3 % TOC bzw. geringfügig höher für ausgewählte Abfälle) bzw. spezielle organische Stoffgruppen (BTEX, LHKW, KW, PAK, PCB und andere), deren Mobilität und Persistenz im Abfallkörper noch weitgehend ungeklärt sind.

### Danksagung

Dieses Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert

## 5 Literatur

- |           |      |  |
|-----------|------|--|
| AbfAbIV   | 2001 | Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, AbfAbIV: Abfallablagerungsverordnung, vom 20. Februar 2001, BGBl. I S. 305; 24.7. 2002, S. 2807 |
| Anhang 51 | 2004 | Oberirdische Ablagerung von Abfällen, Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, AbwV – Abwasserverordnung, Stand 17.06.2004               |

- |   |      |  |
|---|------|--|
| AVV   | 2001 | Verordnung zur Umsetzung des Europäischen Abfallverzeichnis - Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV (BGBl. I Nr. 65 vom 10.12.2001 S. 3379)   |
| Birke, V., Burmeier, H., Niederbacher, P., Wegner, M., Maier, M., Kühlers, D., Eggers, J. Maier, D. Weindl, J. & Koch, M. | 2004 | Zur Abreinigungsleistung durchströmter Reinigungswände (PRB): Hinweise und Rückschlüsse für die Sanierungspraxis und weitere Entwicklung, Altlastenspektrum, 13. Jahrgang, S. 301 – 317; vgl. hierzu auch <a href="http://www.Fe4U.de">www.Fe4U.de</a> |
| Gade, B. & Westermann, H.   | 1998 | Untersuchungen zur Inkrustationsbildung in der Sickerwasserdrainage der Sonderabfalldeponie Raindorf, Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, S 27  |
| Gade, B., Westermann, H. & Heindl, A.   | 1999 | Chemisches Milieu und CO <sub>2</sub> -Haushalt von Müllverbrennungsschlacken: Auswirkungen auf Schlackenqualität und Verwertungskriterien, Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, S 33    |
| Gade, B., Westermann, H. & Heindl, A.   | 2002 | Adsorptionsverhalten von Metallen an ausgewählten deponierten Sonderabfällen unterschiedlichen Alters, Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, S 40   |
| Heindl, A., Lenz, N. & Westermann, H.   | 2004 | Stoffbilanz und Deponieverhalten am Beispiel der Sonderabfalldeponie Raindorf, Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz   |
| Heuss-Aßbichler, S., Magel, G. & Fehr, K.T.   | 2005 | Abiotic hydrogen production in a monofill of MSWI-residues: a kinetic study. – Proceed. of Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, CISA, Italy   |
| Magel G.  | 2003 | Mineralogische und chemische Untersuchungen zur abiotischen Wasserstoffentwicklung in Müllverbrennungsrückständen. Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München   |
| Lechner, P., Huber, H. & Jaros, A.  | 1997 | Assessment of the Long-Term Behavior of MSW Incineration Slags. - Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, Vol. 5, S. 553-561   |
| MBU   | 2004 | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Abfallwirtschaft „Basler Übereinkom-  |

		men – Ergebnisse der 7. Vertragsstaatenkonferenz“, Stand November 2004; <a href="http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/doc/6711.php">http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/doc/6711.php</a>
LAGA	1997 2003	Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen -Technische Regeln, M 20, 4. erweiterte Auflage Erich Schmidt Verlag Berlin, 11/1997; 11/2003
LfU-LfW-Merkblatt	2003a	„Umsetzung der Deponieverordnung (DepV) für Errichtung, Betrieb und Überwachung von Deponien der DK 0 - Inertabfalldeponien - sowie Anpassung und Abschluss bestehender Bauschuttdeponien“, LfW-Merkblatt-Nr. 3.6/3, Stand 15. Juli 2003
LfU-LfW-Merkblatt	2003b	„Anforderungen an die Entsorgung von Gleisschotter“, LfW-Merkblatt-Nr. 3.4/2, Stand August 2003
Richtlinie 1999/31/EG	2003	Entscheidung 2003/33/EG des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG (ABl. Nr. L 11 vom 16.01.2003 S. 11)
TASI	1993	Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, TA Siedlungsabfall vom 14. Mai 1993 (BAnz. S. 4967 und Beilage)

### **Anschrift der Verfasser(innen)**

Dr. Dipl.-Chem. Adi Heindl  
 Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien  
 Stiftung des bürgerlichen Rechts  
 Siemensstrasse 3-5  
 91126 Rednitzhembach  
 Email [adi.heindl@fes-schwabach.de](mailto:adi.heindl@fes-schwabach.de)  
 Website: <http://www.fes-schwabach.de>

PD Dr. Dipl. Min. Soraya Heuss-Aßbichler  
 Department für Geo- und Umweltwissenschaften  
 Ludwig-Maximilians Universität  
 Theresienstr. 41  
 80333 München  
 Email [soraya@min.uni-muenchen.de](mailto:soraya@min.uni-muenchen.de)  
 Website: <http://www.impg-muenchen.de>