



**Evaluierung von Testmethoden und
Modellen für die Bewertung des
mittel- bis langfristigen
Emissionsverhaltens
schadstoffhaltiger organischer
Abfälle und
Immobilisierungsprodukte**

2 Zusammenfassung

Hauptaufgabe dieses Projektes war es Testmethoden, die auf die Quantifizierung des mittel- bis langfristigen Emissionsverhaltens schadstoffhaltiger anorganischer Abfälle abzielen, zu entwickeln bzw. anzuwenden und zu evaluieren.

Hintergrund ist die Tatsache, daß es nicht verhindert werden kann, daß nach einer Nachsorgephase Sickerwässer, die Schadstoffe enthalten können, auf unsere Umwelt einwirken werden. Die Kenntnis des zukünftigen Emissionsverhaltens stellt also die Basis dafür dar, daß notwendige Maßnahmen zielgerichtet geplant und fachlich argumentierbar werden.

2.1 Problemstellung

Ein nicht unerheblicher Anteil der heute abgelagerten Abfälle sind Reststoffe thermischer Prozesse wie z.B. aus der Müllverbrennung oder metallurgischen Prozessen. In diesen Hochtemperaturprozessen werden die Ausgangsstoffe (Abfälle, Rohstoffe ...) in einen thermodynamisch instabilen Zustand übergeführt. Im Kontakt mit Wasser aber auch mit der Atmosphäre sind sie meist hochreaktiv. Die Folge sind teilweise Veränderung ihrer Mineralzusammensetzung sowie Änderung der physiko-chemischen Eigenschaften. In einer ersten relativ kurzen Phase einer Deponie, der „Nachsorgephase“, die nicht länger als 30 bis 50 Jahre dauern sollte, werden ein Teil der leicht löslichen Salze ausgewaschen. Gleichzeitig sinkt der pH-Wert auf Grund von Karbonatisierungsprozessen und anderen internen chemischen Reaktionen (Verwitterungsprozesse unter dem Einfluss von H_2O , CO_2 und O_2). Eine mittel- bis langfristige Stabilisierung ist erst gesichert, wenn der Karbonatpufferzustand erreicht ist.

Die Frage aber, **wie** sich das Auslaugverhalten von Abfälle unter diesen (natürlichen) Rahmenbedingungen (Szenarium) entwickeln wird, ist bis heute weitgehend ungeklärt. Die für eine Einschätzung des Emissionspotentials von Abfällen derzeit verwendeten Untersuchungsmethoden in der EU und auch in Österreich untersuchen die Abfälle im frischen und damit unverwitterten Ausgangszustand. Ob dieser Zustand geeignet ist, das mittelfristige Auslaugverhalten anorganischer Reststoffe zu simulieren, ist bis jetzt weder überprüft noch nachgewiesen worden.

2.2 Ziel

Ziel diese Projektes ist es eine oder mehrere Testmethoden zu identifizieren, die das mittel- bis langfristige Emissionsverhalten schadstoffhaltiger anorganischer Abfälle möglichst genau simulieren können. Als „hinreichendes“ Ergebnis haben wir einen Faktor von $< +/- 10$ und als „sehr gutes“ Ergebnis einen Faktor von $< +/- 2$ als Abweichung vom Referenzsickerwasser vorgegeben. Durch die Implementierung der Ergebnisse des geeigneten Tests in ein (Prognose-) Modell sollen die zukünftigen Emissionen der heute abgelagerten Abfälle abschätzbar werden.

2.3 Szenarium

Die Gültigkeit der Untersuchungen muß durch ein Szenarium, inklusive aller dominierenden Einflussfaktoren, beschrieben und begrenzt werden. Unser Szenarium bezieht sich auf Monodeponien in gemäßigten Klimaten in denen schadstoffhaltige anorganische Reststoffe der thermischen Abfallentsorgung abgelagert wurden. Auf Grund von Verwitterungsprozessen unter dem Einfluss von H_2O , CO_2 und O_2 hat die Deponie den Karbonatpufferzustand erreicht.

Ein L/S von 1 deckt je nach Infiltrationsrate und Deponiehöhe einen Zeithorizont von ~ 25 (hohe Infiltration) bis 500 Jahren (geringe Infiltration) ab. Es ist zu erwarten, daß die meisten Materialien bis zu diesem L/S karbonatisiert sind.

2.4 Methodik

Die Evaluierung der Testmethoden muß an Hand eines Referenzmaterials erfolgen. Als Referenzmaterialien müssen Ablagerungen gewählt werden, deren Inhalte den heute anfallenden Abfällen entsprechen und deren (Verwitterungs-) Zustand dem ausgewählten Szenarium entspricht. Die Emissionen dieser natürlich verwitterten Abfälle stellen somit das Referenzsickerwasser dar.

Jene Testmethoden, die evaluiert werden sollen, werden im Labor an frischem Material durchgeführt. Diese Labortests bestehen aus einer Laugung oder einer Kombination von künstlicher Verwitterung mit anschließender Laugung. Die Ergebnisse dieser Labortests (Konzentrationen im Eluat) sowie die daraus berechneten Frachten werden in der Folge mit den Referenzsickerwasserkonzentrationen und –frachten verglichen.

Weichen die Labor- und Freilandergebnisse nicht mehr als eine Zehnerpotenz von einander ab, so ist die jeweilige Testmethode geeignet, das mittel- bis langfristige Auslagerverhalten des jeweiligen Abfalls zu simulieren.

2.5 Materialien

Die untersuchten Abfälle umfassen fünf anorganische Reststoffe der thermischen Abfallentsorgung. (RAU-Materialien und IGLO). Weiters wurden eine Stahlschlacke (KA), ein Galvanikschlamm (MY) sowie ein Pb- / Zn- vererztes Karbonat (GAIL) untersucht. Diese Materialien wurden sowohl in verwittertem (auf der Deponie) als auch in unverwittertem Zustand beprobt, aufbereitet und im Labor untersucht. Die natürlich verwitterten Materialien wurden, so möglich, in ein Lysimeter eingebaut, und deren (Referenz-) Sickerwasser erfasst.

2.6 Untersuchungsmethoden

2.6.1 Materialcharakterisierung

Die Materialien wurden sowohl in unverwittertem als auch verwittertem Zustand im Hinblick auf deren Phasenbestand und –änderung hin charakterisiert. Sie wurden weiters mittels dreier unterschiedlicher naßchemischer Methoden aufgeschlossen und anschließend analysiert sowie mittels RFA charakterisiert. Die Analytik der

Eluate und der Sickerwässer erfolgte mittels geeigneter Analysetechnik und anschließender Korrekturrechnung.

2.6.2 Elutionsmethoden

Die Elutionen im Labor erfolgten mittels standardisierter und modifizierter Methoden an frischem, natürlich verwittertem und künstlich verwittertem Material. Diese Testmethoden waren der „DEV S4“, der Schweizer „CO₂-Test“, der „CEN (12457-2/Part3)“, der „pH-stat“ sowie der „upflow percolation Test“.

Zusätzlich wurde der „MPWLP“ (**M**ulti **P**hase **W**eathering and **L**eaching **P**rocedure) entwickelt, eine Testmethode die aus einer künstlichen Verwitterung mittels H₂O, CO₂ und O₂ mit anschließender dynamischer Laugung besteht. Eine weitere Entwicklung stellt der „Gleichgewichts CO₂ – Test“ dar, der ebenfalls auch an künstlich verwittertem Material durchgeführt wird.

2.6.3 Sickerwassererfassung

Für die Materialien RAU-S, RAU-S2, RAU-SB und RAU-A sowie KA wurde je ein Großlysimeter (24m³) und für das Material IGLO ein mittelgroßes Lysimeter zur Erfassung der Sickerwässer errichtet. In KA wurden die Sickerwässer zusätzlich zum Lysimeter an mehreren Stellen direkt aus der Halde beprobt. Die Probenahme der Sickerwässer in GAIL und MY erfolgte ausschließlich direkt aus der Ablagerung.

2.6.4 Geochemische Modellierung

Als „Modell“ bezeichnet man ein Abbild bzw. eine abstrakte Vorstellung des Naturgeschehens. Die geochemische Modellierung wird dazu verwendet, die gelösten bzw. löslichen Stoffanteile von anorganischen Stoffen in wäßrigen Systemen abzuschätzen. Im konkreten Fall dienen sie dazu Sättigungskonzentrationen und Gleichgewichtszustände für Löslichkeitsbestimmende Phasen zu ermitteln, Speziierungsrechnungen durchzuführen und die Abhängigkeit des Auslaugverhaltens von Adsorptionsprozessen, Mischkristallbildung und Reinphasen aufzuzeigen.

2.7 Ergebnisse

2.7.1 Gesamtgehalte

Die nasschemischen Methoden zur Bestimmung des „Gesamtgehaltes“ zeigen, dass sich die Gesamtgehalte je nach gewählter Methodik (DEV S7, CEN und EPA) unterschiedlich darstellen können. Dabei zeigt der Aufschluss nach DEV S 7 (bei den untersuchten Elementen) die geringsten und der Mikrowellenaufschluss nach EPA (inverses Königswasser in Kombination mit HF und optional H₂O₂) die höchsten Messwerte. Um im Zuge von Bewertungsverfahren zwischen unterschiedlichen Abfällen und Untersuchungen vergleichen zu können wird empfohlen einheitlich eine bestimmte Aufschlußmethode vorzuschreiben.

2.7.2 Materialcharakteristika und Mineralogie

Die mineralogischen Aussagen beruhen auf Untersuchungen von Gesamtproben und Kornklassen mittels RDA, der Schwere- und magnetischen Fraktionen mit RDA und Rasterelektronenmikroskopie und an Dünn- und Anschliffen mittels Licht- und Elektronenmikroskopie.

Um die Vergleichbarkeit der Elutionstests zwischen alten und neuen Materialien zu gewährleisten, war es als erstes nötig, deren Phasenbestand miteinander zu vergleichen. Bei den im vorliegenden Projekt ausgewählten Materialien stimmten die alten und neuen Materialien überein.

Die durch die künstliche Karbonatisierung erzielte Kalzitbildung wurde quantifiziert. Bei den meisten Materialien wurde eine geringe Zunahme festgestellt. Im Material KA bildete sich zusätzlich ein Mg-Ca-Karbonat.

Bei den Verbrennungsrückständen dominiert die amorphe Schlackephase, weiters sind Durchläufer, metallisches Eisen und nur geringe Anteile an kristallinen Phasen zu finden. Einige Phasen, die in der geochemischen Modellierung als Löslichkeitsbestimmend ermittelt wurden (z.B. Gips oder Baryt), konnten ebenfalls identifiziert werden. An sekundären Neubildungen wurden Karbonate, amorphe und kristalline Eisen- und Aluminiumhydroxide und als temporäre Speicherminerale bekannte Phasen wie Ettringit, CSH, CAH und CASH nachgewiesen. In den Metallhydroxiden wurden jene Spurenmetalle detektiert, die auch als Legierung in der metallischen Komponente zu finden waren, während den Speichermineralen keine eindeutige Schwermetallassoziation zuzuordnen war.

Schwermetalle wurden elementar bzw. als Legierung in Metallen und in deren oxidischen und hydroxidischen Verwitterungsprodukten, als eigenständige Minerale (z.B. Magnetit, Chromspinell), in der Schlackephase gebunden und in eng verwachsenen Strukturen gefunden. In MY liegen die Schadstoffe als amorphe Metallhydroxide vor. Im natürlichen Material GAIL wurden Pb und Zn, ursprünglich sulfidisch gebunden, in im Zuge der Verwitterung entstandenen Neubildungen identifiziert.

2.7.3 Sickerwasserzusammensetzung

Die Zusammensetzung der Sickerwässer der von uns untersuchten Deponien bzw. Großlysimeter bilden die Referenzwerte, anhand derer die Testmethoden beurteilt werden können. Aufgrund des Verwitterungszustandes und Alters der untersuchten Materialien unterscheiden sich die Lysimetersickerwässer wesentlich vom Sickerwasser junger Deponien.

Bei einem Alter von ca. 10 Jahren waren die Materialien RAU-A, RAU-S und RAU-S2, die im ungesättigten, oberflächennahen Bereich der Deponie abgelagert worden waren, bereits vollständig karbonatisiert. Das noch frische, stark basische Verfestigungsprodukt RAU-SB hingegen wurde vor dem Einbau in das Lysimeter so lange natürlich verwittert, bis eine vollständige Karbonatisierung und somit ein pH von 8,5 erreicht wurde. Der Vorteil dieser Methode war, daß bei RAU-SB eindeutig das gleiche Material sowohl im frischen als auch im natürlich verwitterten Zustand für weitere Untersuchungen vorlag.

Das Material IGLO, welches über 3 Jahre hinweg als befestigte Fläche (Parkplatz) diente, weist trotz hoher L/S-Verhältnisse noch pH-Werte zwischen 10 und 11,2 im Sickerwasser auf. Der Mittelwert (pH 10,4) weist darauf hin, daß dieses Material noch nicht vollständig karbonatisiert ist.

Die Sickerwassermittelwerte der Metalle Pb, Cd, Cr und Al sowie alle anderen Parameter (ausgenommen der Leitfähigkeit) liegen in allen Fällen (für Materialien der thermischen Entsorgung) unter den Grenzwerten für „Schadstoffgehalte im Eluat für Reststoffdeponien“ der DVO (entsprechend dem L/S umgerechnet in mg/l). In einigen Fällen werden jedoch Trinkwassergrenzwerte bzw. Trinkwasserindikatorwerte überschritten. Dies betrifft vor allem Sb, B, Mn und Ni aber auch Cr VI bei IGLO.

2.7.4 Sickerwassermengen

Das Volumen des Sickerwassers wurde an den Versuchsanlagen wöchentlich oder mehrmals pro Woche registriert. Die täglichen Niederschlagsmengen und die Tagesmittel der Temperaturen geeigneter meteorologischer Stationen wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik erhoben.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Sickerwassermengen deutlich vom Standortklima, von der Oberflächenabdeckung bzw. Vegetation und schließlich auch vom Material abhängen.

Zusammenfassend ergibt sich daß für durchlässige Abfälle (beispielsweise k_f gesättigt $>10^{-8}$ m/s) unter mitteleuropäischen Verhältnissen mittel- bis langfristig die jährliche Sickerwassermenge – je nach Bodentyp und Vegetation - zwischen 10 und 60 % des Jahresniederschlags betragen kann. Sickerwassermengen unter 10 % des Jahresniederschlags können lokal begrenzt, in einigen trockeneren Regionen Mitteleuropas auftreten. Sickerwassermengen über 60 % des Jahresniederschlags treten praktisch nur in sehr niederschlagsreichen alpinen Bereichen auf.

2.8 Auslaugverhalten

2.8.1 Bestimmende Faktoren

Eine Auswertung mit dem Ziel alle wesentlichen konzentrationsbeeinflussenden Faktoren zu identifizieren konnte auf Basis dafür geeigneter Testmethoden und Testmethodenvergleiche durchgeführt werden. Die Auswertung ist aber immer vor dem Hintergrund des zuvor definierten Szenariums zu sehen.

Das Auslaugverhalten der meisten Elemente ändert sich in Abhängigkeit vom Wasser/Feststoff-Verhältnis, was einer Änderung mit der Zeit gleichgesetzt werden kann. Genauso deutlich ist der Einfluß des pH-Wertes auf das Auslaugverhalten. Im Gegensatz zum Ausgangszustand der Materialien (pH oft > 12) stellen sich in anorganischen Ablagerungen auf Grund von Verwitterungsprozessen mittel- bis langfristig pH-Werte von etwa 8 ein (Karbonatpufferbereich). Der Faktor Verwitterungszustand beeinflusst (unter gleichen pH-Bedingungen) bei etwa der Hälfte der Elemente deren Auslaugbarkeit. Das Trockenfallen von Materialien (=Absenken des Wassergehalts, Fällungsvorgänge, Oxidation, ev. weitere Karbonatisierung) führt nur bei wenigen Elementen (v.a. Mn, Fe, Pb) zu Änderungen

in den Eluatkonzentrationen. Auch die Verwendung verschiedener Auslaugmedien hat bei einigen Elementen Unterschiede im Auslaugverhalten zur Folge. Den geringsten Einfluß der untersuchten Faktoren hat die Korngröße. Es empfiehlt sich aber auf Grund der größeren Repräsentativität möglichst kleine Korngrößen zu verwenden.

2.8.2 Evaluierung und Bewertung geeigneter Testmethoden

Ziel dieses Projektes ist es eine oder mehrere Testmethoden zu identifizieren, die das mittel- bis langfristige Emissionsverhalten schadstoffhaltiger anorganischer Abfälle möglichst genau simulieren können. Als „hinreichendes“ Ergebnis haben wir einen Faktor von $< +/- 10$ und als „sehr gutes“ Ergebnis einen Faktor von $< +/- 2$ als Abweichung vom Referenzsickerwasser vorgegeben.

Um das zukünftige Auslaugverhalten des vorgegebenen Szenariums mit der angestrebten Genauigkeit beschreiben zu können, müssen Labortestmethoden in einem **dynamischen Verfahren an künstlich verwittertem Material** durchgeführt werden, dessen pH-Wert jenem des Szenariums entspricht. Ziel und Zweck der künstlichen Alterung ist die Simulation und Beschleunigung der wichtigsten Prozesse wie Hydratisierung, Karbonatisierung und pH-Absenkung.

Möglich ist diese Simulation des Auslaugverhaltens mittels der neu entwickelten Labortestmethoden „**MPWLP**“ bzw. „**MPWLP T**“ („**M**ulti **P**hase **W**eathering and **L**eaching **P**rocedure“). Wie die Ergebnisse für L/S-Verhältnisse bis < 2 zeigen, weichen von allen untersuchten Elementen 43 % bzw. 40% nicht, 88% bzw. 92 % weniger als eine Zehnerpotenz ab und nur 1% bzw. 0 % mehr als zwei Zehnerpotenzen von den Referenzwerten ab.

Relativ gute Ergebnisse lassen sich aber auch mit statischen Testmethoden erzielen, in denen der pH-Wert während des Tests mittels CO_2 oder HNO_3 induziert wird. Es sind dies „**CO₂-Test**“ bzw. „**pH-stat**“ Tests bei **pH 8,3** die an künstlich gealtertem aber auch frischem Material durchgeführt werden können. Für frische Materialien gilt die Einschränkung, daß die Konzentrationen der Metalle und Oxianionen weniger gut simulierbar sind. Eine Aussage über den Verlauf der Sickerwasserkonzentrationen ist mit statischen Testmethoden nicht möglich.

Statische (DEV S4, CEN 12457, ...) und dynamische Labortestmethoden (upflow percolation), die an **frischem Material** ohne induzierte pH-Änderung durchgeführt werden eignen sich **nicht**, das mittel- bis langfristige Emissionsverhalten schadstoffhaltiger anorganischer Abfälle zu simulieren. Bei Anwendung des „DEV S4“ und des „upflow percolation“ Tests weichen 35% bzw. 30 % um mehr als eine Zehnerpotenz und 10% bzw. 7 % um mehr als zwei Zehnerpotenzen von den Referenzwerten ab. Eine Ausnahme stellt die Abschätzung der Salzkonzentrationen- und Frachten dar, die auch an frischem Material durchgeführt werden können und im upflow percolation Test realitätsnahe Ergebnisse liefern.

Geeignete Testmethoden	Ungeeignete Testmethoden
<ul style="list-style-type: none"> An künstlich verwittertem Material Mit steigendem L/S Mit fixiertem pH-Wert (~8,3) Mit Elutionsmedium CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> An frischem Material Bei einem konstanten L/S Mit stark basischem oder sauren pH-Wert
<p>„Sehr gut“:</p> <p>MPWLP; MPWLP T</p>	<p>In den meisten Fällen</p> <p>„mäßig“ bis „schlecht“:</p> <p>DEV S4; upflow percolation; CEN 12457</p>
<p>„Gut“ (bis tw. „mäßig“):</p> <p>CO₂ 6,5; pH-stat (8,3)</p>	

Anforderungen an und Eignung von Testmethoden, die das mittelfristige Emissionsverhalten schadstoffhaltiger anorganischer Abfälle möglichst genau simulieren sollen. Eine abgesicherte Evaluierung ist derzeit bis L/S < 2 erfolgt.

Eine **Evaluierung** der Testmethoden bei **hohen L/S-Verhältnissen** (10) ist bis jetzt nur indirekt mittels passender (evaluierter) MPWLP-Referenzwerte möglich, da alle Lysimeter-sickerwässer ein L/S von < 2 aufweisen. Es wird bei dieser Evaluierungsstufe die Annahme getroffen, daß alle jene **MPWLP**-Ergebnisse, die bei niedrigem L/S (<2) sehr gute Ergebnisse liefern, geeignet sind, das Auslaugverhalten des Referenzsickerwassers bei hohem L/S ebenfalls gut zu beschreiben.

Wie diese Ergebnisse (Eluatkonzentrationen) zeigen, sind auch bei hohen L/S Verhältnissen nur jene Testmethoden gut geeignet, die an **künstlich verwittertem Material** durchgeführt werden. Es sind dies neben dem (postulierten) **MPWLP** vor allem der „**DEV S4 n-K**“, der „**CO₂ 6,5 n-K**“ sowie 2. Elutionsstufe des „**CEN (12457) n-K**“ .

Zur Simulation der **kumulativen Frachten bis L/S 10**, die jenen Anteil am Gesamtmaterial beschreiben, der unter den vorgegebenen (Test-) Rahmenbedingungen in Summe ausgelaugt wird, eignen sich neben dem (postulierten) **MPWLP** vor allem der „**DEV S4 n-K**“ an künstlich gealtertem Material aber auch die **CO₂** – Tests und **pH-stat** Tests. Letztere zwei können sowohl an künstlich gealtertem, aber auch (tw.) an frischem Material durchgeführt werden.

2.8.3 Auslaugbarkeit in Abhängigkeit von den Mineralphasen und der Alterung

Das Auslaugverhalten von gealterten Abfällen wird primär durch chemische Gleichgewichte (hierunter fallen auch Sorptionsgleichgewichte)¹ bestimmt. Kristalline Phasen, die in größerer Menge vorhanden sind, wie z.B. Gips und Baryt, können mit den mineralogischen Untersuchungsmethoden identifiziert werden. Die in Eluaten und im Sickerwasser vorgefundenen Konzentrationen stimmen gut mit geochemischen Modellrechnungen (Gleichgewichtsmodellen) überein, welche chemische Gleichgewichte voraussetzen.

Bei Spurenelementen können löslichkeitsbestimmende Reinphasen in der Regel nicht identifiziert werden. Adsorption und Mischkristallbildung werden in diesem Fall dominierend. In unserem Modell sind wir davon ausgegangen, daß auch hier Gleichgewichte – und zwar das Gleichgewicht mit den unterschiedlichen Adsorberplätzen an den Oberflächen bzw. das chemische Gleichgewicht mit dem Mischkristall – vorliegen. Der Verlauf der MPWLP-Kurven kann durch eine (Gleichgewichts-)Kaskade von unterschiedlich löslichen Phasen (inklusive Mischkristallphasen) oder durch eine Adsorptionskaskade erklärt werden.

2.8.4 Abschätzung des Auslaugverhaltens thermischer Reststoffe

Als Folge der Vielzahl von Untersuchungen unter den Einflüssen verschiedenster Rahmenbedingungen und Faktoren war es uns zusätzlich möglich, für viele Elemente der untersuchten Materialien eine maximale Eluat- bzw. Sickerwasserkonzentration in Abhängigkeit vom pH-Wert zu erkennen. Für einige Elemente konnte diese mögliche maximal ermittelte Auslaugbarkeit auch durch eine oder mehrere löslichkeitsbestimmende Phasen beschrieben werden (z.B.: für Zn ist dies $\text{Zn}(\text{OH})_2$ im basischen Bereich und Adsorption an HFO im sauren Bereich). Diese maximal ermittelten Löslichkeiten bei einem bestimmten pH-Wert können zwar nicht als absolute Obergrenze unter allen möglichen Szenarien und für alle existierenden anorganischen Abfälle definiert werden. Sie geben aber die Möglichkeit, die Tendenz im Auslaugverhalten sowie den wahrscheinlichen Konzentrationsbereich für die untersuchten Materialien in Monodeponien abzuschätzen. Dies gilt jedoch nicht für Salze sowie leicht zu komplexierende Metalle (z.B. Hg, ...). Es sollte auch nicht dazu führen, daß vorbehaltlos nach Schlüsselnummern klassifiziert und deponiert wird.

2.8.5 Auswaschung des Karbonatpuffers am Beispiel „Natural Analogue“ Unterlaa

Im Zuge der Suche nach „Natural Analogues“ wurden römische Ausgrabungen in Unterlaa beprobt und untersucht. Diese 1900 Jahre alte und inzwischen vollständig karbonatisierte Löschkalkgrube sollte es ermöglichen, abzuschätzen, ob die gemessenen bzw. modellierten Austräge des Karbonatpuffers aus anorganischen Materialien bzw. Deponien realen Werten entsprechen.

¹ Adsorption ist bei anorganischen Schadstoffen primär als chemischer Vorgang zu verstehen.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigten, stimmen die Berechnungen und Messungen sehr gut mit den realen Werten übereinstimmen. Alle berechneten Werte weichen weniger als eine Zehnerpotenz von dem realen Wert ab.

Überraschend ist weiters, daß diese relativ geringmächtige Pufferschicht von ca. 15 cm nach 1900 Jahren noch zu einem großen Anteil (ca. 70 %) vorhanden ist. Dies läßt darauf schließen, daß der Karbonatpuffer in den untersuchten anorganischen Deponien wesentlich länger als einige Jahrhunderte Bestand haben wird.

2.8.6 Prognosemodell

Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist es, ein praktikables Modell zur Abschätzung der zukünftigen Frachten aus anorganischen Ablagerungen zu entwickeln.

Die Schadstoffemissionsrate („Pollutant Flux“ = **PF**) ist jene Stoffmenge, die in einer bestimmten Zeit emittiert wird. Die Konzentrationen werden durch das Auslaugverhalten bestimmt, das sich auf Grund von Verwitterungsprozessen und unter dem Einfluss von Wasser und Gasen mit der Zeit ändert. Die Inhaltsstoffe selbst werden mit einer bestimmten Menge an Wasser transportiert, woraus sich die Sickerwasserkonzentration (**C_p**) ableitet. Die gesamte Sickerwassermenge einer bestimmten Periode hängt von der durch den Deponiekörper strömenden Wassermenge pro m² (**SJS** – spezifische jährliche Sickerwassermenge) sowie der Deponiefläche (**A**) ab. Daraus lässt sich folgende Gleichung ableiten:

$$\text{Schadstofffracht: } \mathbf{PF = C_p \times SJS \times A = [mg/l] \times [l/m^2/Jahr] \times [m^2] = [mg/Jahr]}$$

Wie das gegenständliche Projekt gezeigt hat, ist der neu entwickelte MPWLP, eine Kombination aus Verwitterungs- und Auslaugversuchen, am besten geeignet für einen mittelfristigen Zeitrahmen die Stoffkonzentrationen (**C_p**) im Sickerwasser zu simulieren. Während die spezifische jährliche Sickerwasserrate (**SJS**) in direkter Abhängigkeit von der lokalen „Climax Vegetation“ steht und unter diesen Rahmenbedingungen ermittelt werden kann, stellt die Deponiefläche (**A**) (ausgenommen für Salze) einen fixen Inputparameter in unserem Prognosemodell dar.

Ausgehend von den Ergebnissen dieses Projektes kann dieses Prognosemodell zum derzeitigen Zeitpunkt für eine Abschätzung der mittelfristigen Emissionen (bis L/S <2) aus Reststoffen der Abfallverbrennung, die in Monodeponien abgelagert werden, angewandt werden.

2.9 Schlußfolgerungen

Die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse zeigten auf, daß es mit ausreichender Genauigkeit möglich ist, eine Abschätzung des mittelfristigen Auslaugverhaltens anorganischer Reststoffe aus der thermischen Abfallentsorgung durchzuführen. Möglich wurde dies durch die Entwicklung einer Testmethode (**MPWLP - Multi Phase Weathering and Leaching Procedure**), die sich an dem zukünftigen Szenarium orientiert.