

Auftraggeber:
Magistrat der Stadt Wien
Magistratsabteilung 22 - Umweltschutz
1082 Wien; Ebendorferstraße 4
Ihr Zeichen: MA 22 – 5600/98

Thomas Sabbas, Peter Mostbauer, Peter Lechner

Deponien- Prozesse und Faktoren jenseits der Nachsorge

Dezember 1998

5 Zusammenfassung

Zusammenfassung aus der Sicht natürlicher Systeme

Die **Erde** ist ein großes **dynamisches System**. All ihre Teilsysteme nehmen in unterschiedlicher Geschwindigkeit am **Kreislauf der Stoffe** teil. Der Materialfluß an der Oberfläche der Erde läuft aufgrund zweier sehr unterschiedlicher Prozesse ab. Einerseits bilden aufsteigende Schmelzen, angetrieben durch endogene Kräfte, Teile der Erdkruste und andererseits verwittern und erodieren diese Gesteine, angetrieben vor allem durch exogene Kräfte, um neue sedimentäre Ablagerungen in den Weltmeeren zu bilden. Diese Sedimente können wiederum versenkt werden und somit das Ausgangsmaterial für neue Gesteinsschmelzen bilden oder aber an der Erdoberfläche verbleiben und abermals den Oberflächenprozessen ausgesetzt werden.

Das **Ausgangsmaterial** für die an der Erdoberfläche ablaufenden Prozesse können Materialien **mannigfaltiger Entstehungsgeschichte, chemischer und mineralogischer Zusammensetzung und Gefügeausbildung** darstellen. Sie können in Gebieten mit **unterschiedlichster Morphologie und Hangneigung** diesen Prozessen ausgesetzt sein.

Die an der Erdoberfläche ablaufenden (Haupt-)Prozesse können in Verwitterung, Bodenbildung und Erosion unterteilt werden, wobei eine Trennung dieser Vorgänge nicht möglich ist. Die in der Natur vorherrschenden Ungleichgewichte sind die Triebfeder für den Ablauf der Prozesse. Oftmals laufen diese Prozesse gleichzeitig ab, sind eine Voraussetzung für den Folgeprozess und beeinflussen einander wobei jedoch ein Prozess eine dominante Rolle spielt. Die Verwitterung stellt eine Voraussetzung sowohl für die Bodenbildung als auch Erosion dar. Dominiert z.B. der Austrag von Stoffen, wird eine Bodenbildung nicht möglich sein. Geht der Austrag gegen null, wird sich ein Gleichgewicht einstellen und die Verwitterung und Bodenbildung kommen zum Erliegen. Die oben genannten (Haupt-)Prozesse werden wiederum durch Teilprozesse bestimmt. Diese Teilprozesse sind vor allem Humifizierung, Gefügebildung, Speziestransformation, Mineralneubildung, Komplexierung, Lösung, Fällung, Adsorption, Ionentausch, Redoxreaktionen, physikalische Zerstörung und Transport. Auch hier interagieren die jeweiligen Teilprozesse wobei der vorherrschende Hauptprozess durch die Dominanz einzelner Teilprozesse bestimmt werden. So ist die Lösung hauptverantwortlich für die Verwitterung, die Humifizierung und Gefügebildung für die Bodenbildung und der Transport für die Erosion.

Abhängig sind diese Prozesse von den unterschiedlichsten **inneren (Chemismus, Mineralogie, Gefüge, Ausgangsmaterial) und äußeren Faktoren (Niederschlag, Temperatur, Vegetation, Boden, Gase, Flora, Fauna und Morphologie)** wobei letztere, ausgenommen der Morphologie, sehr stark von den herrschenden **Klimabedingungen** abhängig sind. Die **chemischen Faktoren Ionenpotential, pH und Eh** (der Lösung) werden sowohl von äußeren als auch inneren Faktoren bestimmt. So ist z.B. der pH-Wert bei großen Durchflußraten und geringen Verweilzeiten vom pH-Wert des Niederschlags und bei langen Verweilzeiten eher von den Inhaltsstoffen des Ausgangsmaterials abhängig.

Ausgangsmaterial, Morphologie und Klima stellen die **Hauptfaktoren** dar, die den Ablauf und die Geschwindigkeit des Stoffkreislaufs bestimmen.

Die **Raten der einzelnen Prozesse können sich ändern**. Der **Austrag** aus einem Teilsystem und somit die abermalige Einbeziehung aller Inhaltsstoffe in den natürlichen Stoffkreislauf wird aber auf lange Sicht **niemals unterbunden** werden.

In feuchten, vegetationsreichen und warmen bzw. gemäßigten Klimaten (derzeit in Europa) dominiert die chemische Verwitterung während in kühlen, vegetationslosen und trockenen Klimaten die physikalische Verwitterung dominiert.

Silikate verwittern langsam während Karbonate und vor allem leicht lösliche Salze rasch verwittern. Lockergesteine, poröse Gesteine und solche mit einem hohen Anteil an aktiver Mineraloberfläche zeigen ebenfalls weitaus höhere Verwitterungsraten als kompakte Festgesteine. Die Verwitterungsraten können sich zwischen wenigen mm pro 1000 Jahren und einigen mm pro Jahr bewegen. **Unter den derzeit in Österreich vorherrschenden klimatischen Verhältnissen beträgt die Verwitterungsrate für Karbonate 10-100 mm pro 1000 Jahren.**

Ist die Verwitterungsrate größer als die Erosionsrate so können sich Boden und Vegetation bilden, die ihrerseits die Verwitterung fördern.

In kalten, trockenen, vegetationslosen Gebieten mit stark saisonal geprägtem Klima sowie in Gebirgen ist die Erosion weitaus effektiver als in feuchten, warmen, vegetationsreichen Gebieten mit gleichmäßigem Klima sowie Beckenlagen. Katastrophen und extreme Prozesse können vor allem in Hanglagen und bei stark saisonal geprägtem Klima einen größeren Einfluß auf die Gesamterosion haben als normale Prozesse unter normalen Bedingungen. Erosion ist ein episodischer Prozess und darf nicht an Kurzzeitbeobachtungen gemessen werden.

Werden die seit Millionen von Jahren ablaufenden natürlich gesteuerten Klimazyklen und Prozesse für Klimaprognosen herangezogen, so darf das Eintreffen der nächsten **Kaltzeit in einigen 1000 bis 10000 Jahren** nicht negiert werden.

Kommt es also zu einem Klimawechsel von Warm- zu Kaltzeit so sind Temperaturerniedrigung um bis zu 13 °C, Trockenheit und erhöhte Windgeschwindigkeiten die Folge. Während des Wechsels der Klimabedingungen kommt es zu einer Erhöhung der Prozessraten und **andere Prozesse werden dominant**. Es wird zu einer Vegetationsverschiebung nach Süden und der Ausbildung von Tundrensteppen in Mitteleuropa kommen. Gletscher liefern das Material für vegetationslose Flußterrassen. Großräumige morphologische Veränderungen in Gebirgen und Ebenen sind die Folge. Es kommt zur Bildung von Dauerfrostböden und in der Folge Solifluktion, veränderten hydrogeologischen Regimen, Bodenversauerung und Bildung von Löß. **Ist während der Warmzeit in Europa die chemische Verwitterung vorherrschend, so wird während der sich möglicherweise einstellenden Kaltphase die physikalische Verwitterung und Erosion dominieren.**

Tabelle 39: Zusammenfassung der wichtigsten Prozesse, Faktoren und Auswirkungen von Verwitterung, Erosion, Bodenbildung und Klimawandel

Vorgang	Wichtigste Prozesse	Wichtigste Faktoren	Bemerkungen
Verwitterung	Chemische Verwitterung: Hydratation, Hydrolyse, Protolyse, Oxidation, Komplexierung Physikalische Verwitterung: Frostsprengung, Salz Biochemische Verwitterung: Säurebildung, CO ₂	pH, Eh, CO ₂ Gestein, Gefüge, Klima, Wasser, Bodenbedeckung, Mikrobiologie, Relief	Wasser muß Material abführen um ständiges Ungleichgewicht (Drang zur Verwitterung) zu erhalten Chemische Verwitterung in feuchtem, warmen Gebieten Physikalische Verwitterung in trockenen, kalten Gebieten
Verwitterungsraten	siehe oben	siehe oben CO ₂ , Wasserabflußrate	Evaporite (Salze, Gips) > Karbonate > Silikate Porosität > Klüfte, Spaltbarkeit > massiges Gestein Große aktive Mineraloberfläche > geringe aktive Mineraloberfl. Lockergestein > Festgestein Feucht, warm, Vegetation > trocken, kalt, vegetationslos Fördern: Böden, Wasser, CO ₂ , Säuren Bei Karbonaten fördern: pH<5, CO ₂ , Abflußraten 10 – 100 mm in 1000 Jahren unter österreichischen Bedingungen
Bodenbildung	Verwitterung, Mineralneubildung, Humifizierung, Gefügebildung, Verlagerung	Klima, Gestein, Relief, Wasser, Flora, Fauna	Material darf nicht ständig vollständig ausgetragen werden: Verwitterung > Erosion
Erosion und Erosionsraten	Wasser Eis Wind Schwerkraft	Klima Morphologie Vegetation Katastrophen	kalt, trocken > feucht, warm Gebirge > Becken, Flachland (lange) Hänge > Ebene Gletscher > unvergletschert Lockergestein > Festgestein Vegetationslos > Vegetation stark saisonales Klima > gleichmäßiges Klima Summe der Auswirkungen von Katastrophen kann größer sein als die Summe der Auswirkungen ständig ablaufender Prozesse
Klimawechsel, Eiszeit	Klimawandel Warmzeit → Kaltzeit	Temperatureniedrigung (8 – 12°C) Trockenheit erhöhte Windgeschwindigkeiten	Verstärkung von Prozessen beim Wechsel d. Klimabedingungen, Einstellung von Ungleichgewichten bis zur Erreichung eines neuen Fließgleichgewichtes andere Prozesse werden dominant, Wechsel von chemischer Verwitterung (Warmzeit) zu physikalischer Verwitterung (Kaltzeit) Vegetationsverschiebung (Tundra in Mitteleuropa), Verarmung der Vegetation, Gletscherbildung, Dauerfrostboden (Solifluktion), verändertes hydrologisches Regime, Überarbeitung von Bodenprofilen, Bodenversauerung, morphologische Veränderungen Hänge, Täler,...) Terrassenbildung, Moränen, Lößbildung,

Zusammenfassung aus der Sicht der Abfallwirtschaft

Der Begriff "Endlager" für eine Deponie, deren Stoffflüsse in die Umwelt (Luft, Wasser, Boden) "sowohl kurz- wie auch langfristig" umweltverträglich sind entwickelte sich ausgehend von der Schweiz vor ca. 15 Jahren und hat die theoretischen Zielsetzungen der Abfallwirtschaft entscheidend beeinflusst.

Letzten Endes steht aber eine nähere Definition des Endlagerbegriffes noch aus. **Kriterien für die Ablagerung von Abfällen sind in vielen Ländern vorhanden, können jedoch nicht als ident mit der Endlager-Definition angesehen werden.**

Die chemischen und teilweise auch die physikalischen **Prozesse, die für die Emissionen** aus Deponien (Gas, Sickerwasser...) kurz- und mittelfristig **von Bedeutung sind**, wurden bislang primär für folgende Abfallarten näher untersucht:

- MVA-Schlacke, **Verbrennungsrückstände aus MVA-Anlagen**
- Müll bzw. **Siedlungsabfall** bzw. teilweise mechanisch-biologisch vorbehandeltes (MBA-) Material

Bei **MVA-Schlacke** existieren **gut unterscheidbare Phasen der Alterung**, einhergehend mit (den auch aus der Baustoffkunde) bekannten chemischen Reaktionen, wie z.B. Neutralisation von Portlandit, Carbonatisierung und Korrosionsvorgängen an Metallen. Langfristig sind aufgrund der anorganischen Matrix Analogien zur chemischen Verwitterung von Gesteinen, z.B. Carbonatgestein, vorhanden.

Die **dominierenden Faktoren für die Freisetzung von Metallionen** - z.B. **pH-Wert**, **Eh-Wert** und **Komplexierung** - sind bekannt. Die **langfristige Entwicklung** (Langfristig im Sinne von Jahrtausenden und –zehntausenden) der mechanischen Eigenschaften von Verfestigungsprodukten (z.B. Durchlässigkeit, Festigkeit) kann dagegen **nicht prognostiziert** werden.

Bei **Siedlungsabfall** bzw. MBA-Material sind **Schätzungen** über den Verlauf der Chlorid-, CSB- und NH_4^+ -Konzentrationen im **Sickerwasser** über einen Zeithorizont von **10^2 a bis 10^3 a vorhanden**. **Klar definierte Phasen** des Deponieverhaltens beziehen sich primär auf die **Gasbildung** bzw. auf biologische Abbauvorgänge. Für die Zeit **nach dem Abklingen der biologischen Abbauvorgänge könnten** Moore oder Böden mit hohem organischen Anteil als **natürliche Analoga Informationen über das Langzeitverhalten liefern**. Eine entsprechende Entwicklung analoger Szenarien wurde aber bisher **noch nicht im Detail ausgeführt**.

Kriterien für die Beurteilung der kurz- bis mittelfristigen biologischen Stabilität von Abfällen nach mechanisch-biologischer Vorbehandlung wurden bereits entwickelt (z.B. Atmungsaktivität, Inkubationsversuch).

Faktoren und Prozesse, die den Transport bzw. Transfer von **persistenten organischen Stoffen** (PAH, Dioxin etc.) in einer anorganischen Matrix mittel- und langfristig bestimmen, sind noch **wenig erforscht**. Dies betrifft sowohl Filterstäube aus Abfallverbrennungsanlagen als auch z.B. Materialien aus der Altlastensanierung.

Was den **Zeithorizont** der Beurteilung von Abfällen anbelangt, wird auch bei der Lebenszyklusanalyse (LCA) und auch bei der Sicherheitsanalyse von Endlagern für radioaktive Abfälle die **Einbeziehung langer Zeithorizonte gefordert**. Beispielsweise fordert eine Leitlinie der USEPA zur Standortwahl für Endlager (radioaktive Abfälle) einen Beurteilungs-Zeithorizont von mindestens **10^4 a**. Entsprechende Grundsätze zur Szenarienentwicklung – unter **Einbeziehung der Geologie des Standortes** – sind bereits vorhanden.

Die Phasen der Nachsorge (nicht zu verwechseln mit den Phasen des Deponieverhaltens) werden in der Literatur unterschiedlich definiert. Jedenfalls kann aber eine **"aktive" und "passive" Nachsorge** unterschieden werden:

- **Aktive Nachsorge:** Der Einsatz aktiver Umweltschutzsysteme, wie z.B. Sickerwasserbehandlung
- **Passive Nachsorge:** Der Einsatz passiver Umweltschutzsysteme, die so angelegt werden, daß (so zumindest die Intention) keine Überwachung, Wartung und Energie benötigt wird.

Es besteht Klarheit darüber, daß für lange Zeithorizonte eine aktive Nachsorge nicht zielführend und auch nicht möglich ist. Als realistischer Zeithorizont für eine **aktive Nachsorge** werden meistens Zeiten **zwischen 30 und 50 a** genannt.