

Deponiebau in Nordamerika – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Kent P. Von Maubeuge

Kwasi Badu-Tweneboah, Ph.D.

P.E., Ramil Mijares, Ph.D.

J.P. Giroud, ECP, Ph.D

Zusammenfassung

Deponien sind seit jeher und bis heute die bevorzugte Art der Entsorgung und/oder Behandlung festen Abfalls in Nordamerika. Die Deponietechnologie hat sich von offenen Müllhalden und Verbrennung im Freien in der Vergangenheit bis hin zu modernen Deponien und anderen Einrichtungen für das Abfallmanagement entwickelt. In der Zwischenzeit legt man Wert auf geschlossene Systeme zum Schutz der Umwelt. Dazu gehören die optimale Ausnutzung der verfügbaren Fläche und der Einsatz von bewehrten Erddämmen, sowie Bioreaktortechnologie zur Erhöhung der Kapazität und Recyclingmethoden, Abfallbehandlung und Energierückgewinnung. Auch in Zukunft werden Deponien eine wichtige Rolle bei der Abfallentsorgung spielen; es wird aber zunehmend Wert auf Recycling gelegt, Abfallminimierung sowie auf Technologien zur Nutzung von Abfallstoffen zur Energieerzeugung und auf die nutzbringende Verwertung der Abfallstoffe.

1. Einführung

Abfallmanagement umfasst die Sammlung, den Transport, das Recycling, die Behandlung, die Entsorgung und die Überwachung von Abfallstoffen. Es handelt sich üblicherweise um durch menschliche Aktivitäten erzeugte Stoffe; der Aufwand wird im Allgemeinen betrieben, um deren Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen oder auf die Umwelt zu reduzieren, oder aus ästhetischen Gründen. Alle Abfallstoffe, ob fest, flüssig, gasförmig oder radioaktiv, gehören in den Aufgabenbereich des Abfallmanagements. Deponien dienen der Entsorgung von festem Abfall durch Vergraben; sie sind die älteste Form von Abfallmanagement. Geschichtlich gesehen sind Deponien die am häufigsten angewandte Methode organisierter Abfallentsorgung, sie sind es bis heute an vielen Orten rund um den Globus, so auch in Nordamerika. Deponiestandorte werden zum Abfallmanagement

eingesetzt, z. B. zur temporären Lagerung, zur Konsolidierung und zum Umladen oder zur Behandlung der Abfallstoffe (Sortieren, Aufbereiten oder Recyceln); solche Deponien werden üblicherweise Abfallbehandlungsanlagen oder Abfallumschlagstationen genannt. Dieser Artikel beschreibt die historische Entwicklung (Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft) von Deponien in Nordamerika mit besonderem Augenmerk auf die in den USA üblichen Praktiken.

2. Deponiebau-Management – Die Geschichte

Seit jeher haben Menschen Abfall produziert, dessen Entsorgung aber wurde erst um 10.000 vor Christus zum Problem, als die Menschen anfangen, ihr Nomadentum zugunsten des Lebens in Gemeinschaften aufzugeben. Für das Abfallmanagement verließen sich nomadische Lebensweisen auf natürliche Kräfte – Sonnenlicht und Mikroben im Wasser und Boden waren in der Lage, Abfall und Fäkalien abzubauen, solange die Bevölkerungsdichte auf niedrigem Niveau blieb (Phillips, 1998). Die Zunahme nicht nomadischer Gemeinden jedoch führte zu einer Zunahme der Bevölkerungsdichte. Dadurch konzentriert sich mehr Abfall auf eine geringere Fläche (Niemczewski, 1977). Mit der Zunahme größer werdender Siedlungen wuchs das Problem der Behandlung von festen Abfallstoffen in den ersten Städten.

Um 500 vor Christus wurde die erste bekannte Müllhalde der westlichen Welt in Athen eingerichtet. Hier mussten die Bürger ihren Abfall mindestens eine Meile außerhalb der Stadtgrenze entsorgen. Jedoch blieb die Abfallablagerung innerhalb der Stadtgrenzen die primäre Entsorgungsoption in Europa und den USA bis zu den späten 1800er-Jahren, als eine Verbindung zwischen Krankheiten und unhygienischen Umweltbedingungen festgestellt wurde (NSWMA, 2008).

In den USA haben sich Abfallmanagementansätze als Antwort auf zwei wichtige Faktoren entwickelt: erstens, um dem Wunsch nach einem verbesserten öffentlichen Gesundheitsschutz zu entsprechen und zweitens, viel später, um die Umwelt zu schützen (Roberts, 2007; Niemczewski, 1977). Ein Überblick über die Geschichte des Abfallmanagements zeigt, dass die Entwicklung dieses Vorgangs in mehrere, relativ gut definierte Zeitabschnitte aufgeteilt werden kann. Jeder dieser Abschnitte zeigt eine einzigartige Einstellung zum Umgang mit Abfallmanagement (Roberts, 2007; NSWMA, 2008).

- **Vor 1800:** Während der Kolonialzeit gab es nur wenige Sanitärvorschriften in den amerikanischen Kolonien. Stadtbewohner entsorgten ihre Essensabfälle und ihren Müll in die Straßen, Gassen und Wasserläufe der Städte. Die Regierung spielte kaum eine Rolle bei der Entwicklung von Sanitärsystemen.
- **Ab 1800:** Mit dem Wachsen der Städte nach dem Bürgerkrieg entstanden größere sanitäre Probleme, und häufige, oft verheerende Epidemien waren das Ergebnis. Diese Epidemien waren im Wesentlichen der Anlass für die bundesstaatliche Regierung, ihre Rolle bei der Sicherung sanitärer Standards wahrzunehmen, indem sie 1897 das National Board of Health ins Leben rief.

Vor den 1890er-Jahren hatten nur ganz wenige Gemeindeverwaltungen ein organisiertes System zur Müllsammlung und -entsorgung organisiert (Abb. 1). Mit Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Notwendigkeit für solche organisierte Systeme deutlich, vor allem im Zusammenhang mit den folgenden vier öffentlich diskutierten Sachverhalten:

- (1) mit dem Wachstum der Städte stieg der Konsum in der amerikanischen Gesellschaft, und damit wurden Hausmüll, Asche, Pferdeäpfel, Straßenkehricht und allgemeiner Abfall zu immer größeren Problemen für Städte und Einzelpersonen;
- (2) die von unhygienischen Bedingungen ausgehende Gefahr für die öffentliche Gesundheit wurde klar erkannt;
- (3) sowohl Bürger als auch Politiker verstanden, dass eine saubere Stadt Unternehmen anziehen und Arbeitsplätze schaffen würde; dies würde die Wirtschaft ankurbeln;
- (4) die Beteiligung von Gemeindeverwaltungen an öffentlichen Sanitäreinrichtungen war mit Wasserversorgung und Abwassermanagementsystemen bereits gut etabliert. Abfallsammlung und -entsorgung wurden als natürliche Erweiterung von öffentlichen Einrichtungen angesehen und Bürger verlangten immer mehr nach Lösungen.



Abbildung 1: In den späten 1860er wurde Abfall in Fässern am Straßenrand abgestellt und von „Plünderern“ und Tieren teilweise „entsorgt“ [NSWMA (2008)]

- **Frühe 1900er - 1945:** Während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, geprägt von zwei Weltkriegen und der „Großen Depression in den USA“, spielte das Abfallmanagement – trotz einer dramatischen Zunahme der Menge an Hausmüll – immer noch eine untergeordnete Rolle; Gemeinde- und Kreisverwaltungen konzentrierten sich auf Wasserversorgung und Abwassermanagement.

Die USA erlebten eine bemerkenswerte industrielle Entwicklung und eine wirtschaftliche Erholung nach dem ersten Weltkrieg. Technische Vorschritte, die Fließbandfertigung, einfache Finanzierung sowie steigende Einkommen hatten eine expandierende Mittelschicht zur Folge mit einer Zunahme an Hausmüll, der verwaltet und recycelt werden musste. Daher begannen die Stadt- und Gemeindeverwaltungen mit der Abfuhr und Entsorgung von Müll innerhalb ihres Gebietes. Bis zum Ende der 1920er Jahre waren die Abfuhr- und Entsorgungskosten wegen der immer größer werdenden Städte erheblich gestiegen, so dass die Verwaltungen Möglichkeiten zur Kosteneindämmung finden mussten. Statt eines integrierten Abfallmanagementsystems beschlossen sie jedoch lediglich, mechanisierte Abfuhr- und Entsorgungsdienste zu vergeben. Während dieser Zeit fingen Verwaltungen an,

Abfall in zentralisierten Umschlaganlagen zu sammeln, um ihn dann mit größeren Fahrzeugen, Frachtkähnen und Eisenbahnwagen an Entsorgungsstellen zu bringen.

Zwischen den Kriegen waren Müllhalden die übliche Entsorgungsmethode für Hausmüll, und viele Ortschaften besaßen eine städtische Müllhalde, auf die ihr Abfall gekippt wurde. Auch wenn sie einfach zu errichten und relativ billig zu betreiben war, war eine Kippe äußerst unhygienisch und oft in der Nähe eines Flusses oder Bachs gelegen, wo sie die Wasserqualität und -versorgung leicht bedrohen konnte. Erst 1929 erließ die US-Regierung die erste Standorteinschränkung für Müllkippen. Diese empfiehlt – schreibt aber nicht vor –, dass Standorte für Kippen aus Hygienegründen weit entfernt von Flussufern liegen sollten.

In den 1920er-Jahren wurde das Konzept einer "geordneten Abfallbeseitigungsanlage" in Großbritannien entwickelt. Die Briten nannten dieses Verfahren "geordnetes Kippen", aus dem der Begriff "Kippgebühr" wahrscheinlich stammt. Während das Abladen auf offenen Halden über Jahre praktiziert worden war, führte das Konzept einer wechselnden Schichtenfolge aus Abfall und Boden bzw. einem anderen, nicht faulenden Material zu der Idee einer quasi-technischen Deponie. Der Glaube war, dass Ungeziefer, Gerüche und Brände mit diesem Verfahren eingedämmt werden könnten, was die Halden hygienischer und weniger geruchsbelästigend machen würde.

Im Jahre 1937 wurde die erste moderne "geordnete Deponie" der USA nach britischem Vorbild in Fresno, Kalifornien, in Betrieb genommen. Mit dieser Deponie wurden die Verfahren Grabenaushub, Verdichten und tägliches Abdecken des Abfalls mit Erde eingeführt; dies wird üblicherweise in der Literatur als "trench-and-fill" bezeichnet. Die geordnete Hausmülldeponie in Fresno wurde zum Bauwerk nationaler historischer Bedeutung erhoben, was die Wichtigkeit der Abfallbeseitigung in der städtischen Gesellschaft unterstreicht. Der Einsatz geordneter Deponien breitete sich in den 1930er und 1940er Jahren allmählich über das ganze Land aus.

- **Nachkriegszeit 1945 bis 1964:** Mit der Zuwanderung der Bevölkerung in die Vorstädte in den Jahrzehnten nach dem zweiten Weltkrieg nahm die Ausdehnung der Städte in den USA zu. Die Zusammensetzung des festen Abfalls änderte sich mit der zunehmenden Verfügbarkeit von fertig verpackten Waren. Die zunehmende Verwendung von Papierverpackungen und Plastikbehältern bewirkte eine Verringerung des Nahrungsmittelanteils im Hausmüll, während der Verpackungsanteil anstieg. In den 1950er Jahren wurden außerdem Produktion und Einsatz von Einwegprodukten (z. B. Pappeller, Rasierer, Windeln usw.) allgemein üblich. Mit dieser neuen Verbrauchergesellschaft und dem Anstieg der Bevölkerungszahl ging ein drastischer Anstieg der Menge und Vielfältigkeit an festen Abfällen einher, der neue Herausforderungen an die städtischen Hausmüllmanagementsysteme stellte.

In weiten Teilen der USA waren Deponien weiterhin die eingesetzte Methode der Abfallentsorgung. Offene Müllkippen mit all ihren Problemen wie Bränden, Geruchsbelästigung und Schädlingsbefall waren vielerorts immer noch in Betrieb. Auch die öffentliche Müllverbrennung war bis in die 1960er Jahre verbreitet. Die Verordnung zur Reinhaltung der Luft 1963 führte dann zur Schließung vieler umweltbelastender Anlagen. Die Verantwortung für die Abfuhr und Beseitigung fester Abfälle lag primär bei den Stadt- und Gemeindeverwaltungen. Für diese wurde es zunehmend schwierig, die mit wachsenden Bevölkerungszahlen, Konsum und Industrie stetig steigenden Abfallmengen zu bewältigen.

- **1965 - 1991:** 1965 empfahl US-Präsident Lyndon Johnson der Bundesregierung den Staaten bei der Lösung der drängenden Abfallbeseitigungsprobleme, die ernste Umweltschäden zur Folge hatten, zur Seite zu stehen. Im selben Jahr verabschiedete der Kongress das Gesetz zur Entsorgung festen Abfalls (Solid Waste Disposal Act - SWDA), das als Title 2 der Ergänzungen von 1965 zum Gesetz zur Reinhaltung der Luft (Clean Air Act) von 1963 eingeführt wurde. Dieses erste Bundesgesetz schuf eine Bundesbehörde für Abfallwirtschaft, die zuständig für die Unterstützung der Verwaltungen der Staaten und Kommunen bei der Lösung der technischen und finanziellen Fragen war, die sich bei der Entwicklung und dem Betrieb von Abfallentsorgungsprogrammen ergaben. Außerdem hatte die Behörde sich um die Erstellung von Richtlinien für Abfuhr, Transport, Verwertung und Entsorgung zu kümmern. Das Gesetz war der erste Anlauf der Bundesregierung zur Einrichtung eines umfassenden Netzwerkes für die nationale Abfallentsorgung.

1970 verabschiedete der Kongress das erste Gesetz zur Wertstoffrückgewinnung und verlagerte damit den Schwerpunkt des Engagements auf Bundesebene von der Abfallentsorgung auf Recycling, Wertstoffrückgewinnung und Energiegewinnung aus Abfall. Im selben Jahr wurde die US Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency - EPA) ins Leben gerufen, die die Umweltschutzabteilungen der Ministerien für Gesundheit, für Bildung, für Soziales, für Landwirtschaft, für Innere Angelegenheiten sowie anderer Bundesministerien in sich vereinte.

Am 21. Oktober 1976 verabschiedete der Kongress das Gesetz zur Bewahrung und Rückgewinnung von Wertstoffen (Resource Conservation and Recovery Act - RCRA), um die wachsenden Probleme in Angriff zu nehmen, denen sich die Nation aufgrund der steigenden Mengen an Haus- und Industriemüll gegenüber sah (EPA, 2013c). In diesem Gesetz wurde ein umfassendes Engagement auf Bundesebene bei der Abfallwirtschaft festgelegt, das auch eine Überwachungsfunktion mit einschloss. Die nationalen Ziele des RCRA, das eine Änderung des SWDA von 1965 darstellte, waren der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt vor den potentiellen Gefahren der Abfallentsorgung, die Einsparung von Energie und natürlichen Rohstoffen, die Reduzierung der Müllmenge sowie die Sicherstellung eines umweltgerechten Abfallmanagements (EPA, 2013c).

1980 verabschiedete der Kongress das Gesetz "Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA, allgemein bekannt als "Superfund") als direkte Reaktion auf das Love-Canal-Debakel. Der Love Canal war ursprünglich geplant von einem Mr. William Love Ende 1892 als Industriestadt mit billiger Energie aus einem Kanal, der den oberen und den unteren Niagara-Fluss im Hinterland des Staates New York miteinander verbinden sollte. Aufgrund finanzieller Probleme wurde das Projekt von Mr. Love aufgegeben, und das teilweise fertiggestellte Projekt wurde 1920 verkauft. Über 30 Jahre lang wurde der Kanal als Müllhalde für Hausmüll und chemische Abfälle der Stadt Niagara, New York und weiterer Kommunen in der Umgebung benutzt. 1953 wurde die Halde mit Erde abgedeckt und an das Niagara-Schulsystem für 1 US\$ verkauft. Das Gelände des Kanals und seine Umgebung wurden für den Bau einer Wohnsiedlung und Schule benutzt. 1978 begannen nach schweren Regenfällen giftige Chemikalien aus dem alten Kanal auszutreten und gelangten in die Gärten und Keller der Gemeinde. Sie verursachten ernsthafte Gesundheitsschäden in der Umgebung. Viele Fälle von Krebs, Geburtsschäden und damit verbundenen gesundheitlichen Schäden waren die Folge. Das Love Canal Problem wurde ins Licht der Öffentlichkeit gezerrt, als Präsident Carter das gesamte Areal zum Katastrophengebiet erklärte und Notfall-Fonds zur Evakuierung der Bürger bereitstellte. Zweck des Gesetzes war es, eine staatliche Lösungsstrategie für Probleme zu implementieren, die sich aus dem bisherigen Umgang mit gefährlichem Abfall ergaben, diejenigen zur Rechenschaft zu ziehen, die solche Probleme verursachen, sowie für die Sanierung von verseuchten Böden und Grundwasser Sorge zu tragen. Mit dem CERCLA wurden auch verschiedene Steuern für die chemische und erdölverarbeitende Industrie eingeführt, die in einen Treuhandfonds für Sanierungsmaßnahmen eingezahlt wurden (daher der Name "Superfund") – Abbildung 2.

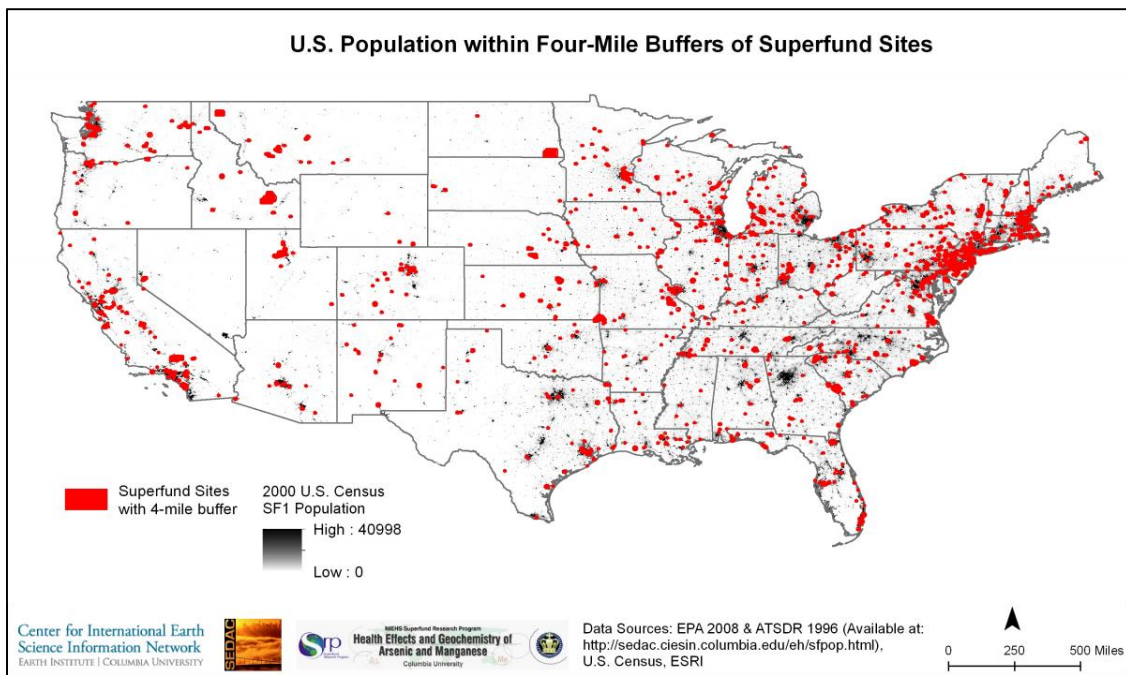


Abbildung 2: Superfundstandorte in USA in 2008

1984 verabschiedete der Kongress in Abänderung des RCRA die Ergänzung für gefährliche Festabfälle von 1984 (Hazardous and Solid Waste Amendments of 1984 - HSWA). Das HSWA setzte strenge neue Anforderungen zur Behandlung und Entsorgung von gefährlichem Abfall in Kraft und beauftragte die EPA mit der Entwicklung von Kriterien für neue Festmülldeponien, um die Wahrscheinlichkeit der Entstehung neuer Superfund-Schauplätze aufgrund schlecht gebauter und betriebener Deponien drastisch zu reduzieren. So veröffentlichte die EPA 1991 ein umfassendes Regelwerk für den Bau und Betrieb von Deponien für Hausmüll mit dem Titel "Kriterien für Hausmülldeponien". Es machte jeden einzelnen Staat für die Inkraftsetzung der neuen Regeln und die Schließung offener Deponien verantwortlich.

Wie zuvor erwähnt sind die zwei primären Ziele des Hausmüllmanagements der Schutz der Gesundheit der Bevölkerung und der Schutz der Umwelt. Heutzutage gibt es aufgrund verbesserter Technologien und eines tieferen Verständnisses der Verhinderung von Umweltverschmutzung ein drittes Ziel: der weise Umgang mit Wertstoffen und Energiereserven (Phillips, 1998).

In den letzten 30 Jahren hat sich der Umgang mit Hausmüll erheblich verbessert. Überall in den USA haben moderne, gut geplante Deponien und Anlagen zur Energiegewinnung aus Abfall die offenen Müllhalden und umweltverschmutzenden Verbrennungsanlagen ersetzt. In den meisten Kommunen ist das Recycling zum festen Bestandteil des Hausmüllmanagements geworden. Einsparungen an Material und Energiereserven als Bestandteil des Hausmüllmanagements wurde zum Schlüsselkriterium für nachhaltige Entwicklung.

3. Verschiedene Arten von Hausmüll

Unabhängig davon wo gelebt, gearbeitet oder gespielt wird, immer wird Abfall produziert. Für die längste Zeit in der Geschichte war die von Menschen produzierte Abfallmenge aufgrund niedriger Bevölkerungsdichte und geringer Ausbeutung von Rohstoffquellen unbedeutend. Hinzu kam in der Vergangenheit die nomadische Lebensweise. Abfall in vormodernen Zeiten bestand in erster Linie aus Asche und biologisch abbaubarem Rückständen, und dieser wurde der Erde wieder zugeführt und hatte eine minimale Auswirkung auf die Umwelt. Werkzeuge waren aus Holz oder Metall hergestellt und üblicherweise wiederverwendet oder über Generationen weitergegeben. Mit Beginn der Industrialisierung und anhaltendem Städtewachstum in den großen Ballungszentren in England und anderswo verursachten die wachsenden Müllberge einen schnellen Niedergang der Hygienebedingungen und der allgemeinen Lebensqualität in den Städten.

Die folgenden Abfallstoff-Klassen in der heutigen Zeit, hier in abnehmender Reihenfolge ihres Gefährdungspotentials, bilden den Großteil der zu behandelnden und/oder zu entsorgenden festen Abfallstoffe in den USA (Bonaparte et al. 2002):

- Gering radioaktiver Abfall;
- Gefährlicher/giftiger Abfall;
- Erzschlackeabfälle;
- Krankenhaus-/Forschungsabfall;
- Hausmüll (MSW – Municipal Solid Waste);
- Asche aus Verbrennungsanlagen;
- Klärschlamm;
- Belasteter Schlamm;
- Asche aus der Stromerzeugung;
- Bergwerksabraum;
- Bau- und Abrissabfall (CDD – Construction and Demolition Debris).

Hausmüll besteht aus Materialien, die üblicherweise von Menschen entsorgt werden. Ohne Sortierung können das diverse Sachen sein, z. B. Verpackungsmaterial, Essbares, Gartenabfälle, Möbel, Computer, Reife, Küchengeräte, Chemikalien aus dem Haushalt, Glass und vieles mehr. Hausmüll sollte aber keinen Industriemüll oder Bauschutt beinhalten. In USA wurden nach EPA Angaben in 2011 ca. 227 Millionen Tonnen Müll produziert, also ca. 728 kg pro Einwohner, wovon mehr als die Hälfte in Deponien entsorgt worden ist (EPA, 2013a). Im Vergleich dazu: EU in 2008 ca. 524 kg/Einwohner; Tschechische Republik 300 kg/Einwohner; Dänemark 800 kg/Einwohner (Eurostat 2010, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>).

Tabelle 1 zeigt eine EPA-Schätzung der Menge an erzeugtem Hausmüll zwischen 1960 und 2011. Nicht in dieser Tabelle enthalten sind Bauabfälle, Asche aus Verbrennungsanlagen, Schlämme sowie ungefährlicher Industrieabfall; sie müssen zu den angegebenen Mengen hinzuaddiert werden.

	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2007	2009	2010	2011
Abfallmenge	88,1	121,1	151,6	208,3	243,5	253,7	256,5	244,3	250,5	250,4
Recycling	5,6	8,0	14,5	29,0	53,0	59,2	63,1	61,6	65,0	66,2
Kompostierung	gering	gering	gering	4,2	16,5	20,6	21,7	20,8	20,2	20,7
Gesamtes Recycling	5,6	8,0	14,5	33,2	69,5	79,8	84,8	82,4	85,2	86,9
Entsorgung nach Recycling	82,5	113,1	137,1	175,1	174,0	173,9	171,7	161,9	165,3	163,5
Verbrennung	0,0	0,4	2,7	29,7	33,7	31,6	32,0	29,0	29,3	29,3
Deponierung	82,5	112,7	134,4	145,3	140,3	142,3	139,7	132,9	136,0	134,2

Tabelle 1: Erzeugung, Wertstoffrückgewinnung, Kompostierung, Verbrennung mit Energiegewinnung sowie Deponierung von Hausmüll-Abfall, 1960 bis 2011 (in Mio. Tonnen) (EPA, 2013a).

Anzumerken ist, dass Programme zur Abfallreduzierung und -verwertung tatsächlich ihren Zweck in Bezug auf die jeweils erzeugten und entsorgten Abfallmengen erfüllen. Die Entsorgung auf Deponien mit bautechnisch durchgeplanten Abfall-Barrieresystemen ist nach wie vor die häufigste Methode in den USA für die Entsorgung von Hausmüll und vielen anderen Abfallarten.

4. Deponievorschriften

4.1 Überblick

Mehrere Methoden zur geordneten Entsorgung von Abfällen wurden in den 1950er-Jahren entwickelt. Das tägliche Zudecken der aktiven Deponiefläche unterscheidet geordnete Deponien von allen anderen Müllkippen oder -halden (Hickmann, 1999). Dieser Abschnitt zeigt die Entwicklung von Vorschriften für Betrieb und Management von Deponien auf.

Im Jahre 1959 hat die American Society of Civil Engineers (ASCE) die ersten Richtlinien für "von der Umwelt abgesicherte Deponien" veröffentlicht. Diese empfahlen das Verdichten des Abfalls und dessen tägliches Abdecken mit Boden, um Gerüche zu reduzieren und Nagetiere fern zuhalten (NSWMA, 2008).

Wie bereits erwähnt war die SWDA von 1965 die erste US-weite Gesetzgebung, die das Management von Hausmüll behandelte. Bis Mitte der 1970er Jahre hatten alle Bundesstaaten Vorschriften für das Management von Hausmüll eingeführt. Die Inhalte dieser Vorschriften waren jedoch sehr unterschiedlich. Während dieser Zeit wurde in vielen Bundesstaaten das offene Abfall-Verbrennen auf Müllhalden verboten, diese wurden nach und nach durch gesicherte Deponien ersetzt. Zusätzlich verlangten einige Staaten, dass Deponien Zulassungen vorlegen und Mindestanforderungen für den Entwurf und Betrieb einhalten mussten.

Das RCRA im Jahre 1976 (EPA 2013c) trennte Abfallsorten in gefährliche (nach RCRA Subtitle C) und ungefährliche (nach RCRA Subtitle D). Subtitle C forderte die Erstellung eines umfassenden Managementsystems für gefährliche Abfälle, um sicherzustellen, dass solche Abfälle von ihrer Entsehung bis zur endgültigen Entsorgung sicher behandelt wurden. Subtitle D wurde konzipiert, um die Entsorgung nicht gefährlicher Abfälle zu behandeln und sicherzustellen, dass Deponien für nicht gefährliche Abfälle so geplant und errichtet wurden, dass ihre Auswirkungen auf die Umwelt minimiert wurden. Ein drittes RCRA-Programm, Subtitle I, regelte unterirdische Lagerbehälter für gefährliche Stoffe und Mineralölprodukte (EPA, 2013c).

Im Jahre 1979 hat die EPA Kriterien für geordnete Deponien erstellt. Diese beinhalteten: Einschränkungen für den Bau in Aue-Gebieten; den Schutz von bedrohten Tierarten; den Schutz von Oberflächenwasser; den Schutz des Grundwassers; die Bekämpfung von Krankheitsüberträgern (Nagetieren, Vögeln, Insekten); ein Verbot der offenen Verbrennung; sicherer Umgang mit zündfähigem Gas (Methan); Brandschutz durch Verwendung von Abdeckmaterialien; Verhinderung der Gefährdung von Flugzeugen durch Vögel.

1980, als Antwort auf RCRA Subtitle C, hat EPA die ersten Vorschriften für das Management von gefährlichem Abfall erlassen. Diese führten mehrere Anforderungen ein: Identifizierung von festen und gefährlichen Abfallstoffen, Vorschriften für Erzeuger von gefährlichem Abfall, Vorschriften für Spediteure von gefährlichem Abfall, Anforderungen an Entsorgungsanlagen für gefährlichen Abfall sowie Vorschriften als Voraussetzung für die Betriebserlaubnis einer

Entsorgungsanlage für gefährlichen Abfall. Diese Anforderungen beschrieben das Managementziel für gefährlichen Abfall "von der Wiege bis zur Bahre" (EPA, 2013c).

Das HSWA von 1984 definierte zum ersten Mal die Abfallminimierung als Bestandteil des Managements von festen Abfällen. Auf Grundlage des RCRA in der mit dem HSWA geänderten Version wurde die EPA beauftragt, Mindestanforderungen für den Deponiebetrieb zu erarbeiten. Diese Mindestanforderungen schlossen Überwachungssysteme ein, die eine Schadstoffbelastung des Grundwassers feststellen sollten, außerdem Abhilfemaßnahmen im Falle einer Belastung, und grundsätzliche Vorschriften zu Standortwahl und Betrieb. Falls diese Auflagen nicht eingehalten wurden, wurde eine Einrichtung als offene/wilde Halde eingestuft. Die Entsorgung von Hausmüll auf einer Halde wurde untersagt (Phillips, 1998).

Die "*Criteria for Municipal Solid Waste Landfills*" (Kriterien für kommunale Feststoffdeponien), 1991 von der EPA bekannt gegeben, verlangten von allen bestehenden Hausmüll-Deponien in den USA, dass sie entweder:

- (1) ein umfassendes Programm zur Überwachung von Grundwasser und Deponiegas einrichten, eine finanzielle Sicherung organisieren, um sicherzustellen, dass entsprechende Mittel für eine geordnete Schließung und nachfolgende Überwachung zur Verfügung standen, und gewisse betriebliche Auflagen einhalten; oder
- (2) geschlossen werden: Neue Deponien mussten demnach mit einem technischen Dichtungssystem errichtet werden, das in der Lage war, das Einsickern von Deponiesickerwasser ins Grundwasser zu verhindern; sie mussten darüber hinaus die Auflagen betreffend Grundwasser- und Deponiegasüberwachung, finanzielle Sicherung sowie verschärfte betriebliche Auflagen einhalten. Was die Vorschriften betraf, war die "offene/wilde Halde" nun endlich Geschichte (Roberts, 2007).

4.2 Aktuelle Vorschriften

In den USA unterliegen Deponien aktuell den Vorschriften der EPA und der jeweiligen bundesstaatlichen Umweltbehörde. Hausmüll, gefährliche Abfälle sowie bestimmte andere Abfallsorten unterliegen Vorschriften der RCRA, einschließlich der Änderungen durch die HSWA.

4.2.1 Deponien für gefährliche Abfälle

4.2.1.1 Definition

Der Begriff "gefährlicher Abfall", wie er von der EPA verwendet wird, hat eine sehr spezifische juristische Definition. Im Absatz 40 der Code of Federal Regulations (CFR), Part 261 (d. h. 40 CFR 261) wird Abfall als gefährlich definiert, wenn:

- er als gefährlicher Abfall gelistet ist (gelistete gefährliche Abfälle sind in 40 CFR 261, Subpart D spezifiziert);
- er aus gefährlichem Abfall nach der EPA-Definition stammt oder mit diesem gemischt ist;
- er nicht ausgeschlossen ist (manche Abfälle, wie Hausmüll, sind besonders identifiziert und vom gefährlichem Abfall ausgeschlossen); und
- wenn er eines der vier in 40 CFR 261, Subpart C beschriebenen Merkmale aufweist: (i) Entzündbarkeit; (ii) Korrosivität; (iii) Reaktivität; (iv) Toxizität nach der Definition des Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)-Tests.

Für die Einstufung eines Abfalls als gefährlich nach dieser Definition enthält Subtitle C der RCRA die einschlägigen Rechtsvorschriften. Spezielle EPA-Vorschriften für Abfall-Umschließungssysteme auf RCRA Subtitle C-Deponien, oberirdischen Deponien sowie Abfallhalden sind in 40 CFR 264 veröffentlicht.

4.2.1.2 Anforderungen an Basisdichtungssysteme

Nach RCRA Subtitle C müssen Deponien für gefährliche Abfälle über ein doppellagiges Dichtungssystem verfügen mit einem Leckdetektionssystem (LDS) zwischen den beiden Dichtungssystemen und einem Abwassersammlungs- und Ableitungssystem (im Englischen leachate collection and removal system - LCRS) oberhalb der Hauptbarriere (Abbildung 3). Der Zweck des LDS ist, eine Überwachung der Hauptbarriere zu ermöglichen (d. h. festzustellen, ob, und in welchem Ausmaß, Deponiesickerwasser durch das erste Dichtungssystem hindurchsickert) und eine Möglichkeit zur Entfernung solcher Flüssigkeiten zu bieten. Ein Doppeldichtungssystem mit einem LDS ist ein Markenzeichen der Vorschriften für gefährlichen Abfall in den USA (Bonaparte et al. 2002). Die Leistungsfähigkeit von Doppeldichtungen für in Nordamerika errichtete Deponien im Hinblick auf ihre Wirksamkeit beim Zurückhalten von Deponiesickerwasser wurde untersucht und für zufriedenstellend befunden durch Bonaparte et al. (2002); Bonaparte und Gross, (1990, 1993); Gross et al. (1990); und Rowe (2005, 2009).

Die Mindestanforderungen für die Bemessung von Doppeldichtungssystemen für Deponien für gefährlichen Abfall, zitiert in 40 CFR 264 Subpart 301 der RCRA Subtitle C Vorschriften, sehen folgenden Aufbau vor (von oben nach unten):

- Ein Abwassersammlungs- und -ableitungssystem (LCRS), das die Sickerwassersäule auf die primäre Dichtung auf 0,3 m oder weniger begrenzt;
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB) als primäre Barriere;
- eine 0,3 m mächtige mineralische Leckdetektionssystem (LDS) Entwässerungsschicht mit einer Mindestdurchlässigkeit von 1×10^{-4} m/s oder eine Geokunststoff-Entwässerungsschicht (geosynthetisches Dränsystem) mit einer Mindestdurchlässigkeit von 3×10^{-5} m²/s
- Sekundär-Barriere als Kombinationsdichtung aus einer KDB über einer 0,9 m mächtigen mineralischen Ton-Dichtung (compacted clay liner, CCL) mit einer maximalen Durchlässigkeit von 1×10^{-9} m/s.

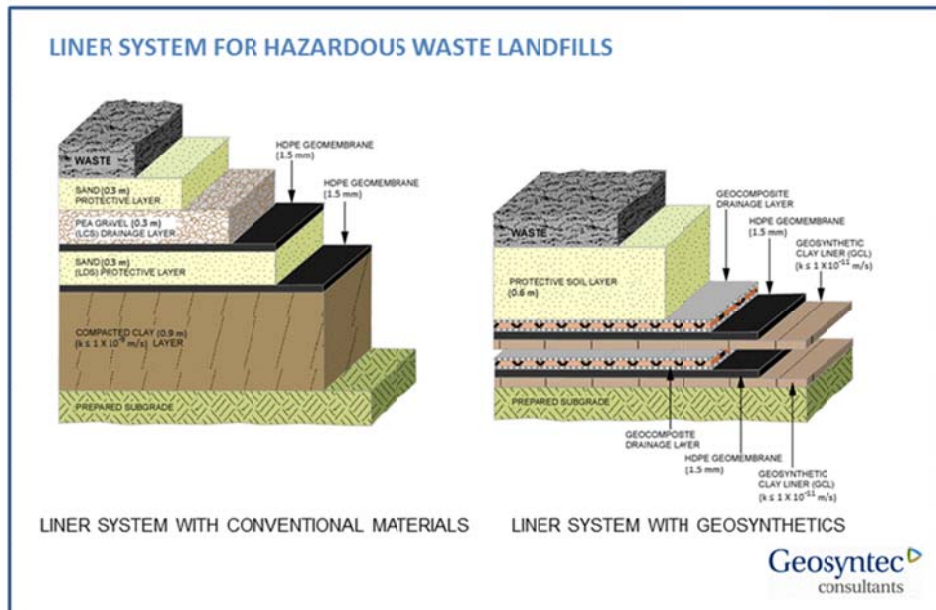


Abbildung 3: Typischer Querschnitt einer Basisdichtung für Sondermülldeponien

4.2.1.3 Anforderungen an Oberflächendichtungssysteme

Oberflächendichtungssysteme sind ein weiterer wichtiger Bestandteil von Deponien. Während Dichtungssysteme unterhalb des Abfalls (d. h. an der Basis sowie an den Böschungen der Deponie) verbaut werden, werden Oberflächendichtungssysteme über den fertig geschütteten und meist verdichteten Abfallkörper aufgebracht, so dass der Abfall komplett eingekapselt werden kann. Der Zweck und die Funktion des Oberflächendichtungssystems bestehen darin, das Einsickern von Niederschlagswasser in den Abfall zu minimieren bzw. zu verhindern; dadurch wird auf lange Sicht das Entstehen von Deponiesickerwasser sowie das Risiko einer Durchsickerung durch das Basisdichtungssystem in das Grundwasser und/oder die Umwelt eingeschränkt.

Die Anforderungen an Oberflächendichtungssysteme für Deponien für gefährlichen Abfall werden ebenfalls in Bundesvorschriften behandelt (d. h. 40 CFR 264, Subpart 310 oder Subtitle C der RCRA): Diese Vorschriften verlangen, dass Deponien für gefährlichen Abfall mittels eines Oberflächendichtungssystems verschlossen werden. Diese müssen bestimmte Leistungsmerkmale und Anforderungen aufweisen, u. a.:

“...eine Wasserdurchlässigkeit aufweisen, die geringer als oder gleich der Durchlässigkeit der Basisdichtung oder der anstehenden natürlichen Böden ist...”

Obwohl keine Mindestbemessungskriterien für Oberflächendichtungssysteme ähnlich denen für Basisdichtungen existieren, empfiehlt die EPA-Leitlinie (EPA, 1989) folgenden Mindestaufbau (von oben nach unten) für Oberflächendichtungssysteme für Deponien für gefährlichen Abfall (Bonaparte et al., 2002):

- eine oberste Schicht aus zwei Lagen: (i) entweder eine begrünte oder befestigte Oberfläche; und (ii) eine passende 0,6 m dicke Schutzschicht aus Oberboden oder Füllboden
- eine 0,3 m mächtige mineralische Entwässerungsschicht mit einer Mindestdurchlässigkeit von 1×10^{-4} m/s
- eine hydraulische Barriere als Kombinationsdichtung aus einer 0,5 mm mächtigen KDB über einer 0,6 m mächtigen CCL mit einer maximalen Durchlässigkeit von 1×10^{-9} m/s.

Die Abbildung 4 zeigt einen typischen Querschnitt aus den US-Bundesvorschriften für Deponien für gefährlichen Abfall mit dem beschriebenen Oberflächendichtungssystem über den Abfall sowie der Basisdichtung unterhalb des Abfallkörpers. Die Materialarten und -dicken sowie die Möglichkeit, Geokunststoffe alternativ zu den vorgeschriebenen Materialien einzusetzen, werden im anderen Kapiteln angesprochen.

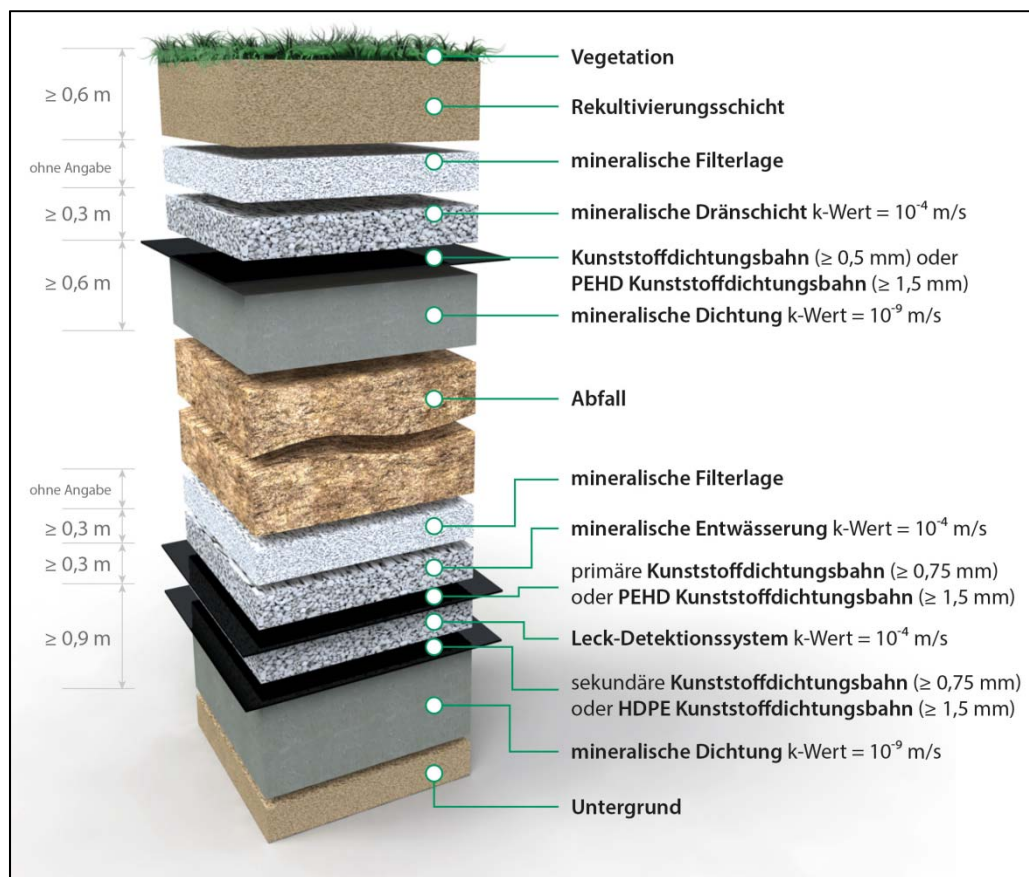


Abbildung 4: Oberflächen- und Basisdichtungssysteme für Deponien mit gefährlichem Abfall (Koerner, 2008)

Das RCRA-Zulassungsverfahren auf Bundesstaatsebene wird von der EPA benutzt, um die Hauptverantwortlichkeit für die Implementierung des RCRA-Programms für gefährlichen Abfall auf die einzelnen Bundesstaaten zu delegieren (EPA, 2013b). Dieser Vorgang sichert die Konsistenz sowie Mindestanforderungen auf Nationalebene bei gleichzeitiger Flexibilität für die Bundesstaaten in der Implementierung der Vorschriften. Staatliche RCRA-Programme müssen mindestens so streng wie die staatlichen Anforderungen sein; Bundesstaaten dürfen aber auch strengere Anforderungen fordern.

4.2.2 Hausmülldeponien

4.2.2.1 Überblick

Die für Hausmüll maßgeblichen US-staatlichen Vorschriften befinden sich in Subtitle D des RCRA. Hausmüll-Deponien sind üblicherweise zur Deponierung von Hausmüll vorgesehen, sie können aber auch für nicht gefährlichen Schlamm, festen Industrieabfall sowie Bauschutt-Abfall verwendet werden. Die für Hausmüll-Deponien (und für solche, die nicht gefährliche Verbrennungsasche entsorgen, d. h. Hausmüll-Aschedeponien) gültigen Bundesvorschriften sind in 40 CFR Part 258 enthalten (Subtitle D des RCRA). Die grundlegenden Vorschriften wurden am 9. Oktober, 1991 (EPA, 1991) veröffentlicht. Diese Vorschriften wurden von allen Bundesstaaten und Gebieten mit Deponievorschriften oder mit von der EPA genehmigten Gesetzen eingeführt. Das heißt, dass alle Hausmüll-Deponien den staatlichen Vorschriften in Subtitle D des RCRA entsprechen müssen – oder gleichwertigen staatlichen Vorschriften. Die föderalen Standards bzw. Vorschriften für MSA-Deponien beziehen folgende mit ein (EPA, 2013d):

- **Örtliche Einschränkungen** – stellen sicher, dass Deponien in geologisch geeigneten Gebieten errichtet werden, in entsprechender Entfernung von Verwerfungen, Feuchtgebieten, Überschwemmungsgebieten oder anderen Gebieten mit Einschränkungen.
- **Anforderungen an das Kombinationsdichtungssystem** – beinhalten u. a. eine Kunststoffdichtungsbahn mit einer darunterliegenden Schicht aus ca. 60 cm verdichtetem Ton als Dichtung an Deponiebasis und -böschungen, schützen das Grundwasser und darunter anstehenden Boden gegen Deponiesickerwasser-durchsickerungen.
- **Abwassersammlungs- und Ableitungssysteme** – werden auf der Kombinationsdichtung aufgebracht und leiten Deponiesickerwasser zur Behandlung und Entsorgung ab.
- **Betriebsabläufe** – beinhalten u. a. Verdichten des Abfalls und dessen Abdecken mit mehreren Dezimetern Boden, um Geruchsbildung zu dämmen, das Herumwehen von Abfall sowie Insektenflug zu verhindern und die öffentliche Gesundheit zu schützen.
- **Vorschriften zur Überwachung des Grundwassers** – schreiben die Überwachung von Grundwasserbrunnen vor, um festzustellen, ob Abfallstoffe aus der Deponie entwichen sind.
- **Vorschriften für die Schließung und Nachsorge** – beinhalten u. a. das Abdecken der Deponie und die langfristige Nachsorge geschlossener Deponien.

- **Abhilfemaßnahmen** – aus der Deponie entweichende Stoffe eindämmen und entsorgen, Vorschriften zum Schutz des Grundwassers einhalten.
- **Finanzielle Sicherung** – stellt finanzielle Mittel für Umweltschutz während und nach Schließung der Deponie (d. h. während der Schließung und Nachsorge).

Einen Querschnitt durch eine typische moderne Hausmülldeponie in USA, die den meisten o. g. staatlichen Anforderungen entspricht, ist in Abbildung 5 dargestellt.

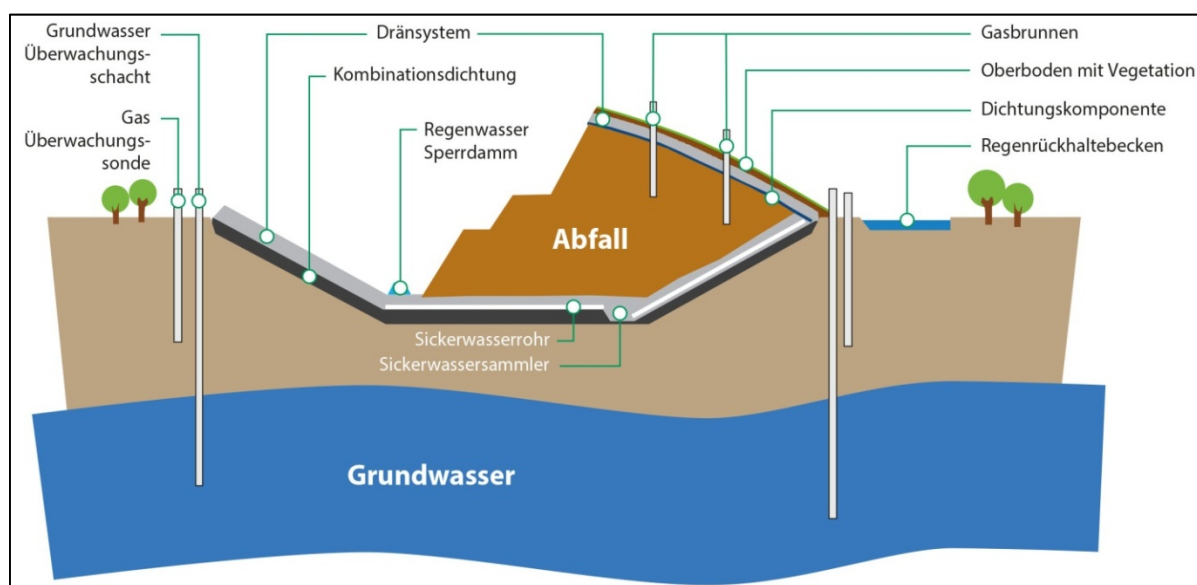


Abbildung 5: Querschnitt durch eine moderne Hausmüll-Deponie (Nwra, 2013)

Die Vorgaben der Bundesbehörden für Hausabfalldeponien (siehe Abbildung 5) beinhalten gemäß 40 CFR 258.40(a) zwei Mindestanforderungen für das Design einer einfachen Kombinationsdichtung und die Depomiesickerwassersammlung (LCRS), wie in Kap. 4.2.2.2 beschrieben. Die Vorgaben beinhalten auch Anforderungen an das Langzeitverhalten eines Dichtsystems, die mit Anforderungen an bestimmte Schwellenwerte zur Wahrung der Grundwasserqualität einhergehen, z. B. maximal zulässige Belastung in einem Abstand von 150 m von der Deponie. Nur der Direktor der Genehmigungsbehörde des Bundeslandes, die eine Zulassung für diesen Design hat, kann eine technische Ausführung genehmigen, die dem geforderten Langzeitverhalten entspricht. Der Beweis, dass natürlich anstehende tonhaltige Materialien den Anforderungen genügen, wird häufig mit den Modellen HELP und MULTIMED geführt. Die eingesetzten Modelle müssen vom Direktor des Bundeslandes zugelassen sein. Diese Anforderung an das Langzeitverhalten erlaubt im Allgemeinen Standorten mit natürlicherweise gering-durchlässigem Untergrund oder tief anstehendem

Grundwasserspiegel Deponien zu errichten/zu betreiben und damit den Mindestanforderungen genüge zu tun, ohne eine technische Barriere errichten zu müssen.

4.2.2.2 Anforderungen an Dichtungssysteme

Die in der staatlichen Subtitle D der RCRA-Vorschriften vorgegebenen Mindest-Bemessungsanforderungen für Hausmüll-Deponien sehen ein einzelnes Kombinationsdichtungssystem vor (Abbildung 6), das von oben bis unten wie folgt aufgebaut ist:

- ein Entwässerungssystem (LCRS), das die Deponiesickerwassersäule auf 0,3 m oder weniger begrenzt
- obere Lage der Kombinationsdichtung aus einer 0,75 mm dicken KDB (bzw. 1,5 mm wenn die KDB aus PEHD besteht)
- untere Lage der Kombinationsdichtung aus einer 0,6 m mächtigen mineralischen Tondichtung mit einer maximalen Durchlässigkeit von 1×10^{-9} m/s

Obwohl die staatlichen Mindest-Bemessungsanforderungen mit einer einzelnen Kombinationsdichtung von vielen Bundesstaaten übernommen wurden, verlangen einige Staaten, dass Hausmüll- bzw. -verbrennungssaschedeponien mit einem doppelagigen System ausgestattet werden. Auch wenn staatliche Vorschriften für Deponien für gefährlichen Abfall ein doppelagiges System vorsehen, bei dem die Sekundärdichtung aus einer Kombinationsdichtung besteht, werden Doppeldichtungen sowohl für die Haupt- als auch für die Sekundärdichtung von einigen Bundesstaaten gefordert. Doppellagige Kombinationsdichtungen, bei denen die primäre Dichtungskomponente aus einer KDB und einer Tondichtung besteht, sind schwer zu bauen, weil die Tonschicht auf den Geokunststoffen der darunter liegenden LDS und Sekundär-Kombinationsdichtung verdichtet werden muss (Giroud, 1993; Giroud et al. 1997). Giroud et al. (1997) haben jedoch gezeigt, dass der Einsatz einer geosynthetischen Tondichtungsbahn (Geosynthetic Clay Liner (GCL); Bentonitmatte) als geringdurchlässiger Bestandteil der Hauptkombinationsdichtung diese Thematik löst; dieses Konzept wurde US-weit von den meisten Staaten akzeptiert.

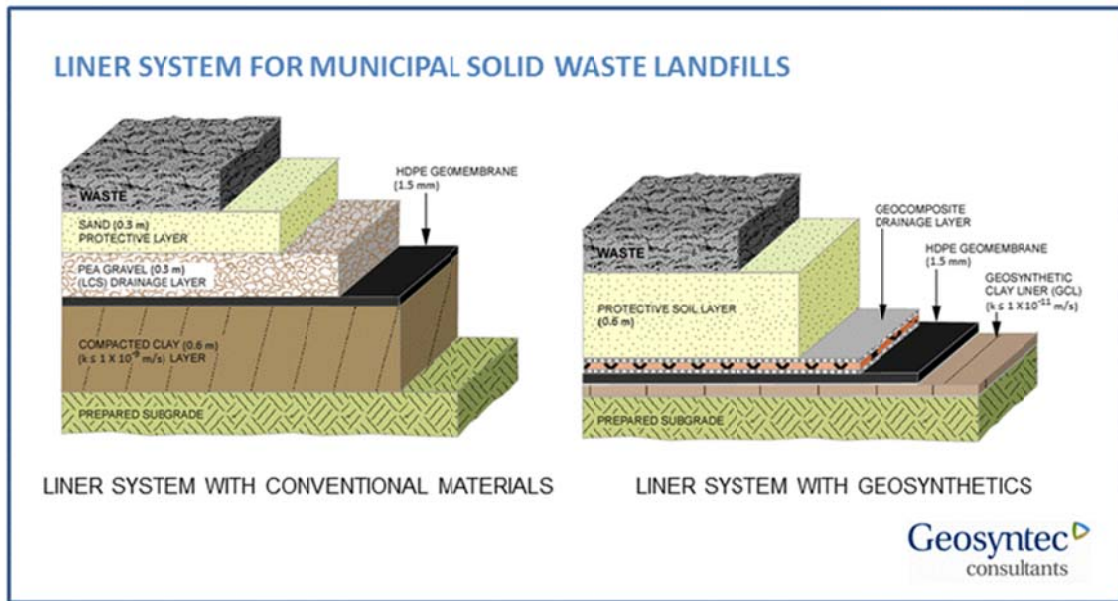


Abbildung 6: Typischer Querschnitt einer Basisdichtung einer Hausmülldeponie nach den US Vorschriften

Die Sickerwasserentwässerungssysteme LCRS sammeln Deponiesickerwasser und leiten diese von der Deponie zu einer funktionstüchtigen Sickerwasserbehandlung und -entsorgung. Die LCRS verfügen über eine Sickerschicht für Deponiesickerwasser, eine Filterlage sowie einem Netz aus Sickerrohren, die Sickerwasser sammeln und zu dafür vorgesehenen Tiefpunkten (Pumpensümpfen) in der Deponie führen. Das Deponiesickerwasser wird mit Tauchpumpen o. ä. aus den Pumpensümpfen entfernt.

Der Mindeststandard in den einzelnen Bundesländern ist eine einlagige Kombinationsdichtung, wobei einige Bundesländer (ca. 12 Stück) in Hausmülldeponien und Aschedeponien ein Doppeldichtungssystem fordern (siehe Abbildung 7).

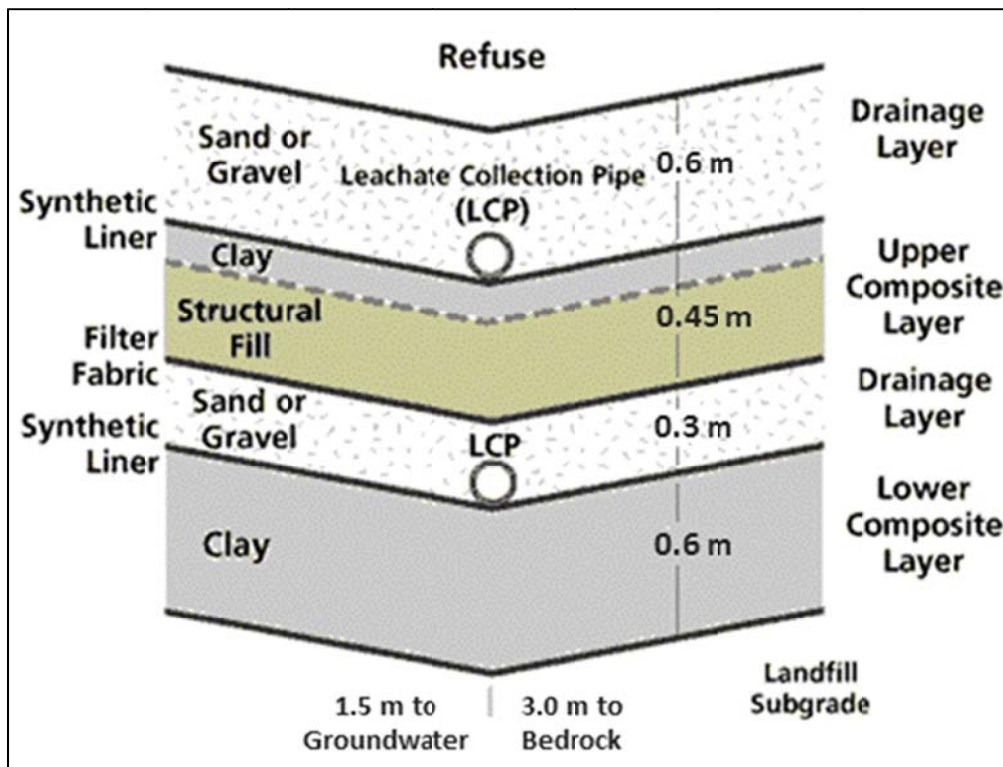


Abbildung 7: Basisdichtungssystem für Hausmülldeponien, wie im Bundesstaat New York umgesetzt (Vana und Phaneuf, 2000)

4.2.3.3 Anforderungen an Oberflächendichtungssysteme

Oberflächendichtungssysteme für Hausmüll-Deponien mit Basisdichtungen aus einer Kombinationsdichtung ähneln denjenigen für gefährlichen Abfall, außer dass die Vorschriften spezifizieren, dass die festgelegten Anforderungen aus 40 CFR Part 258.60 eingehalten werden müssen. Die Mindest-Bemessungsanforderungen für Oberflächendichtungssysteme für Hausmüll-Deponien bestehen aus folgenden Bestandteilen, von oben nach unten:

- eine 0,15 m mächtige Begrünungsschicht (z. B. Humus)
- obere Lage der Kombinationsdichtung aus einer 0,5 mm dicken KDB
- untere Lage der Kombinationsdichtung aus einer 0,45 mm mächtigen mineralischen Tondichtung, wobei dies eine maximale Wasserdurchlässigkeit von 1×10^{-7} m/s aufweisen muss.

RCRA Subtitle D lässt andere Oberflächendichtungssysteme zu; es muss jedoch nachgewiesen werden, dass diese hinsichtlich Durchsickerung und Erosionsbeständigkeit mit nach den staatlichen Vorschriften gebauten Dichtungssystemen gleichwertig sind. Dies hat den Einsatz alternativer Dichtungssysteme ermöglicht, wie z. B. exponierte KDB-Abdeckungen (exposed geomembrane covers, EGCs) sowie Verdunstungs-/Transpirations-Abdeckungen (evapotranspiration covers, ETCs) (Othman, 2013; EPA, 2003) ermöglicht. Wie in einem folgenden Kapitel angesprochen, hat der Einsatz von EGC für Hausmüll-Deponien dazu geführt, dass auf geschlossenen Deponien die Stromerzeugung mit flexiblen Solarkollektoren vorteilhaft betrieben werden kann (Gupta und Morris, 2013).

Die Abbildung 8 zeigt einen typischen Querschnitt einer Hausmüll-Deponie nach den US staatlichen Anforderungen. Sie stellt das Oberflächendichtungssystem oberhalb und das Basisdichtungssystem unterhalb des Deponiekörpers dar. Die Materialtypen und -dicken sowie Möglichkeiten für den Ersatz der in den Vorschriften vorgegebenen Materialien durch Geokunststoffe werden in den folgenden Kapiteln kurz behandelt.

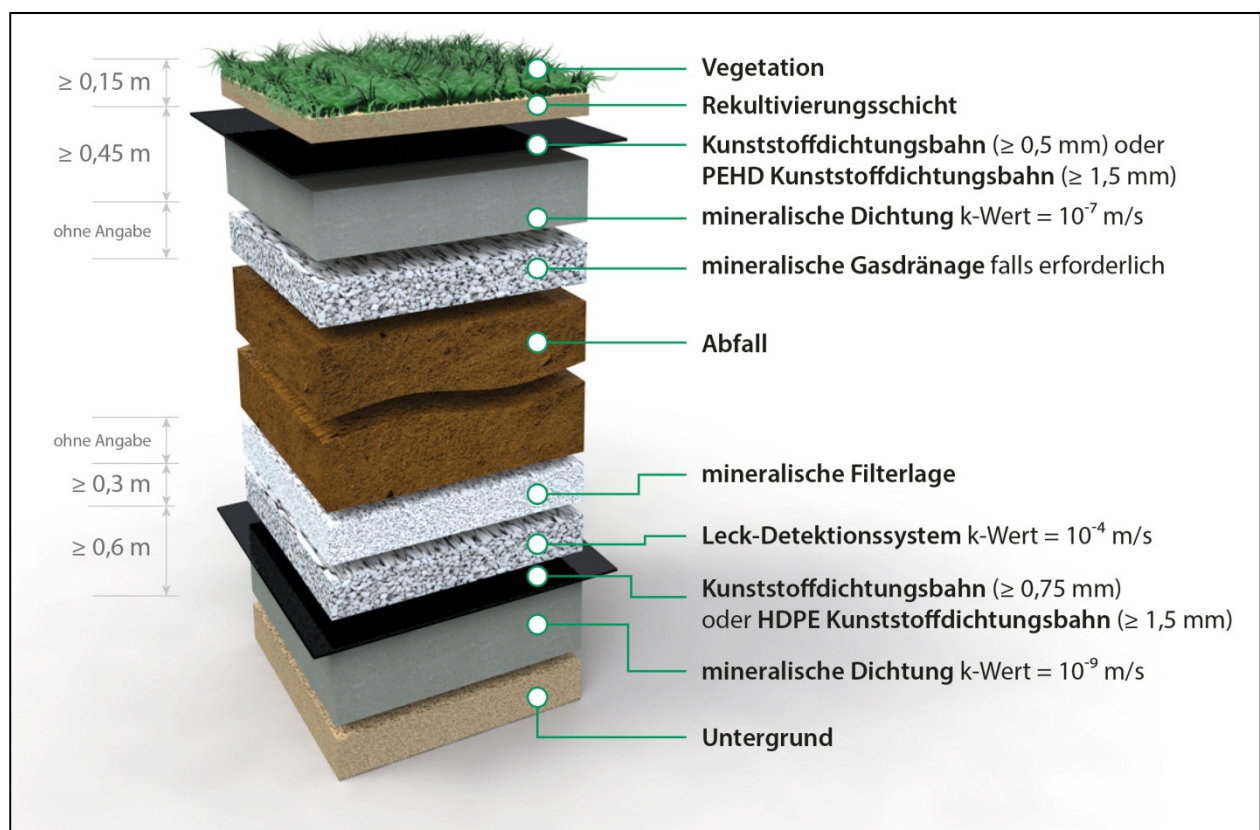


Abbildung 8: Oberflächendichtungssysteme für Hausmüll-Deponien (Koerner, 2008).

Anzumerken ist, dass die staatlichen Vorschriften für Hausmüll-Deponien zwei Mindest-Bemessungsanforderungen für einfache Kombinationsdichtungen und einem LCRS enthalten – siehe Abschnitt 4.3.2.1. Diese Mindest-Bemessungsanforderungen werden in 40 CFR 258.40(a)(2) beschrieben. Die Vorschriften schließen jedoch auch Mindestanforderungen für die Wirksamkeit unter 40 CFR 258.40(a)(1) ein. Diese schreiben ein Dichtungssystem vor, das nachweislich die Anforderungen der jeweiligen Grundwasservorschriften einhält (d. h. maximale Schadstoffbelastungswerte (maximum contaminant levels, MCLs) in einer maximalen Entfernung von 150 m von der Deponie.

Diese Wirksamkeit erlaubt den Bau von Deponien an Standorten mit natürlich anstehenden Böden geringer Durchlässigkeit, ohne dass die Forderung nach einem technischen Barriersystem nach 40 CFR 258.40(a)(2) erhoben wird. Der technische Nachweis, dass ein bestimmtes Dichtungssystem (z. B. eine natürlich anstehende Tonschicht) die Anforderungen hinsichtlich Wirksamkeit einhält, wird oft mithilfe der Computermodelle von HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) sowie MULTIMED (Multimedia Exposure Assessment Model) (EPA, 1993) geführt. Im Weiteren werden die Mindest-Bemessungsanforderungen berücksichtigt, die den Einsatz von Böden mit bekannten technischen Eigenschaften sowie von Geokunststoffen erfordern.

Unter Subtitle D des RCRA müssen Bundesstaaten Zulassungskonzepte einführen, die die Einhaltung entsprechender staatlichen Anforderungen in ihren Staaten sicherstellen. Das Gesetz verlangt ebenfalls, dass die EPA entscheidet, ob staatliche Zulassungskonzepte ausreichen, um die Einhaltung zu erfüllen. Die Genehmigung der Zulassungskonzepte setzt voraus, dass Bundesstaaten eine Teilnahme der Öffentlichkeit während des Zulassungsverfahrens ermöglichen. Diese kann öffentliche Versammlungen oder das Einreichen von Bedenken in schriftlicher Form an die Zulassungsbehörde einschließen (EPA 1998). Darüber hinaus müssen Staaten berechtigt sein, Zulassungen zu erteilen und Maßnahmen zu ergreifen, die die Einhaltung der staatlichen Anforderungen sicherstellen (EPA 1998).

4.2.3 Anforderungen für andere Abfallarten

Es existieren weiter gesetzliche Vorgaben für andere Abfallarten, z. B. für polychlorinierte Biphenyle (PCBs) and PCB-haltige Materialien, die unter dem "Toxic Substances Control Act (TSCA)" fallen. Das geltende Regelwerk ist 40 CFR 761.5.

Anforderungen für die Deponierung von Uran-haltigen Bergbauschlämmen, gemäß dem „Uranium Mill Radiation Control Act (UMTRCA)“ sind in dem Regelwerk 40 CFR 192.02 beschrieben.

In den Vergangenen Jahrzehnten gab es immer wieder Schadensfälle in Kohleaschedeponien (meist flüssige Lagerung), so dass derzeit auch hier über einheitliche Regelwerke diskutiert wird und in der Umsetzung sind. Auch diese sollen zukünftig EPA Vorschriften folgen.

5. Stand der Technik bei der Planung moderner Deponien

5.1 Bestandteile von Abfall-Umschließungssystemen

Deponiedichtungssysteme die den staatlichen und Bundesländer-Vorschriften/Anforderungen für Deponien entsprechen, schließen Basis- und Oberflächen-Dichtungssysteme und Entwässerungssysteme ein.

Sie können aus einer Reihe von Materialien wie Böden, Geokunststoffen, Zement und/oder Metallen bestehen. Beim Bau von modernen Deponien sind Bodenmaterialien und Geokunststoffe jedoch die am häufigsten verwendeten Materialien und werden daher vertiefend berücksichtigt. Folgende Materialien werden in der Regel bei der Planung von Deponiedichtungssystemen sowohl bei Deponien für gefährlichen Abfall als auch für Hausmüll-Deponien in Nordamerika in Betracht gezogen:

- Hydraulische Barriere bzw. Dichtung – Kunststoffdichtungsbahn (KDB), Bentonitmatten/geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD, im englischsprachigen: Clay Geosynthetic Barrier (GBR-C), bzw. Geosynthetic Clay Liner (GCL)), mineralische Tondichtung oder eine Kombination hieraus;
- Entwässerungsschicht – Geosynthetisches Dränsystem/Dränmatte (mit oder ohne Filtervliesstoff) oder körniges, nicht bindiges Material
- Filterlage – Geotextil oder körniges, nicht bindiges Material
- Deponiegas-, Niederschlagswasser-, Deponiesickerwasser-Sammler, bzw. Entwässerung – Geotextil, Sickerrohr bzw. körniges, nicht bindiges Material
- Schutzlage – geotextiler Vliesstoff und/oder geeignetes Bodenmaterial
- Erosionsschutz – Geosynthetische Erosionsschutzmatten, Jute, Kies, Asphalt, Steine oder sonstige geeignete Materialien.

Im Allgemeinen wird jeder der oben genannten für eine bestimmte Anwendung in der Deponie unter Berücksichtigung seiner Hauptfunktion (z. B. Trennen, Filtern, Bewehren, Schützen, Dränen, Dichten, Verpacken, Erosionsschutz) bemessen. Daher spielt die Hauptfunktion eines Geokunststoffes normalerweise die entscheidende Rolle bei seiner Wahl für eine bestimmte Anwendung; bei den meisten Anwendungen erfüllt er auch Sekundär- und Tertiärfunktionen. Tabelle 2 stellt eine Matrix für Geokunststoffe vor, die typische Hauptfunktionen für die in Abfall-Deponierungssystemen eingesetzten Geokunststoffe zusammenfasst.

Geokunststoff	Trennen	Schützen	Bewehren	Filtern	Dränen	Dichten
Geotextilien	×	×	×	×	×	
Geogitter			×			
Drängitter					×	
Kunststoffdichtungsbahn						×
Bentonitmatte						×
Geozellen	×		×			
Geoverbundstoff	×	×	×	×	×	×
Geocontainer	×		×	×		×

Tabelle 2: Typische Hauptfunktionen für Geokunststoffe (Koerner, 2012)

5.2 Bestandteile des Basis- und Oberflächendichtungssystems

Im Folgenden werden die relevanten Details von z. B. Dichtungssystemen, Dränagefunktionen, Filteranforderungen, etc. behandelt.

5.2.1 Baustoffe für Dichtungen/Barrieren

Baustoffe, die als Barriere bei der hydraulischen Dichtung von Deponien eingesetzt werden, sind u. a. mineralische Tondichtungen, Kunststoffdichtungsbahnen (KDB), sowie Bentonitmatten/geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD, GBR-C, bzw. GCL).

5.2.1.1 Mineralische Tondichtungen

Mineralische Tondichtungen werden hauptsächlich aus natürlichen Böden erstellt, die einen hohen Gehalt an natürlichen Tonmineralien wie z. B. auch Bentonit aufweisen. Falls geeignete Materialien verfügbar sind, können anstehende Böden mit handelsüblichen Tonen (z. B. Bentonit oder Kaolinit) gemischt werden, um eine niedrige Wasserdurchlässigkeit zu erzielen. Ein relativ kleiner Anteil an Natrium-Bentonit (typischerweise 2 - 6 Gew.-%) kann die Wasserdurchlässigkeit um mehrere Zehnerpotenzen verringern. Solche Dichtungsschichten werden normalerweise als vergütete Tondichtungen beschrieben; sie werden aber trotzdem als mineralische Tondichtung geführt.

Wie in Kapitel 4 besprochen und in Abbildungen 4 und 8 dargestellt, werden Mindestdicken von 0,9 m für die mineralische Tondichtungen der Sekundär-Kombinationsdichtung sowie 0,6 m für die des Oberflächendichtungssystems für Deponien für gefährlichen Abfall bei einer maximalen Durchlässigkeit von 1×10^{-9} m/s gefordert. Im Falle von Hausmüll-Deponien jedoch beträgt die Mindestdicke der Tondichtungsschicht in Basisdichtungen 0,6 m und die maximale Durchlässigkeit 1×10^{-9} m/s, wogegen von Oberflächendichtungen mindestens 0,45 m Ton mit einer maximalen Durchlässigkeit von 1×10^{-7} m/s gefordert werden.

Die Wirksamkeit von mineralischen Tondichtungen in Deponieanwendungen in Basis und Oberflächendichtungssystemen wurde in den letzten Jahrzehnten in USA umfassend untersucht und beschrieben. Dabei gibt es auch Hinweise, dass die geforderte Durchlässigkeit oft schon nach dem Einbau nicht erreicht wird. (Daniel 1997). Dabei wurden Durchlässigkeiten von mineralischen Tondichtungen aus Probefeldern gesammelt und festgestellt, dass 63 Probefelder die geforderten Durchlässigkeitsbeiwerte von 1×10^{-9} m/s erreichten aber in 22 Probefeldern (26 % der untersuchten Probefelder) höhere Durchlässigkeiten nachgewiesen wurden.

5.2.1.2 Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)

KDB sind dünne, industriell hergestellte Polymermaterialien, die verbreitet als hydraulische Barrieren in Basis- und Oberflächendichtungssystemen eingesetzt werden, und zwar wegen ihrer nicht-porösen Struktur und Flexibilität und weil sie einfach zu verlegen und zu verbinden sind. Der weitverbreitete Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen in den USA und Deutschland wurde durch in den frühen 1980-er und 1990-er Jahren erlassene gesetzliche Vorschriften für die Dichtung von Deponien für festen und gefährlichen Abfall belebt (Koerner, 2008; Badu-Tweneboah et al. 2013). Wie oben bei den staatlichen Vorschriften für Deponien in den USA erwähnt stellen sie daher einen wesentlichen Bestandteil der meisten Dichtungsschichten dar, insbesondere bei einlagigen oder doppelten Kombinationsdichtungssystemen. In den USA waren KDB früher unter der Bezeichnung "flexible Membrandichtungen" von der EPA in Deponiedichtungssystemen sowie von dem US Bureau of Reclamation (USBR) als Barrierschichten beim Bau von Kanälen eingesetzt. Die Bezeichnung "Geomembrane" (KDB) wurde 1977 von J.P.Giroud eingeführt (Giroud and Perfetti 1977, Holtz 2004).

Die Kunststoffpolymere, die am häufigsten zur Herstellung von KDB für Abfall-Umschließungssysteme verwendet werden, sind:

- PEHD – Polyethylen hoher Dichte
- very flexible Polyethylen (VFPE), dazu gehören linear low-density Polyethylen (LLDPE), low-density linear Polyethylen (LDLPE) sowie very low-density Polyethylen (VLDPE)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- chlorosulfonated Polyethylen (CSPE)
- Ethylene Interpolymer Zusammensetzung (EIA)
- Ethylene Propylene diene monomer (EPDM), sowie
- Flexibles Polypropylene (fPP).

Kunststoffbahnen sind meist auch mit rauen Oberflächen auf einer oder beiden Seiten verfügbar. Diese Oberflächenstrukturen sind notwendig, um den Kontaktreibungswinkel zu angrenzenden Schichten zu erhöhen, wenn dies zur Erreichung der Gleitsicherheitskriterien erforderlich ist – besonders an den Böschungen von Basis- und Oberflächendichtungssystemen. Fast alle KDB für Deponie-Dichtungssysteme in Nordamerika, insbesondere in den USA, werden aus PEHD hergestellt (Giroud 1993). Der Hauptgrund für den Einsatz von PEHD ist seine erwiesene hervorragende chemische Widerstandsfähigkeit (Haxo und Haxo, 1988). Die Mindestdicke für durch staatliche und Bundesländer-Vorschriften zugelassene KDB aus PEHD beträgt 1,5 mm. Daher hat eine Mehrzahl der Deponien in Nordamerika 1,5 mm dicke KDB aus PEHD, aber um die Dichtungssicherheit zu erhöhen, fordern einige Staaten auch eine Dicke von mindestens 2 mm. Zum Vergleich: In Deutschland beträgt die Mindestdicke für KDB aus PEHD nach Forderung der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin 2,5 mm (August, 1997; Müller, 2007; Koerner, 2008; BAM 2012).

KDB aus PEHD werden auch in vielen Oberflächendichtungssystemen eingesetzt; hier jedoch werden auch andere Grundrohstoffe eingesetzt, da die chemische Beständigkeit scheinbar für diese Anwendung nicht so hoch sein muss wie in einer Basisdichtung. Beispielsweise werden KDB aus PVC und VLDPE, manchmal auch LLDPE dort eingesetzt, wo mit hohen Setzungen zu rechnen ist und möglicherweise eine Verformbarkeit der Bahn gewünscht ist. In Oberflächendichtungen ist die KDB häufig nur 1 mm dick.

5.2.1.3 Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD)/Bentonitmatten

GTD sind eine interessante Kombination von Polymerrohstoffen/-komponenten und natürlichen, dichtenden und quellfähigen Böden. GTD sind Produkte mit mindestens einer dichtenden ca. 5 – 15 mm dicken Bentonitschicht (üblicherweise Natriumbentonit) und werden zum Zwecke des Dichtens eingesetzt. Die Tonschicht ist meist zwischen Geokunststoffen (Deck- und Trägergeotextil) eingekapselt. Schubkraftübertragende geosynthetische Tondichtungsbahnen sind vernadelt oder vernäht. Eine neue Anwendungsrichtung sind Polyethylen beschichtete geosynthetische Tondichtungsbahnen, sozusagen eine Multibarrierenvariante aus einer Tondichtung und einer polymeren Dichtungsschicht. Diese Produkte kommen als Einzeldichtung dort zum Einsatz, wo, z. B. eine sofortige Dichtigkeit gegen Gas nötig ist, eine Austrocknung dauerhaft verhindert werden soll, eine Wurzelbarriere notwendig ist, Bentonitwaschungen bei hohen Wassersäulen und kiesigen Untergründen verhindert werden sollen oder ein Zusatzschutz gegen kritische Flüssigkeiten erforderlich ist. (von Maubeuge, 2012).

In vielen Anwendungen, Untersuchungen und Publikationen wurde in den letzten Jahrzehnten dokumentiert, dass die GTD im Allgemeinen gleichwertig oder besser ist, als die bisher im Deponiebau eingesetzten mineralischen Tondichtungen (Koerner und Daniel, 1994; Giroud et al. 1992, 1997; Müller-Kirchenbauer 2010).

5.2.1.4 Kombinationsdichtungen

Während jedes der in 5.2.1.1 bis 5.2.1.3 beschriebenen drei Dichtungsmaterialien (Tondichtung, KDB oder GTD) als Einzeldichtung/-barriere verwendet werden kann, hat sich die Kombination von zwei oder mehreren Komponenten als die wirksamste Dichtung für den Deponiebau erwiesen, sei es gegen Niederschlag, Gas oder Deponiesickerwasser. Bei den meisten Deponieanwendungen wird eine KDB direkt auf eine Tondichtungsschicht oder GTD verlegt, um eine Kombinationsdichtung zu bilden. In einigen wenigen Anwendungen jedoch wurde eine dreifache Kombidichtung KDB/GTD/Tondichtung gebaut. In allen Fällen gilt das Grundprinzip einer Kombinationsdichtung, dass eine Durchsickerung wegen einer Beschädigung – sei es ein Material-, Einbau- oder Überlappungsfehler - in der KDB durch die darunter liegende mineralische Dichtung oder durch den Pressverbund der Schichten unterbunden wird. Beim Einsatz von Kombinationsdichtungen war deutlich erkennbar, dass die Durchflussraten durch die KDB Komponente signifikant geringer waren (Abbildung 9) als bei einer KDB Einzeldichtung (Bonaparte et al. 2002, Giroud et al. 1992, 1994, 1997). Tabelle

3 zeigt Vergleiche errechneter Durchsickerungen durch unterschiedliche Barrieren von Giroud et al. (1994).

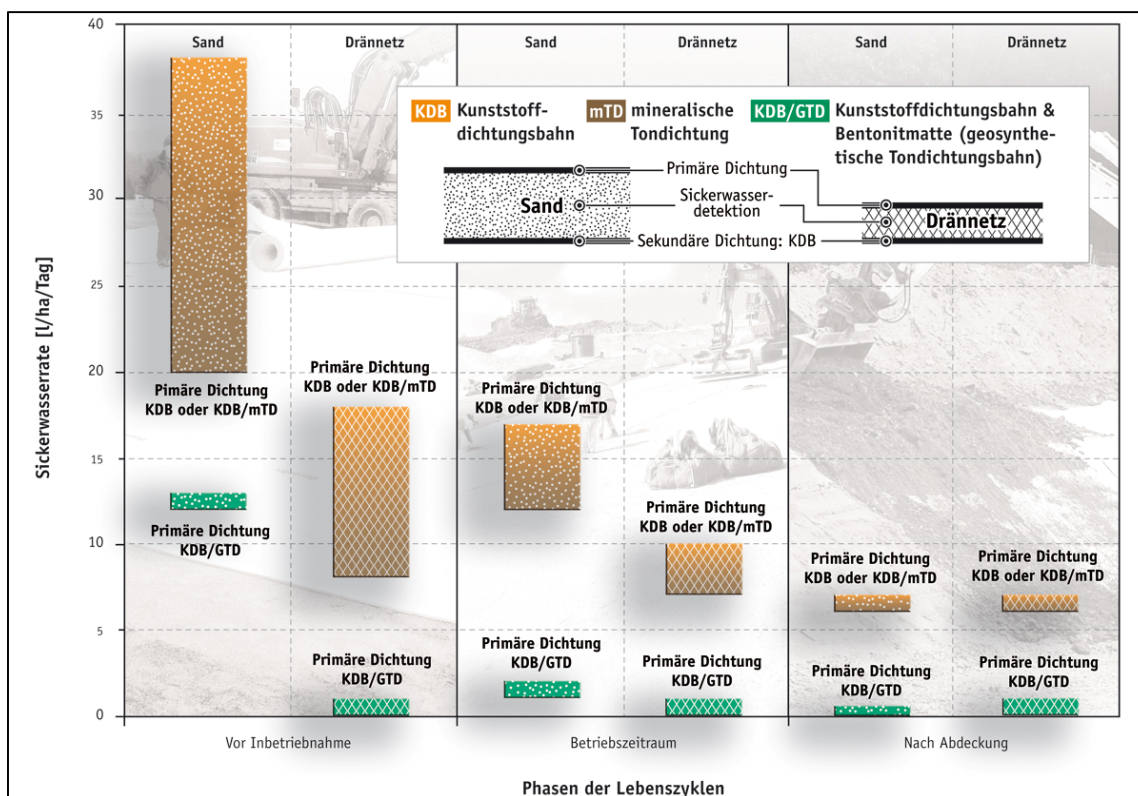


Abbildung 9: Durchsickerungsraten durch das primäre Dichtungssystem, gemessen im Leckdetektionssystem oberhalb des sekundären Dichtungssystems

Dichtungsvariante (b)	Durchlässigkeit des Bodens		Wassersäule, h [m] Werte in (a)			
		k [m/s]	0,01	0,03	0,1	0,3
Boden	Boden	10^{-7}	90000	90000	100000	150000
	Boden	10^{-8}	9000	9000	10000	15000
	Boden	10^{-9}	900	900	1000	1500
Kunststoffdichtungsbahn (KDB)	Boden	$>10^{-2}$	600	1000	2000	3000
KDB auf durchlässigem Boden	Boden	10^{-3}	300	500	1100	2000
	Boden	10^{-4}	100	250	600	1400
	Boden	10^{-5}	40	100	200	600
	Boden	10^{-6}	10	20	60	150
GTD	GTD	10^{-11}	25	50	150	450
KDB und mineralische Tondichtung (mTB)	mTB	10^{-7}	1,5	4	12	30
	mTB	10^{-8}	0,3	0,7	2	6
	mTB	10^{-9}	0,05	0,15	0,4	1
KDB und GTD	GTD	10^{-11}	0,002	0,008	0,04	0,2

(a) 1 l/ha/Tag $\approx 10^{-12}$ m/s
 (b) Nach Gleichungen in Giroud et al. (1994).

Tabelle 3: Leckagerate pro Flächeneinheit in Liter/Hektar/Tag (lphd)(a) durch verschiedene Barrieretypen (basierend auf Giroud et al. 1994).

5.2.2 Materialien für Entwässerungsschichten

In Deponiedichtungssystemen werden Entwässerungsschichten eingesetzt zum Sammeln, Ableiten und Entfernen von Deponiesickerwasser, Niederschlagswasser, und/oder Deponiegas. Sie werden üblicherweise, je nach Zweck unterhalb oder oberhalb der Kombinationsdichtung eingesetzt.

- Oberhalb der Kombinationsbasisdichtung als Sickerwasserentwässerung
- Unterhalb der Kombinationsbasisdichtung als Sickerwasserdetektion
- Oberhalb der Kombinationsoberflächendichtung als Niederschlagsentwässerung
- Unterhalb der Kombinationsbasisdichtung als Ableitung von Deponiegas

Verwendete Dränagematerialien sind mineralische Schichten, meist Sand oder Kies, Dränmatten (mit oder ohne geotextile Filterlagen), sowie Sickerleitungsrohre.

5.2.2.1 Nichtbindige Bodenmaterialien

Für Entwässerungen oder als Gassammler werden meist Sand- oder Kiesmaterialien eingesetzt. Die vorgeschriebene Mindestdicke einer mineralischen Dränschicht in einem LCRS oder LDS sowohl für gefährlichen Abfall als auch für Hausmüll-Deponien in Nordamerika beträgt üblicherweise 0,3 m. Diese Dicke wurde gewählt, um die vorgeschriebene maximale Deponiesickerwassersäule von 0,3 m einzuhalten. Die vorgeschriebene Mindestdurchlässigkeit für mineralische Dränschichten beträgt dabei 1×10^{-4} m/s; manche Bundesstaaten erlauben 1×10^{-6} m/s, solange die maximale Sickerwassersäule von 0,3 m eingehalten wird. Im Allgemeinen wird empfohlen, die erforderliche Dicke und Durchlässigkeit von Entwässerungsschichten aus nichtbindigem Bodenmaterial auf Basis von baustellen- und materialspezifischen Überlegungen sowie Bemessungen festzulegen. Die Entwässerungsschicht sollte z. B. Filterkriterien gegenüber dem darüber liegenden Boden oder Abfall einhalten; ansonsten sollte ein Mineral- oder Geotextilfilter zwischen beiden Schichten angebracht werden.

5.2.2.2 Geosynthetische Dränagematerialien

Eine Anzahl unterschiedlicher Geokunststofftypen wurden als Entwässerungsschichten in Deponiedichtungssystemen eingesetzt. Zu nennen sind Dränmatten mit und ohne geotextile Filterlagen sowie Sickerleitungsrohre. Obwohl schwerere oder dickere Geotextilien auch

schon als Entwässerungsschichten eingesetzt worden sind, ist es die Erfahrung der Autoren, dass sie nicht über eine ausreichend hohe Transmissivität verfügen, um als Hauptableitungsmedium langfristig zu funktionieren. Die geosynthetische Dränmatte wird so bemessen und ausgewählt, dass es die vorgeschriebenen Mindestanforderungen für nichtbindige Bodenmaterialien erfüllt. Ähnlich wie mineralische Entwässerungsschichten sollten geosynthetische Dränschichten die Filterkriterien gegenüber der darauf liegenden Schicht erfüllen.

5.2.3 Filtermaterialien

Um ein Zusetzen der Entwässerungsschicht zu verhindern, ist es oft erforderlich, einen Mineralkorn- oder Geotextilfilter direkt auf dem Dränagematerial einzubauen. Die Funktion des Filters ist, zu verhindern, dass Feinmaterial aus dem darüber liegenden Boden oder Abfall in die Entwässerungsschicht einwandert, während Flüssigkeiten ungebremst durch den Filter in die Dränschicht gelangen. Die Filterkriterien sowohl für Mineralkorn- als auch für Geotextilfilter legen fest, welches Verhältnis der Korn- bzw. Porengrößen erforderlich ist, um benachbarte Materialien zurückzuhalten und das Zusetzen der Entwässerungsschicht zu verhindern, während die Sickerströmung ungehindert bleibt. Die Leistungsfähigkeit und Wirksamkeit eines Geotextils als Filtermedium hängen von seiner Fähigkeit ab, ausreichend durchlässig zu bleiben (d. h. Zusetzen reduzieren), während es Partikel, die durchwandern könnten, zurückhält. Giroud (1982) sowie Sharma und Lewis (1994) legen fest, dass die mittlere Öffnungsweite eines als Filter eingesetzten Geotextils groß genug sein sollte, um die feineren Bodenteilchen passieren zu lassen, aber klein genug, um die größeren Bodenteilchen zurückzuhalten. Ein korrekt bemessener Geotextilfilter muss daher vier Kriterien erfüllen: ausreichende Langzeitdurchlässigkeit, -rückhaltevermögen, -porosität sowie Dicke (Giroud, 2010).

5.2.4 Andere Geosynthetische Materialien

Es werden aber auch weitere, bisher nicht näher beschriebene Geokunststoffe im Deponiebau eingesetzt um Funktionen aus Tabelle 2 zu erfüllen. Beispielsweise werden Geogitter eingesetzt, um Bodenschichten auf Böschungen oder von Tragschichten unter Dichtungssystemen zu bewehren, wenn z. B. eine Deponie auf einem schwachen oder unebenen Untergrund oder einer alten Deponie gebaut wird oder die Kontaktreibungswinkel von Materialien im Böschungsbereich zu niedrig sind. Geogitter werden auch eingesetzt, um

eine Erhöhung der Abfallkapazität zu erzielen, wenn seitliche Stützkonstruktionen zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 6.1).

Geokunststoffe wie Geotextilien, Dränmatten mit Filtervliesstoffen und in manchen Fällen auch Hartschaumplatten werden als Schutzlage auf der KDB eingesetzt. In den meisten Fällen hängt die Schutzwirkung des darunter oder darüber liegenden Materials (z. B. KDB) ab von der Korngröße und -form des darüber oder darunter liegenden Materials (z. B. fein- oder grobkörnigen Boden) und den Charakteristiken des Schutzgeokunststoffes (z. B. dicker Vliesstoff oder Verbundstoff).

In Oberflächendichtungssystemen kommen verschiedene Materialien zum Einsatz, wenn ein Erosionsschutz auf der Rekultivierungsschicht gefordert ist. Die eingesetzten Materialien sind ganz oder teilweise aus natürlichen Rohstoffen wie Jute oder Kokos oder aus geosynthetischen Stoffen hergestellt. Sie unterstützen auch eine schnellere Begrünung von Oberflächendichtungssystem.

6. Die Zukunft von Deponien

6.1 Kunststoff bewehrte Erde (KBE)-Dämme zur Abfallkapazitätserhöhung

Die KBE-Technologie besteht darin, geosynthetische oder metallische Bewehrungselemente zusammen mit Boden und einer breiten Palette an Frontelementen zu verwenden, um seitliche Stützwände zu bauen. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Kapazitäten in Deponien zu erhöhen (Abb. 10).

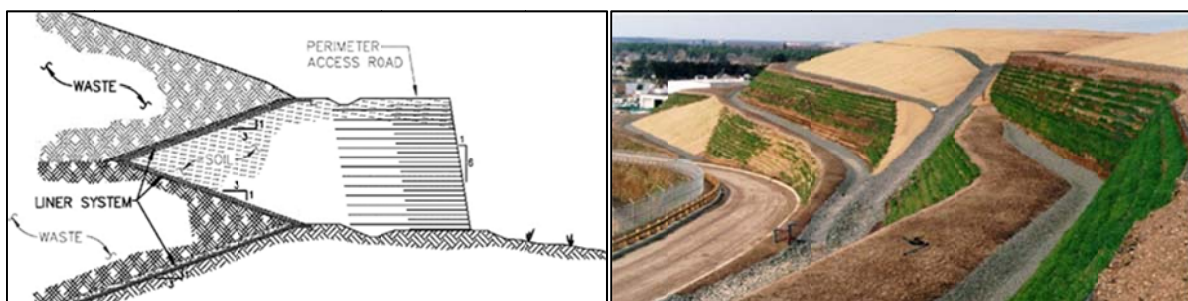


Abbildung 10: MSE-Damm zur Erhöhung der Kapazität einer Deponie (Geosyntec 2008).

Der KBE-Ringwall um den Umfang einer Deponie zur Gewinnung zusätzlicher Entsorgungskapazität wurde bereits in vielen Deponieerweiterungsprojekten in den USA verwendet. Ein Beispiel dafür ist die Cherry Island Landfill (CIL) Erweiterungsprojekt in Wilmington, DE, bei der ein 2.440 m langer, 21 m hoher KBE-Wall errichtet wurde, um die Erhöhung der CIL zu ermöglichen (Geosyntec, 2011; Espinoza et al., 2008). Diese Höhenerweiterung führte nicht nur dazu, dass die Betriebsdauer um 20 Jahre verlängert werden konnte, sie wurde auch einer der fünf Finalisten der 2012 „Outstanding Civil Engineering Achievement Award“ (Herausragende Bauingenieur-Leistung) der ASCE.

In Zukunft ist es sehr wahrscheinlich, dass dieses Verfahren auf Deponien zunehmend an Bedeutung gewinnt, besonders bei Deponien, bei denen eine Flächenerweiterung nicht möglich oder sehr teuer ist oder es keine Höhenlimitierung gibt. Die KBE-Technologie wird auch dadurch immer beliebter, weil neue Deponiestandorte wegen des NIMBY-Syndroms (Not In My Backyard) immer schwerer zu erschließen sein werden.

6.2 Bioreaktor-Deponien zur Verbesserung des Abfallabbaus

Bioreaktor-Deponien stellen die nächste Stufe der Entwicklung moderner, technisch ausgereifter Deponien dar – von sicheren, trockenen Deponiekörpern hin zu geführten, überwachten biologischen Behandlungssystemen. In einer Bioreaktor-Deponie werden Deponiesickerwasser und andere Flüssigkeiten wie Oberflächenwasser, gering belastetes Grundwasser oder ungefährlicher flüssiger Abfall in den Abfallkörper eingebracht, der dadurch befeuchtet wird. Das Rückführen von Flüssigkeiten kann vielfach von Vorteil sein.

- Das Einbringen von Flüssigkeiten beschleunigt den Abfallabbau und reduziert das Abfallvolumen, was die nutzbare Entsorgungskapazität und daher die Rentabilität der Deponie erhöht.
- Das Umpumpen von Deponiesickerwasser im Kreislauf kann eine kostenwirksame Alternative sein zur herkömmlichen Sickerwassermanagement-Methode "Lagerung, Transport und Fremdbehandlung". Die Entsorgung flüssigen Abfalls kann auch eine zusätzliche Einnahmequelle für den Deponiebetreiber sein. Die Flüssigkeitszufuhr beschleunigt die Entstehung von Deponiegas, was bei der Energiegewinnung aus Gas sehr vorteilhaft sein kann.

6.3 Abfallbergbau und „Dauerdeponie,“

Abfallbergbau (Deponierückbau) ist die Verwertung von Deponieinventar nach dem Abbau des Abfalls, in dem Wertstoffe, wie Metalle, Glas sowie Kunststoffe rückgewonnen und recycelt werden. Er stellt einen relativ neuen Ansatz zur Erweiterung der Deponiekapazität dar. Die Kosten werden oft kompensiert durch den Verkauf oder Wiederverwendung der rückgewonnenen Materialien wie Wertstoffe, Boden oder Abfall, der als Sekundärbrennstoff verbrannt werden kann (EPA, 1997).

Das Verfahren wird auch Deponiebergbau oder -verwertung genannt. Die EPA hat 1997 ein Informationsblatt veröffentlicht, das die möglichen Vorteile zusammenfasst. Demnach zählen zu den Vorteilen: das Reduzieren von Umweltverschmutzung oder des Risikos von Umweltverschmutzung aus nicht gesetzeskonformen Deponien oder Abfallplätzen, das Rückgewinnen von Boden, das Verlängern der Lebensdauer der Deponie durch Abfallvolumenreduzierung, das Rückgewinnen von Materialien wie NE-Metalle (z. B. Aluminium) und eisenhaltige Metalle sowie die Erzeugung von Energie in kommunalen Anlagen zur Energiegewinnung aus Abfall.

Kombiniert mit einer abbaubeschleunigenden Bioreaktor-Deponietechnologie führt die Praxis des Abfallbergbaus zum Konzept der „ewigwährenden Deponie“. Eine Deponie kann so geplant werden, dass sie dauerhaft funktioniert, wenn einzelne Abschnitte nacheinander gefüllt, deren Abfälle biologisch abgebaut, am Ende minimiert und danach wieder gefüllt werden (Koerner 2008).

6.4 Sanierung geschlossener Deponien

Die meisten Deponien befinden sich in Autobahn- oder Hauptstraßen-Nähe. Manche Deponien – vormals in ländlichen Gebieten errichtet – befinden sich, bedingt durch die Ausbreitung von Städten, heute in stadtnahen Baugebieten. Mit dem zunehmenden Bedarf nach mehr Raum rückt das Entwicklungspotential von Deponien zunehmend ins Blickfeld. Die möglichen Nachnutzung für geschlossene Deponien können passiv sein, z. B. Grünflächen oder Lebensraum für Wildtiere; sie können auch aktiv sein, z. B. Golf- oder Sportplätze.

Im letzten Jahrzehnt wuchs die Nachnutzung geschlossener Deponien als Anlagen zur Erzeugung von Solarenergie oder als Golfplätze und für ähnliche Freizeitaktivitäten. Diese

beiden Verwendungsmöglichkeiten für geschlossene Deponien werden in den folgenden Kapiteln besprochen.

6.4.1 Möglichkeiten für die Erzeugung von Solarenergie

Geschlossene Deponien verfügen üblicherweise über große, lichte Flächen, die sie für die Errichtung von Solarpaneelen zur Energieerzeugung geeignet machen. In nördlichen Breiten sind Deponien mit nach Süden ausgerichteten Flächen für den Bau von PV-Systemen ideal (Gupta und Morris, 2013). Diese Systeme bestehen typischerweise aus freistehenden, auf Stützen auf der Deponie angebrachten Flachpaneelen oder aus flexiblen Dünnschichtpaneelen, die an eine exponierte KDB-Abdeckung angeklebt sind (siehe Abbildung 11). Es wird geschätzt, dass sich per Dezember 2011 in den USA mehr als 20 deponiebasierte Solarprojekte im Betrieb befanden (Gupta und Morris, 2013).

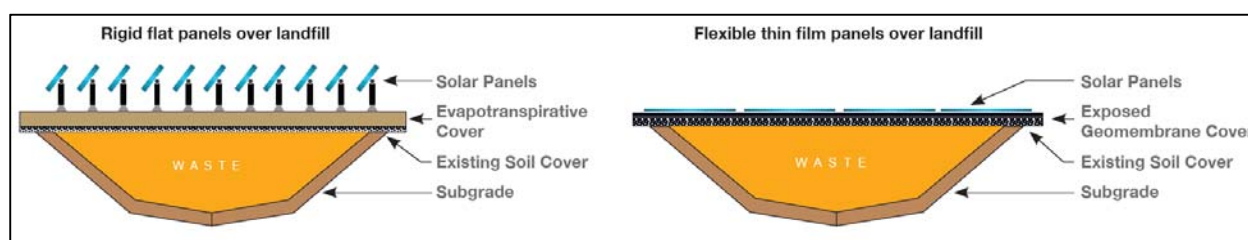


Abbildung 11: Solaranwendungen auf Deponieabdeckschichten



Abbildung 12: Auf einer Deponieoberflächendichtung aufgebrachte Solarzellen (Gupta und Morris, 2013)

6.4.2 Freizeitanlagen

Sanierungsoptionen für geschlossene Deponien als Freizeitanlagen sind u. a. Golfplätze, Golf Driving Ranges, Spielplätze (z. B. Fußball-, Baseball- und/oder American Football-Plätze, Bogenschießstände, Laufbahnen usw.) sowie öffentliche Parks und Wanderwege.



Abbildung 13: Verwendung der Oberfläche einer gedichteten Deponie als öffentlichen Golfplatz - Fulton County, Georgia
(<http://www.apwa.net/Resources/Reporter/Articles/2004/9/Converting-a-closed-landfill-into-a-golf-course-can-provide-an-effective-redevelopment-alternative>)

6.5 Laufende Forschungen

Auf dem Gebiet der Deponieplanung, des Deponiebetriebs und der Deponieschließung wird weiter geforscht, insbesondere in den Bereichen Bioreaktortechnologie, Abfallstabilisierung und Gasrückgewinnung; KBE-Dämme zur Kapazitätserhöhung sowie die Entwicklung geosynthetischer und alternativer Produkte für Deponieanwendungen.

Ein weiteres interessantes Forschungsgebiet ist die Auswirkung erhöhter Temperaturen auf die Lebensdauer von Dichtungssystemen (Rowe, 2009; Browne and Quiroz, 2009; Stark et al., 2012). Hausmüll-Deponien sowie Deponien für gefährlichen Abfall können erhöhte Temperaturen aus verschiedenen Gründen erfahren wie die Hydratation von Asche, Abfallabbau durch Mikroben, chemische Reaktionen von Aluminiumabfall oder Verbrennungasche, mit erhöhter Temperatur angelieferter Abfall sowie Oberflächenverbrennungseignisse (z. B. Brände). Länger andauernde erhöhte Temperaturen können die Lebensdauer der Bestandteile eines Dichtungssystems verkürzen, indem sie das Aufbrauchen von Antioxidantien und den Abbau von Polymeren der KDB

beschleunigen (z. B. Verlust an Spannungsrisssbeständigkeit) oder Austrocknen von Tondichtungen und/oder GTD (Stark et al, 2012). Während Forschungen zur Klärung der Ursachen für erhöhte Temperaturen und zu ihrer Beherrschung weitergehen, wird bei einigen Herstellern von KDB an der Entwicklung neuer Polymerrezepturen gearbeitet, die sich mit den Auswirkungen von Temperatur auf die Lebensdauer befassen (Ramsey und Wu, 2013).

Ein weiteres Forschungsgebiet, das eine signifikante Auswirkung auf Deponien in Nordamerika haben könnte, ist das Aufkommen von Technologien, die mit der Erzeugung von Energie aus Abfall gleichzeitig das zu entsorgende Hausmüllvolumen signifikant reduzieren. Beispiele für diese sich entwickelnden Technologien, insbesondere in den USA, sind u. a.: anaerobe Gärung, die Verarbeitung organischen Abfalls (oder Kompostierung) sowie thermische "Abfall-zu-Energie"-Technologien wie Hausmüll-Verbrennung, Pyrolyse, Vergasen und Plasma-Lichtbogenvergasen sowie Hydrolyse. Anzumerken ist, dass die meisten dieser Technologien in Europa bereits erfolgreich verwendet wurden; ihr Einsatz in den USA wird einerseits wegen des Bestrebens nach sauberer alternativer Energie forciert und andererseits wegen staatlicher Forderungen nach Nullabfall oder höheren Recyclingquoten für Hausmüll. In den USA ist die Konkurrenz dieser Technologien mit regulärer Entsorgung auf Hausmülldeponien aus wirtschaftlichen Gründen historisch schwierig gewesen (im Vergleich mit den Kosten der Behandlung von Hausmüll mit einer der genannten Technologien sind Entsorgungsgebühren relativ gering).

Literatur

- August, H., Holzlöhner, U., Meggyes, T. (1997), "Verbundvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen, Schlußbericht", Umweltbundesamt, Berlin
- Badu-Tweneboah, K., Damasceno, V., Mijares, R., and Joshi, R. (2013), "Sustainable Development in Africa – The Role of Geosynthetics", Keynote Lecture, *GeoAfrica 2013 Conference*, GhIGS, Accra, Ghana, November.
- BAM (2012), "Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen", herausgegeben vom Fachbereich 4.3 „Schadstofftransfer und Umwelttechnologien“, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin
- Bonaparte, R., and Gross, B.A. (1990), "Field Behavior of Double-Liner Systems", *Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance*, ASCE Geotechnical Publication No. 26, R. Bonaparte (Editor), New York, USA, pp. 52-83.

- Bonaparte, R., and Gross, B.A. (1993), "*LDCRS Flow from Double-Lined Landfills and Surface Impoundments*", Report to, under contract No. 68-CO-0068, EPA Risk Reduction Engineering Research Laboratory, Cincinnati, USA, 65 p.
- Bonaparte, R., Daniel, D.E., and Koerner, R.M. (2002), "*Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems*", EPA/600/R-02/099, EPA Cooperative Agreement No. CR-821448-01-0, Washington, DC, USA, 1200 p.
- Browne, C.R., and Quiroz, J.D. (2009), "*Investigating the Causes and Effects of Hot Landfills*", Talking Trash, The Newsletter of the SWANA Florida Sunshine Chapter, Summer 2009, pp 8-9.
- Daniel, D. (1997), "Waste disposal and contaminated sites", Plenary Session 6, Ground engineering, September issue
- EPA (1989), "*Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments*", Technical Guidance Document, EPA/530/SW-89/047, U.S., EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., USA, 39 p.
- EPA (1991), "*Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers*", Seminar Publication, EPA/625/4-91/025, U.S., EPA, Office of Research and Development, Washington, D.C., USA, 145 p.
- EPA (1993), "*Solid Waste Disposal Facility Technical Manual*", EPA530-R-93-017, Washington DC, USA.
- EPA (1997), "*Landfill Reclamation*", EPA530-F-97-001, Washington DC, USA.
- EPA (1998) "*Environmental Fact Sheet - Procedures for Approving State Subtitle D Landfill Permitting Programs*", EPA530-F-98-024, Washington, DC, USA, <http://www.epa.gov/osw>.
- EPA (2003) "*Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet*", EPA542-F-03-015, Washington, DC, USA.
- EPA (2013a), "*Municipal Solid Waste in the United States 2011 Facts and Figures*", EPA/530-F-13-001, Washington, DC, USA, May 2013, <http://www.epa.gov/wastes>.
- EPA (2013b), "*RCRA State Authorization*", <http://www.epa.gov/osw/laws-regs/state>, July, 2013.
- EPA (2013c), "*History of RCRA*", <http://www.epa.gov/epawaste/laws-regs/rcrahistory.htm>, Nov 2013.
- EPA (2013d), "*Landfills*", <http://www.epa.gov/osw/nonhazar/municipal/landfill.htm>.
- Espinoza, R. D., Lazarte, C. A., Germain, A., Houlihan, M. F. (2008), "Design Considerations for Expansion of an Existing Landfill Over Extremely Compressible Soils", *Geo-Strata* —Geo Institute of ASCE, March/April 2008.

- Geosyntec (2008). "Landfill Expansions Using Mechanically Stabilized Earth Berms", *GeoEnvironmental Engineering Newsletter*, Fall Issue, November 2008.
- Geosyntec (2011), "*Innovative Design and Application of a Mechanically Stabilized Earth Wall to Compress Highly Unstable Foundation Soils at the Cherry Island Landfill, Wilmington, Delaware*", ASCE Outstanding Civil Engineering Achievement Award Nomination Package.
- Giroud, J. P. (1982), "Filter criteria for Geotextiles", *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, Vol. 1: 103-108.
- Giroud, J.P. (1993), "North America Experience on Geosynthetics in Landfills", *L'Ingegnere e l'Architetto*, Vol. 1, No. 1-4, 1994, Proceedings of the 7th Italian Conference on Geosynthetics, Bologna, Italy, October 1993, pp. 69-72.
- Giroud, J.P. (2010), "Development of Criteria for Geotextiles and Granular Filters", *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, Vol. 1: 45-64.
- Giroud, J.P. and Perfetti, J. (1977), "Classification des textiles et mesure de leurs propriétés en vue de leur utilisation en géotechnique", *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, Session 8, Paris, April 1977, 345-352. (in French)
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K., and Bonaparte, R. (1992), "Rate of Leakage through a Composite Liner due to Geomembrane Defects", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 11, No. 1: 1-28.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K., and Soderman, K.L. (1994), "Evaluation of Landfill Liners", *Proceedings of Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products*, Singapore, 5-9 Sep 1994: 981-986.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K., and Soderman, K.L. (1997), "Comparison of Rates of Leachate Flow Through Compacted Clay Liners and Geosynthetic Clay Liners in Landfill Liner Systems", *Geosynthetics International*, Vol. 4, Nos. 3-4: 391-431.
- Gross, B.A., Bonaparte, R., and Giroud, J.P. (1990), "Evaluation of Flow from Landfill Leakage Detection Layers", *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol. 2, The Hague, Netherlands, pp. 481-486.
- Gupta, R. and Morris, J. (2013), "The Geotechnics of Converting Waste Sites to Renewable Energy Sites", *Geo-Strata*, ASCE, July/August 2013: 18-25.
- Haxo, H.E. (1991), "*Compatibility of Flexible Membrane Liners and Municipal Solid Waste Leachates*", USEPA, Cincinnati, OH, USA, 107 p.

- Haxo, H.E. and Haxo, P.D. (1988), "*Consensus Report of the Ad Hoc Meeting on the Service Life in Landfill Environments of Flexible Membrane Liners and Other Synthetic Polymeric Materials of Construction*", Report No. EPA-600/x-88-252, USEPA, Cincinnati, OH, USA, 52 p. plus appendices.
- Hickman, H.L.J. (1999), "A Brief History of Solid Waste Management in the US During the Last 50 Years, Part 3: Sanitary Landfill", *MSW Management*, Jan-Feb 2000.
- Holtz, R.D. (2004), "*Geosynthetics R&D - The "Early" Days (1960s to Circa 1985)*", Koerner Research Symposium, Drexel University, Philadelphia, PA, USA.
- Koerner, R.M. (2008), "A Worldwide Perspective on the Impermeabilization of Solid Waste Landfills: Past-Present-Future", 2nd Congreso Nacional de Impermeabilization Edificacion y Obra Publica, Palma de Mallorca, 23-25 April 2008.
- Koerner, R.M. (2012), "Designing with Geosynthetics", 6th ed., Vol 1, Xlibris Corporation, USA.
- Koerner, R.M. and Daniel, D.E. (1994), "A suggested methodology for assessing the technical equivalency of GCLs to CCLs", *Proceedings of Geosynthetic Research International-7 Conference on Geosynthetic Liner Systems*, IFAI, St. Paul, MN, pp. 255-275.
- Landreth, R.E. (1990), "Chemical Resistance Evaluation of Geosynthetics Used in Waste Management Applications", *Geosynthetics Testing for Waste Management Application*, ASTM STP 1081, R.M. Koerner (Editor), pp. 3-11.
- Von Maubeuge, K.P., Boley, K., Stimm, A. (2012) „The New Generation of GEOSYNTHETIC CLAY LINERS“, EuroGeo, Valencia, Spain
- von Maubeuge. K. P., Pohlmann H., Widarso, A. (2012) "Advantages of Geosynthetics over Natural Materials in Composite Liner Systems", *Aplas*, 7th Landfill Symposium in Denpasar, Indonesia
- von Maubeuge K. P., Mueller-Kirchenbauer A., Prasetyo B. S. (2012), "HYDRAULIC PERFORMANCE OF GEOSYNTHETIC CLAY LINERS (GCLS) COMPARED WITH COMPACTED CLAY LINERS (CCLS) IN LANDFILL LINING SYSTEMS", *GEOSYNTHETICS ASIA 2012*, 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics, 13 to 15 December 2012, Bangkok, Thailand
- Müller, W., *Handbuch der PE-HD Dichtungsbahn in der Geotechnik*, Birkhäuser Verlag, Berlin, 2001, ISBN 3-7643-6504-8
- MUELLER-KIRCHENBAUER A., BLUEMEL W., von MAUBEUGE K. P., (2010); "Performance of Geosynthetic clay liners in landfill cap sealing systems - physical processes in the bentonite layer during drying and rehydration periods", 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners Würzburg, Germany

- Niemczewski, C. (1977), "*The History of Solid Waste Management*", The Organization and Efficiency of Solid Waste Collection, New York: The Trustees of Columbia University.
- NSWMA (2008), "*Modern Landfills: A Far Cry from the Past*", National Solid Wastes Management Association, Washington, DC, USA.
- NWRA (2013), "*Landfills: Municipal Solid Waste Landfills*", National Waste & Recycling Association, Washington, DC, USA.
- Othman, M. (2013), "Exposed Geomembrane Covers (EGCs) for Landfills", *Proceedings of the SC SWANA 2013 Spring Conference*, Pawleys Island, South Carolina, USA, May 8-10.
- Phillips, J.A. (1998), "*Managing America's Solid Waste*", Prepared by J.A. Phillips & Associates for National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy.
- Ramsey, B. and Wu, Y. (2013), "Advances in Geomembranes: Thermal Properties and Elevated Usage Temperatures", *Proceedings of GeoAfrica 2013 Conference*, GhIGS, Accra, Ghana, November.
- Roberts, J. (2007), "*Garbage: The Black Sheep of the Family. A Brief History of Waste Regulation in the United States and Oklahoma*", Oklahoma Department of Environmental Quality.
- Rowe, R.K. (2005), "Long-Term Performance of Contaminant Barrier Systems", *45th Rankine Lecture, Geotechnique*, Vol. 55, No. 9: 631-678.
- Rowe, R.K. (2009), "Long-term performance of leachate collections systems and geomembrane liners for MSW landfills", *Keynote Lecture, GIGSA GeoAfrica 2009 Conference*, Cape Town, South Africa, 2-5 September, 23 p.
- Sharma, H.D., and Lewis, S. P., (1994), "*Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation*", John Wiley & Sons, Inc.
- Stark, T, D., Jafari, N.H., and Rowe, R.K. (2012) "*Service Life of a Landfill Liner System Subjected to Elevated Temperatures*", a paper to be submitted for review and possible publication in the ASCE Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management
- Vana, J.M. and Phaneuf, R.J. (2000), "*Landfill Bioreactors: A New York State Regulatory Perspective*", MSW Management, May-June 2000.

