

15. JANUAR 2023

DEPONIEREN ALS  
ZUKÜNFTIGE  
BERBAUANLAGEN  
BRANDENBURGISCHE TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT COTTBUS-SENFTENBERG

Review Artikel  
Elisa Korb 4000493  
Prof. Dr. Christian Abendroth  
Fachgebiet Kreislaufwirtschaft

## Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	2
Abkürzungsverzeichnis.....	2
Abstract.....	2
1.Einleitung.....	3
3.Bibliographische Analyse.....	5
4.Aufbau einer Deponie in Deutschland als Maßstab .....	7
5.Landfill mining Problemstellungen und Lösungsmöglichkeiten.....	9
6.Bewertung der wirtschaftlichen Rentabilität .....	11
7.Schlussteil.....	13
Literaturverzeichnis .....	14
Einverständniserklärung .....	16

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließdiagramm über die Herangehensweise zur Ausarbeitung des Review Artikels

Abbildung 2: Darstellungen der systematischen Web of Science Recherche

Abbildung 3: Skizze einer herkömmlichen Deponieanlage nach deutschem Standard

Abbildung 4: Skizze der Abdeckung einer herkömmlichen Deponieanlage nach deutschem Standard

## Abkürzungsverzeichnis

WtE	Waste-to-Energy
WtM	Waste-to-Materials
LFM	Landfill mining
LFMR	Landfill mining and reclamation
PEHD	Polyethylen high density

## Abstract

In dem Review Artikel über die Rückführung von Ressourcen aus Deponien in die Kreislaufwirtschaft, werden Deponieklassen anhand des deutschen Vorbildes erläutert. Deutschland dient als positives Beispiel für die Klassifizierung von Deponien. Der Unterhalt einer Deponie stellt sich dennoch als nicht nachhaltiges und langfristig ineffizientes Projekt heraus. Allerdings ist es umständlich, Deponien zurückzubauen und den Abfall zu sortieren und aufzubereiten. Durch verschiedene Verfahren kann zwischen unterschiedlichen Abfallarten differenziert werden, und so der Output an die gegebene Situation angepasst werden. So versprechen Metalle einen größeren Output beim Weiterverkauf, wobei sich bei Nichtmetallen die Umwandlung in Energie und das Recycling als lohnender darstellt. Neben den betragslichen Erlösen, stellen sich durchaus die Opportunitätskosten als rentablerer Grund heraus, da neben vermiedenen Kosten auch die sozialen und ökologischen Folgen reduziert werden. Das Projekt des Deponiebergbaus findet schon in vielen Regionen der Welt seine Anwendung. In Anbetracht der Tatsache, dass die Ressourcenknappheit und der steigende Bedarf eine Einschränkung im Konsum hervorrufen können, wird die weitere Arbeit an Projekten wie diesen

unabdingbar. Die weiterführende Forschung ist notwendig, um das Prinzip des landfill minings in die reguläre Wirtschaft einzugliedern.

## 1. Einleitung

Die Menschen in der westlichen Welt leben in einem Zustand des Überflusses. Der Konsum steigt in nahezu allen Lebensbereichen an. Dabei ist seit geraumer Zeit bekannt, dass die Ressourcen, auf denen unsere Welt aufbaut, endlich sind. Ebenfalls ist bekannt, dass der verschwenderische Verbrauch von neuen Gütern, unserer Welt schadet. Dieser Konflikt wird durch das kapitalistische Wirtschaftssystem verstärkt. Der Gedanke der Nachhaltigkeit ist hierbei wenig ausgeprägt, erlangt jedoch aufgrund der Endlichkeit von Ressourcen zunehmend an Bedeutung. Seine Ausprägung hat in dieser Hinsicht viele Facetten, sowohl der Konsumverzicht als auch das effektive Recycling sind dabei grundlegende Überlegungen. Die Optimierung des Entsorgungsprozess muss somit ebenfalls in der Diskussion, um eine ressourcenschonendere Verhaltensweise näher betrachtet werden. (Castellani, et al., 2021) Die Deponie ist hierbei eine weit verbreitete Methode, um Abfall zu lagern und zu entsorgen. Vor allem für schwer recyclebare Abfallstoffe, ist die Einlagerung alternativlos. Da die Restriktionen zur Erbauung und zum Erhalt von Deponien stark von der Region und den gesetzlichen Anforderungen abhängen, gibt es diverse Unterschiede im Aufbau und in der Struktur; sowie den Sicherheitsvorschriften einer Deponie. Da die Deponie einen einfachen Ablageort darstellt, wurde in den vergangenen Jahrzehnten keine besondere Aufmerksamkeit der Instandhaltung zugesprochen. (Vaverkova, et al., 2018) Erst mit der Analyse der Schadstoffe und einem wachsenden ökologischen Bewusstsein, wurde das Konzept der Deponie überdacht. Allerdings werden weiterhin in weniger entwickelten Ländern, gefährliche Abfälle, medizinische Abfälle oder konterminierte Substanzen in einer Deponie, ohne zureichende Sicherheitsvorkehrungen, gelagert. Ungeachtet der Tatsache, dass es sowohl für Menschen als auch für die Umwelt zu enormen Problemen führen kann. Die Gefahr geht nicht nur von Sondermüll aus, sondern auch von Hausmüll und Bauschutt. (Barcic & Ivancic, 2010)

Im folgenden Review Artikel sollen die Gegebenheiten und Möglichkeiten für den Deponiebergbau näher erläutert und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Der Deponiebergbau ist eine gute Möglichkeit, diverse Materialien zurückzugewinnen und in den Kreislauf wieder einzubringen (Mohanty, et al., 2018).

## 2. Material und Methodenteil

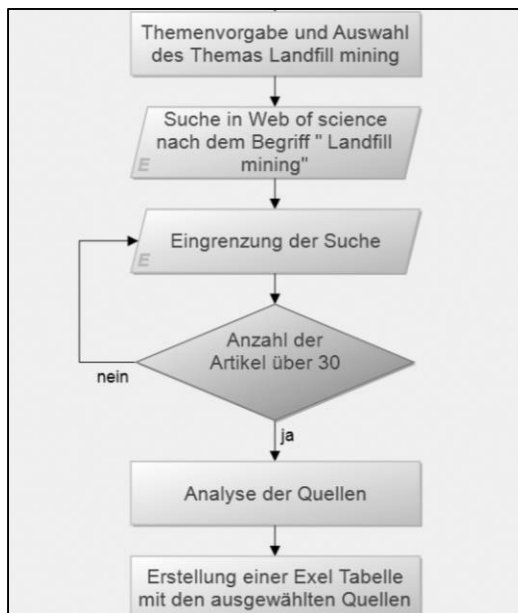


Abbildung 1 grafische Darstellung des systematischen Vorgehens bei Beginn des Review Artikels

In dem Modul „Grundzüge des Umweltingenieurwesens“ durften sich die Studierenden in den ersten Stunden des Seminars mit verschiedenen Themenbereichen auseinandersetzen. Von Professor Dr. Abendroth werden verschiedene Themenvorschläge gegeben, an denen sich die Studierenden orientieren können. Die Autorin wählte das Thema landfill mining beziehungsweise den Deponiebergbau aus. Danach ging es in die konkrete Auswahl des Themas. Die Autorin erkundigte sich zunächst über das Thema und die Bedeutung dessen. Im folgenden Verlauf wurde die Plattform Web of Sciences zur ausführlichen Recherche genutzt. In dieser englischsprachlichen Datenbank ist es möglich nach Schlüsselbegriffen zu suchen und geeignete Quellen auszuwählen. Die Autorin suchte nach den Begriffen „landfill mining“, „germany“ und „Waste“. Die Autorin erzielte mit diesen Begriffen die besten Suchergebnisse. In anderen Zusammenhängen wurden unter anderem auch Suchbegriffe wie „germany“, „economic impact“ und „solutions“. In der Suche wurden Parameter zur Eingrenzung angegeben. So wurden ausschließlich Artikel von 2017 bis 2021 verwendet, um geprüfte und aktuelle Quellen zu gewährleisten. Als weitere Eingrenzung wurden ausschließlich Forschungsartikel zur Recherche benutzt. Dies gewährleistet Informationen aus erster Hand. Die Vorgabe waren zunächst 30 Artikel zu finden, die als Grundlage des Review Artikels dienen sollten. Durch das Lesen des Abstracts konnte die Autorin die Artikel in verschiedene Gruppen

einordnen, die die grobe Vorgabe für die Gliederung darstellten. Während der Einordnung wurde die Anzahl der Artikel dezimiert, da es keine ausreichende Themenüberschneidung gab. Schlussendlich wurden 23 Artikel ausgewählt, auf denen der Review Artikel aufbaut.

### 3. Bibliographische Analyse

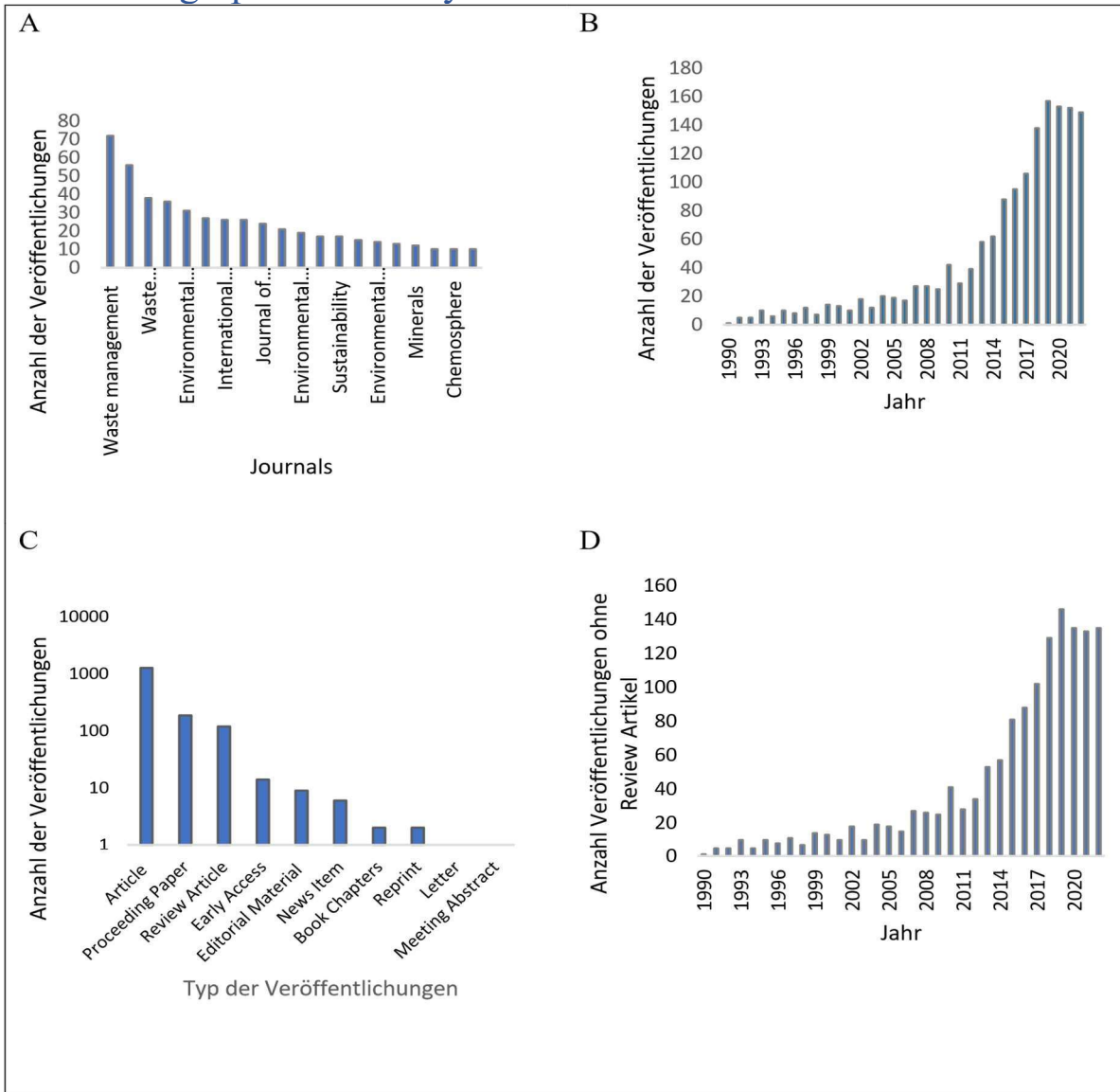


Abbildung 1

Abbildung 2 grafische Darstellung der Web of Sciences Recherche.

Diagramm A: Darstellung der Journale in denen die meisten Veröffentlichungen zum Thema landfill mining publiziert wurden

Diagramm B: Darstellung der Publikationen über den Zeitverlauf von dem Jahr 1990 bis 2020 zum Thema Landfill mining

Diagramm C: Anzahl der Veröffentlichungen in Zusammenhang des Veröffentlichungstypen

Diagramm D: Abbildung der Veröffentlichten Review Artikel zum Thema landfill mining über die Zeit

In der biographischen Analyse sollen die erstellten Diagramme näher erläutert werden. In Diagramm A, wird die Anzahl der veröffentlichten Artikel zum Thema landfill mining über die Jahre dargestellt. Anhand dieser Darstellung, kann erkannt werden, dass sich ab den 1990er Jahren näher mit dem Thema landfill mining beschäftigt wurde. Das Interesse an ressourcenschonenderen Alternativen beginnt in dieser Zeit, sodass sich auch näher mit der Eingliederung von Ressourcen aus Deponien in die Kreislaufwirtschaft beschäftigt wird. Bis in die späten 2000er Jahre, beschäftigen sich vereinzelt WissenschaftlerInnen mit dieser Form der Abfallaufbewahrung. Ab den frühen 2010er Jahren gewinnt das Thema an Popularität. In dem Diagramm B ist die gleiche Entwicklung festzustellen, hier wird noch einmal die genaue Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen ohne Review Artikel abgebildet. Für die Autorin ist es bedeutend, die Entwicklung der letzten Jahrzehnte aufzugreifen, um sowohl die gesellschaftliche Entwicklung, sowie die grundlegende Forschungsarbeit der letzten Jahre nachvollziehen zu können. In der Abbildung C sind die Veröffentlichungstypen geclustert. Darin ist zu erkennen, dass Forschungsartikel als häufigster Veröffentlichungstyp genutzt werden. Die recherchierte Anzahl beträgt 1246 Artikel. Aus diesem Grund hat sich die Autorin bei der Auswahl ihrer Quellen ausschließlich auf Artikel fokussiert. Die hohe Anzahl der Artikel ist auf die breite Forschungsarbeit auf dem Gebiet zurückzuführen, die das Thema landfill mining in den letzten Jahren zum Gegenstand hatte. Im letzten Diagramm D, sind die Journals aufgelistet in denen am häufigsten zum Thema landfill mining berichtet wird. Im Journal Waste Management wird dabei am häufigsten veröffentlicht. Da Deponien und die Ressourcenwirtschaft in den Bereich Abfall Management am häufigsten einzugliedern sind, ist die Veröffentlichung in diesem Journal eine naheliegende Entscheidung. In der Vorgehensweise zur Bearbeitung der Aufgabenstellung, hat sich die Autorin mit dem Thema des Aufbaus von Deponien genauer auseinandergesetzt. Durch persönliche Interessen wurde die Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung von eingelagerten Ressourcen als Hauptthema des Review Artikels gewählt. So wurde die Suche nach angemessenen Quellen auf die Suchbegriffe „landfill mining“ eingegrenzt. Aus der Anzahl der Artikel wurde sich für die Begrenzung der Methoden, der Wirtschaftlichkeitsanalyse und der Abfallaufbereitung entschieden. In dem vorliegenden Review Artikel, sollen Methoden zur Ressourcen Rückgewinnung und deren Wirtschaftlichkeit analysiert werden. Welche Methoden gibt es? Wie umweltfreundlich sind aktuelle Deponien und Methoden? Welche Ansätze gibt es, die Nachhaltigkeit zu steigern? Wie wirtschaftlich rentabel sind diese Ansätze? Diese Fragen sollen in dem nachfolgenden Artikel behandelt werden.

## 4. Aufbau einer Deponie in Deutschland als Maßstab

Deponien in Deutschland haben einen klar geregelten Aufbau. Sie entsprechen hohen Standards und deren Nutzung ist durch strikte Regularien beschrieben. (Mueller & Wohlecke, 2019). Deutschland hat Deponien in fünf Kategorien unterteilt. Deponien der Klasse 0; enthalten Abfälle, die nicht oder sehr gering mit potenziellen Reaktionspartnern reagieren. Diese Abfälle werden in Fachkreisen Inert Abfälle bezeichnet und sind schadstofffrei. Häufig handelt es sich um Bodendeponien. Deponien der Deponieklasse I (DK I), enthalten einen sehr geringen Anteil organischer Materialien und sind somit nicht in der Lage relevante Mengen Schadstoffe freizusetzen. Deponien dieser Art, lagern beispielsweise Erdstoffe, Bauschutt oder sonstige Reststoffe. In Deponien der zweiten Deponieklasse (DK II) werden Abfälle gelagert mit einem geringen Anteil organischer Materialien, diese Deponieklasse wird für Siedlungsabfälle und Hausmüll verwendet. Voraussetzung für Deponieklasse I als auch für Deponieklasse II, ist die geringe Schadstoffbelastung der eingelagerten Materialien. Somit benötigen sowohl Deponieklasse I als auch Deponieklasse II eine geringe Überwachung. Es handelt sich bei den Abfällen in Deponien der DK III um Sonderabfälle. Die Anforderungen sind in dieser Klasse sehr hoch, sowohl im Aufbau der Deponie, in der Kontrolle der Abfalleinlagerungen und in der Überwachung. Deponien der Klassen 0, I, II und III, werden oberirdisch errichtet. Bei Deponieklassen IV und V handelt es sich um unterirdische Ablagerungsstätten, da hier Abfälle eingelagert werden, die nicht sicher an der Oberfläche zu verwahren sind. Der gefährlichen Sonderabfall, wie zum Beispiel leicht radioaktiver Abfall; oder hochreaktive Materialien, müssen unter besonderer Beobachtung stehen. (Schneck, 1994) Aufgrund der Art und der Gefährlichkeit der Abfälle wird in der folgenden Arbeit nicht weiter auf Deponien der Klasse IV und V eingegangen, da sie eine Weiterverarbeitung der Abfälle ausschließen. Mithin wird anhand einer angefertigten Skizze der Autorin, der grobe Aufbau einer Deponie erklärt. Auf die detaillierte Erläuterung wird verzichtet, da Deponien länderabhängig sind. Im Folgenden wird sich daher an der deutschen Deponieverordnung orientiert. Die Abbildungen dienen lediglich der bildlichen Veranschaulichung. Eine Deponie besteht grundsätzlich aus einer Basisabdichtung und Oberflächenabdichtung, damit der Abfall allseitig von der Umgebung und der Interaktion mit der Umwelt getrennt wird. Zudem verfügen sie über eine Gasabführung und Sickerwasserabführung (siehe Abbildung 3). (Melchior, et al., 2010) Die Basisabdichtung besteht aus unabhängigen Abdichtungssystemen. Im Regelfall aus einer mineralischen Abdichtung, zum Beispiel Ton, und einer Kunststoffabdichtung, aus PEHD (Polyethylen high density). Die Oberflächenabdichtung besteht ebenfalls aus zwei unabhängigen Dichtungssystemen. Diese bestehen ebenfalls aus mineralischen Abdichtungen und



Kunststoffabdichtungen (siehe Abbildung 4). In den letzten Jahren hat sich die Anwendung von Betonitmatten anstelle von Ton durchgesetzt. Grundsätzlich ist hinzuzufügen, dass der Aufbau einer Deponie immer auf die lokalen Gegebenheiten angepasst werden muss. Je nach Standort, sind unterschiedliche Umweltbedingungen zu erwarten und sowohl die Neigung bzw. Steigung der Deponie, die Auswahl der Basisabdeckung und der Oberflächenabdeckung beeinflussen diese. (Mueller & Wohlecke, 2019)

Häufig wird unterstellt, dass es sich bei Deponien um einfache Ablageorte für Abfall handelt. Dadurch wird dem Thema des Deponieunterhaltes keine genügende Aufmerksamkeit geschenkt. Sowohl die Instandhaltung als auch der Aufbau, sind kosten und zeitintensiv. Durch vermeintlich einfache Abfallbehandlung in Deponien werden sowohl politisch als auch wirtschaftlich, Ressourcen zurückgehalten, die eine innovative Aufbereitung der herkömmlichen Deponien voraussetzt. In der Tat wird ein hohes Maß an Wissen und Verantwortung von den handelnden Personen verlangt. Das steht in Konflikt zu der allgemeinen Annahme, dass Deponien eine einfache Abfallentsorgung darstellen. (Grossule & Stegmann, 2021). Auch der Fachkräftemangel hat Auswirkungen auf den Betrieb herkömmlicher Deponien. (Wee, et al., 2022) Da Fachkräfte in nahezu jedem Bereich gefragt sind, werden Ingenieure häufig in anderen Bereichen eingesetzt. Eine Deponie mit effizienteren Verfahren, könnte dem entgegenwirken. (Grossule & Stegmann, 2021) Es besteht im Allgemeinen eine allgemeine Abneigung gegen Deponien in der Bevölkerung. Gerade in bevölkerungsreichen Gebieten, wo viel Abfall entsteht, stößt das Errichten einer Deponie auf Ablehnung, da das Landschaftsbild destruiert wird. (Grossule & Stegmann, 2021). Deutschland ist ein dicht bevölkertes Land, der Platz für Deponien ist hier beschränkt. Zudem möchte jeder eine sichere Abfallentsorgung aber keine Deponie in seiner Umgebung.

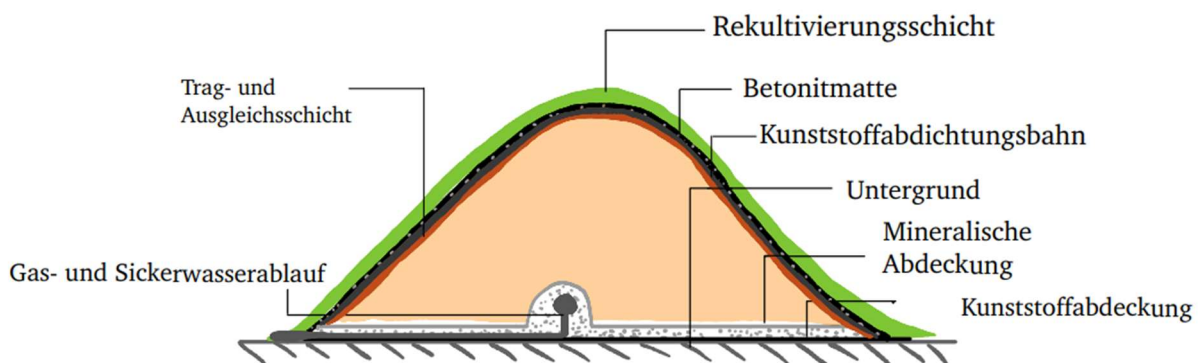


Abbildung 3 selbsterstellte Skizze des Aufbaus einer deutschen Deponie

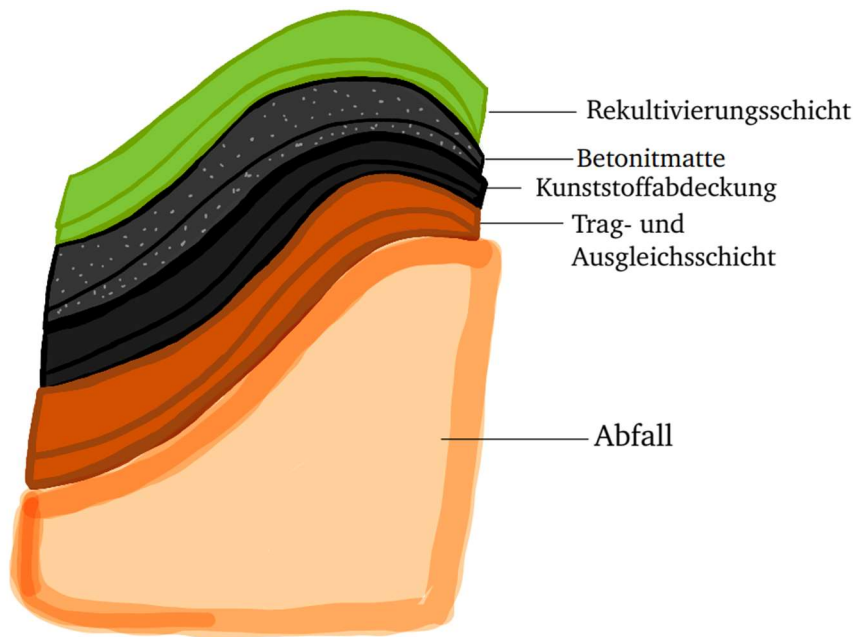


Abbildung 4 selbsterstellte Skizze der Oberflächenabdeckung einer deutschen Deponie

## 5. Landfill mining Problemstellungen und Lösungsmöglichkeiten

Landfill mining beschreibt die Rückgewinnung von Rohstoffen und möglichen Ressourcen aus dem Deponieinhalt. Im Folgenden sollen die Möglichkeiten und die aufkommenden Probleme des landfill mining beschrieben werden. In einer Studie von Sora Yi, wurden 4 Deponien in Südkorea, nach dem LFMR (landfill mining and reclamation) untersucht. Dabei wurde eine Stoffstromanalyse durchgeführt, in der die verschiedenen Materialien der einzelnen Deponien untersucht wurden. Dieses Verfahren zeigte auf, dass in koreanischen Deponien eine große Menge an Rohstoffen zurückgewonnen werden kann. Durchschnittlich kann so der Erhalt einer Deponie, daher der Zeitraum in dem Abfall eingebaut werden kann, um 66 Jahre verlängert werden. Unter der Bedingung, dass Verfahren genutzt werden, um Rohstoffe zu trennen und aus der Deponie abzuführen. Nach der Stoffstromanalyse gibt es verschiedenen Möglichkeiten, um die Materialien einer Deponie zu verwerten. Dazu hat Sora Yi, die einzelnen Bestandteile in brennbare Materialien, in nicht- brennbare Materialien und in Bodenmaterial unterteilt. Wichtig ist das Verhältnis der drei Kategorien. In den vier Deponien, wurden jeweils 100 m<sup>3</sup> des Deponats untersucht. Es kam eine durchschnittliche Verteilung von 73,7 % des brennbaren Abfalls, 7,3% des nicht- brennbaren Abfalls und 19,1% des Bodenmaterials zusammen. Auch hier muss erwähnt werden, dass Umweltbedingungen und unterschiedliche Verhältnisse der jeweiligen Umgebung berücksichtigt werden müssen. (Yi, 2019) In einer Begutachtung in Halbenrain in Österreich untersuchte Cristina Garcia Lopez, dass in 2785 Tonnen abgebauten Deponieabfällen, rund 3% (90 Tonnen) Eisenmetalle zurückgewonnen werden konnten.

Problematisch zeigt sich dabei allerdings die Rentabilität, die selbst mit dem Gewinn von Nichtmetallen, nicht hergestellt werden kann. Zudem sind die Verunreinigungen in Deponien und die Feuchtigkeit problematisch. Ist das Material nicht trocken genug und besteht eine stark heterogene Materialdurchmischung, so sinkt die Leistung von Prozessmaschinen zur Weiterverarbeitung und der Output von marktfähigen Bestandteilen sinkt. Gerade bei Metallen kann das zu Problemen führen. Zusammen machen Eisen und Nichteisen einen kleinen Anteil des Deponiebestandes aus. Die Schwermetallbelastung erschwert zudem die Weiterverarbeitung. In einem aufwendigen Verfahren müssen die Metalle von Verschmutzung und Schwermetallen vor der Weiterverarbeitung befreit werden. Hilfreich wäre eine Auslese der Materialien vor der Deponieeinlagerung, sodass Schwermetalle und gefährliche Stoffe direkt in Deponien der Klasse IV untergebracht werden können (Lopez, et al., 2018). Auch die Verarbeitung von Kunststoffen kann unter der Verunreinigung von anderen Materialien leiden. In einer Untersuchung wurde eine kunststoffreiche Fraktion, einer verlassenen Industriedeponie begutachtet. Mittels Analyseverfahren können verschiedene Kunststoffkomponenten klassifiziert werden. Der größte Bestandteil macht Polyethylen aus, welcher häufig mit organischen und anorganischen Materialien verunreinigt ist. In dem Artikel von Roberto Avolio wird eine Valorisierungsstrategie entwickelt, die die adaptive Behandlung von Kunststoffen aus Deponien ermöglicht. Das Verfahren ist flexibel auf unterschiedliche Kunststoffarten anwendbar (Avolio, et al., 2019). So wurde untersucht, dass neben Verunreinigung und Heterogenität, weitere Faktoren, die Weiterverarbeitung von Deponieabfällen maßgeblich beeinflussen. So zum Beispiel die Agglomeration des Abfalls. Auch die Degradation nimmt Einfluss auf die technische Machbarkeit des Trennverfahrens. Es werden daher geophysikalische Methoden und Verfahren eingesetzt, die die Erkennung des Abfallzustandes und die unterirdische Deponiestruktur erleichtern. Damit kann im Vorhinein entschieden werden, ob sich die Öffnung einer Deponie wirtschaftlich rechnet. Mit dieser Voruntersuchung können Kosten gesenkt werden (Parrodi, et al., 2020). In einer Untersuchung von Zaulfikar Abbas wurde festgestellt, dass sich in einer 8- 9 Jahre alten Deponie in der Regel 50% ihres Abfalls in einem kompostierbaren Zustand befindet. Über 25% können getrennt und wiederverwendet werden und unter 25% des Abfalls können nicht weiterverarbeitet werden und müssen entweder verbrannt oder erneut eingelagert werden. Trotz dessen wird der Verbrennungsprozess als bessere Alternative angesehen, als den Abfall lediglich einzulagern. Durch den Verbrennungsprozess besteht die Möglichkeit, den vorhandenen Abfall in Energie umzuwandeln. (Lino & Ismail, 2018). Es ist zu erwähnen, dass Abbas eine Deponie in Indonesien untersuchte, und in entwicklungschwächeren Ländern ein anderer Standard herrscht als in entwicklungsstarken Ländern. Die Frage der Relevanz lässt sich allerdings nicht

stellen, da ein Großteil der entwicklungsstarken Länder ihren Abfall in Entwicklungsarmeländer verschickt, sodass dort ein hoher Bedarf an landfill mining besteht (Abbas, et al., 2020). Ist eine Deponie im gewünschten Zustand, gibt es Trennverfahren und Aufwertungsprozesse, die sich als hilfreich erwiesen haben. So zum Beispiel die Korngrößenklassifizierung, die Dichteklassifizierung, die sensorbasierte Sortierung, sowie die thermochemische Verwertungstechnologie und das Reststoffupcycling (Parrodi, et al., 2020). Problematisch wird es, wenn die eingelagerten Stoffe nicht geeignet sind, um sie weiterzuverarbeiten. In einer Deponie, ebenfalls in Indonesien, wurde Bodenmaterial geborgen, das sich nach indonesischen Richtlinien, nicht als Ackerboden eignet. Das Material wurde mit Kompost durchmischt, im Zuge dessen sich ein nährstoffreicher Boden ergab. Neben Bodenmaterial fallen auch brennbare Stoffe an, deren Heizwert zu gering ist, um sie zu verbrennen. Bedingt durch einen zu hohen Wassergehalt oder durch einen zu hohen Aschegehalt. Um das zu umgehen, können Materialien wie beispielsweise Holz, Papier, Kunststoff und Textilien, getrennt und getrocknet werden. Alternativ, um den Aschegehalt zu verringern, können Füllstoffe und Grünschnitt hinzugefügt werden (Kristanto, et al., 2021). Deponien können zudem einen Beitrag zur Stromerzeugung durch Gasproduktion leisten. Sie eignen sich als Gasspeicher und als Gaslieferant. Der Ansatz ist hierbei, Regionen, mit geringfügiger Stromversorgung durch umliegende Deponien mit Energie zu versorgen. (Kurniawan & et.al, 2022) Auch zur Nährstoffrückgewinnung können Deponien ihren Beitrag leisten. So kann die Wasseraufbereitung durch ungenutzte Biomasse erreicht werden. Unter dem Ammonium- Stripping und der Absorptionsbehandlung, konnten 99% des Ammoniakes entfernt werden. (Kurniawan, et al., 2021) Um die Projektarbeit im Rahmen des landfill mining zu erleichtern, gibt es ein decision support Tool, das sowohl die Bedingungen der Umwelt und der, Deponieverhältnisse als auch die Deponiestruktur und den Inhalt berücksichtigt. Mit dieser Methode ist es möglich die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Ergebnisse möglicher Projekte vorherzusagen. Anhand von Eingabeparametern ist eine flexible Machbarkeitsbewertung möglich. Damit kann die Ungewissheit der wirtschaftlichen Durchführung beseitigt werden (Pastre, et al., 2018). Von der Autorin wird geschlussfolgert, dass Deponien ein Themenbereich sind bei dem es keine allgemeine Lösung gibt. Die Lösung für flexible Probleme, sind flexible Methoden und Verfahren, die länderunabhängig funktionieren.

## 6. Bewertung der wirtschaftlichen Rentabilität

Das landfill mining durchaus das Potential hat, Stoffkreisläufe zu schließen und damit eine nachhaltige Option gegenüber der Abfallablagerung in Deponien darstellt, ist in den vorherigen

Kapiteln erläutert. In diesem Kapitel soll die Rentabilität dieser Projekte betrachtet werden. Eine Untersuchung im europäischen Kontext von John Laurence Esguerra zeigte Ansätze, die zu den Verbesserungen der ökonomischen Leistung von LFM- Projekten beitragen. In der Studie wurde anhand eines Referenzmodelles die Internalisierung von WtE- Behandlung (Waste to Energy) und der Verwertung von Feinstückrückständen und Bauzuschlagsstoffen behandelt. Als Ergebnis konnte ein hoher Gewinn für zurückgewonnene Materialien und Energie deklariert werden. Mit diesen Behandlungsverfahren steigt der Nettogewinn von 19% auf 35% im Referenzmodell. Somit erwies sich die Untersuchung als wirtschaftlich rentabel und gibt einen Anreiz, auch Ersatzstoffe und Feinstückrückstände zu nutzen (Esguerra, et al., 2021). Das genutzte Verfahren WtE beschreibt die energetische Verwertung von Abfällen. Folglich gibt es auch die stoffliche Verwertung WtM. Beide Prozesse sind im realen Kontext hinreichende Möglichkeiten, um den Mangel an Primärressourcen und die zugleich steigende Nachfrage an Rohstoffen teilweise zu befriedigen. Deponien dienen als Lagerstätte verschiedenster Stoffe, die eine Vielzahl an Risiken bergen, wie gesundheitliche Schäden und eine hohe Emissionsausschüttung. Zudem wird wertvoller Siedlungsraum beansprucht und für eine andere Nutzung unzugänglich. Dementsprechend wird bei der Aufarbeitung/ Rückbau dieser Deponien nicht nur ein wirtschaftliches Problem gelöst, sondern auch ein ökologisches. Der merkliche Einflussfaktor ist die technische Machbarkeit der Verwertungsverfahren, diese hängt wiederum von der Qualität des Abfalls ab, wie bereits in Kapitel 3 erläutert (Parrodi, et al., 2020). Im Gegenzug dazu, steht die Studie von David Laner, welcher erkannte, dass rund 80% der generierten LFM-Szenarien ein negatives Ergebnis erzielen und sich somit nicht rentieren. Hauptverursacher ist die umfangreiche Bearbeitung und Verarbeitung von Materialien. Zudem sind die Systembedingungen, hier zum Beispiel gesetzliche Richtlinien, für den Deponiebergbau ein großer Kostenverursacher. Die größten Projekterlöse kommen aus den Opportunitätskosten, die entstehen, wenn Deponiebewirtschaftungskosten vermieden werden. Die Autorin schlussfolgert daraus, desto kleiner die Deponie, desto weniger Instandhaltungskosten anfallen umso weniger rentabel wird sich ein landfill mining darstellen. Die Betrachtung der generierten Erlöse allein ist deshalb nicht aussagekräftig genug, um landfill mining als rentabel zu deklarieren. Eine positive Wirkung hat das Einbeziehen von mehreren wirtschaftlichen Vorteilen, wie zum Beispiel die Einnahmen aus Materialverkäufen, das Wegfallen von Verwaltungskosten und die Bewirtschaftung des zurückgewonnenen Landes. Je höher die Einnahmen und die vermiedenen Kosten, desto höher der wirtschaftliche Erfolg. Ausschlaggebend ist die Abfallablagerungshöhe also ein geringes Masse-zu-Fläche-Verhältnis, die Sanierungsarbeiten und das Landaufwertungspotenzial, daraus ergeben sich dann die vermiedenen Kosten. Somit kann nur eine umfassende Analyse nahelegen, ob sich der

Deponiebergbau lohnt. (Laner, et al., 2019). Zur Rentabilität eines Deponiebergbauprojektes trägt überdies die Zusammensetzung des Abfalls und der Aufwand zum Trennen bei, was in einer Untersuchung in Teheran in Kahrizak (Iran) bestätigt wurde. In dieser Untersuchung fehlt allerdings die Betrachtung von Sonderabfalldeponien, die einen erheblichen Einfluss auf die Umgebung haben. Letztendlich wurde der Entschluss getroffen, dass das Schließen von Stoffkreisläufen einen entscheidenden Schritt in Richtung Nachhaltigkeit darstellt und somit weitere Untersuchung in diesem Gebiet vorgenommen werden. (Sabour, et al., 2020). Aufgrund der Bedeutsamkeit der Rohstoffgewinnung gibt es Vorschläge, die derartige Vorhaben erleichtern würden. Der Vorschlag ist hier eine Senkung der Steuern auf die Kosten des Rückbaus und die Verschärfung der Anforderungen für die Nachsorge der Deponien, sodass es zu umständlich wird die bestehenden Deponien zu unterhalten. Politisch wird gefordert, dass Maßnahmen für das Aufbrechen von bestehenden Marktstrukturen ergriffen werden müssen. Somit zahlt der Abfallbesitzer für die Verwertung und anschließende Verwendung des Mülls, anstatt Erlöse für getrennte Stoffe und Energieträger zu gewinnen (Parrodi, et al., 2020).

## 7.Schluss teil

In dem Review Artikel über die Rückführung von Ressourcen aus Deponien in die Kreislaufwirtschaft, wird der klassische Aufbau einer deutschen Deponie in Kapitel 2 erklärt. Er dient als Standardannahme. Das gegenwärtige Problem mit Deponien ist nach wie vor die Schadstoffbelastung für Mensch und Umwelt, und die hohen Instandhaltungskosten zur Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, wie in Kapitel 3 beschrieben. Landfill mining kann in diesem Fall eine wirtschaftlich rentablere und nachhaltigere Alternative bieten. Die Methoden zum Abfallrecycling sind vielfältig. Je nach Deponieklasse sind andere Abfallarten vorhanden. So können Deponien mit Hausmüll einen Beitrag zur Gasproduktion und damit zur Strom- und Wärmeversorgung leisten. Deponien, die einen hohen Kunststoffanteil enthalten, können entweder zur stofflichen oder energetischen Nutzung herangezogen werden. Wesentlich sind die Gehalte an Eisen- und Nichteisenmetallen in den Abfällen, da hier zunehmend Knappheit herrscht und die Nachfrage steigt. Problematisch sind die Verunreinigungen und die erforderliche Abfalltrennung, die die Rentabilität von landfill mining Projekten bestimmen. Je größer die Verunreinigung und die Heterogenität des Abfalls ist, desto kostenaufwendiger ist die Weiterverarbeitung und die Erlöse vom Projekt sinken. Der größte finanzielle Erfolg eines Deponiebergbauprojektes geht durch die Opportunitätskosten hervor, die dadurch entstehen, dass die Instandhaltungskosten einer herkömmlichen Deponie vermieden werden. Durch das landfill mining kann auch in entwicklungschwächeren Ländern einen Beitrag zur

wirtschaftlichen und sozialen Stabilität geleistet werden. Dafür sind allerdings politische Restriktionen notwendig, die eine korrekte Abfallentsorgung und eine Weiterverarbeitung ermöglichen. Letztendlich wird von der Autorin geschlussfolgert, dass Deponien in bekannter Form keine zukunftsfähige Möglichkeit darstellen, Ressourcen im Kreislauf zu führen und die Umweltbelastung zu reduzieren. In Hinblick der Nachhaltigkeit und der einhergehenden Ressourcenaufbereitung müssen neue Konzepte etabliert werden, die dazu beitragen, dass vorhandene Potenzial besser auszuschöpfen. Landfill mining kann dazu einen innovativen Beitrag leisten.

## Literaturverzeichnis

Abbas, Z., Utomo, S. & Budiyono, 2020. Analysis of Optimum Garbage Heaps Age on recovery of Landfills Dominated by Organic Solid Waste. *Journal of ecological Engineering*, 21(8), pp. 91-98.

Avolio, R. et al., 2019. Recycling Polyethylene-Rich Plastic Waste from landfill Reclamation: Toward an Enhanced Landfill-Mining Approach. *Polymers*, 11(2).

Barcic, D. & Ivancic, V., 2010. Impact of the Prudinec/ Jakusevec landfill on environment pollution. *Sumarski List*, 134(7-8), pp. 347- 359.

Castellani, V., Sanye- Mengual, E. & Sala, S., 2021. Environmental impacts of household goods in Europe: a process-based life cycle assessment model to assess consumption footprint. *International Journal of life cycle assessment* , 26(10), pp. 2040- 2055.

Esguerra, J., Laner, D., Svensson, N. & Krook, J., 2021. landfill mining in Europe: Assessing the economic potential of value creation from generated combustibles and fines residue. *Waste Management* , Band 126, pp. 221-230.

Grossule, V. & Stegmann, R., 2021. Problems in traditioal landfilling and proposals solutions based on sustainability. *Detritus*, Band 12, pp. 78-91.

Kristanto, G., Jansen, A. & Koven, W., 2021. The potentail of Landfill Mining in two Inactive Zones of the bantar Gebang landfill in Jakarta, Indonesia. *International Journal of Technology*, 11(7), pp. 1430-1441.

Kurniawan, T. et al., 2021. Resource recovery toward sustainability through nutrient removal from landfill leachate. *Journal of environmental Management*, Band 287.

- Kurniawan, T. & et.al, 2022. Harnessing landfill gas (LFG) for electricity: A strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in Jakarta (Indonesia). *Journal of environmental Management*, Band 301.
- Laner, D. et al., 2019. Systematic assessment of critical factors for the economic performance of landfill mining in Europe: What drives the economy of landfill mining?. *Waste Management* , Band 95, pp. 674- 686.
- Lino, F. & Ismail, K., 2018. evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in campinas, brazil. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, Band 29, pp. 19-25.
- Lopez, C., Koppers, B., Clausen, A. & Pretz, T., 2018. Landfill Mining: A Case Study regarding smapling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian Landfill. *Detritus*, Band 2, pp. 29-45.
- Melchior, S. et al., 2010. Results from 18 Years of In Situ Performance Testing of Landfill cover systems in Germany. *Journal of enviromental engineering- ASCE*, 136(8), pp. 815-823.
- Mohanty, A., Vivekanandhan, S., Pin, J. & Misra, M., 2018. composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations . *Science* , 362(6414), pp. 536-542.
- Mueller, W. & Wohlecke, A., 2019. Zero leakage? Landfill liner and capping systems in Germany. *Environmental Geotechnics* , 6(3), pp. 162-170.
- Parrodi, J. et al., 2020. Integration of resource recovery into current Waste Management through (enhanced) landfill mining. *Detritus*, 8(SI), pp. 141- 156.
- Pastre, G. et al., 2018. A Decision Support Tool for Enhanced Landfill Mining. *Detritus*, Band 1, pp. 91-101.
- Sabour, M., Alam, E. & Hatami, A., 2020. Environmental and economic assessment of Enhanced Landfill Mining in Tehran. *Environemetal Science and Pollution Research*, 27(27), pp. 34469- 34483.
- Schneck, W., 1994. Technical Standards for the construction of hazardous- waste landfills in germany documented at the hazardous-waste landfill site at raindorf. *Water science and technology*, 29(8), pp. 263-277.
- Vaverkova, M. et al., 2018. Impact of Municipal Solid Waste Landfill on Environment - A Case Study. *Journal of ecological engineering* , 19(4), pp. 55-68.



Wee, S., Gustiabani, Z. & mohamed, S., 2022. Challenges of Landfill Operation in Tanjungpinang, Kepri, Indonesia. international Journal of sustainable Construction engineering and technology, pp. 205- 218.

Yi, S., 2019. Resource recovery potentials by landfill mining and relamation in South Korea. Journal of Environmental Management , Band 242, pp. 178-185.

## Einverständniserklärung

Nutzungsrecht: Hiermit erlaube ich Herrn Prof. Dr. Abendroth die Nutzung meiner Arbeit als Lehrmaterial für weitere Lehrveranstaltungen. Die Zusage erfolgt unter der Prämisse, dass die Inhalte im originalen/unveränderten Zustand mit etwaigen Studierenden geteilt werden. Die inhaltlichen Rechte verbleiben weiterhin bei dem Autor dieser Arbeit.