

**Matthias Kühle-Weidemeier (Hrsg.)**

## **6. Praxistagung Deponie 2014**

**Betrieb – Abschluss – Nachnutzung**

**Tagungsband  
10. und 11. Dezember 2014**

**wasteconsult**  

---

**INTERNATIONAL**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



## 6. Praxistagung Deponie 2014





**Matthias Kühle-Weidemeier (Hrsg.)**

## **6. Praxistagung Deponie 2014**

**Betrieb – Abschluss – Nachnutzung**

**Tagungsband  
10. und 11. Dezember 2014**

**wasteconsult**  

---

**INTERNATIONAL**

**Cuvillier Verlag**



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-876-2

eISBN 978-3-7369-4876-1



# wasteconsult INTERNATIONAL

Beratung, Ingenieurplanung, Forschung und Wissenstransfer in den Bereichen  
Abfallwirtschaft – Abfallbehandlung – Deponien – Altlasten – Geotechnik



## Abfallbehandlung

Die Mitarbeiter und Kooperationspartner von Wasteconsult waren und sind maßgeblich an der Forschung, Anlagenentwicklung, Anlagenplanung und Optimierung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung und der Emissionskontrolle beteiligt.

## Deponietechnik und Altlasten

Wir verfügen über umfangreiche Erfahrungen bei

- Altlastenerkundung
- Sanierungsplanung
- Deponieabdichtung
- Betriebs- und Schüttkonzepte
- Deponieentgasung und Sickerwasserfassung,
- Monitoring und Nachsorge
- Photovoltaikanlagen



## Konferenzen

Die von uns regelmäßig veranstalteten Konferenzserien

- Waste-to-Resources
- Praxistagung Deponie

gehören zu den führenden Veranstaltungen ihres Themenbereiches.

## Internationale Projekte

Wasteconsult ist besonders international ausgerichtet und hat Projekt in / für Kunden aus Australien, Frankreich, Finnland, Großbritannien, Japan, Kroatien, Polen, Spanien, Türkei, und den USA abgewickelt.

Nutzen Sie unsere Erfahrung, mit der wir Sie beraten und für Sie planen können!

[www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)   [info@wasteconsult.de](mailto:info@wasteconsult.de)   Tel. 0511 6558 1775



# Inhalt

## I Rund um die Deponie

- Wie viel Deponien braucht das Land? – Bedarfsanalyse für Deponien am Beispiel Nordrhein-Westfalen** 1  
*Thorsten Thörner, Sigrid Hams*
- „LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ Fortschreibung der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen“** 7  
*Wolfgang Bräcker*

## II Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien

- Monitoring des Wasserhaushaltes der ehemaligen Zentral-mülldeponie Rastorf in Schleswig-Holstein** 19  
*Steffen Beck-Broichsitter, Heiner Fleige, Rainer Horn*
- Oberflächenabdichtung der Deponie Braunschweig Watenbüttel mit einem Deponiekontrollsystem, 1. BA** 29  
*Franziska Gromadecki*
- Abdichtung einer Altablagerung und Überbauung als Parkfläche mit Einsatz von Stahlwerkschlacken** 41  
*Wolfgang Oltmanns, Michael Bergmann*
- Gereiftes Nassbaggergut als Rekultivierungssubstrat für Deponien** 52  
*Gert Morscheck, Michael Nelles, Michael Henneberg*
- Rekultivierung von Deponien mithilfe von Abwasserschlammmhumus zum Anbau von Energiepflanzen** 68  
*Stephan Knorre, S. Bernsdorf, R. Meissner*

## III Deponierückbau

- Landfill Mining - Nassmechanische Aufbereitung von Feinmaterial** 77  
*Sebastian Wanka, Klaus Fricke, Kai Münnich*
- Erkenntnisse aus Szenarienanalysen zum Rückbau einer Hausmülldeponie in OWL** 89  
*Ernst Reuter, Sebastian Schulze, Reinhard Kahmen*





## **IV Deponieüberwachung und betriebliches Controlling**

- depSIM – Einsatz und Potentiale der numerischen Deponiesimulation** 111  
*Sebastian Schmuck, Renatus Widmann, Tim Ricken*
- 3D-Rauminformationen mittels unbemannter Flugzeuge** 123  
*Werner Mayr*
- Zukunftsweisende Software-Konzepte für das kontinuierliche Anlagen-Monitoring von Abfalldeponien** 133  
*Irene Priebes, Andreas Abecker, Thomas Egloffstein, Gerd Burkhardt*

## **V Sicherung und Stabilisierung von Deponien**

- Spundwand aus Kunststoff** 146  
*Hans Gust, Wolfgang Behrens, Jan Schröder*
- Prinzip Vorsorge zur Beendigung der Nachsorge – Erläutert anhand von Fallbeispielen** 157  
*Klemens Finsterwalder, Daniela Sager*

## **VI Deponiegas**

- Deponieentgasung im Rahmen von PTJ - Projekten zur vor-zeitigen CO<sub>2</sub> – Klimabilanzverbesserung an konkreten Beispielen** 169  
*Wolfgang H. Stachowitz, Falko Ender*
- inspiro - Environmental Excessive Extraction Klimaschutz mittels kontrollierter und effizienter Deponieentgasung** 177  
*Joachim Lehner*

## **VII Sickerwasser**

- Entwässerung von Altdeponien über Deponiegasleitungen** 189  
*Florian Kölsch*
- Ganzheitliche Sanierung und Sicherung des Entwässerungssystems der Deponie Stockstadt** 198  
*Jörg Kässinger, Jürgen Morlok*
- Das LAMBDA-RWD-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Nitrif/Denitrifikation in der Sickerwasser-aufbereitung anhand eines Praxisbeispiels in NRW** 217  
*Volker Rekers, Frank Lenzen, Uwe Walter, Martin Denecke*



## **VII Nachnutzung von Deponien**

<b>Die Deponie als „Nachnutzung“ der Deponie – Grundzüge und Praxisbeispiele</b>	223
<i>Ulrich Bartl, Peggy Hiemann</i>	
<b>:metabolon – Vom Reststoff zum Wertstoff</b>	237
<i>Monika Lichtinghagen-Wirths</i>	
<b>Elektro- und Elektronikgeräterecycling auf einem Deponiegelände</b>	251
<i>André Pohl</i>	
<b>Der Energieberg Georgswerder: Die Nachnutzung einer Deponie durch Energieerzeugung, Infotainment und als Freizeitfläche</b>	260
<i>Deik Esser</i>	
<b>PV - Regenerative Energie auf Deponiekörpern – Erfahrungen und Praxisbeispiele</b>	269
<i>Axel Beese, Manfred Karl, Jürgen Schmid</i>	



## Hinweis

Dieser Tagungsband wurde durch Wasteconsult international, Dr. Kühle-Weidemeier mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Fehler sind trotzdem nicht auszuschließen. Für die Richtigkeit der Angaben in diesem Buch wird von Wasteconsult und den Verfassern keinerlei Haftung oder Gewährleistung übernommen. Die Verantwortung für den Inhalt der Beiträge liegt bei den Autoren selbst.

Sofern in den Beiträgen Markennamen verwendet wurden, bestehen dafür möglicherweise Schutzrechte, auch wenn darauf nicht ausdrücklich hingewiesen wird.

Die Inhalte dieses Tagungsbandes sind urheberrechtlich geschützt und dürfen nur mit Genehmigung des Herausgebers oder der Autoren vervielfältigt werden.



# Wie viel Deponien braucht das Land? – Bedarfsanalyse für Deponien am Beispiel Nordrhein-Westfalen

Thorsten Thörner<sup>1</sup>, Sigrid Hams<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prognos AG, ,Düsseldorf, <sup>2</sup> INFA GmbH, Ahlen

## Inhaltsangabe

Prognos und INFA haben für das Land Nordrhein-Westfalen eine Bedarfsanalyse für DK I-Deponien durchgeführt, bei der die Aufkommen mineralischer Materialien berücksichtigt wurden, die auf Deponien entsorgt (verwertet und beseitigt) oder außerhalb von Deponien verwertet werden und infolge veränderter (rechtlicher) Rahmenbedingungen zukünftig möglicherweise auf Deponien zu entsorgen sind. Die Mengen dieser mineralischen Materialien wurden in verschiedenen Szenarien fortgeschrieben, die sowohl den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen als auch den rechtlichen und technischen Entwicklungen Rechnung tragen. Die Auswirkungen auf den zukünftigen Bedarf an Deponien wurden untersucht. Wesentliches Ergebnis war, dass die vorhandenen DK I-Deponievolumina im bevölkerungsreichsten Land Nordrhein-Westfalen bereits in 5 Jahren verfüllt sein werden. Und selbst bei Realisierung aller bekannten Planungen verlängere sich die Restlaufzeit nur auf ca. 13 Jahre.

## Stichworte

Aufkommen mineralischer Materialien, DK I-Deponiekapazitäten, Bedarfsanalyse, Berechnung von Szenarien, Anliefermengen, Deponierestlaufzeiten

## 1 Hintergrund

Drohen Engpässe bei der Entsorgung von Bauabfällen – diese Frage wurde zuletzt in einer Reihe von Bundesländern aufgeworfen. So klagen etwa in Baden-Württemberg mehrere Wirtschaftsverbände über fehlende Entsorgungskapazitäten für Erdaushub. In Niedersachsen warnt das Umweltministerium vor regionalen Entsorgungsempässen, und auch in Rheinland-Pfalz konstatiert in seinem kürzlich fortgeschriebenen Abfallwirtschaftsplan eine unausgewogene regionale Verteilung des Restverfüllvolumens auf DK 0- und DK I-Deponien. Schleswig-Holstein sowie Bayern lassen den zukünftigen Deponiebedarf derzeit untersuchen. Das bevölkerungsreichste Bundesland Nordrhein-Westfalen hat im Rahmen einer aktuellen Studie den Bedarf an DK I-Deponiekapazitäten durch Prognos und INFA abschätzen lassen.

## 2 Methodik und Datengrundlage

Für die Bedarfsanalyse wurden Abfälle berücksichtigt, die derzeit auf Deponien entsorgt (verwertet und beseitigt) werden. Des Weiteren wurden mineralische Materialien einbezogen, die derzeit verwertet werden, und infolge veränderter (rechtlicher) Rahmenbedingungen zukünftig möglicherweise auf Deponien zu entsorgen sind.



Die Auswahl der zu berücksichtigenden Materialströme erfolgte im Wesentlichen auf Basis ihrer Mengenrelevanz für die hier vorliegende Fragestellung (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Berücksichtigte Materialströme

Herkunftsbereich	Materialstrom
<b>Bau- und Abbruchabfälle</b>	Bauschutt
	Boden und Steine
<b>Abfälle aus der Instandhaltung des Verkehrswegenetzes</b>	Straßenaufbruch
<b>Abfälle und Reststoffe aus thermischen Prozessen sowie aus der thermischen Abfallbehandlung (Aschen und Schlacken)</b>	Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung (Flug-, Kesseltaschen, Schmelzkammergranulat)
	Abfälle / Reststoffe aus der Eisen und Stahlindustrie (Stahlwerkschlacken, Edelstahlschlacken, Hochofenschlacken)
	Abfälle / Reststoffe vom Gießen von Eisen, Stahl und NE-Metallen (Gießformen und Sande nach dem Gießen, Ofenschlacken)
	Kupferhüttenmaterial
	Hausmüllverbrennungsaschen

Für die Ermittlung der in Nordrhein-Westfalen anfallenden Mengen mineralischer Materialien wurden verschiedene Datenquellen genutzt. So stellte IT.NRW im Rahmen der Status quo-Erfassung Daten aus den umweltstatistischen Erhebungen für das Jahr 2010 zu Verfügung. Darüber hinaus wurden beim Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, dem Statistischen Bundesamt und Verbänden vorliegende Daten zum Aufkommen mineralischer Materialien auf Nordrhein-Westfalen umgerechnet und über Fachgespräche plausibilisiert. Das Aufkommen an Straßenaufbruch wurde in einem eigenen Modell auf Basis des Baustoffvolumens und der Erneuerungszyklen errechnet.

Für einige Materialströme konnten nur unzureichend Daten zu Verwertungsmengen und Verwertungswegen ermittelt werden, da diese Daten für Nordrhein-Westfalen nicht entsprechend erhoben werden und somit nur auf Bundesebene vorliegen. Für diese Abfälle wurden jeweils spezifische Abschätzungen vorgenommen. So wurden die in Nordrhein-Westfalen anfallenden Massen z. B. über Produktionszahlen (z. B. für Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie) oder unter Berücksichtigung der abgelagerten Mengen und Hochrechnung der Gesamtmassen unter Berücksichtigung der Kenntnisse über die einzelnen Verwertungswege abgeschätzt (z. B. für Abfälle vom Gießen von Eisen und Stahl).



Als Ausgangspunkt für die Prognose wurden die aus Nordrhein-Westfalen stammenden Abfallmengen, die an DK-I-Deponien in der Ablagerungsphase angeliefert wurden sowie Mengen die zeitlich begrenzt auf DK 0- bis DK III-Deponien in der Stilllegungsphase eingesetzt wurden, angesetzt.

Die Prognose der zukünftig auf DK I-Deponien abzulagernden Abfallmengen wurde unter Berücksichtigung der ökonomischen Entwicklung der Haupterzeugerbranchen sowie in Abgleich mit den demographischen Rahmendaten durchgeführt. Die Projektion der wirtschaftlichen Rahmendaten erfolgte mit Hilfe des Regionalmodells „REGINA“.

Um neben den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch den rechtlichen und technischen Entwicklungen Rechnung zu tragen, wurden für die Prognose drei Szenarien entwickelt, die neben der wirtschaftlichen Entwicklung einzelner Branchen auch geplante bzw. zukünftige Änderungen rechtlicher Vorgaben (z. B. Mantelverordnung) sowie strategischer Entwicklungen (Ressourcenstrategie für mineralische Rohstoffe NRW) berücksichtigen:

- **Status quo-Szenario**  
Es unterstellt keine Veränderungen hinsichtlich der Anteile an mineralischen Materialien, die auf Deponien angenommen werden. Das Verhältnis von Deponierung und Verwertung außerhalb von Deponien und damit die relative Menge an zu deponierenden mineralischen Abfällen bleiben somit gleich.
- **Szenario „höherer Bedarf an DK I-Volumen“ (Hoch-Szenario)**  
Es wird angenommen, dass durch die geplante Mantelverordnung bis 2020 restriktiv umgesetzt ist. Durch Regelungen in Artikel 2 „Ersatzbaustoffverordnung“ wird ein Rückgang bezüglich der Verwertung verschiedener Materialien erwartet.
- **Szenario „niedrigerer Bedarf an DK I-Volumen“ (Niedrig-Szenario)**  
In diesem Szenario wird angenommen, dass durch die geplante Mantelverordnung keine wesentlichen Restriktionen für die Verwertung entstehen werden. Darüber hinaus wird von einer Förderung des Recyclings mineralischer Materialien und einer Erhöhung der Akzeptanz für Recyclingmaterialien ausgegangen.

Zur Ermittlung der zu deponierenden mineralischen Abfälle wurden die verschiedenen Einflüsse auf die einzelnen Verwertungswege geprüft und in dem jeweiligen Szenario berücksichtigt.

### 3 Ergebnisse

Mit Stand 2012 gab es in Nordrhein-Westfalen 22 für die Bedarfsanalyse relevante DK I-Deponien mit einem Restvolumen von insgesamt rund 21 Mio. m<sup>3</sup>. Für ein Volumen in Höhe von rund 27 Mio. m<sup>3</sup> gibt es darüber hinaus Planungen.



Tabelle 2 Vorhandene und geplante DK I-Deponievolumina in Nordrhein-Westfalen

Regierungsbezirk	Bestand Anzahl	Restvolumen 2012 Mio. m <sup>3</sup>	Planungen Anzahl	Geplantes Volumen Mio. m <sup>3</sup>
Düsseldorf	7	4,3	4	13,2
Köln	2	3,0	4	10,5
Münster	0	0,0	1	0,9
Detmold	3	0,3	2	1,2
Arnsberg	10	13,2	3	1,2
<b>NRW</b>	<b>22</b>	<b>20,9</b>	<b>14</b>	<b>27,0</b>

Dabei verfügte der Regierungsbezirk Münster mit Stand 2012 über keine DK-Deponien, und auch bei zeitnaher Realisierung der geplanten Kapazitäten ergibt sich im Status quo- eine theoretische Restlaufzeit von nur wenigen Jahren. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Regierungsbezirk Detmold, wo die vorhandenen DK I-Deponievolumen kurzfristig verfüllt sind und auch die Planvolumina nur noch wenige Jahre reichen werden. Über das mit Abstand das größte DK I-Restvolumen verfügt der Regierungsbezirk Arnsberg.

Für Nordrhein-Westfalen wird, ausgehend von einer potenziell auf DK I-Deponien abzulagernden Mengen von rund fünf Mio. t/a (Mittelwert 2009-2011) bis zum Jahr 2030 mit einer kumulierten Gesamtablagerungsmenge in Höhe von rund 93,2 Mio. t (62,1 Mio. m<sup>3</sup>) im Status quo-Szenario gerechnet (vgl. Abbildung 1).

Im Niedrigszenario wird von einer bis 2030 insgesamt abzulagernden Menge von rund 77 Mio. t (51,3 Mio. m<sup>3</sup>) ausgegangen, für das Hoch-Szenario werden rund 126,8 Mio. t (84,5 Mio. m<sup>3</sup>) erwartet.

In allen drei Szenarien wird das in Nordrhein-Westfalen vorhandene DK I-Restvolumen im Jahr 2018 theoretisch verfüllt sein. Unter Berücksichtigung der geplanten DK I-Deponievolumina ergibt sich für das Status quo-Szenario eine theoretische Restlaufzeit bis zum Jahr 2028. Im Niedrigszenario verlängert sich die Restlaufzeit bis zum Jahr 2029, während im Hochszenario von einer Verfüllung des vorhandenen und geplanten DK I-Deponievolumens bis zum Jahr 2023 auszugehen ist. Das jeweilige Einzugsgebiet der Deponien ist in der Regel eher regional ausgeprägt. Lieferentfernungen von mehr als 50 km sind die Ausnahme und scheinen vor allem bei guter verkehrstechnischer Verbindung zwischen Anliefernden und Deponien vorzukommen oder dort, wo keine DK I-Deponie in der Nähe liegt.

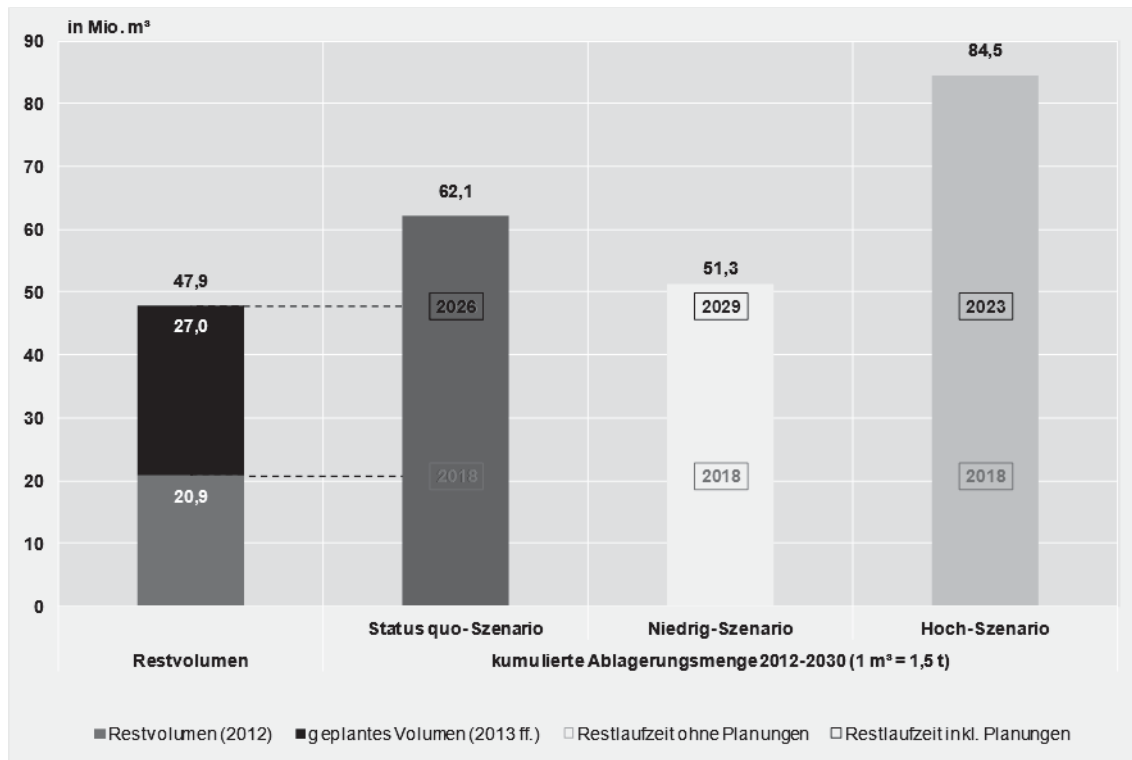


Abbildung 1 DK I-Deponievolumen und Anliefermengen bis zum Jahr 2030 in Nordrhein-Westfalen

## 4 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Bedarfsanalyse für DK I-Deponien in Nordrhein-Westfalen wurden die Aufkommen mineralischer Materialien berücksichtigt, die auf Deponien entsorgt (verwertet und beseitigt) oder derzeit verwertet werden, und infolge veränderter (rechtlicher) Rahmenbedingungen zukünftig möglicherweise auf Deponien zu entsorgen sind. Die Mengen dieser mineralischen Materialien werden in verschiedenen Szenarien fortgeschrieben, die neben den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch den rechtlichen und technischen Entwicklungen Rechnung tragen. Dabei wurden neben der wirtschaftlichen Entwicklung einzelner Branchen auch mögliche zukünftige Änderungen rechtlicher Vorgaben (z. B. Mantelverordnung) berücksichtigt.

Das Status quo-Szenario unterstellt keine Veränderungen hinsichtlich der Anteile an mineralischen Materialien, die zukünftig auf Deponien angenommen werden, d.h. das Verhältnis von Deponierung und Verwertung außerhalb von Deponien und damit die relative Menge an zu deponierenden mineralischen Abfällen bleiben gleich. Im Szenario „höherer Bedarf an DK I-Deponievolumen“ wurde ein Rückgang bezüglich der Verwertung verschiedener mineralischer Materialien angenommen. Im Szenario „niedrigerer Bedarf an DK I-Deponievolumen“ wurde dagegen angenommen, dass zukünftig keine wesentlichen Restriktionen für die Verwertung entstehen werden, das Recycling mine-





ralischer Materialien gefördert wird und sich die Akzeptanz für Recyclingmaterialien erhöht.

Die im Rahmen der Bedarfsanalyse durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse zeigen, dass neue Deponievolumina bereits kurz- bis mittelfristig notwendig werden. Selbst bei Umsetzung aller bekannten Planungen für neue DK I-Deponien bzw. Deponieabschnitte reichen die Volumina in einzelnen Regierungsbezirken nur für wenige Jahre. Für Nordrhein-Westfalen ergeben sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Szenario durchschnittliche theoretische Restlaufzeiten in den Regionen von 9 bis 16 Jahre.

Für Nordrhein-Westfalen ist aufgrund der Ergebnisse zusammenfassend festzustellen, dass die vorhandenen DK I-Deponievolumina in ca. fünf Jahren verfüllt sein werden. Die Laufzeit der DK I-Deponien verlängert sich bei Realisierung aller bekannten Planungen auf ca. 13 Jahre. Vor allem der Norden, der Nordosten und der Südosten des Landes Nordrhein-Westfalen sind eher unterversorgt. Unter Berücksichtigung der Zeiträume für die Realisierung neuer Deponien bzw. Einrichtung oder Wiederinbetriebnahme vorhandener Deponien (etwa 10 Jahre) wird deutlich, dass bereits jetzt weitere DK I-Deponieplanungen notwendig sind.

## 5 Literatur

MKULNV (Hrsg.); 2013 Bedarfsanalyse für DK I-Deponien in Nordrhein-Westfalen. Zusammenfassung der Ergebnisse, 2013

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

Dipl.-Ing. Thorsten Thörner  
Prognos AG  
Schwanenmarkt 21  
D-40213 Düsseldorf  
Telefon +49 211 9 13 16 140  
Email: [thorsten.thoerner@prognos.com](mailto:thorsten.thoerner@prognos.com)  
Website: [www.prognos.com](http://www.prognos.com)

Dipl.-Biol. Sigrid Hams  
INFA GmbH  
Beckumer Str. 36  
D-59229 Ahlen  
Telefon +49 2382 9 64 518  
Email: [hams@infa.de](mailto:hams@infa.de)  
Website: [www.infa.de](http://www.infa.de)



# „LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“

## Fortschreibung der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen“

Wolfgang Bräcker

Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim

### Inhaltsangabe

Mit der Deponieverordnung wurde den Ländern die Aufgabe übertragen, detaillierte technische Anforderungen in Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards festzulegen und zum Teil die Eignung von Materialien, Komponenten oder Systemen, bei denen es sich nicht um Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme handelt, bundeseinheitlich zu beurteilen. Zur Erfüllung dieser Aufgabe haben die Länder die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ eingerichtet. An dieser Stelle wird über den aktuellen Stand der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen berichtet.

### Stichworte

Deponiebau, Abdichtungssysteme, Bundeseinheitliche Qualitätsstandards, Eignungsbeurteilungen, LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“

## 1 Bundeseinheitliche Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen

Die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung-DepV) [1] enthält allgemeine Anforderungen an den Stand der Technik sowie grundsätzliche technische Anforderungen an die geologische Barriere und die Abdichtungssysteme von Deponien. Die Festlegung detaillierter technischer Anforderungen und zum Teil die Beurteilung der Eignung von Materialien, Komponenten oder Systemen, bei denen es sich nicht um Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme handelt, wurden den Ländern übertragen. Auf der Grundlage von Anhang 1 Nr. 2.1.2 DepV definieren die Länder in Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) die Prüfkriterien und legen Anforderungen an den fachgerechten Einbau sowie an das Qualitätsmanagement fest. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den geforderten Zeitraum der Funktionstüchtigkeit von mindestens 100 Jahren gelegt.

Für die Eignungsbeurteilung sonstiger Materialien, Komponenten oder Systeme, insbesondere für den Einsatz von natürlichem, ggf. vergütetem Boden- und Gesteinsmaterial



aus der Umgebung sowie von Abfällen ist die jeweilige Zulassungsbehörde der Deponie zuständig. Grundlagen der Eignungsbeurteilung sind die von den Ländern erstellten BQS. Die Länder nehmen aber auch bundeseinheitliche Eignungsbeurteilungen vor, die dann als Eignungsnachweis gegenüber der zuständigen Behörde herangezogen werden können.

Die Länder haben die Aufgaben, BQS zu erarbeiten sowie bundeseinheitliche Eignungsbeurteilungen vorzunehmen und fortzuschreiben, der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ übertragen [8]. Mitglieder dieser Ad-hoc-AG sind Vertreter aus Fach- und Genehmigungsbehörden aller 16 Bundesländer sowie des Umweltbundesamtes. Als Gast gehört auch ein Vertreter des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) der Ad-hoc-AG an. BQS und Eignungsbeurteilungen werden in kleineren Unterarbeitsgruppen vorbereitet. Die Bearbeitung von BQS wird fachlich von ehrenamtlich tätigen Sachkundigen unterstützt. Für Eignungsbeurteilungen können auf Kosten der Antragsteller externe Sachverständige hinzugezogen werden. Sachkundige und externe Sachverständige sind erfahrene Mitarbeiter aus Forschung und Praxis.

Die wesentlichen Arbeiten an den BQS und Eignungsbeurteilungen konnten in einem Zeitraum von nur zwei Jahren abgeschlossen werden. Seit Aufnahme der Arbeit der Ad-hoc-AG wurden die in Tabelle 1 genannten BQS erarbeitet [6]. Für Asphaltabdichtungen in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen ist jeweils ein BQS in Vorbereitung.

Tabelle 1 Liste der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS)

<b>BQS Nr.</b>	<b>Titel</b>
1-0	Technische Maßnahmen betreffend die geologische Barriere
2-0	Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen
2-1	Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen
2-2	Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus vergüteten natürlichen mineralischen Baustoffen
2-3	Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen
3-1	Mineralische Entwässerungsschichten aus natürlichen Baustoffen in Basisabdichtungssystemen
3-2	Mineralische Entwässerungsschichten in Basisabdichtungssystemen aus nicht



BQS Nr.	Titel
	natürlichen Baustoffen
4-1	Trag- und Ausgleichsschichten
5-0	Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten - übergreifende Anforderungen
5-1	Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen
5-2	Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus vergüteten natürlichen mineralischen Baustoffen
5-3	Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen
5-5	Oberflächenabdichtungskomponenten aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen
5-6	Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen
6-1	Mineralische Entwässerungsschichten aus natürlichen Baustoffen in Oberflächenabdichtungssystemen
6-2	Mineralische Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen
7-1	Rekultivierungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen
7-2	Wasserhaushaltsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen
7-3	Methanoxidationsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen
7-4a	Technische Funktionsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen – Photovoltaik auf Deponien
8 -1	Rohre, Schächte und Sonderbauteile in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien
9-1	Qualitätsmanagement - Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen



Bundeseinheitliche Eignungsbeurteilungen dieser Ad-hoc-AG bzw. der vorangegangenen LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ liegen für folgende Komponenten bzw. Systeme vor:

Tabelle 2 Liste der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS)

Komponente	Produkt / System	Anbieter	Eignungsbeurteilung durch	
			LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“	LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“
Geosynthetische Tondichtungsbahnen	Bentofix B 4000	Firma NAUE	X	
	Bentofix BZ 6000		X	
	Bentofix NSP 4900			X
	Bentomat GDA	Firma BECO		X
	NaBento RL-C	Firma HUESKER		X
	NaBento RL-N	Firma HUESKER		X
Kapillarsperre	Kombikapillarsperre	Dr. Sehrbrock	X	
	Kapillarblockbahn	Firma G <sup>2</sup>		X
Mineralische Dichtung	METHA-Material	Hamburg Port Authority (HPA)	X	
	Trisoplast	Firma G <sup>2</sup>		X

## 2 Umgang mit Praxiserfahrungen

Unmittelbar mit Inkrafttreten der DepV 2009 mussten die Deponieabdichtungssysteme einem Qualitätsstandard entsprechen, der bundeseinheitlich zu gewährleisten war. Daher musste sehr schnell geklärt werden, was dieser bundeseinheitliche Qualitätsstandard ist. Anstelle die BQS nur innerhalb der Ad-hoc-AG zu erstellen und anschließend



die Entwürfe in einem Gelbdruckverfahren der Fachdiskussion bereitzustellen, wurde daher die Erörterung mit Fachkreisen, z. B. dem AK 6.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), dem SKZ/TÜV-LGA Arbeitskreis „Rohre, Schächte, Bauteile“ und in speziellen Fachgesprächen mit Sachkundigen bereits in die Phase der Erstellung der BQS verlagert. So standen bereits in der Bausaison 2012, abgesehen von Asphaltabdichtungen, für alle Komponenten der Abdichtungssysteme BQS zur Verfügung.

Zahlreiche Mitglieder der Ad-hoc-AG sind unmittelbar mit der Genehmigung und Überwachung von Deponien betraut. Auch wurde anlässlich zahlreicher Veranstaltungen dazu aufgerufen, den Mitgliedern der Ad-hoc-AG über Praxiserfahrungen zu berichten. So können sie ihre unmittelbar gewonnenen oder zugetragenen Erfahrungen mit der Anwendung der BQS und bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen direkt in die Ad-hoc-AG einbringen. Anbieter von durch die Ad-hoc-AG eignungsbeurteilten Produkten treten automatisch an die Ad-hoc-AG heran, wenn sie der Auffassung sind, dass aufgrund bestimmter Inhalte der Eignungsbeurteilung die Einsatzmöglichkeit ihres Produktes eingeschränkt ist oder sie einen Wettbewerbsnachteil gegenüber einem Mitbewerber sehen.

Der Erfahrungsaustausch über Praxiserfahrungen mit der Anwendung von BQS und bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen ist fester Bestandteil jeder Sitzung der Ad-hoc-AG. Es wird jeweils unmittelbar über eine Fortschreibung entschieden oder eine Unterarbeitsgruppe beauftragt, sich eingehender mit der Fragestellung zu befassen. Sofern sich in der Unterarbeitsgruppe ein Fortschreibungsbedarf für den BQS oder die bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung herausstellt, erarbeitet sie ggf. unter Hinzuziehung Sachkundiger bzw. externer Sachverständiger einen Vorschlag für deren Fortschreibung. Dieser Vorschlag der UAG wird in der Vollversammlung abschließend beraten und der LAGA zur Zustimmung und Veröffentlichung zugeleitet.

### **3 Aktuelle Fortschreibungen**

Die Fortschreibungen der BQS zur geologischen Barriere, zu mineralischen Abdichtungskomponenten und Entwässerungsschichten sowie zu Trag- und Ausgleichsschichten wurden in der Vollversammlung der Ad-hoc-AG beraten und sollen im Frühjahr 2015 der LAGA zugeleitet werden. Die nachfolgenden Ausführungen zu den genannten BQS stehen daher unter dem Vorbehalt der Zustimmung durch die LAGA.

#### **3.1 Geologische Barriere**

Nach Anhang 1 Nr. 1.2 Ziffer 2 DepV soll der Untergrund u. a. aufgrund seines Schadstoffrückhaltevermögens eine Schadstoffausbreitung aus der Deponie maßgeblich behindern. Das Schadstoffrückhaltevermögen wird in der DepV nicht quantifiziert.



Aufgrund der regional heterogenen Verteilung geologischer Formationen mit höherem und geringerem Schadstoffrückhaltevermögen in Deutschland hat die Ad-hoc-AG im BQS 1-0 über die qualitative Festlegung der DepV keine weitere Konkretisierung zum Schadstoffrückhaltevermögen vorgenommen, sondern sich auf entsprechende Hinweise beschränkt. U. a. wurde im Zusammenhang, dass Tonminerale in einem bestimmten Mindestmaß in der geologischen Barriere enthalten sein müssten, auf das LANUV Arbeitsblatt 13 [10] hingewiesen. Da dieses Arbeitsblatt gerade nicht den Tonmineralanteil, sondern den Tonanteil als Bemessungskriterium heranzieht, war dieser Querbezug an dieser Stelle unzutreffend und wurde entfernt. Gleichwohl dient das Arbeitsblatt als Erkenntnisquelle, auf die an anderer Stelle im BQS 1 0 weiterhin hingewiesen wird.

### 3.2 Mineralische Abdichtungskomponenten

Die BQS zu mineralischen Abdichtungskomponenten konnten so interpretiert werden, dass immer alle dort genannten Nachweise geführt und durch Versuche belegt werden müssen. Aus diesem Grund sind einige Klarstellungen geplant:

Ist die Einhaltung von Anforderungen dieses BQS für bestimmte Materialeigenschaften aufgrund langjähriger Erfahrungen und Untersuchungen aus vergleichbarer Anwendung nachgewiesen, z.B. bei natürlichen Böden oder Gesteinsmaterialien, soll künftig der Eignungsnachweis auch anhand einer fachgutachterlichen Beurteilung geführt werden können.

Die BQS 2-0 und 5-0 beinhaltet eine Tabelle 1 zu Leistungsfähigkeit und Nachweisen für mineralische Abdichtungskomponenten des Basisabdichtungssystems. Diese Tabelle soll einen Überblick geben, aber nicht die Inhalte des weiteren Textes überregeln. Hierauf wird in einer neuen Fußnote zur Tabelle hingewiesen.

Wenn der zu erwartende Krümmungsradius eingebauter mineralischer Dichtungen den Wert von  $R = 200$  m nicht unterschreitet, kann künftig bei natürlichen mindestens mittelplastischem mineralischen Baustoffen auf einen Nachweis der Abdichtungswirkung bei einer Krümmung der Abdichtungskomponente mit einem Krümmungsradius  $R$  von 200 m verzichtet werden.

Um den stärker mineralisch geprägten Sickerwässern besser Rechnung tragen zu können, wird für Worst-case-Betrachtungen die Sickerwasserbelastung in Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit erhöht und gleichzeitig die DOC-Belastung reduziert. In Einzelfällen können die Art und Aggressivität des Sickerwassers projektspezifisch nach den abzulagernden Abfällen abgeschätzt werden.

Probefelder können künftig in Abstimmung mit der zuständigen Behörde Bestandteil der Abdichtung werden, wenn alle Anforderungen an das Abdichtungssystem und dessen





Komponenten nachgewiesen sind, alle Probenahmestellen ordnungsgemäß verschlossen und alle Anschlüsse ordnungsgemäß hergestellt wurden.

Für mineralische Basisabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen kann die hydraulische Widerstandsfähigkeit gegenüber innerer Erosion und Sufusion infolge von Durchströmungsvorgängen als gegeben angesehen werden. Daher können hierfür entsprechende Versuche und Nachweise entfallen.

### **3.3 Mineralische Entwässerungsschichten, Trag- und Ausgleichsschichten**

Im BQS 3-1 wurde eine Klarstellung aufgenommen, dass bei Gesteinen, deren Komponenten calcitisch gebunden sind, der Anteil des Calciumcarbonats nicht mehr als 1 Masse.-% betragen darf. Der Anteil an nicht kristallin gebundenem Calciumcarbonat muss abweichend von DIN 19667 nicht mehr bestimmt werden.

Auch für mineralische Entwässerungsschichten aus Deponieersatzbaustoffen sowie Trag- und Ausgleichsschichten soll künftig der Eignungsnachweis anhand einer fachgutachterlichen Beurteilung geführt werden können, wenn die Einhaltung von Anforderungen der betreffenden BQS für bestimmte Materialeigenschaften aufgrund langjähriger Erfahrungen und Untersuchungen aus vergleichbarer Anwendung nachgewiesen ist.

### **3.4 Geosynthetische Tondichtungsbahnen**

Im BQS 5-5 wurde eine Übergangsregelung bezüglich des Einflusses von Ionenaustausch auf die Permittivität der geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD) aufgrund zeitlichen Ablaufs gestrichen.

Anhand von Zwischenergebnissen von Versuchen zum Einfluss von Salzeinwirkungen auf die Permittivität in Folge von Erstquellen und Ionenaustausch gemäß Anhang 3 des BQS 5-5 zeigte sich, dass es keine Veranlassung gibt, die bisherigen Eignungsbeurteilungen grundsätzlich in Frage zu stellen. Um zusätzliche Sicherheitsreserven zu den Leistungsanforderungen des BQS 5-5 zu schaffen, haben sich die Hersteller auf Anfrage der LAGA Ad-hoc-AG bereit erklärt, einheitlich die Bentoniteinlage auf 4250 g/m<sup>2</sup> als Mindestgehalt bei einem Wassergehalt von  $w = 0\%$  zu erhöhen. Bis zum 30.09.2017 sollen alle Ergebnisse der in der Werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) gemessenen Permittivitäten mit der erhöhten Flächenmasse der Bentoniteinlage statistisch ausgewertet der Ad-hoc-AG vorgelegt werden. Auf Basis dieser statistischen Auswertung werden neue charakteristische Permittivitäten einheitlich festgelegt. Diese gelten dann ab 01.01.2018.





Vergleichbar mit einer Übergangsregelung der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) für geosynthetischen Entwässerungsschichten ist vorgesehen, dass die Hersteller die bis zu einem Stichtag beauftragten Projekte einschließlich der dazugehörigen Grundfläche benennen und für diese Projekte eine Bestätigung der Ad-hoc-AG erhalten, ihre GTD mit den in den bisherigen Eignungsbeurteilungen genannten Flächenmasse der Bentoniteinlage weiterhin einsetzen zu dürfen.

Im BQS 5-5 wurde die Versuchsmethodik zur Langzeit-Beständigkeit der geotextilen Komponenten (Gewebe, Vliesstoff und/oder Nähgarn) gegenüber Oxidation und Auslaugung an die aktuelle Fassung der europäischen Normung angepasst.

Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung der Trag- und Ausgleichsschicht wurden flexibler gefasst.

Die Eignungsbeurteilungen der Produkte Bentofix B 4000, BZ 6000 und NSP 4900, Bentomat GDA, sowie NaBento RL-C und RL-N wurden an den fortgeschriebenen BQS 5-5 angepasst.

Die Anforderungen an das Überbauen einer GTD wurden in den genannten Eignungsbeurteilungen vereinheitlicht.

Die Kennzeichnung der GTD-Rollen wurde an die CE-Kennzeichnungspflicht angepasst.

Der BQS 5-5 und die Eignungsbeurteilungen werden nach Zustimmung durch die LAGA voraussichtlich im Herbst 2014 veröffentlicht.

### **3.5 Rekultivierungsschichten**

Die Funktionstüchtigkeit deponietechnischer Einrichtungen darf durch eine Folgenutzung der Deponie auch nach ihrer Rekultivierung nicht beeinträchtigt werden. Ein weiterer Anhang zum BQS 7-1 soll entsprechende Hinweise bei einer geplanten Biomasseproduktion beinhalten. Die Beratungen sind in der Ad-hoc-AG bereits abgeschlossen. Dieser Anhang soll durch eine Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift ergänzt werden, der die pflanzenbauspezifischen Besonderheiten beleuchtet.

Der Ad-hoc-AG liegen diverse Stellungnahmen mit Erfahrungen der Anwendung des BQS 7-1 vor. Diese wurden im August 2014 in einem Fachgespräch mit Sachkundigen erörtert. Zu diesem Fachgespräch waren auch Vertreter aus dem Kreis der Deponiebetreiber und der Bauwirtschaft eingeladen. Die Ergebnisse des Fachgesprächs werden derzeit in der Unterarbeitsgruppe ausgewertet.

Ausgangsbasis der Diskussion war die Feststellung, dass die Funktionstüchtigkeit eines Oberflächenabdichtungssystems und seiner Komponenten nach dem in der DepV defi-



nierten Stand der Technik für mindestens 100 Jahre nachgewiesen werden muss. Darüber das Abdichtungssystem aber weiterhin eine Wirksamkeit besitzen soll, für die jedoch kein Nachweis zu führen ist.

Schwerpunkte der Beratungen waren mit folgenden Ergebnissen:

- Materialanforderungen, geeignete Bodenarten

Das Spektrum geeigneter Bodenarten soll erweitert werden. Hierzu wird voraussichtlich der AK 6.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) einen Vorschlag in die GDA-Empfehlung E 2-31 „Rekultivierungsschichten“ aufnehmen. Der BQS 7-1 könnte sich darauf beschränken, auf diese Empfehlung zu verweisen.

Für den Eignungsnachweis von Böden, die bei Baumaßnahmen anfallen, zeichnen sich Lösungen ab, die die Annahmemöglichkeiten von Kleinmengen an Böden erleichtern könnten.

- Anforderungen an die Luftkapazität

Die Luftkapazität des Bodens mit 8 Vol.-% bleibt ein wichtiges Kriterium für Rekultivierungsschichten. Der Zeitpunkt der Bestimmung der Luftkapazität soll jedoch insbesondere auch auf die Konsolidierung des Bodens abgestimmt werden. Unterschreitungen sollen in einem bestimmten Rahmen möglich sein.

- Anforderung an den Einbau der Rekultivierungsböden

Nicht alle Böden reagieren auf Verdichtung in gleichem Maße empfindlich. Die zielorientierte Einbautechnik sollte daher einzelfallspezifisch festgelegt werden.

- Standsicherheit

Zu den Anforderungen an die Standsicherheit und die entsprechenden Nachweise sollen weitere Hilfestellungen gegeben werden.

- Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität

Anhand des Ergebnisberichtes eines vom Land Sachsen-Anhalt beauftragten Forschungsvorhabens und eines von der IGU Ingenieurgesellschaft für Geotechnik in Rostock organisierten Ringversuches wird geprüft, ob für die Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität zum Teil auf Daten aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) [2] zurückgegriffen und somit auf einen Teil der laborativen Bestimmung nach DIN ISO 11274 verzichtet werden kann.

- Parameter und Prüfumfang gemäß Anhang zum BQS 7-1



Zu den im Rahmen der Eignungsuntersuchung und der Qualitätskontrolle zu bestimmenden Parametern und deren Untersuchungshäufigkeit liegen Änderungsvorschläge vor, die noch geprüft werden müssen.

- Kompatibilität des BQS 7-1 mit anderen BQS

Verschiedene BQS, Eignungsbeurteilungen und Zulassungen der BAM zu Abdichtungs- und Entwässerungskomponenten beinhalten spezielle Anforderungen an Rekultivierungsschichten. Die Kompatibilität dieser Anforderungen wird geprüft.

Die Ergebnisse des Fachgesprächs werden derzeit in der Unterarbeitsgruppe ausgewertet. Mitte November 2014 soll der Entwurf einer Fortschreibung des BQS 7-1 den Teilnehmern am Fachgespräch zur Stellungnahme und der Vollversammlung der Ad-hoc-AG zur Beratung vorgelegt werden.

Ziel ist es, die Beratung des BQS 7-1 im Dezember 2014 abzuschließen. Er könnte dann im Frühjahr 2015 der LAGA zugeleitet werden. Im Anschluss daran wird die Ad-hoc-AG die BQS 7-2 und 7-3 inhaltlich der Fortschreibung des BQS 7-1 anpassen.

### **3.6 Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien**

Im September 2013 wurde die erste Fortschreibung der SKZ / TÜV-LGA Güterrichtlinie „Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien“ veröffentlicht. Der BQS 8-1 wurde daraufhin fortgeschrieben und im Frühjahr 2014 veröffentlicht.

### **3.7 Fremdprüfung**

Nach Veröffentlichung des BQS 9-1 „Qualitätsmanagement - Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen“ im Herbst 2013 kamen verschiedene Hinweise zum Mindestumfang der Prüfungen, für die die Inspektionsstelle selbst akkreditiert sein sollte. In einer Informationsveranstaltung der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) im Frühjahr 2014 wurden von den Teilnehmern weitere Hinweise zur Akkreditierung von Fremdprüfern vorgetragen. In einer gemeinsamen Sitzung der Ad-hoc-AG mit Vertretern der DAkkS wurden der BQS 9-1 fortgeschrieben und die DAkkS Regel [3] darauf abgestimmt. Der fortgeschriebene BQS 9-1 wurde nach Zustimmung durch die LAGA im Mai 2014 veröffentlicht.



### 3.8 Steile Böschungen und Wände

Bei der Suche nach neuen Deponiestandorten treten auch Steinbrüche und Gruben in den Fokus des Interesses, darin Deponien zu errichten. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die bestehenden Anforderungen der DepV an die geologische Barriere und die Basisabdichtung geeignet sind, den besonderen Standortanforderungen Rechnung zu tragen oder Sonderregelungen erforderlich sind. Zur Klärung dieser Fragen fand im Juni 2014 ein Fachgespräch mit Vertretern von Ingenieurbüros, Bauindustrie, Fachgutachter, der Gütegemeinschaften AGAS und AK GWS sowie von Behörden statt.

Im Ergebnis sollen daraufhin die Anforderungen an den Einsatz von Geokunststoffen in steilen Böschungen und Wänden von AGAS und AK GWS in Zusammenarbeit mit der BAM und die Anforderungen an den Einsatz mineralischer Baustoffe von der Ad-hoc-AG in Zusammenarbeit mit dem AK 6.1 der DGGT und der Gütegemeinschaft BU erarbeitet werden. Sobald die fachlich-inhaltlichen Punkte geklärt sind, wird entschieden, in welcher Form die Ergebnisse veröffentlicht werden.

## 4 Veröffentlichung

BQS und Eignungsbeurteilungen der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ veröffentlicht die LAGA auf ihrer Internetseite [6] und [7].

Damit Anwender leichter erkennen können, welche Änderungen in den Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und Eignungsbeurteilungen vorgenommen wurden, werden Dokumente mit den Änderungsvermerken gegenüber der jeweils vorangegangenen Version auf der Internetseite der Niedersächsischen Gewerbeaufsichtsverwaltung unter ([www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de](http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de), Pfad Umweltschutz → Kreislauf- und Abfallwirtschaft → Deponietechnik → LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ → Änderungen von BQS und Eignungsbeurteilungen) veröffentlicht.

Unverändert gültige Eignungsbeurteilungen der vorangegangenen LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ sind ebenfalls auf der Internetseite der Niedersächsischen Gewerbeaufsichtsverwaltung [9] verfügbar.

## 5 Literatur

### [1] DEPONIEVERORDNUNG

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV); Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009; (BGBl. Teil I vom 29.04.2009, Seite 900); zuletzt geändert durch Art. 7 der Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung



der Verordnung über Immissionsschutz- und Störfallbeauftragte und zum Erlass einer Bekanntgabeverordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I, Nr. 21, S. 973)

- [2] AG BODEN  
„Bodenkundliche Kartieranleitung“; Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, 5. Auflage, Hannover E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- [3] DEUTSCHE AKKREDITIERUNGSSTELLE  
Zusätzliche Akkreditierungskriterien für Stellen, die an der Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen entsprechend der Deponieverordnung (DepV) beteiligt sind - Inspektionsstellen nach DIN EN ISO/IEC 17020 und Prüflaboratorien nach DIN EN ISO/IEC 17025 (71 SD 1 030 | Revision: 1.0 | 02. Mai 2014)
- [4] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK  
Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke": [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)
- [5] DIN ISO 11 274:2011-01  
Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren
- [6] LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“  
Diverse Bundeseinheitliche Qualitätsstandards; [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)
- [7] LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“  
Diverse Eignungsbeurteilungen; [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)
- [8] LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“  
Geschäftsordnung (GO) zur Festlegung bundeseinheitlich zu gewährleistender Qualitätsstandards sowie Eignungsbeurteilung von Deponieabdichtungssystemen und -komponenten vom 13.12.2011; [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)
- [9] LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNISCHE VOLLZUGSFRAGEN“  
Diverse Eignungsbeurteilungen; [www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de](http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de)
- [10] LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORD-RHEIN-WESTFALEN  
„Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponiebasisabdichtungssysteme LANUV -Arbeitsblatt 13) (2011)
- [11] SKZ / TÜV-LGA  
Güterichtlinie „Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien“; September 2013



# Monitoring des Wasserhaushaltes der ehemaligen Zentralmülldeponie Rastorf in Schleswig-Holstein

Steffen Beck-Broichsitter, Heiner Fleige und Rainer Horn

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel

## Abstract

Auf der ehemaligen Zentralmülldeponie in Rastorf/Schleswig-Holstein wird ein langjähriges Wasserhaushaltsmonitoring durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit einer temporären mineralischen Oberflächenabdeckung kontinuierlich zu überwachen.

Die jährlichen Sickerwasseraufkommen entsprechen im Mittel 10 % des Freilandniederschlages und bewegen sich im Rahmen der modellgestützten Prognosen für die temporäre Sicherungsmaßnahme.

Bei einer nachgewiesenen Eignung über einen Zeitraum von ca. 8–10 Jahren wird die temporäre Oberflächenabdeckung ein Bestandteil des endgültigen Abdeckungssystems oder soll eigenständig als kostengünstiges endgültiges Abdeckungssystem fungieren.

## Stichworte

Temporäre Abdeckung, Monitoring, Wasserhaushalt, Sickerwasser

## 1 Einleitung

### 1.1 Bedeutung einer Oberflächenabdeckung

Die übergeordnete Bedeutung von Deponien spiegelt sich in ihrer Funktion als Schadstoffsenke wider. Damit verbunden ist die Aufgabe, eine großflächige und unkontrollierte Verteilung von Abfällen und Schadstoffen zu verhindern (HEYER, ET AL., 2005). Die wesentlichen Bestandteile eines Gesamtanierungsplans sind daher eine qualifizierte Oberflächenabdeckung zur Sicherung des Deponiekörpers und ein umfangreiches Überwachungsprogramm (HIRSCHMANN, ET AL., 2003).

Dokumentierte Versagensfälle (z. B. Rissbildungen in Dichtungen) in Verbindung mit hohen Herstellungs- und Nachsorgekosten sind in den vergangenen Jahren in der Deponietechnik ein wesentlicher Grund für die Erprobung alternativer Oberflächenabdeckungskonzepte (HOEPFNER UND SCHNEIDER, 2006; MELCHIOR, 2012).

Auf der stillgelegten Siedlungsabfalldeponie Rastorf im Nordosten Schleswig-Holsteins steht seit September 2007 ein temporäres Oberflächenabdeckungssystem für die grundlegenden und umsetzungsdefinierten Untersuchungen zum Wasserhaushalt von geschichteten mineralischen Abdeckungen zur Verfügung.





Die kontinuierliche Überwachung der Funktionsfähigkeit einer Deponieoberflächenabdeckung und insbesondere der anfallenden Deponiegas- sowie Sickerwassermengen ermöglicht es, dass von der Deponie ausgehende Schadeinflüsse auf die Umwelt rechtzeitig erkannt und mögliche Sanierungsmaßnahmen frühestmöglich eingeleitet werden können.

Da die Wirksamkeit einer Oberflächenabdeckung im Wesentlichen durch klimatische Einflussfaktoren und den Pflanzenbewuchs bestimmt wird (EGLOFFSTEIN ET AL., 2008), gehört die jährliche Überwachung und Bilanzierung des Wasserhaushalts zu den grundlegenden Aufgaben und Zielen des Projektes.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Deponie Rastorf

Die ehemalige Zentralmülldeponie Rastorf im Kreis Plön in Schleswig-Holstein wurde über einen Zeitraum von 28 Jahren vom 1. Februar 1977 bis zum 31. Mai 2005 durch die ZMD Rastorf GmbH betrieben. Auf einer Fläche von 10,5 ha, etwa 20 km östlich der Landeshauptstadt Kiel gelegen, wurden ca. 2,0 Millionen Tonnen an Siedlungsabfällen aus dem Kreis Plön deponiert (vgl. Abb. 1).

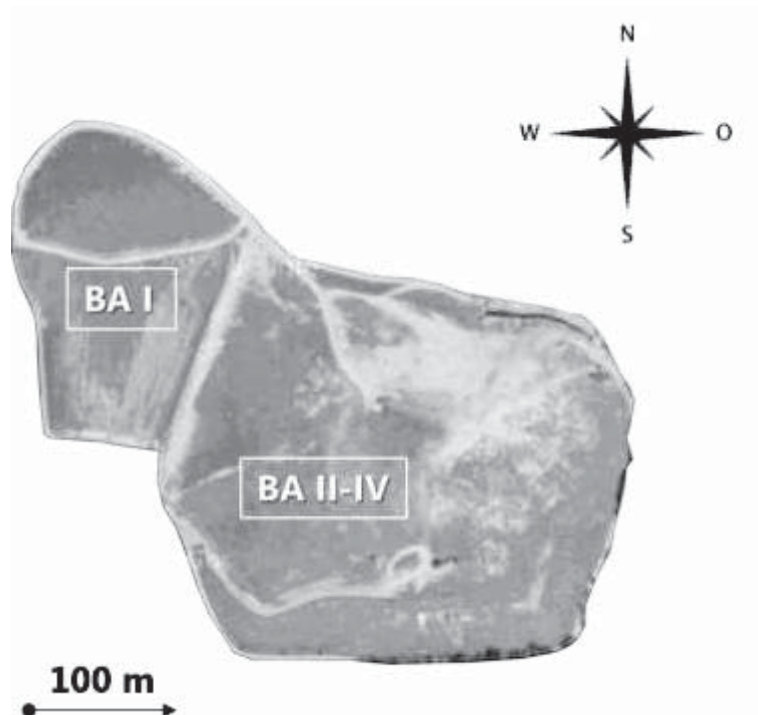


Abbildung 1 Die Siedlungsabfalldeponie Rastorf mit den Bauabschnitten I bis IV.



Aufgrund erhöhter Anteile an biologisch verfügbaren organischen Bestandteilen im Hausmüll (HEYER, ET AL., 2005) werden bis zum heutigen Zeitpunkt durch mikrobiellen Abbau nennenswerte Deponiegasemissionen erwartet und außerdem besteht durch entsprechende Setzungen und Austrocknungen die Gefahr der Bildung und des Austritts von Sickerwasser.

In den Bauabschnitten II-IV der Deponie Rastorf wurde nach Abschluss der Verfüllung das entstandene Deponiegas mit einem aktiven Gaserfassungssystem gefasst und bis zum heutigen Zeitpunkt energetisch in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) genutzt, um damit Strom und Wärme zu erzeugen.

Zur Verhinderung einer intensiven Oberflächenwasserversickerung erfasst ein Drainagesystem oberhalb der Basisabdichtung das anfallende Sickerwasser. Die im Sickerwasser enthaltenen Schadstoffe werden am Standort in einer verfügbaren Umkehrosmoseanlage vom Wasser getrennt, wobei das gereinigte Wasser direkt in einen kleinen Bach eingeleitet wird.

## 2.2 Aufbau der temporären Oberflächenabdeckung

Charakteristisch für die mineralische Abdeckung ist eine 100 cm mächtige Schicht aus Geschiebemergel, bestehend aus einem schwach bis stark lehmigen Sand mit sehr hohen Trockenrohdichten zwischen 1,8 und 2,0 g/cm<sup>3</sup>. Das dreischichtige System besteht aus einem humosen Ober- und einen humusarmen Unterboden in 0–40 bzw. 40–70 cm Tiefe, die zusammen als Drainschicht fungieren (vgl. Abb. 2). Die kompaktere mineralische Dichtschicht in 70–100 cm Tiefe dient als Wurzelsperre und sorgt für einen effektiven Zwischenabfluss aus dem teildurchlässigen System.



Abbildung 2 Der Aufbau der temporäre Oberflächenabdeckung der Deponie Rastorf.





Die Basisabdichtung besteht aus einer ca. zwanzig Meter dicken Schicht aus Geschiebemergel und einer maschinell aufbereiteten Schicht aus Tonmergel. Ein zusätzlicher Schutz zur mineralischen Basisabdichtung wurde in Form einer Kunststoffdichtungsbahn installiert (Abb. 2).

Die Oberfläche der Deponie ist unter Grünlandnutzung mit zwei Schnitten pro Jahr, gekennzeichnet durch flach wurzelnde Arten mit einem dominanten Anteil an Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne*).

## 2.3 Wasserhaushaltskenngößen

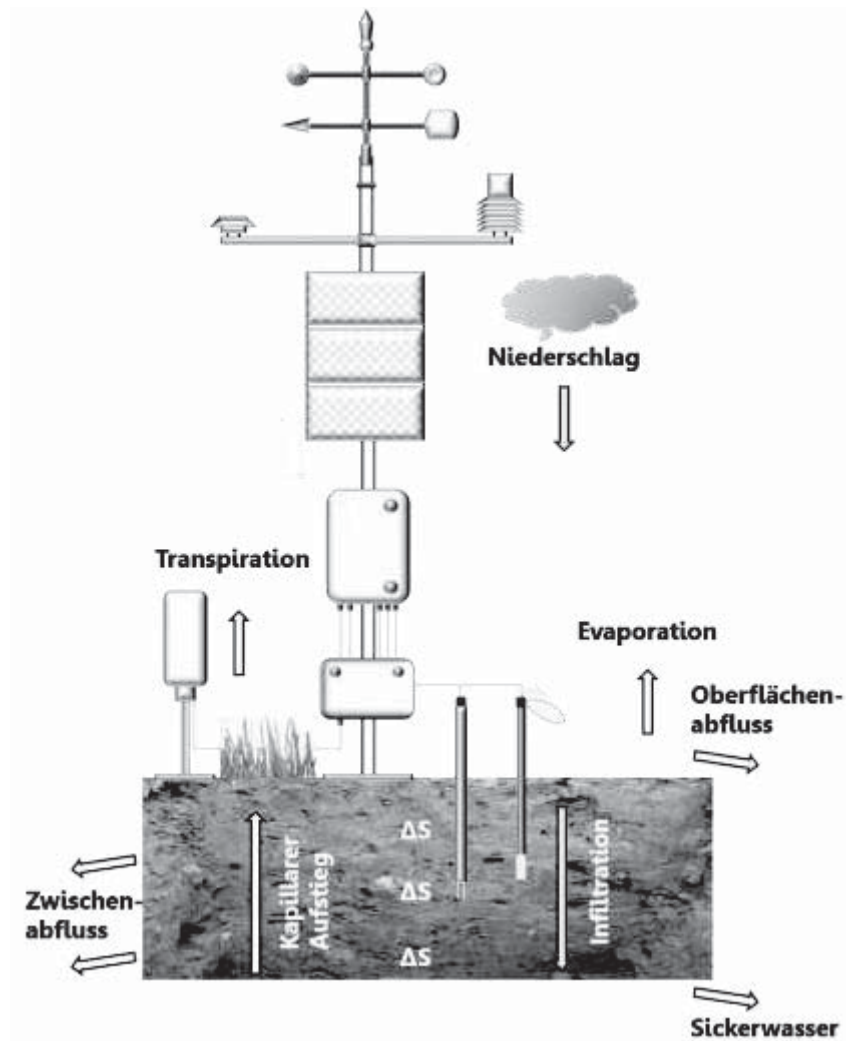
Als Untersuchungszeitraum dienen die hydrologischen Jahre von 2012 und 2013. Alle Daten werden stationsbezogen und auf Tagesbasis ermittelt sowie kontinuierlich mit Datenloggern aufgezeichnet.

Die Erhebung der meteorologischen Kenndaten (u. a. Niederschlag) erfolgt mit einer vor Ort installierten Wetterstation (Abb. 3). Der Niederschlagstyp (Regen oder Schnee) und die Lage der Wetterstation haben einen wesentlichen Einfluss auf die Messung des tatsächlichen Niederschlags. Aus diesem Grund wird ein Korrekturverfahren für die Niederschlagsmessung nach RICHTER (1995) durchgeführt.

Die Abflussdaten werden in sechs Teileinzugsgebieten durch eine Kombination aus durch Druckpegelsensoren gestützte V-Wehre und Kippzähler erfasst und ermöglichen eine Software-basierte Auswertung von Durchflussraten zwischen 0,04 und 315 dm<sup>3</sup>/s.

Zur Ermittlung der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration auf Tagesbasis wird die FAO-Penman-Montheith-Gleichung verwendet und unter Berücksichtigung des Bodenwasser- und Wärmehaushaltes das typische Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration in Schleswig-Holstein zu Grund gelegt (ALLEN ET AL., 1998; ATV-DVWK-M 504, 2002). Die Interzeption wird nach einem Regressionsansatz von HOYNINGEN-HUENE (1983) geschätzt und der Blattflächenindex für den Oberflächenbewuchs entsprach 5,0 im Frühling und Sommer sowie 3,0 im Herbst und Winter.

Die Veränderung des Bodenwasserhaushaltes wird mittels Tensiometern (Matrixpotenzial, hPa) und FDR-Sensoren (Wassergehalt) ganzjährig in 20, 50, 80 und 100 cm Tiefe an den repräsentativen Standorten Kuppe, Mittel- und Unterhang ermittelt (vgl. Abb. 3).



$$S_b = N - I - ET_a - A$$

Abbildung 3 Messtechnik für meteorologische und bodenhydrologische Parameter, Wasserhaushaltskenngrößen für die klimatische Sickerwasserbilanz,  $S_b$ : Sickerwasser,  $N$ : Freilandniederschlag,  $ET_a$ : aktuelle Evapotranspiration,  $A$ : Abfluss.

### 3 Ergebnisse

Aus den vorliegenden Messungen und Berechnungen zum Wasserhaushalt können wesentliche Aussagen über die Funktionsfähigkeit des Abdeckungssystems getroffen werden. Die durchschnittlichen jährlichen und zugleich korrigierten Niederschläge auf der Deponie Rastorf variieren im Bilanzzeitraum zwischen 754 und 751 mm. Die sogenannten Interzeptionsverluste des Grünlandes zeigen an, dass ca. 25 % der Niederschläge in 2012 und 2013 auf der Blattoberfläche zurückgehalten werden und verdunsteten.



Tabelle 1 Wasserhaushaltskenngößen der Deponie Rastorf in den hydrologischen Jahren 2012 und 2013, Tageswerte vom 01.11.2012 bis zum 31.10.2013.

Kenngößen der klimatischen Sickerwasserbilanz		2012	2013
		[mm]	
<b>N</b>	Freilandniederschlag	754	751
<b>I</b>	Interzeption	196	184
<b>Nn</b>	Bestandesniederschlag	558	567
<b>ETo</b>	Potenzielle Evapotranspiration	464	478
<b>ETa</b>	Aktuelle Evapotranspiration	189	201
<b>A</b>	Oberflächen- und Zwischenabfluss	277	293
<b>Sb</b>	Sickerwasser	<b>86</b>	<b>64</b>

Der Pflanzenbewuchs der Oberflächenabdeckung wurde so gewählt, dass neben dem Schutz vor Wind- und Wassererosion eine möglichst hohe reale Verdunstungsleistung von 189 mm in 2012 und 205 mm in 2013 erzielt werden konnte.

Der Oberflächen- und Zwischenabfluss ist mit einem Anteil von 35–40 % am korrigierten Freilandniederschlag als sehr hoch anzusehen (vgl. Tab. 1).

Die Speicheränderung im Boden ist ein Bestandteil der Wasserhaushaltsbilanz und ist in diesem langjährigen Betrachtungszeitraum vernachlässigbar.

Das Sickerwasseraufkommen in 2012 beträgt 8665 m<sup>3</sup> und verringert sich im hydrologischen Jahr 2013 auf 6423 m<sup>3</sup> und ist vorrangig von der Niederschlagsinfiltration von der Deponieoberfläche abhängig. Das entspricht einem Anteil an Sickerwasser von 11,4 bzw. 8,5 % am korrigierten Freilandniederschlag. Bei vergleichbaren Jahresniederschlägen reduziert sich der Sickerwasseranteil um ca. 20 % und ist auf einen erhöhten Abflussanteil sowie einer verbesserten Verdunstungsleistung der Vegetation zurückzuführen (vgl. Tab. 1).



## 4 Diskussion

Die ermittelten klimatischen Sickerwasserbilanzen in 2012 und 2013 erscheinen durchweg plausibel und es können Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Abdeckungssystems gezogen werden (vgl. HOEPFNER UND SCHNEIDER, 2006).

Die sorgfältig durchgeführten Messungen und Analysen sind mit Ungenauigkeiten behaftet und werden mit einem jährlichen Bilanzrest ( $N - A - V$ ) von 6 mm im hydrologischen Jahr 2012 und 9 mm in 2013 untermauert.

Der größere Differenzbeitrag in 2013 kann zumindest teilweise auf eine etwas größere positive Bodenspeicheränderung zurückgeführt werden. Ein Grund sind nachträgliche Sanierungsmaßnahmen in Form einer Komposteinführung in Teilbereichen der Kuppe, infolgedessen der feinstrukturierte Kompost über eine große Wasserspeicherkapazität als die eingesetzten lehmigen Sande verfügt (EGLOFFSTEIN ET AL., 2008, SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2010).

Die niederschlagsreichen Monate im Frühling und Herbst mit Starkregenereignissen von 30–40 mm/Tag im Mai und Juni eines jeden Jahres haben einen sehr hohen Anteil am Jahresniederschlag und dem damit verbundenen Sickerwasseraufkommen.

Aufgrund der klimatischen Begebenheiten in Deutschland ist während der Vegetationszeit im Sommer der Sickerwasseranfall extrem gering. Das gesamte Niederschlagswasser kann daher fast vollständig in Oberflächenabdeckungen von mindestens 1,0 m Mächtigkeit gespeichert werden und über Evapotranspiration verdunsten (HEERTEN, 2007).

Der Aufbau des Messsystems macht eine Differenzierung in Oberflächen- und Zwischenabfluss sehr schwierig und erfordert modellgestützte Analysen. In diesem Zusammenhang wird das infiltrierte Niederschlagswasser nachgewiesenermaßen auf der mineralischen Dichtschicht hangabwärts abgeführt. Insgesamt betrachtet sind die steilen Hanglagen des Mittel- und Unterhangs auf einer Teilfläche von ca. 4,5 ha der wesentliche Grund für den hohen Abflussanteil am Jahresniederschlag.

Im Vergleich zu Gräsern erzielen tiefer wurzelnde Gehölze sowie Laub- und Nadelbäume eine deutlich höhere Verdunstungsleistung, machen jedoch eine Oberflächenabdeckung von 2,5 bis 3,0 m Mächtigkeit erforderlich (SCHMEISKY UND HOFMANN, 2005). Demgegenüber sind in Rastorf regelmäßige Pflegemaßnahmen notwendig, um ein Aufkommen an krautigen Arten, Gehölzen oder Baumarten zu unterbinden, um die Wirkungsweise der mineralischen Dichtschicht aufrecht zu erhalten.



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In Anbetracht der jährlichen Sickerwasseraufkommen von 86 mm in 2012 und 64 mm in 2013 ist festzuhalten, dass keine erhebliche Durchsickerung der temporären Oberflächenabdeckung stattfindet.

Ein Mangel an Infiltrationswasser kann zum Erliegen der mikrobiologischen Abbauprozesse im Deponiekörper und damit zur unerwünschten „Trockenstabilisierung“ der organischen Inhaltsstoffe führen (PETERS, 2000). Zum jetzigen Zeitpunkt ist ein Erliegen des „Bioreaktors“ nicht zu erwarten und externe Bewässerungsmaßnahmen nicht erforderlich.

Am Beispiel der ehemaligen Siedlungsabfalldeponie in Rastorf wird gezeigt, wie eine zielgerichtete Überwachung von Deponien effektiv und qualitätsgesichert betrieben werden kann. Das Monitoringprogramm wird in Zukunft fortgesetzt und weiter optimiert, um alterungsbedingte Veränderungen der Oberflächenabdeckung im Vorfeld einer endgültigen Abdeckung zu ermitteln und mögliche Sanierungsmaßnahmen zeitnah durchführen zu können.

## 6 Literatur

- |   |      |  |
|---|------|--|
| Allen, G. A., Pereira, L., S.,<br>Raes, D., Smith, M. | 1998 | Crop Evapotranspiration – guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, S. 78-86.  |
| ATV-DVWK-M 504  | 2002 | Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. DWA, Hennef, Germany, 144 S.   |
| DepV  | 2009 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist.  |
| Egloffstein, T. H., Sturm, D.,<br>Bräckerlmann, H.    | 2008 | Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten. Bodenqualität, und –verfügbarkeit, unverdichteter Einbau, Erosions- und Setzungsverhalten, erste Langzeiterfahrungen, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 20 S. |



- Heerten, G. 2007 Zur Langzeitwirksamkeit von Komponenten für Deponieoberflächenabdeckungen. 18. Nürnberger Deponie-Seminar: Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien, Nürnberg, April 2007
- Heyer, K.-U., Hupe, K. & Stegmann, R. 2005 In situ Stabilisierung in der Stilllegungsphase zur Reduzierung der Deponienachsorge: Wasserinfiltration und Aerobisierung. High noon - Höchste Zeit zu handeln; Nur noch 1 Monat bis zur Deponiestilllegung. DAS IB, Kiel: 241-265.
- Hirschmann, G., Melchior, S., Bielfeld, H.-R. & Wienberg, R. 2003 Qualifizierte Abdeckung der ehemaligen Deponie Eckerkoppel. - in: Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. (Hrsg.): Revitalisierung von Verkehrsflächen: Element einer nachhaltigen Siedlungspolitik. ITVA-Symposium 08./09.05.2003 in Hamburg, S. 45-64.
- Hoepfner, U., Schneider, P. 2006 Langzeitmonitoring von Abdeckungen an Wismut-Sanierungsstandorten. - in: Schoenherr, J., Baumert, R. & Müller, M. (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau - Liberec 2006. Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Wissenschaftliche Berichte, Hochschule Zittau/Görlitz, Vol. 91: 113-122.
- Hoyningen-Huene, J. F. V. 1983 Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau 57: 1-53.
- Melchior, S. 2012 Wechselwirkungen zwischen mineralischen Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen. - in: Arbeitskreis Grundwasserschutz & Süddeutsches Kunststoffzentrum (Hrsg.): "Die sichere Deponie", Würzburg, 20 S.
- Peters, T. A. 2000 Kontrollierte Infiltration von Sickerwasserkonzentrat in den Deponiekörper. Beitrag zum Fachgespräch "Infiltration von Wasser in den Deponiekörper", Berlin, 7 S.
- Richter, D. 1995 Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur der systematischen Meßfehler des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 194, 93 S.



- Scheffer, F., Schachtschabel, P. 2010 Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin, 570 S.
- Schmeisky, H., Hofmann, H. 2005 Etablierung von Vegetationsbeständen auf Rekultivierungsschichten von Deponien. "Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschichten als mögliches Sicherungselement für Deponien", Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle, 12 S.

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

M.Sc. Steffen Beck-Broichsitter  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde  
Hermann-Rodewald-Str. 2  
D-24118 Kiel  
Telefon: +49 431 8801445  
Email: [s.beck-broichsitter@soils.uni-kiel.de](mailto:s.beck-broichsitter@soils.uni-kiel.de)  
Website: [www.soils.uni-kiel.de](http://www.soils.uni-kiel.de)

Dr. Heiner Fleige  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde  
Hermann-Rodewald-Str. 2  
D-24118 Kiel  
Telefon: +49 431 8801445  
Email: [h.fleige@soils.uni-kiel.de](mailto:h.fleige@soils.uni-kiel.de)  
Website: [www.soils.uni-kiel.de](http://www.soils.uni-kiel.de)

Prof. Dr. Dr. h.c. Rainer Horn  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde  
Hermann-Rodewald-Str. 2  
D-24118 Kiel  
Telefon: +49 431 8801445  
Email: [rhorn@soils.uni-kiel.de](mailto:rhorn@soils.uni-kiel.de)  
Website: [www.soils.uni-kiel.de](http://www.soils.uni-kiel.de)





# Oberflächenabdichtung der Deponie Braunschweig Watenbüttel mit einem Deponiekontrollsystem, 1. BA

Franziska Gromadecki

Stadt Braunschweig

## Inhaltsangabe

Im Oktober 2013 haben die Bauarbeiten für die dauerhafte Abdichtung auf den stillgelegten Schüttfeldern der früheren Braunschweiger Hausmülldeponie Watenbüttel begonnen. In insgesamt drei Bauabschnitten wird das rd. 26 ha große Areal abgedichtet und anschließend rekultiviert. Im ersten Bauabschnitt, der für den Zeitraum Herbst 2013 bis Sommer 2015 geplant ist, werden rd. 8 ha des ehemaligen Schüttfeld I abgedichtet. Es wird ein mehrschichtiges Dichtungssystem aufgebracht, das im Kern aus einer Kunststoffdichtung und einem Dichtungskontrollsystem besteht. Weiterhin gehören zum Dichtungssystem Trag- und Ausgleichsschichten, Dränschichten für Gas und Wasser, sowie eine Rekultivierungsschicht. Die Rekultivierungsschicht wird zur Einpassung in das Landschaftsbild sowie zum Erosionsschutz mit einer Begrünung und mit Pflanzinseln aus Gehölzen und Sträuchern hergestellt.

Aktuell haben seit dem vergangene Herbst schwere Baumaschinen mehr als 90.000 Kubikmeter Abfall umgelagert und so das Gelände mit flacheren Böschungen neu modelliert. Zusätzlich ist an der westlichen und nördlichen Flanke der Deponie eine rund 570 m lange Stützwand fertiggestellt worden, um die umzulagernde Abfallmenge auf ein Minimum zu reduzieren. Es wurden bereits große Mengen Material u. a. für die Ausgleichs- und Gasdränschichten bewegt und ein neues Pumpwerk gebaut. Besonders die mit Gasdrän- und Ausgleichsschicht bedeckten Bereiche sind dabei ins Auge gefallen, muteten sie doch auf den ersten Blick wie eine Mondlandschaft an. Auch die Installation des Dichtungskontrollsystems und der Kunststoffdichtungsbahn ist bereits weit fortgeschritten. Die Sensoren des Systems sind dabei in der Ausgleichsschicht positioniert. Die Spannungsgeber liegen oberhalb der Dränmatten. Das Kontrollsystem wurde jüngst einem ersten Test unterzogen, um die einwandfreie Funktion zu prüfen. Dazu wurden an drei Stellen kleine Testleckagen angebracht, die mit einer maximalen Abweichung von 2,5 Metern zu lokalisieren waren. Die beschädigten Stellen wurden sogar mit einer Abweichung von nur knapp über 1,3 Metern geortet. Der Abschluss des ersten Bauabschnittes ist für den Sommer 2015 geplant.

## Stichworte

Deponie, Oberflächenabdichtung, Deponiekontrollsystem

## 1 Ausgangssituation

### 1.1 Lage der Deponie Braunschweig Watenbüttel

Die Deponie Watenbüttel liegt nordwestlich der Stadt Braunschweig bzw. westlich des Stadtteils Watenbüttel. Im Norden und Westen grenzen die Flächen der städtischen





Rieselfelder an das Deponiegelände, im Osten die Abwasserbehandlungsanlage der Stadt Braunschweig. Ca. 500 m südliche der Deponie verläuft der Mittellandkanal.

Die als Haldendeponie angelegte Deponie verfügt über eine Gesamtgröße der Ablagerungsbereiche von ca. 37,7 ha. Die Ablagerungen wurden auf vier Schüttfeldern (SF), den SF I, II, IIa und III ausgeführt. Die nun abzudichtende Fläche von SF I, II und IIa hat eine Größe von insgesamt ca. 26 ha.



Abbildung 1 Luftbild der Lage der Deponie Braunschweig Watenbüttel

## 1.2 Deponiebetrieb

Von 1967 bis 1992 wurden die drei Schüttfelder SF I, II und SF IIa betrieben. Der dabei entstandene Abfallkörper besteht zum größten Teil aus Hausmüll und Siedlungsabfällen, zu Beginn wurden auf SF I auch Industrieabfälle abgelagert. In die beiden weiteren SF wurden auch Klärschlämme eingebracht.

Auf dem Schüttfeld III wurden von 1990 bis 1999 überwiegend vorbehandelte Abfälle und inerte Materialien wie Bauschutt, Bodenaushub oder asbesthaltige Abfälle abgelagert. Seit 2009 ist dieser Deponieabschnitt wieder in Betrieb, dort werden Bo-



denaushub und Straßenaufbruch mit gefährlichen Inhaltsstoffen aus dem Stadtgebiet Braunschweigs abgelagert.

### 1.3 Plangenehmigung

Im Oktober 2004 wurde die Stilllegung der Schüttfelder I, II, und IIa angezeigt und erstmals ein entsprechender Genehmigungsantrag eingereicht, ein Bescheid wurde im Februar 2006 erlassen. Ein dem mittlerweile geltenden Recht der neuen Deponieverordnung angepasstes Oberflächenabdichtungssystem wurde im Februar 2010 als Änderungsgenehmigung beantragt. Es wurde ausschließlich die Genehmigung der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung der bereits stillgelegten SF I, II und IIa beantragt.

Die Deponie Watenbüttel ist abfallrechtlich in die Deponieklasse DK II eingestuft, d. h. es ist ein Oberflächenabdichtungssystem mit zwei Abdichtungskomponenten vorzusehen. Der Verzicht einer zweiten Abdichtungskomponente ist zugelassen, wenn der Betreiber der Deponie nachweist, dass Maßnahmen zu einer beschleunigten Inertisierung des Abfallkörpers durchgeführt werden oder nachweislich bereits durchgeführt wurden.

Auf Basis eines im Vorlauf zum Genehmigungsantrag erstellten Variantenvergleichs wurde als Oberflächenabdichtung eine Kunststoffdichtungsbahn mit Dichtungskontrollsystem als Vorzugsvariante ausgewählt.

Die Plangenehmigung wurde mit Datum vom 14.11 2012 erteilt.

### 1.4 Bauabschnitte

Die Realisierung der Oberflächenabdichtung auf den Schüttfelder I, II und IIa erfolgt in drei Bauabschnitten zu je ca. 6-9 ha.

Der erste Bauabschnitt erstreckt sich auf einen ca. 8 ha großen Teilbereich von SF I. Neben den Abfallumlagerungen und den Arbeiten zum Bau des Oberflächenabdichtungssystems ist eine Stützwand entlang der Nord- und Westseite vorzusehen. Weiterhin ist insbesondere das Sickerwasserfassungssystem von SF 1 durch den Neubau eines Sickerwasserpumpwerkes sowie der entsprechenden Sickerwasserdruckleitung zu optimieren. 15 der vorhandenen vertikalen Gasbrunnen sind zu ertüchtigen sowie eine Horizontalentgasung zu errichten. Die insgesamt 16 Brunnen sind in das Oberflächenabdichtungssystem zu integrieren.

Die Arbeiten im Rahmen des ersten Bauabschnitts haben im Oktober 2013 begonnen und werden voraussichtlich bis Sommer 2015 andauern. Die Arbeiten für den zweiten und dritten Bauabschnitt schließen sich an, es ist geplant diese in 2018 abzuschließen.



Abbildung 2 Aufteilung der Bauabschnitte

## 2 Sicherungskonzept

### 2.1 Winkelstützwand

Der westliche und nördliche Böschungsbereich weist z. T. sehr steile Abfallschüttungen auf. Aufgrund der vorhandenen Platzverhältnisse und um den Eingriff in den Abfallkörper so gering wie möglich zu halten ist dort die Ausführung eines Stützbauwerkes auf einer Gesamtlänge von 570 m geplant. Dabei entstehen 4.300 m<sup>2</sup> Winkelstützwand in Stahlbetonbauweise mit einer sichtbaren Höhe des Bauwerkes von 3,70 m. Dadurch können Umlagerungsprozesse bei der Böschungsprofilierung reduziert werden.

### 2.2 Oberflächenabdichtungssystem

Das Oberflächenabdichtungssystem, welches auf den Schüttfeldern I, II und IIa aufgebracht werden soll, weist nachfolgenden Aufbau auf (von oben nach unten)

- 20 cm humushaltiger Oberboden
- 80 cm Unterboden
- Dränmatte mit BAM-Zulassung
- 2,5 mm Kunststoffdichtungsbahn mit BAM-Zulassung

- Dichtungskontrollsystem mit BAM-Zulassung
- 30 cm Gas- und Ausgleichsschicht
- Trenn-/ Filtervlies nach Erfordernis

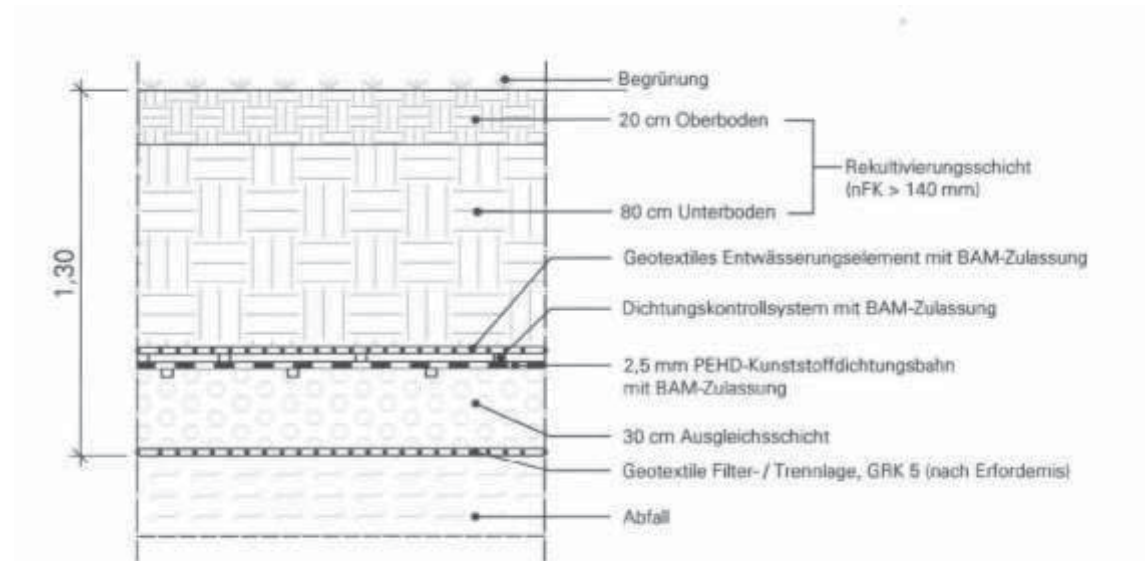


Abbildung 3 Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems

Bei den SF II und II a wird zur Beschleunigung der noch aktiven biologischen Abbauprozesse und somit zur Verbesserung des Langzeitverhaltens ein Befeuchtungssystem eingebaut. Bei dem SF I sind die Abbauprozesse bereits abgeklungen, es wird als inert angesehen und wird nicht befeuchtet.

Als Abdichtungskomponente des Oberflächenabdichtungssystems werden nach Herstellung der Ausgleichs- und Gasdrännschicht die Elektroden des Dichtungskontrollsystems verlegt. Die Sensoren des Systems sind dabei in der Ausgleichsschicht positioniert. Die Spannungsgeber liegen oberhalb der Dränmatten. Auf die verlegten Sensoren wird eine BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aus Polymeren hoher Dichte (PEHD) mit einer Dicke von 2,5 mm verlegt und verschweißt.

Darauf werden Kunststoff-Dränelemente aufgebracht, die ebenso wie die Kunststoffdichtungsbahn einen gültigen Zulassungsbescheid für den Einsatz in endgültigen Deponieabdichtungssystemen der BAM vorweisen müssen. Die Hydraulische Leistungsfähigkeit der Dränmatte musste gemäß Plangenehmigung nachgewiesen werden, die anzusetzende Dränspende konnte durch einen projektspezifischen Nachweis ermittelt werden. Der Nachweis wurde mit der Aufsichtsbehörde abgestimmt und dem Ergebnis letztlich von dort zugestimmt.





Zum Schutz der Dichtung ist eine mindestens 1,0 m mächtige Rekultivierungsschicht herzustellen. Diese ist aufgeteilt in 0,80 m Unterboden und 0,20 m humosen Oberboden.

### **2.3 Instandsetzung der Deponiegas- und Sickerwasserfassung**

Auf dem Deponieplanum war eine Ausgleichs- und Gasdränschicht mechanisch und chemisch stabil herzustellen. Sie soll also befahrbar und witterungsstabil sein. Die Schicht hat gemäß Ausschreibung eine Mindestdicke von  $30 \pm 2$  cm. Die Oberkante der Gasausgleichsschicht muss den Vorgaben der BAM-Zulassung für die KDB entsprechen.

Zusätzlich müssen 15 der vorhandenen vertikalen Gasbrunnen ertüchtigt werden und es ist eine Horizontalentgasung zu errichten. Das gesamte System muss in das Oberflächenabdichtungssystem integriert werden. Insbesondere müssen der Anschluss der Gasbrunnenköpfe und die Einbindung in die Kunststoffdichtungsbahn erfolgen.

Weiterhin wird durch den Neubau eines Sickerwasserpumpwerkes sowie der entsprechenden Sickerwasserdruckleitung das Sickerwasserfassungssystem von SF I optimiert. Die in den Schacht einmündenden Rohrabschnitte wurden so ausgeführt, dass eine Wartung und Inspektion des Sickerwassersystems mittels Kamerabefahrung möglich ist. Das anfallende Sickerwasser wird mittels Tauchpumpe zum Vorlageschacht des vorhandenen Pumpwerkes 2 gefördert.

### **2.4 Oberflächenwasser, Begrünung**

Niederschläge, welche auf die Oberflächenabdichtung der Schüttfelder I, II und IIa treffen, werden getrennt nach Oberflächenwasser und Dränwasser gefasst und zu verschiedenen am Deponiefuß angeordneten Sammelpunkten geleitet. Das System zur Fassung, Ableitung und Einleitung von nicht verunreinigtem Oberflächenwasser erfolgt grundsätzlich in freier Vorflut.

Zur Fassung des Oberflächenwassers werden Entwässerungsmulden mit einem Längsgefälle von 1,0 % in die Rekultivierungsschicht profiliert. Zur Fassung des im Kunststoff-Dränelement flächenhaft gefassten Dränagewassers werden entlang der Tieflinien (Deponiefuß) sowie entlang des Übergangs von Plateau zu Böschung Dränmulden angelegt.

Von diesen Sammelpunkten aus erfolgt jeweils eine gemeinsame Einleitung des Drän- und Oberflächenwassers in das umgebende Grabensystem, über das letztendlich eine Einleitung in den nordwestlich der Deponie Watenbüttel verlaufenden Aue-Oker-Kanal erfolgt.



Die hergestellte Rekultivierungsschicht wird zur Einpassung in das Landschaftsbild sowie zum Erosionsschutz mit einer Begrünung in Form einer Rasenansaat versehen. Zusätzlich sind im Zuge der gesamten Rekultivierungsmaßnahme 25 Pflanzinseln mit Gehölzen und Sträuchern herzustellen. Zur Begrünung der Winkelstützwand werden Efeu, Wilder Wein sowie Waldrebe und Waldgeißblatt eingesetzt werden.

Um die Erreichbarkeit der technischen Einrichtungen zu Wartungszwecken zu gewährleisten, werden Betriebswege hergestellt, wobei zwischen äußerem Betriebsweg und innerem Betriebsweg zu unterscheiden ist. Der äußere Betriebsweg ist in seiner Wegführung bereits vorhanden und nach Abschluss der Baumaßnahmen in Stand zu setzen. Der innere Betriebsweg wird auf dem Dichtungssystem als aufgesetzte Berme aufgebaut.

## **3 Sanierungsablauf**

### **3.1 Baustelleneinrichtung, Baustraßen**

Auf der südlichen Deponieseite im Bereich der ehemaligen Deponiezufahrt liegt die für die Baustelleneinrichtung vorgesehene Fläche. Ferner hat der Auftraggeber einen Containerverbund aus einem Doppel-Container und zwei Einzel-Containern zur Einrichtung eines Besprechungsraumes und des Büros der Bauleitung und der Bauüberwachung zur Verfügung gestellt. Die in diesem Bereich noch befindlichen Altanlagen sind noch rückzubauen und zu entsorgen.

Nach Herstellung des Strom- und Wasseranschlusses hat der Auftragnehmer die Baustelleneinrichtung so errichtet, dass während der Arbeitswoche die Arbeiter dort untergebracht sind. Dabei sind die erforderlichen Anforderungen v. a. hinsichtlich der einzuhaltenden Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt worden.

Für die interne Erschließung des Baufeldes, insbesondere für die Materialanlieferung zu den zu profilierenden und abzudichtenden Flächen hat der Auftragnehmer Betriebswege im Einbahnstraßensystem geregelt und die Wege laufend durch den verdichteten Einbau von Mineralgemisch ertüchtigt. Maßnahmen zur Staubminderung waren vorzuhalten.

### **3.2 Baufeldvorbereitung**

Bevor mit den eigentlichen Arbeiten für den Aufbau des Dichtungssystems begonnen werden konnte, war das Baufeld von dem umfangreichen Bewuchs zu befreien. Dabei handelte es sich sowohl um Bereiche mit Waldbestand (Ahorn, Weide, Birke, Rubinie, Fichte) in denen Fäll- und Wurzelrodungsarbeiten erforderlich waren, als auch um



Grünflächen, die zu mähen waren. Die Fällarbeiten sind in der Vegetations- und Brutpause durchgeführt worden.

Die Deponie war zur temporären Sicherung mit einer Kunststoffdichtungsbahn und Bodenmaterial abgedeckt. Die Kunststoffdichtungsbahn wurde zurückgebaut, das aufgebrauchte Bodenmaterial aufgenommen und gesondert gelagert. Dieses kann gemäß Prüfungsergebnis später für den Aufbau der Rekultivierungsschicht genutzt werden.

Zur Baufeldvorbereitung gehörte auch der Rückbau von Gasbrunnen, Schächten und Pumpwerken jeweils bis zu einer Tiefe von 2 m unterhalb der Unterkante der geplanten Ausgleichsschicht.

### **3.3 Abfallprofilierung, Winkelstützwand**

Vorlaufend zur Aufbringung des geplanten Oberflächenabdichtungssystems werden die Schüttfelder I, II und IIa durch Umlagerung von Abfällen profiliert. Als Profilierungsrandbedingung wurde ein Mindestgefälle für Plateaubereiche von 7,0 % (vor Setzung) und eine maximale Neigung für Böschungsbereiche von 1 : 3 zu Grunde gelegt.

Das aufgenommene Material war soweit erforderlich auf Kantenlängen von max. 500 mm zu brechen. Prinzipiell war in den Ablagerungsbereichen davon auszugehen, dass auf schadstoffhaltige Abfälle gestoßen wird. Erfreulicherweise ist dies nicht der Fall gewesen, so dass hier keine besonderen Maßnahmen erforderlich geworden sind. Während der Profilierungsarbeiten wurden Emissionsmessungen gemäß Arbeits- und Sicherheitsplan durchgeführt. Zu keinem Zeitpunkt wurden messbare Emissionen festgestellt.

Zur Minimierung von Abfallabtragsmengen ist entlang der West- sowie Nordseite eine Winkelstützwand erstellt worden. Durch eine Vereinfachung bei der Umsetzung der Schalungsarbeiten konnten dabei zeitliche und finanzielle Vorteile erzielt werden. Die Arbeiten erfolgten im Pilgerschrittverfahren.

### **3.4 Probefeld**

Vor Baubeginn der Oberflächenabdichtung wurde ein ca. 500 m<sup>2</sup> großes Probefeld im süd-westlichen Böschungsbereich des 1. BA angelegt. Damit war die Herstellbarkeit des Oberflächenabdichtungssystems nachzuweisen und der jeweilige Herstellungsvorgang sowie der Geräteeinsatz im Einzelnen festzulegen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu dem Versuchsfeld dienen als Grundlage zur Festlegung der Einbau- und Abnahmekriterien für die Abdichtung (Einbauanweisung) und sind in den Qualitätsmanagementplan eingeflossen. Insbesondere der Nachweis der nutzbaren Feldkapazität für die Rekultivierungsschicht hat hier dazu geführt, dass





die Art des Einbaus des zur Verfügung stehenden Oberbodenmaterials mehrfach angepasst werden musste.

## **4 Qualitätssicherung**

### **4.1 Örtliche Bauüberwachung**

Die Baumaßnahme wird durch ein Ingenieurbüro fachtechnisch begleitet. Das Ingenieurbüro erbringt dabei insbesondere die Leistung der örtlichen Bauüberwachung, des Koordinators und des Sicherheitskoordinators.

### **4.2 Eigen- und Fremdüberwachung**

Zur Qualitätssicherung während der Bauausführung und zur Gewährleistung einer langfristigen Funktionsfähigkeit sind baubegleitende Prüfungen durch die Eigenüberwachung des Baubetriebes sowie durch eine hiervon unabhängig beauftragte Fremdprüfung durchzuführen.

Die Prüfungen werden nach Eignungsprüfungen, Eigenüberwachungsprüfungen und Kontrollprüfungen unterschieden. Die Fremdüberwachung ist für die Durchführung der Kontrollprüfungen während des Einbaus der Materialien zuständig und soll neben den eigenen Untersuchungen die Ergebnisse der Eignungsprüfungen und Eigenüberwachung, welche die ausführende Firma selbst durchführt, bewerten.

Maßnahmen der Fremdüberwachung werden durch eine unabhängige Prüfinstitution wahrgenommen. Maßnahmen der Eigenüberwachung werden durch den AN durchgeführt und der Fremdüberwachung zur Prüfung überlassen.

Die Fremdüberwachung spricht gegenüber dem Gewerbeaufsichtsamt eine Freigabeempfehlung z. B. zu den einzubauenden Materialien aus. Das GAA folgt den Empfehlungen in den meisten Fällen und erteilt die Freigabe.

### **4.3 QMP**

Im Rahmen der vorbereitenden Planungsarbeiten wurde ein Qualitätsmanagementplan (QMP) zur Überwachung der Sicherungsarbeiten einschließlich Festlegung von Kennwerten für die mineralischen und die kunststofftechnischen Komponenten der Oberflächenabdichtung erstellt. Die darin aufgeführten Prüfungen und Kontrollen sollen gewährleisten, dass die mit der Planung beabsichtigte Wirkung und Funktionalität des Abdichtungssystems realisiert wird.



Der QMP besteht aus den Teilbereichen mineralische und kunststofftechnische Komponenten und regelt grundsätzlich die Verantwortlichkeiten, Aufgaben und das Zusammenwirken der beteiligten Kontrollinstitutionen auf Basis des aktuellen technischen Standards. Es sind darin die Anforderungen an die zu verwendenden Materialien und die dazugehörigen Eignungsprüfungen einschließlich der Prüfberichte (Gas- und Ausgleichsschicht, Kunststoffdichtungsbahn, Dichtungskontrollsystem, Kunststoff-Dränelement, mineralische Dränschicht, Rekultivierungsschicht) ebenso beschrieben, wie die Anforderungen an die Erstellung und Bewertung des Versuchsfeldes.

Für die Zeit während und nach der Herstellung der Dichtungsbauwerke sind die Maßnahmen zur Qualitätsüberwachung und –prüfung einschließlich der Erstellung der Prüfberichte und Freigaben formuliert. Im QMP stehen Reparaturanweisungen und die Maßnahmen zur behördlichen Abnahme einschließlich der Erstellung der Abnahmedokumentation.

Der Qualitätsmanagementplan wird in Abhängigkeit der aktuellen Ergebnisse der fortlaufenden Prüfungen fortgeschrieben.

## **5 Fortschritt der Arbeiten**

### **5.1 Baubesprechungen**

Die erste Baubesprechung fand am 14. Oktober 2013 statt. Darauffolgend findet alle 14 Tage eine Baubesprechung vor Ort unter Beteiligung der Aufsichtsbehörde, der Fremdprüfer, des mit der Bauüberwachung beauftragten Ingenieurbüros, des Deponiebetreibers, des Auftraggebers und je nach Bedarf mit den Eigenprüfern der Baufirma oder auch dem planenden Ingenieurbüro statt. Im Allgemeinen erfolgt im Anschluss an die jeweilige Besprechung eine Baustellenbegehung. Bisher konnte in den meisten Fällen durch die umfangreiche Beteiligung in den Besprechungen eine schnelle und einvernehmliche Lösung zu aufgetretenen Fragestellungen erwirkt werden.

### **5.2 Nachweise**

Alle eingebauten Materialien werden den rechtlich vorgegebenen Untersuchungen unterzogen und auf Empfehlung der Fremdprüfer vom Gewerbeaufsichtsamt freigegeben. Bisher konnten alle von der Baufirma akquirierten Materialien Verwendung finden.

Das Verlegen und Verschweißen der Kunststoffdichtungsbahn wird ebenfalls von den Fremdprüfern gemäß den gesetzlichen Vorgaben begleitet. Auffälligkeiten hat es bisher nicht gegeben.



Das Kontrollsystem wurde einem ersten Test unterzogen, um die einwandfreie Funktion zu prüfen. Dazu wurden an drei Stellen kleine Testleckagen angebracht, die mit einer maximalen Abweichung von 2,5 Metern zu lokalisieren waren. Die beschädigten Stellen wurden sogar mit einer Abweichung von nur knapp über 1,3 Metern geortet.

Grundsätzlich sind auch die Ergebnisse des Probefeldes positiv zu bewerten. Hier ist ein gewisser Engpass zu Tage getreten, da der Nachweis der nutzbaren Feldkapazität analysebedingt einen längeren Zeitraum beansprucht und sich deswegen bei Nachbesserungen das Vorliegen der Ergebnisse erheblich verzögern kann.

### 5.3 Detailanpassungen

Im Zuge der Baubesprechungen wurden von der Baufirma viele Details mit einem Lösungsvorschlag eingebracht. Ursächlich war dabei häufig die aktuell im Baugeschehen deutlich gewordene Ist-Situation. So mussten die Durchmesser der Gasleitungen in den Gasbrunnen z. T. angepasst werden, bisher unbekannte Leitungen identifiziert und gesichert werden oder es wurde die Anbindung der KDB an die Winkelstützmauer in Abstimmung mit dem Planer verändert. Das Sickerwasserpumpwerk war zunächst als rundes Stahlbetonbauwerk geplant, ist dann aber auch in PEHD zur Ausführung gekommen. Weiterhin wurden einige in der Baubeschreibung nicht im Detail getroffenen Vorgaben, wie z. B. die Farbgebung der Gassammelstation, konkretisiert.

### 5.4 Aktueller Stand der Arbeiten

Die Abfallprofilierung sowie der Bau der Winkelstützwand sind mittlerweile genauso zu 100 % umgesetzt, wie natürlich sämtliche Geländefreimachungen und Rückbauarbeiten und die Einrichtung von Baustelle und Baustraßen. Zu rund 50% ist das Dichtungssystem bereits bis auf den Oberboden vollständig aufgebaut. Damit sind die nördliche und westliche Böschung des ersten Bauabschnittes quasi abgedeckt. Im Plateaubereich ist schon weitestgehend die Ausgleichs- und Gasdränschicht eingebaut worden. Die weiteren Dichtungskomponenten werden ab nächstem Frühjahr eingebaut.

Das neu zu errichtende Pumpwerk ist bis auf die endgültige Einbindung in das Sickerwassernetz fertig gestellt, die weiteren Wartungs- und Kontrollschächte sowie die Ableitung des Oberflächenwassers und die Entgasungsarbeiten sind rund zur Hälfte fertig.

Von Anfang Dezember bis voraussichtlich März des Folgejahres wird sich die Winterpause erstrecken. Für diese Zeit hat die Baufirma ein Wintersicherungskonzept vorgelegt, mit dem die bisherigen Maßnahmen gegen die Witterungseinflüsse gesichert werden. Ein wesentlicher Punkt ist dabei das Durchreißen der oberen Schicht des Unterbodens, um Erosion infolge von Niederschlagsereignissen zu verhindern. Weiterhin wird die Baufirma in regelmäßigen Abständen die Baustelle inspizieren. Vor Ort ist der für



die Deponiebewirtschaftung zuständige Dritte, der ggf. auch ganz kurzfristig reagieren kann.

### **Anschrift der Verfasserin**

Dr.-Ing. Franziska Gromadecki  
Stadt Braunschweig, Tiefbau und Verkehr,  
Stadtentwässerung und Abfallwirtschaft  
Bohlweg 30  
D-38100 Braunschweig  
Telefon +49 531 470 2697  
Email [franziska.gromadecki@braunschweig.de](mailto:franziska.gromadecki@braunschweig.de)  
Website: [www.braunschweig.de](http://www.braunschweig.de)



# Abdichtung einer Altablagerung und Überbauung als Parkfläche mit Einsatz von Stahlwerkschlacken

Wolfgang Oltmanns<sup>1)</sup> / Michael Bergmann<sup>2)</sup>

PROF. RODATZ UND PARTNER, Braunschweig<sup>1)</sup>

DR. RIETZLER & HEIDRICH, Nürnberg<sup>2)</sup>

## Inhaltsangabe

Auf einer heterogenen gering tragfähigen Altablagerung (Haldenvolumen  $\approx 1,7$  Mio. m<sup>3</sup>) konnte mit dem Einsatz von Stahlwerkschlacken (LDS) für Gasflächenfilter, Barrieren und Tragschichten sowie mit Geokunststoffen eine robuste Oberflächenabdichtung und eine rd. 5 ha große Verkehrsfläche realisiert werden. Die Morphologie und gebotene Eingriffsminimierung erforderten für die Oberflächenwasserab- und Deponiegasausleitung ein anspruchsvolles geneigtes Faltwerk als Oberfläche und eine Kanalisation als Grundleitung. Die Erkundung der Deponate mit Drucksondierungen resp. die Dimensionierung des Oberflächenabdeckungssystems wurde im Sinne der Beobachtungsmethode nach DIN 1054 durch geotechnische und geodätische Messungen evaluiert. Die weiteren Messungen und regelmäßige organoleptische Kontrollen bestätigten die Realisierung der im Sanierungsplan nach BBSchG deklarierten Ziele.

## Stichworte

Stahlwerkschlacken (LDS), LDS-Deponiegasflächenfilter, LDS-Deponietragschicht, Deponatsondierungen (CPT), Beobachtungsmethode (DIN 1054), Liniensetzungsmessungen (Inklinometer), Last-Zeit-Setzungsprognose, Sanierungsplan (BBSchG)

## 1 Projektskizze

### 1.1 Historie; Ökochemischer Charakter der Altablagerung

Eine 9 ha große Senke mit nahezu gleichem Gelände- und Grundwasserspiegelniveau wurde ab 1965 mit Bauschutt und ab 1972 mit Holz, Papier, Kunststoffen, Kehrricht, Böden und Bauschutt sowie Gießereisanden und Sedimenten aus Absetzbecken aufgefüllt. Im Untergrund stehen wasserdurchlässige überwiegend mitteldicht bis dicht gelagerte Sande und partiell Torfe zwischen locker gelagerten Sanden und organischem Schluff an. Über die Zeit wuchs der Ablagerungsbereich auf 15 ha mit einem Volumen von 1,7 Mio. m<sup>3</sup> randlich bis 12 m und mittig 2 - 8 m über Gelände. Die Morphologie war gekennzeichnet durch eine hufeisenförmige Aufwallung außen, einer geneigten Ebene in der unteren und einer Mulde in der oberen Hälfte des Hufeisens.

Mitte der 80iger Jahre wurde in dem dann insgesamt über 25 ha großen Areal die Rekulтивierung begonnen. Sickerwässer aus der Mulde wurden mit Dränagen gefasst und verrohrt in eine Teichanlage auf dem Gelände geleitet.



Übrige Wässer wurden nicht gefasst. Durch die Oberbodenabdeckung und Vegetation versickerten etwa ein Drittel der Niederschläge, also etwa 40.000 m<sup>3</sup>/a.

Seit 1974 wird die hydrogeologische Situation mittels Grundwasser-Monitoring überwacht. In 2001/2 wurden zudem Deponat-, Boden- und Grundwasserproben sowie die Boden- und Umgebungsluft mit Blick auf einen eventuellen Rückbau der Halde analysiert. Der Rückbau wurde dann jedoch aus wirtschaftlichen Gründen verworfen.

Die Auswertungen der Boden- und Umgebungsluftanalysen zeigten i.Ü. keine ökologische Gefährdung - auch Schäden an Flora oder Fauna waren nicht feststellbar. Besondere über die üblichen bei Arbeiten auf Deponien hinausgehenden Maßnahmen des Arbeitsschutzes waren nicht absehbar. Allerdings wurden oft - auch abhängig von klimatischen Bedingungen - diffus über die Oberfläche verteilt (sehr) schwache Methan-gasemissionen, insbesondere in offenen Aufschlüssen, festgestellt.

Bei diversen Gefährdungsabschätzungen waren signifikante, aber - für eine Deponie - vergleichsweise geringe Kontaminationen des Grundwassers diagnostiziert worden. Unbeschadet dessen war gutachterlich eine Deponieoberflächenabdichtung zur Diskussion gestellt, aber seinerzeit nicht weiter konkretisiert und nicht realisiert worden.

Das Areal ist formal eine stillgelegte Abfallentsorgungsanlage resp. nach § 31 Abs. 1 Nr. 1 NAbfG (Niedersächsisches Abfallgesetz) als Altablagerung deklariert.

## **1.2 Deponiebau- bzw. geotechnischer Charakter der Altablagerung**

Nach Archivrecherchen konnten in der Halde hinsichtlich der Festigkeit/Steifigkeit der Ablagerungen mehrheitlich Bauschutt umlaufend in der Aufwallung und unter einer Umfahrt auf der Hochfläche, weiche feinkörnige Sedimente in der Mulde und in/unter der Restfläche sowie unterhalb vorbeschriebener Partien heterogene Gemenge aus allen genannten Deponaten erwartet werden. Konkrete Ausdehnungen dieser Partien, deren Homogenität oder Heterogenität und insb. technische Parameter waren unbekannt.

Signifikante Differenzsetzungen oder Sackungen traten über Jahre nach der Rekultivierung nicht auf. Messtechnisch waren Deformationen deshalb nicht kontrolliert worden.

Bei der Kampagne in 2001/2 wurden - mit Blick auf den damals angedachten Rückbau - u. a. 30 Bohrungen abgeteuft. Das Bohrgut wurde organoleptisch angesprochen; repräsentative Proben wurden chemisch analysiert. Mit dieser Kampagne konnten die Basis und recherchiertes Haldeninventar bestätigt und dafür Größenordnungen der Massenanteile ermittelt sowie Kosten der Umlagerung/Entsorgung kalkuliert werden.





Das Gros der Deponate wurde, hilfsweise geotechnisch, als gemischtkörnig bindig (für den mineralischen Anteil) mit deutlichen Anteilen von Kunststofffasern/-folien, Pappen etc. und wenigen Anteilen von Bauschutt und Metallen angesprochen. Quantifiziert wurde lediglich die Sensitivität des Gemenges bzgl. der Festigkeit bei Wassergehaltsänderungen: Natürlich 'erdfeuchtes' Gemenge hatte Festigkeiten  $\tau_{FS} > 25 \text{ kN/m}^2$ , war also umlagerungsfähig und mit Erdbaugeräten befahrbar, aber bereits mit gering zunehmenden Wassergehalten sank die Festigkeit  $\tau_{FS} \ll 25 \text{ kN/m}^2$ ; in Folge dessen müssen Vernässungen dieser Deponate bei Bearbeitungen strikt vermieden werden.

Bei parallel zu den Bohrungen realisierten Rammsondierungen (DPH) wurden generell minimale Sondierwiderstände und zahlreiche Sondierhindernisse festgestellt. Die für eine konventionelle Deponieoberflächenabdichtung oder Verkehrsfläche erforderliche Stabilität resp. Tragfähigkeit der Halde konnte jedenfalls nicht festgestellt werden.

Mit einem Proctorversuch wurde nach erdbaulichen Kriterien die Unverdichtbarkeit dieser Deponate mit konventionellen Erdbaumethoden verdeutlicht. Eine tieferreichende 'Dynamische Intensivverdichtung' zwecks Ertüchtigung der Tragfähigkeit kam übrigens wegen der Anrainer und besorgter Mobilisierung von Deponieinventar nicht in Frage.

## 2 Projektziele

Das Areal der Altablagerung liegt in einer sehr attraktiven Verkehrslage und sollte deshalb als Parkplatz für etwa 4.000 Fahrzeuge nutzbar gemacht werden.

In Kombination damit sollten, entsprechend den gutachterlichen Empfehlungen, Niederschlagsimmissionen resp. Grundwasserkontaminationen sowie Gasemissionen durch eine Oberflächenabdichtung der Halde reduziert werden.

Das Oberflächenabdichtungssystem mit Verkehrsfläche sollte uneingeschränkt als Parkplatz nutzbar, langfristig betriebssicher, wartungsarm und kontrollierbar sein.

Zudem sollte das System einschl. Verkehrsfläche bautechnisch und terminlich robust herstellbar und baubetrieblich vertragsfest definierbar resp. kalkulierbar sein.

Insbesondere war der Arbeitsschutz der Baubeteiligten und Anrainer zu gewährleisten.

Die Beräumung des Areals durch Umlagerung der Halde in eine Deponie kam nach 2005 wegen der dafür unzulässig hohen organischen Bestandteile nicht mehr in Frage. Die Halde musste deshalb überbaut werden. Angedachte aufgeständerte hochbauliche Nachnutzungen, bspw. Parkdecks, über der Altablagerung wurden nicht weiter verfolgt.

Die Projektbeteiligten, d. h. die Bauherrschaft, Genehmigungs- und Fachbehörden sowie Planer, sollten gemeinsam die fachgutachtlich skizzierte Strategie zur Erreichung der vorbeschriebenen Ziele zur Genehmigungs- und Ausführungsplanung entwickeln.





Die Darstellung dieser Planungen zusammen mit der Ausgangslage, die Kontrollen zur Überprüfung der sachgerechten Ausführung und Wirksamkeit der Maßnahmen sowie die Kosten und Ausführungszeiten sollten in einem Sanierungsplan, der vollinhaltlich den Maßgaben des BBodSchG genügt, behandelt werden.

Dieser Sanierungsplan - als verlässliche Handlungsgrundlage für alle Beteiligten - wurde schließlich, mit Auflagen, behördlich für verbindlich erklärt.

### 3 Deponiebau- bzw. geotechnische Erkundung

Als notwendige Planungsgrundlage mit Blick auf die Gebrauchstauglichkeit, d. h. maximal zulässige Deformationen und homogene Last-Zeit-Setzungen wurden für die Bewertung der Steifigkeit und Festigkeit der Deponate und Erkundung horizontaler und vertikaler Ausdehnungen mindestens näherungsweise homogener Bereiche Drucksondierungen CPT gem. DIN EN ISO 22476-1 im 70 m - Raster bis über die Basis der Deponate realisiert. Die Drucksondierungen unter Bohraufsicht nach BGR 128 - Regularien wurden u. a. gewählt, weil nach Erfahrungen auf anderen kontaminierten Standorten die Gefährdung der Arbeitssicherheit minimiert, das Umsetzen bei Hindernissen wenig aufwendig und das Verschließen der Sondierung bzw. der Ausbau gut möglich ist. Diese Erfahrungen wurden auf der gegenständlichen Altablagung bestätigt.

Das Liegende konnte nach früheren Aufschlüssen als tragfähig für die Altablagung mit Oberflächenabdichtung und Verkehrsfläche klassiert werden. Nicht überplante Außenböschungen mussten nicht nachgewiesen resp. untersucht werden.

Drucksondierungen sind indirekte geotechnische Aufschlüsse, bei denen eine Sondenspitze mit einem Gestänge kontinuierlich in den Boden gedrückt wird. Gemessen werden u. a. der Spitzenwiderstand  $q_c$  am Kegel der Spitze und die lokale Mantelreibung  $\tau_m$  an einer Reibungshülse am Schaft der Messspitze. Als Bodenindex wird das Reibungsverhältnis  $r_f$  als Quotient aus lokaler Mantelreibung  $\tau_m$  und Spitzenwiderstand  $q_c$  berechnet. Durch Theorie, Erfahrung und Korrelation mit direkten Aufschlüssen werden aus diesen Sondierergebnissen fachgutachterlich geotechnische Parameter abgeleitet für Bodenschichten und bspw. Lagerungsdichten bei nichtbindigen bzw. Konsistenzen bei bindigen Böden und deren Festigkeiten und Steifigkeiten.

Erfahrungen zum Einsatz von Drucksondierungen und validierte Korrelationen für Klärschlämme und industrielle Schlämme lagen hier aus verschiedenen Projekten vor. Für die vorbeschriebenen Gemenge aber mussten die Ergebnisse nach ingenieurtechn. Verständnis interpretiert und konnten nicht bspw. an Laborversuchen kalibriert werden. Diesem Umstand war geschuldet, dass die Beobachtungsmethode i. S. der DIN 1054 zur Anwendung kam.



Dabei wird das prognostizierte (Setzungs-)Verhalten anhand von Messungen evaluiert; bei Erfordernis muss die Dimensionierung modifiziert oder durch vorbereitete Maßnahmen das prognostizierte Systemverhalten herbeigeführt werden.

Im Ergebnis zeigten die Sondierungen zwischen vereinzelt festem Einlagerungen generell geringe und kleinräumig heterogene 'Lagerungsdichten' bzw. 'Konsistenzen' resp. heterogene und generell geringe Tragfähigkeiten der Ablagerungen.

## 4 Sanierungsplanung und -realisierung

Unter Würdigung der projektspezifischen Gegebenheiten sah die deponiebautechnische Sanierungsplanung vor, nach geringmächtigem Oberbodenabtrag zunächst eine massive steife profilierte Barriere gegen Niederschlagsimmissionen und Gasemissionen herzustellen und diese dann nach angemessener Liegezeit mit einer wasser- und gasdichten Verkehrsflächenkonstruktion zu überbauen. Wasser und Gas sollten aus der Fläche abgeführt werden. Einschnitte in den Bestand und Leitungsgräben waren zu minimieren.

Als zertifizierte Baustoffe für die Barriere und die Tragschicht unter der asphaltierten Verkehrsfläche wurde Stahlwerkschlacken LDS aus dem Linz-Donauwitzer-Verfahren ausgewählt. Der Baustoff ist mit  $2,4 \text{ t/m}^3$  vergl. schwer und befördert damit Vorbelastungen und ein günstiges Verhältnis von ständigen und veränderlichen Einwirkungen. Die Kornfraktionen konnten gaswegsam oder - durch Selbstverfestigung - schwach gas- und wasserdurchlässig und dabei gut verdichtbar und sehr steif resp. fest gewählt werden. Die LDS konnte nach individueller baubetrieblicher Anforderung auch in großen Massen termingerecht geliefert und witterungsunabhängig eingebaut werden.

Im 1. Bauabschnitt wurde 2008 zuerst die umwallte geneigte Ebene mit 1,7 ha Fläche überbaut. Nach Oberbodenabtrag wurde Stahlwerkschlacke LDS 8/32,  $D = 0,20 \text{ m}$  auf einer Geogitter-Vlies-Kombination als flächiger Gassammler und LDS 0/32,  $D = 0,30 \text{ m}$  als Sperr- und Tragschicht eingebaut. Zwischen diesen Schichten wurde ein Trennvlies verlegt. Ein prognostizierter und realisierter Effekt war, dass Feinanteile aus der LDS das Vlies zusetzen und zusätzlich die LDS selbst unter Witterungseinfluss verfestigt und abdichtet. Diese Eigenschaft der Stahlwerkschlacken, zusammen mit der sehr guten Tragfähigkeit bzw. Befahrbarkeit mit Straßenfahrzeugen, beförderten die beabsichtigte Barriere während der Liegezeit zwecks 'Konsolidation' der Deponate.

Die Oberfläche wurde - entsprechend dem Endausbau - als geneigtes Falwerk mit behutsamer Anpassung an die vorhandene Morphologie konturiert. Die Massenminimierung und Gewährleistung der Gefälle unter Berücksichtigung prognostizierter unterschiedlicher Setzungen war eine planerische Herausforderung.



In den Traufen wurden in der LDS 0/32 verrohrte Schotterrigolen LDS 8/32 über Sohlenauskleidungen mit Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) eingebaut, die im Tiefsten an eine Sammelleitung angeschlossen sind. Die Sammelleitung leitet gefasstes Niederschlagswasser über einen Sandfang in die RW-Kanalisation. In den Firsten wurden Gassammelleitungen verlegt. Diese Sammler enden in Kompostfiltern außerhalb des Baufeldes resp. der Parkfläche. Wiederholte Kontrollen der Wässer und der Umgebungsluft über der Barriere bestätigten die geplante Funktion. Bereits während der Liege- und Beobachtungszeit konnte diese Fläche als geschotterte nicht öffentliche Abstellfläche genutzt werden.

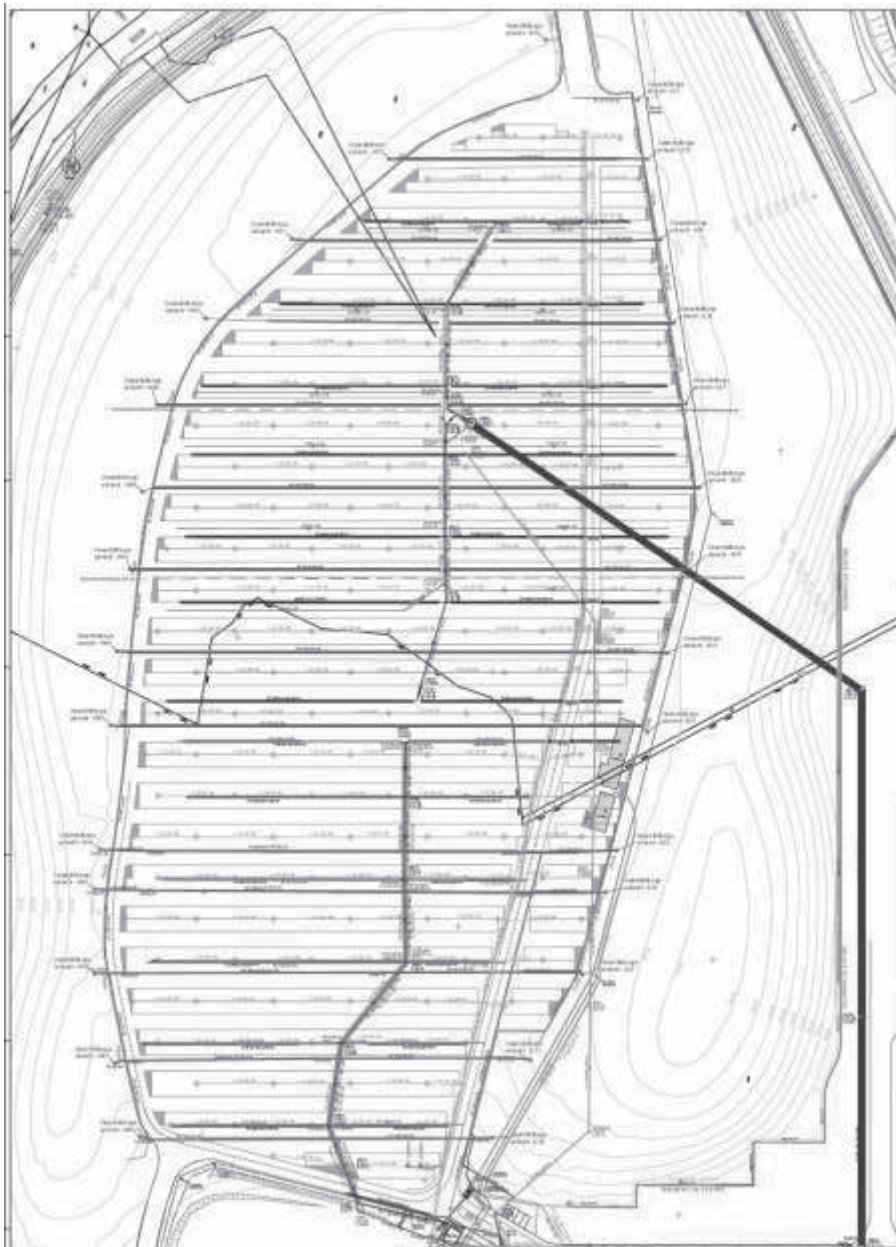


Abbildung 1 Lageplan mit Entwässerungs- und Gasausleitungssystem



Nach den positiven Zwischenresultaten wurde der 1. Bauabschnitt in 2011 mit der Herstellung der Verkehrsfläche abgeschlossen. Dafür wurde auf der Schottertragfläche eine vollflächig verschweißte Kunststoffdichtungsbahn (KDB) im Sandbett verlegt und mit einer Drän- und Schutzmatte und einem Geogitter belegt. Über der Schutzmatte wurde Stahlwerkschlacke LDS 0/32, D = 0,50 m als Schottertragschicht eingebaut. Die Bauweise wurde in einem Versuchsfeld nachgewiesen. Letztendlich wurden eine Asphalttragschicht AC 16, D = 8 cm und eine -deckschicht AC 8, D = 2,5 cm aufgebracht.

Zudem wurde nach geotechnischen Berechnungen am Übergang zu dem 2. BA eine Bodenrinne zwecks Vorwegnahme der Setzungen aus dem 2. BA und damit mögliche Schäden an der fertiggestellten Verkehrsfläche im 1. BA aufgesetzt.

Das Oberflächenwasser fließt in vergitterten Betonrinnen in den Traufenlagen ab und wird kanalisiert abgeleitet. Als Kontrolle der Asphaltabdichtung sind die Dränmatten an Sammler in den Traufen und diese an Kontrollschächte und -ableitungen angeschlossen. Als Kontrolle der KDB blieb das vormalige Entwässerungssystem erhalten.

Das intensivierete Grundwassermonitoring zeigte teilweise erhöhte Konzentrationen typischer Inhaltsstoffe während und unmittelbar nach den Bauphasen 2008 und 2011, ohne jedoch zulässige Grenzwerte zu überschreiten.

In 2012 wurde der 2. Bauabschnitt in der originären Muldenlage begonnen. Bevor dort analog zu dem 1. BA eine steife Barriere aufgebaut wurde, wurde das Geländetiefste mit Sand aufgefüllt. Bedingt durch die Morphologie und insbesondere der gebotenen Minimierung von Rohrgräben und Einschnitten war eine verrohrte Ableitung von Niederschlägen aus dem Deponietiefsten nicht möglich. Ein Rohrvortrieb durch Deponate war nachweislich der Erkundungen wenig erfolgversprechend.

Zur Entwässerung wurde deshalb im Tiefsten ein Schachtbauwerk DN 2000 mit einer Sohle 7 m u. GOK bzw. bis unter die Deponiebasis angeordnet. Aus einem Startschacht außerhalb der Altablagerung konnte dieser als Zielschacht mit grabenlosem Rohrvortrieb DN 1000 im Grundwasser durch die Sande im Untergrund der Altablagerung problemlos nach rd. 200 m angefahren werden.

Bereits in 2013 konnte der 2. Bauabschnitt über rd. 3,0 ha mit der Realisierung der inzwischen bewährten Verkehrsflächenbauweise des 1. Bauabschnittes abgeschlossen werden. Voraussetzung dafür war - neben der engagiert konstruktiven Leistung aller Baubeteiligten - die Anwendung und das Ergebnis der Beobachtungsmethode.





## 5 Beobachtungsmethode

Bei der Beobachtungsmethode i. S. der DIN 1054 werden Prognosen durch laufende messtechnische Kontrollen während der Herstellung und der Nutzung evaluiert. Unvorhergesehenem soll nach Erfordernis durch vorbereitete Maßnahmen begegnet werden. Die Methode kommt zur Anwendung, wenn eine Prognose nicht hinreichend zuverlässig und ein Versagen rechtzeitig erkennbar ist. Bei tatsächlich günstigerem Verhalten kann die Methode auch der Optimierung der Bemessung oder des Ablaufes dienen.

Die Bauherrschaft projektierte die Inbetriebnahme des kompletten Parkplatzes mit dem 2. BA ein halbes Jahr nach Aufbringung der Barriere, also ohne Liegezeit des 2. BA.

Für die Überbauung der Altablagung waren das Last-Zeit-Setzungsverhalten mit Zeitsetzungen über ein Jahr und mit Primäreindsetzungen bis vier Dezimeter infolge Auflast aus dem bis 2 m mächtigen Oberflächenabdichtungssystem prognostiziert worden.

Die prognostizierten Primäreindsetzungen wurden - mit Vorhaltemaß und Konfidenzintervallen - auch bei der Planung für den 2. BA durch Überhöhungen berücksichtigt.

Für kleinräumige 'erdfallartige' Ereignisse war i.Ü. das System mit der KDB nach den dafür geltenden Regularien [EBGEO] mit Dehnungen  $\varepsilon < 2,5 \%$  dimensioniert.

Im 1. BA waren nach drei Jahren Liegezeit unter rd.  $15 \text{ kN/m}^2$  Auflast weitgehend homogen Setzungen 3 - 6 cm in dem durch die beschriebene Barriere vorbelasteten mittleren Areal und 8 - 11 cm am unvorbelasteten Rand durch Nivellements im Raster auf der fertigen Fläche gemessen. Diese Deformationen sind für das System unkritisch.

Für die Realisierung der geplanten verkürzten Liegezeit im 2. BA musste das prognostizierte Zeit-Setzungsverhalten messtechnisch schneller nachgewiesen werden.

Ergänzend zu den geodätischen Kontrollen (Nivellements im Raster auf der fertigen Fläche) wurden deshalb bereits mit ersten Profilierungsarbeiten in 2012 zwei rd. 200 m lange Inklinometerstrecken auf dem Rohplanum eingerichtet und baubegleitend bei zunehmender Last durch Überbauung zw. Überwachung der Standsicherheit und nach Fertigstellung unter nahezu gleichbleibender Last zwecks Überwachung der Gebrauchstauglichkeit (= Funktionstüchtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems) gemessen. Diese Messmethode ohne baubetrieblich störende und das Dichtungssystem durchdringende Elemente (Setzpegel) hat sich gut bewährt.

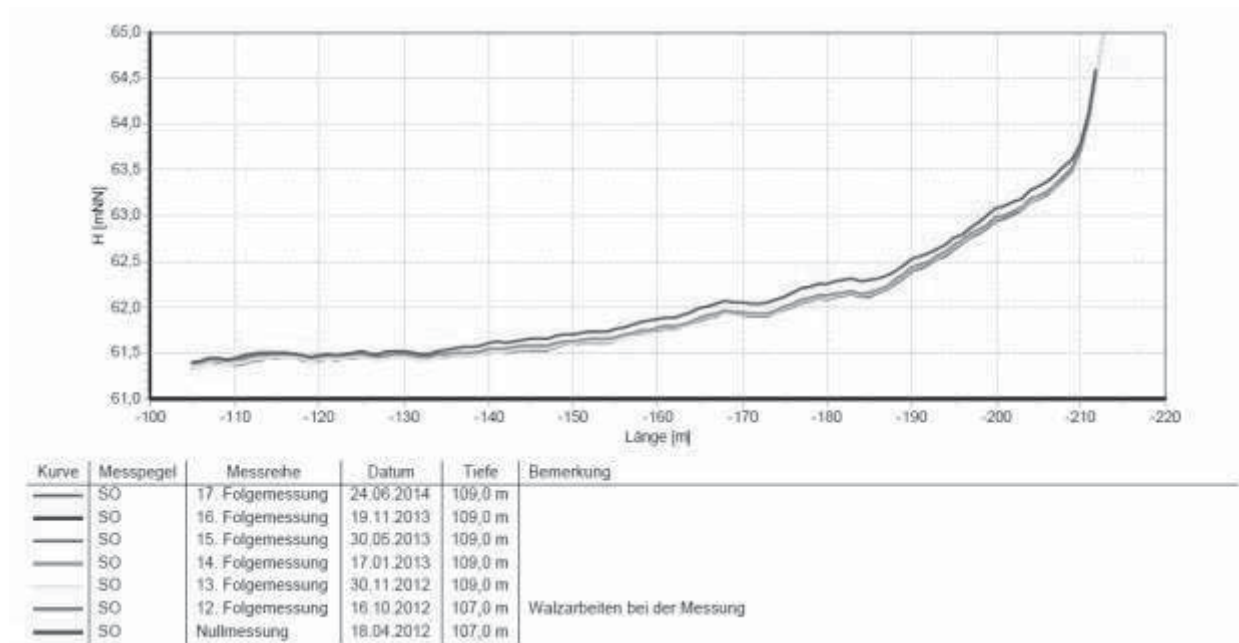


Abbildung 2 Liniensetzungsmessungen

Die Deformationen, d. h. Setzungen und insb. Differenzsetzungen, wurden im Spiegel der Prognosen gutachterlich aus geo- und deponiebautechnischer Perspektive bewertet. Die baubegleitenden Messungen und visuellen Kontrollen wiesen die Standsicherheit der Verkehrsfläche resp. der Altdeponie nach.

Nach der Bezugs- resp. Nullmessung wurden während der Liegezeit des Sandplanums und nach Aufbringung der Gasflächendränge LDS 8/32 und der Tragschicht LDS 0/32 sowie unter der fertiggestellten asphaltierten Verkehrsfläche Folgemessungen mit nivellistischer Anbindung der Streckenenden durchgeführt und daraus Setzungen bzw. Deformationen bestimmt. Generell zeigen die Messungen randlich geringe Setzungen und zentral zuerst Hebungen durch nachträgliches Profilieren der Mulde. Danach werden nach Überbauung mit der Dränageschicht und der Schottertragschicht relativ gleichmäßige Deformationen in Zentimetergrößenordnung gemessen.

Die beobachteten Gesamtdeformationen zentral (verglw. geringe Deponatmächtigkeit) und randlich (geringe Aufhöhung) mit 5 bis 10 cm und die bei mittlerer Deponatmächtigkeit und Überbauungshöhe bis 15 cm liegen in der Größenordnung der Setzungsprognose mit 15 cm zentral und 10 cm randlich der Überbauung.

Wichtiges Kriterium nach der Homogenität der Deformationen war das Zeitsetzungsverhalten des Systems mit Blick auf die verkürzte Liegezeit. Für diese Bewertungen wurden mit einschlägigen geotechnischen Methoden anhand der gemessenen Last-Zeit-Setzungsverläufe die Primärendsetzungen ermittelt. In der Beobachtungszeit zeigte sich - unbeschadet teils diffuser Korrelationen wegen Vor- und Rückbauarbeiten resp. Setzungen und Hebungen - insgesamt ein zügiges Abklingen der Primärsetzungen.

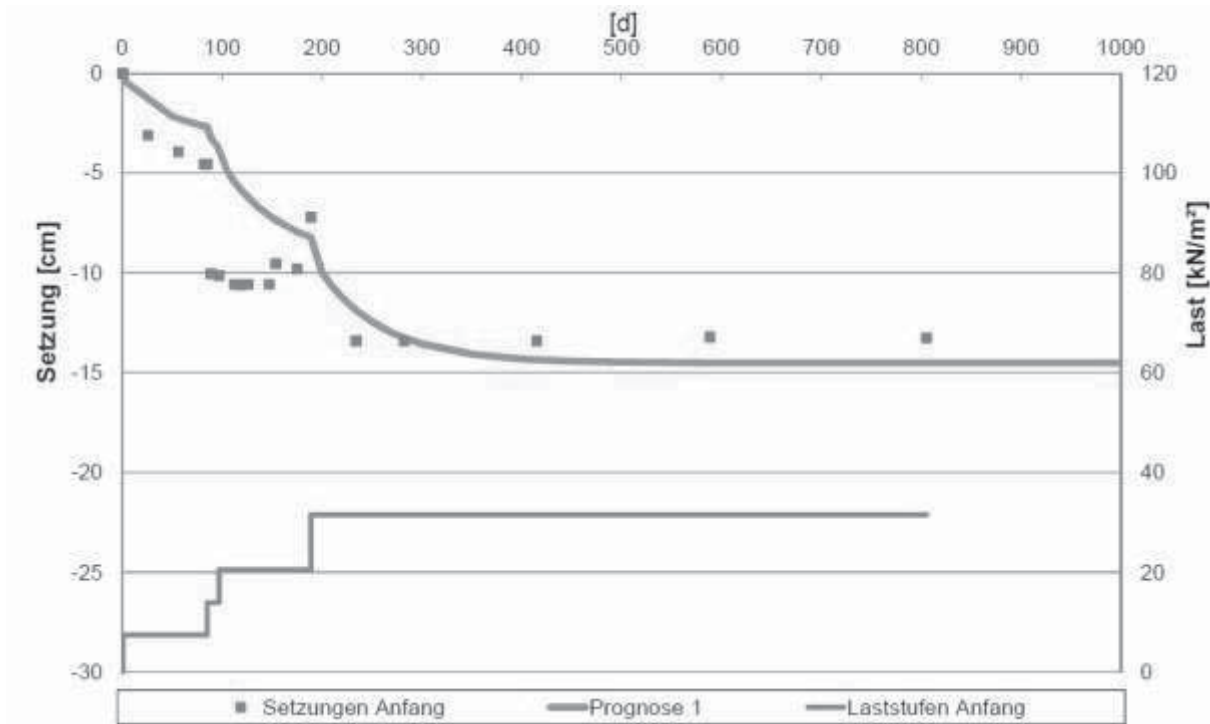


Abbildung 3 Last-Zeit-Setzungsmessungen und -Prognose

Auf der Grundlage dieser Beobachtungen und Bewertungen durfte die ohne weiteres konservativ prognostizierte Liegezeit von einem Jahr auf ein halbes Jahr verkürzt werden. Insgesamt liegen die Setzungen in/unter der prognostizierten Größenordnung und sind, auch bedingt durch die schärfste steife Überbauung mit Stahlwerkschlacken und Geogittern, vergleichsweise stetig, mithin mit geringen lokalen Dehnungen unter der zulässigen Grenze  $\epsilon \leq 2,5 \%$  (lt. BAM-Zulassung für die KDB).

Das Ziel der lt. Sanierungsplanung und Verbindlichkeitserklärung beabsichtigten partiellen Oberflächenabdichtung der Deponie ist nachweislich der Deformationsmessungen bisher erreicht. Die Infiltration von Niederschlägen wurde auf unter 10 % der originären Rate gesenkt. Die Verkehrsfläche kann - allerdings mit der prophylaktischen Einschränkung des Rauchverbotes sowie der Maßgabe, sämtliche elektrischen Installationen oberhalb der gasdichten Abdeckung (KDB) vorzunehmen - als Parkfläche genutzt und mit vergleichsweise geringem Aufwand bewirtschaftet werden. Die Funktionalität des Oberflächenwasserabflusses ist - auch bei Starkregenereignissen - gegeben. An den Kompostfiltern der Deponiegasausleitungen sind keine Schadgase feststellbar. In einzelnen Gassammelleitungen werden relevante Methangaskonzentrationen gemessen. Die planerische Option einer außenliegenden Ringleitung und konzentrierten Gasbehandlung muss bis dato nicht genutzt werden. Entsprechend dem Sanierungsplan wird das Oberflächenabdichtungssystem weiterhin einmal jährlich inspiziert und zusammen mit geodätischen, geotechnischen, hydraulischen Kontrollmessungen und Analysen von Gas und Grundwasser gutachterlich bewertet.





## 6 Literatur

BBodSchG	1998	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. BGBl, I S. 502
BGR 128	2006	Kontaminierte Bereiche. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften. Carl Heymanns Verlag
EBGEO	2010	Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen. DGGT. Ernst & Sohn
DIN 1054	2010	Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1

### Anschriften der Verfasser

Dipl.-Ing. Wolfgang Oltmanns  
PROF. DR.-ING. WALTER RODATZ UND PARTNER  
BERATENDE INGENIEURE FÜR GEOTECHNIK GMBH  
Nußbergstraße 17  
D-38102 Braunschweig  
Telefon +49 531 70 13 611  
E-mail: w.oltmanns@rup-geotechnik.com  
Website: www.rup-geotechnik.de

Dipl.-Geol. Michael Bergmann  
Dr: Rietzler & Heidrich GmbH  
Geologie und Umwelt, NL Lüneburg  
Hinter der Saline 27  
D-21339 Lüneburg  
Telefon +49 41 31 40 21 60  
E-mail: rh-umwelt.lueneburg@t-online.de  
Website: www.rh-umwelt.de



# Gereiftes Nassbaggergut als Rekultivierungssubstrat für Deponien

**Gert Morscheck, Michael Nelles und Michael Henneberg**

Universität Rostock

## Inhaltsangabe

Die aktuelle Deponieverordnung (DepV) fordert für Rekultivierungsschichten den Nachweis einer ausreichend großen nutzbaren Feldkapazität. In Mecklenburg-Vorpommern wird humusreiches- und feinkörniges Substrat aus der Baggerung der Schifffahrtswege aufbereitet und seit ca. 15 Jahren als Rekultivierungssubstrat eingesetzt. Auf 4 Deponien wurden die Herstellung und die Wirksamkeit der Rekultivierungsschichten aus „aufbereitetem Nassbaggergut“ geprüft. Dazu wurde das eingesetzte "aufbereitete Nassbaggergut" gekennzeichnet und die aktuelle Funktionalität der Rekultivierungsschichten durch bodenchemische und bodenmechanische Untersuchungen an angelegten Schürfen überprüft.

## Stichworte

Deponierekultivierung, nutzbare Feldkapazität, nFK, Nassbaggergut, HELP-Model

## 1 Einleitung

Deponien müssen nach dem Betrieb gesichert werden; diese „Abkapselung“ von der Umwelt erfolgt mit Hilfe eines Oberflächenabdichtungssystems, dessen obere Schicht aus einem Rekultivierungssubstrat aufgebaut wird. Die DepV hat die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht, deren Funktion und das Substrat, aus der sie erstellt werden darf, klar geregelt. Diese Festlegungen werden durch weitere Vorgaben und Empfehlungen ergänzt (BQS 7-1, BQS 7-2, GDA-Empfehlungen E 2-31 und E 2-32). Zurzeit wird in der Fachwelt die Umsetzbarkeit der bodenphysikalischen Forderungen, die sich aus der DepV ergeben, umfangreich diskutiert und geprüft welche Herausforderungen sich für die Praxis des Deponiebaus ergeben.

In Mecklenburg-Vorpommern wurden seit Ende der 90er Jahre mehr als 10 Deponien mit aufbereitetem Nassbaggergut aus dem Küstenbereich rekultiviert. Aufgrund der neuen Anforderungen an die Substrate für Rekultivierungsschichten durch die DepV sollte im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern durch Untersuchungen an bereits mit aufbereitetem Nassbaggergut rekultivierten Deponien analysiert werden, in wie weit die schon existierenden Rekultivierungsschichten diese Forderungen erfüllen, und ob aufbereitetes Nassbaggergut auch weiterhin für den Einbau in Rekultivierungsschichten empfohlen werden kann.



## 2 Herkunft und Qualität des Baggergutes

Das Nassbaggergut fällt bei der Herstellung und bei der Aufrechterhaltung der schiffbaren Fahrwassertiefen an. Da nur Sande und Mergel in der Ostsee verklappt werden dürfen, muss humus- und feinanteilreiches Baggergut an Land in Spülfeldern abgesetzt werden. Am Standort Rostock wird dieses Baggergut in einem speziell dafür ausgebauten Spülfeldkomplex klassiert, entwässert und aufbereitet. Das aufbereitete Nassbaggergut ähnelt im verwertungsfähigen Zustand einem organikreichen, tonig-schluffigem Mutterboden der der Körnungsart Lehm zuzuordnen ist. Seit Ende der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts wird in Rostock an einer umweltverträglichen Baggergutverwertung geforscht. Die Spülfelder der Hansestadt Rostock wurden Mitte der 90-er Jahre zu einer industriellen Absetz- und Aufbereitungsanlage (IAA) umgebaut, so ist ein den umweltrechtlichen Anforderungen genügendes und effizientes Nassbaggergutmanagement möglich, dessen Kern die Aufbereitung des landseitig untergebrachten Baggergutes für eine nachhaltige Verwertung ist. Seit dem Jahr 2000 verwertet die Hansestadt Rostock als einzige Hafenstadt im Küstenbereich Deutschlands sein nicht umlagerungsfähiges organikreiches Nassbaggergut zu 100% landseitig. Die Verwertung von aufbereitetem Nassbaggergut findet vor allem im Landschaftsbau und der Deponierekultivierung statt (Abb.1). Aber auch der Einsatz des gereiften Nassbaggergutes als Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft ist möglich. Begleitet durch noch immer laufende Versuche, gibt es auch hier bereits erfolgreiche Anwendungen.

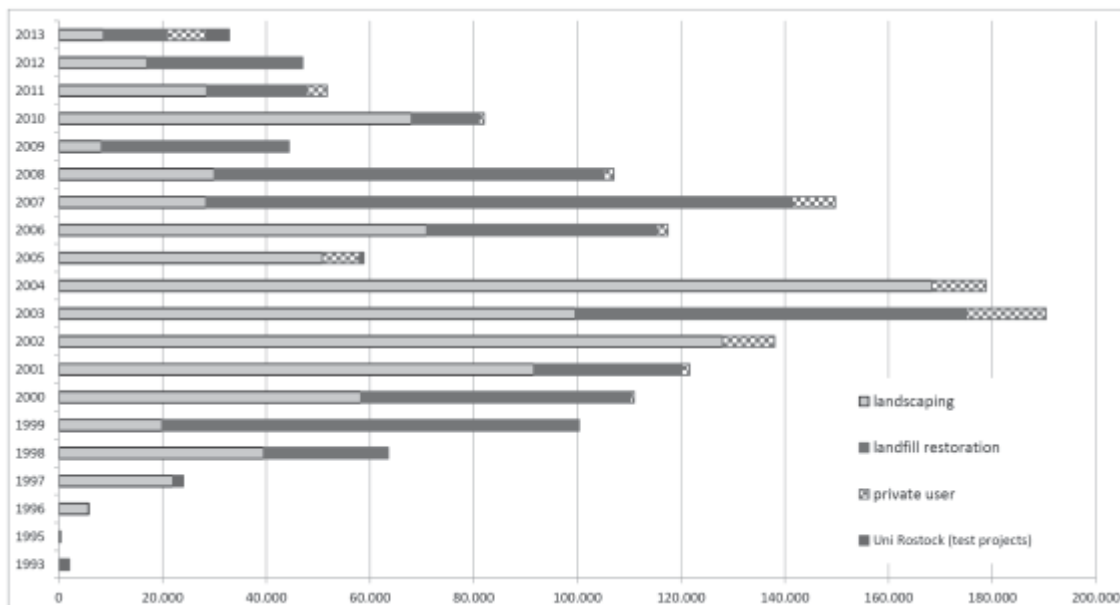


Abbildung 1 Entwicklung der Verwertung des Rostocker Baggergutes



## 2.1 Korngrößenverteilung

Die in den Aquatorien gebaggerten Sedimente werden in eingedeichte Polder, die Spülfelder, mit einem Wassergehalt von ca. 95% eingespült. Dort klassieren die Partikel längs zum Spülstrom. Steine, Kiese und Sande werden vom Wasser nicht sehr weit mitgerissen, am Ende der Spülstrecke lagern sich die feineren, leichteren Bestandteile ab (Schluff, Ton und Organische Substanz) (Tab. 1). Die Sande und Kiese lassen sich in der Bauwirtschaft verwerten. Im weiteren Verlauf des Spülstromes setzen sich dann Mischböden (Sand-Schlickgemische) und, am weitesten von der Einspülstelle entfernt, zuletzt reine Schlicke (Ton-Schluff-OS-Gemische) ab. So führt die Längsstromklassierung in der IAA zu zwei für die Deponierekultivierung geeigneten Fraktionen (Mischböden, Schlicke).

*Tabelle 1 Korngrößenverteilung des Baggergutes (DIN ISO 11777)*

[M%]	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
<b>Mittelwert Schlicke</b>	1,1	8,7	29,9	10,8	15,5	11,5	23,6
<b>Mittelwert Mischboden</b>	1,4	16,3	56,4	8,5	57,0	3,0	8,3
<b>Maximum Schlicke</b>	3,0	22,0	49,0	18,0	27,0	19,0	46,0
<b>Maximum Mischboden</b>	3,6	28,9	70,9	14,2	103,0	4,6	15,1
<b>Minimum Schlicke</b>	0,0	1,0	7,0	7,0	8,0	6,0	13,0
<b>Minimum Mischboden</b>	0,4	7,7	45,7	3,5	26,0	1,5	3,0

## 2.2 Chemische Kennzeichnung des Nassbaggergutes

Die Herkunft des Baggergutes aus dem Küstenbereich führt zu natürlich erhöhten Salzgehalten (SK) (Tab. 2).

Da die Warnow ein ländliches Einzugsgebiet hat und im Rostocker Ballungsraum seit langem eine gute Klärung aller Abwässer erfolgt, ist der Schadstoffgehalt im Baggergut relativ gering. Durch die Klassierung weisen die feinkörnigen Schlicke etwas höhere Schadstoffgehalte auf als die weniger bindigen Mischböden (Tab. 3; Tab. 4). Die Einhaltung der verwertungsspezifischen Grenz- und Richtwerte erlaubt einen vielfältigen Einsatz z.B. in der Deponierekultivierung.



Tab. 2 Nährstoff- und Salzgehalt der Schlicke und Mischböden

	TS	pH	SK	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub>	OS	CaCO <sub>3</sub>	anorg. N	P	K	Mg	Total N	T- Wert
	%		%	mg/100 g Boden				%	mg/100 g			%	mval/ 100g B.	
			TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	
Mittelwert Schlicke	58,2	7,3	1,9	429	346,1	514,8	11,1	8	2,5	2	31,4	127,8	0,5	26,1
Mittelwert Mischboden	71,3	7,4	1,2	140,9	114,5	264,2	5,3	5,6	0,9	1,8	12,8	67,7	0,2	9,2
Maximum Schlicke	71	8	4	1340	905	1428	18	16	9	5	56	226	1	36
Maximum Mischboden	87,5	7,9	2,5	678,8	422	541,9	11	9,8	2	4,4	19,5	125	0,5	14,6
Minimum Schlicke	47	7	1	69	104	163	4	2	1	0,4	9	72	0	16
Minimum Mischboden	60,1	7,0	0,4	11,5	28,0	82,0	0,9	2,5	0,5	0,4	7	14,8	0,1	4,4

Tab. 3 Schadstoffgehalte der Schlicke und Mischböden und Grenzwerte

	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	As	EOX	IR-KW	PAK	PCB
	mg/kg TM											
Mittelwert Schlicke	21,2	0,4	35,2	22,4	14,5	0,3	100,5	9,6	0,7	225,3	0,9	0,033
Mittelwert Mischboden	9,5	0,2	15,8	12,0	6,7	0,2	44,2	5,8	0,7	108,7	0,6	0,028
Maximum Schlicke	35,0	0,8	63,5	37,0	18,0	0,9	177,0	25,0	1,0	715,0	2,18	0,074
Maximum Mischboden	23,8	0,3	32,8	28,5	10,0	0,4	94,0	12,5	1,3	281,0	3,3	0,066
Minimum Schlicke	10,0	n.n.	12,0	14,0	11,0	0,0	36,0	5,0	n.n.	28,0	n.n.	0,009
Minimum Mischboden	4,0	0,1	44,0	4,6	3,0	0,0	16,0	3,6	0,4	19,4	n.n.	0,009
BBodSchV VSW Sand	40,0	0,4	30,0	20,0	15,0	0,1	60,0				3,0	0,050
70%	28,0	0,3	21,0	14,0	10,5	0,07	42,0				2,1	0,035
BBodSchV VSW Lehm/Schluff	70,0	1,0	60,0	40,0	50,0	0,5	150,0				3,0	0,050
70%	49,0	0,7	42,0	28,0	35,0	0,35	105,0				2,1	0,035
DepV Sp. 9 (Reku-Schicht)	140	1	120	80	100	1	300				5	0,1



Tab. 4 Schadstoffgehalte (Eluat) im Baggergut im Vergleich zu Grenzwerten der DepV

	pH	Lf μS/cm	Chlorid mg/l	Sulfat mg/l	Pb μg/l	Cd μg/l	Cr μg/l	Cu μg/l	Ni μg/l	Hg μg/l	Zn μg/l	As μg/l
Mittelwert Schlicker	7	4044	542	2022	9,1	0,6	2,3	28,8	10,6	n.n.	75,8	3,4
Mittelwert Mischboden	7,1	2975	259	1596	4,6	0,2		11,3	6	n.n.	21,7	2,2
DepV Reku-Schicht	6,5 - 9	500	10	50	40	2	30	50	50	0,2	100	10

### 3 Verwendung von gereiftem Nassbaggergut in der Deponierekultivierung

Die seit Ende der 90-er Jahre erfolgreiche Verwertung von aufbereitetem Baggergut bei der Deponierekultivierung, aber auch im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Landwirtschaft, belegt die sehr guten und in der Praxis bewährten Bodeneigenschaften (Wasserspeicherung, Nährstoffhaltevermögen, Erosionsstabilität) dieses Materials.

Der Einsatz des Baggergutes bei der Deponieabdeckung wurde in der Vergangenheit jeweils auf Grundlage von Einzelfallentscheidungen der zuständigen Abfallbehörden durchgeführt. Dabei bedurfte es entsprechender Ausnahmeregelungen, da das Baggergut aufgrund seiner relativ hohen Salz- und Organikgehalte die geltenden Richtwerte der Deponieverordnung deutlich überschreitet.

Nach bisherigen Erfahrungen eignet sich das Material sowohl zur Herstellung der Kubatur, als auch zum Aufbau einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht. In Mecklenburg-Vorpommern besteht weiterhin ein nicht unerheblicher Bedarf an Bodenmaterial für die Stilllegung von Deponien bzw. die Sicherung von Altstandorten.

Insbesondere hinsichtlich der sehr günstigen Eigenschaften des Baggergutes (Wasserspeichervermögen und Pflanzenverfügbarkeit des Wassers) stellt die aktuelle DepV konkrete Anforderungen. Schon eine temporäre Abdeckung muss die Sickerwasserneubildung minimieren. Das Rekultivierungssubstrat muss zudem, um ein ausreichendes Pflanzenwachstum gewährleisten zu können, eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 140 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht, aufweisen (DepV, Anhang 1, Pkt. 2.3.1). Beim Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht fordert die DepV eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 220 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Wasserhaushaltsschicht; zusätzlich darf die Durchsickerung höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30





Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung, betragen (DepV, Anhang 1, Pkt. 2.3.1.1). Natürlich muss gereiftes Nassbaggergut auch die Anforderungen an Deponieersatzbaustoffe erfüllen (DepV, Anhang 3, Tab. 2, nach Ziffer 9 der Tab. 1). Um auch künftig gereiftes Nassbaggergut in der Deponierekultivierung einsetzen zu können, musste auf bereits rekultivierten Deponien geprüft werden, in wie weit diese neuen Anforderungen der DepV eingehalten werden.

Beobachtungen an den rekultivierten Deponien und Erfahrungen aus anderen Einsatzbereichen des Baggergutes geben Grund zur Annahme die neue DepV einhalten zu können. Zum Beispiel wurde in einem seit neun Jahren an der Universität Rostock betriebenen Lysimeterversuch die Sickerwassermenge um bis zu 25 % im Vergleich zu lehmigem Sand reduziert. Dabei wurde Baggergut (Bodenart: organik- und kalkreicher, schluffiger Lehm), in einer Mächtigkeit von bis zu 10 cm Auftragshöhe in die 30 cm mächtige Oberbodenschicht (lehmiger Sand) eingearbeitet.

## 4 Ergebnisse - Prüfung der Rekultivierungsschichten

Für die Untersuchungen wurden vier in den letzten Jahren mit Baggergut rekultivierte Deponien unterschiedlichen Abdeckungsalters ausgewählt (Deponien Teterow-Danschow, Grimmen, Rostock NIR (ehem. Warnow-Werft) und Marlow).

Dabei wurden u.a. folgende Parameter an den vier Standorten geprüft:

- Aktuelle Situation (Sickerwasseranfall, besondere Auffälligkeiten)
- Optische Beurteilung der Abdeckung (Aufwuchs, Erosionen, Setzungen, Rutschungen...)
- Recherche eventuell durchgeführter Maßnahmen und vorliegender Untersuchungen seit der Abdeckung
- Befragung des Eigentümers/Betreibers der Deponie zum bisherigen Verlauf der Nachsorge
- schichtenweise Bodenprobenahme (gestörte und ungestörte Proben), zur Beurteilung der Restschrumpfung des Baggergutes und Bestimmung der Durchwurzelungstiefe und -intensität
- Bodenmechanische Untersuchungen gemäß DepV bzw. GDA-Empfehlung (Wassergehalte, Dichten, Flügelscherfestigkeit vor Ort, aktuelle Feldkapazität (nFK und FK), kf-Wert (in-situ und Labor), pH-Wert, OS, Kalk,
- Beurteilung des Schadstoffpotentials der Baggergutchargen anhand vorliegender Zertifizierungen
- Untersuchung der Stoffverlagerung, insb. Salze im Profil
- Prüfung der Humusformen im Baggergut und ihrer Stabilität (AT<sub>4</sub>-Versuch)
- Modellierung des Wasserhaushaltes mit HELP Version 3.90D.



Die Deponien sind vor zwei bis 16 Jahren abgedeckt worden. Das für die Rekultivierung eingesetzte Baggertgut variiert in seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften, da es aus unterschiedlichen Baggerungen stammt. Es existierten keine Testfelder mit gleichem Baggertgut, alle Untersuchungen wurden an bereits rekultivierten Deponien durchgeführt.

#### 4.1 Aktuelle Situation

Die Deponien wurden während und seit der Rekultivierung immer wieder untersucht.

In Abhängigkeit von der Bedeutung der Deponie ist auch der Pflegezustand nach der Rekultivierung. Wurden die Deponien jährlich gemäht, bilden Gräser die dominierende Pflanzenart. Wurde die Pflege seit Jahren ausgesetzt, wachsen Kräuter; die Deponie verbuscht und erster Baumwuchs ist vorhanden. Auf allen Deponien ist ein dichter Bewuchs vorhanden (hohe Bodenfruchtbarkeit des Substrates Baggertgut trotz des erhöhten Salzgehaltes).

Keine der Deponien zeigte mechanische Veränderungen der Oberfläche (Erosionen, Setzungen, Rutschungen). Die sehr intensiven Niederschläge des Jahres 2011 konnten die Rekultivierungsschichten nicht schädigen. Die Niederschlagssumme des Sommer 2011 lag z.T. über der normalen durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme. Sickerwasseraustritte in die Entwässerungsschicht des Abdichtungssystems konnten nur bei einer Deponie beobachtet werden.

Dass Baggertgut sehr erosionsstabil ist, das zeigte sich bei der Deponie NIR Rostock im Jahr 2006. Gleich nach Fertigstellung der Abdeckung der Deponie im August 2006 haben mehrere Starkniederschläge (12. bis 14. 8. mit 52 mm sowie 20. bis 22. 8. 2006 mit 32 mm) trotz noch fehlender Begrünung kaum zu Erosionserscheinungen geführt.

Bei Aufgrabungen der Rekultivierungsschichten konnten Rissbildungen in der Rekultivierungsschicht festgestellt werden. Das war insbesondere der Fall, wenn der Einbau des Materials bei zu hohem Wassergehalt erfolgte, diese Risse reichen mehrere Dezimeter in die Rekultivierungsschicht. Die Schrumpfrisse verfüllen sich aber mit Bodenpartikeln.

Die Rekultivierungsschichten sind sehr gut durchwurzelt und werden so für die Wasserversorgung der Pflanzen erschlossen und verdunstungswirksam.



## 4.2 Beurteilung chemischer und biologischer Eigenschaften der Rekultivierungsschichten

Die vier untersuchten Deponien wurden jeweils an zwei Schürfen beprobt die die gesamte Rekultivierungsschicht erschlossen (ca. einen Meter tief). In drei Tiefen erfolgten die Messungen bzw. die Probennahmen.

Die Wasserbewegungen in der Rekultivierungsschicht führten zu Stoffverlagerungen: insbesondere bei Salzionen und Magnesium lässt sich meist eine Zunahme der Gehalte mit der Tiefe feststellen.

Die Gehalte an TOC und Kalk weisen noch immer ähnlich hohe Gehalte wie beim Einbau auf. Der immer noch hohe Kalkgehalt erhält langfristig neutrale pH-Werte (hohes Puffervermögen). Der weiterhin gleichhohe TOC zeigt die sehr gute Stabilität der Organischen Substanz, was auch die sehr geringe Atmungsaktivität ( $AT_4$ ) belegt, die deutlich unter der Vorgabe der DepV (5 mg  $O_2$ /g TS) liegt.

Auf die Bedeutung des herkunftsbedingt hohen Salzgehaltes im Baggergut wurde bereits hingewiesen. Einzelfallentscheidungen können aber den sinnvollen Einsatz des Baggergutes ermöglichen.

Die weiterhin relativ geringen Gehalte an verfügbarem mineralischen Stickstoff (bezogen auf den großen Stickstoffvorrat im Boden) von meist nur 0,5 bis 2 mg  $N_{min}$ /100 g Boden (ca. 20 - 80 kg N/ha in der oberen Rekultivierungsschicht von 0 - 30 cm) reichen aber aus, um ein kräftiges Pflanzenwachstum zu ermöglichen.

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor weisen das vom Baggergut bekannte niedrige Niveau auf, was aber erfahrungsgemäß sicher ausreicht den Pflanzenbedarf zu decken.

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium liegen im Bereich einer ausreichenden Versorgung, die bezugnehmend auf landbauliche Erfordernisse keine zusätzliche Düngung erfordern würde. Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Magnesium sind als hoch bis sehr hoch einzuschätzen (35 - 100 mg/100 g Boden). Das ist auch bei frisch aufbereitetem Baggergut der Fall, zum Teil auf noch höherem Niveau (> 150 mg/100 g Boden) (Tab. 5).

Die Untersuchung der bodenchemischen Parameter zeigt für alle betrachteten Rekultivierungsschichten, dass diese für das Pflanzenwachstum sehr gute bodenfruchtbarkeitsbestimmende Eigenschaften aufweisen. Auf Grund des guten Bindungsvermögens (hohe Gehalte an TOC und Ton) sowie des ausgezeichneten Wasserhaltevermögens war kein erhöhter Austrag an Salzionen und Nährstoffen zu erwarten.



Tab. 5 Chemische Kennzeichnung der Rekultivierungsschichten

Standort	Tiefe	TM	pH	SK	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OS	AT <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	N <sub>an</sub>	P	K	Mg
				grav.	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS	TS
	mm	%		%	mg/100 g TS			%	mgO <sub>2</sub> /kg TS	%	mg/100 g TS			
Marlow Schürf 1	100	78,7	7,2	0,90	1,9	1,2	138,2	4,8	1,02	3,6	1,3	4,5	17	37
	350	78,3	7,4	1,03	2,0	1,3	174,3	4,8	0,71	3,2	0,8	1,7	10	34
	700	75,2	7,5	1,13	0,7	3,8	187,1	6,9	1,03	3,8	0,9	1,9	9	74
Marlow Schürf 2	150	71,1	7,3	0,80	0,5	1,1	66,8	7,6	0,98	3,1	0,7	5,1	16	44
	400	73,2	7,4	1,05	2,0	2,0	179,4	5,6	0,85	3,3	0,3	2,2	10	37
	750	67,8	7,5	1,13	1,4	3,9	207,5	7,8	1,08	4,7	0,4	1,5	9	72
NIR Schürf 1	150	61,8	7,5	1,10	4,4	7,4	284,8	8,2	1,5	3,4	0,8	1,2	17	37
	450	66,8	7,7	1,41	59,4	90,0	271,7	7,4	0,56	3,4	1,6	0,8	13	79
	850	62,9	7,6	1,59	152,5	149,0	307,8	7,0	1,1	2,4	2,2	0,7	14	76
NIR Schürf 2	150	76,9	7,6	1,11	11,5	11,0	205,5	7,4	0,8	3,8	1,2	1,0	22	40
	400	72,1	7,6	1,56	103,1	128,0	274,9	8,7	1,3	2,9	1,8	0,7	12	92
	850	69,9	7,6	1,96	329,1	218,8	286,1	9,8	0,8	2,7	1,7	1,3	17	102
	1200	66,5	7,7	1,71	210,3	159,1	283,3	8,3		3,0	1,5	0,5	20	95
Teterow Schürf 1	100 - 200	86,9	7,3	0,06	2,8	1,1	1,8	1,4	0,2	12,5	4,7	5,5	20	21
	400 - 500	75,5	7,6	1,12	8,2	13,7	227,5	5,3	0,4	5,1	0,9	0,7	9	54
	800 - 850	70,2	7,6	1,27	35,1	55,1	262,4	6,5	0,6	4,2	1,1	0,6	13	77
Teterow Schürf 2	100 - 200	96,0	7,6	0,15	4,8	3,1	1,9	1,8	0,7	6,3	2,1	8,3	11	20
	350 - 450	63,1	7,6	1,19	11,7	27,3	287,5	9,0	0,8	4,8	1,3	0,7	11	82
	800 - 850	72,2	7,6	1,21	17,4	34,3	249,9	6,1	0,6	4,6	1,0	0,6	11	71
Grimmen Schürf 1	100 - 200	74,4	7,6	1,12	5,0	8,8	219,4	9,7	1,8	2,7	0,9	0,9	16	58
	400 - 500	66,5	7,6	1,26	14,2	29,5	244,8	8,9	0,9	2,0	0,9	0,6	13	95
	800	62,2	7,6	1,54	102,8	110,3	298,4	9,8	2,6	2,4	1,0	0,4	20	100
	950	64,2	7,6	1,51	95,0	103,9	307,5	8,6		1,8	0,9	0,4	20	97
Grimmen Schürf 2	200 - 250	74,4	7,6	1,11	7,3	9,4	232,3	11,3	1,9	2,6	1,3	0,6	14	48
	550	58,7	7,6	1,53	79,4	116,2	331,5	12,8	2,0	4,8	1,5	0,3	23	110
	800	57,1	7,6	1,62	130,1	148,1	349,2	11,8	1,9	4,3	1,4	0,3	25	105

Die Rekultivierungsschicht bis 200 mm in Teterow ist nicht aus Baggergut sondern aus Mergel aufgebaut, deshalb die Unterschiede zu den anderen Schichten!



### 4.3 Beurteilung physikalischer Eigenschaften in den Rekultivierungsschichten

Die Deponieverordnung und die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) 7-1 und 7-2 fordern die Einhaltung bodenphysikalischer Parameter (siehe Kap. 3). Diese Parameter wurden geprüft, um den Nachweis der weiteren Verwendbarkeit des aufbereiteten Nassbaggertgutes zu erbringen.

#### 4.3.1 Scherfestigkeit

Die in den Schürfen ermittelten Flügelscherfestigkeiten schwanken z.T. erheblich in Abhängigkeit von der Art des Einbaus.

Tab. 6 Scherfestigkeit der Rekultivierungsschichten

Standort	Tiefe mm	TM %	Scherfestigkeit kPa	Lagerungsdichte g/cm <sup>3</sup>
Marlow Schürf 1	150	78,7	26,5	1,11
	750	75,2	156,8	1,14
Marlow Schürf 2	100	71,1	18,4	1,00
	350	73,2	21,3	0,98
	650	67,8	116,6	1,05
NIR Schürf 1	450	66,8	30,3	0,88
	1000	62,9	35,0	0,89
NIR Schürf 2	150	76,9	32,7	0,87
	400	72,1	116,7	0,90
	800	69,9	109,1	0,88
<i>Teterow Schürf 1</i>	200	86,9	76,1	1,80
	400	75,5	116,7	1,12
	800	70,2	109,1	1,01
Grimmen Schürf 1	100 - 200	74,4	122,0	0,88
	400 - 500	66,5	136,0	0,89
	800	62,2	124,0	0,88
Grimmen Schürf 2	200 - 250	74,4	103,5	0,82
	550	58,7	92,8	0,77
	800	57,1	97,1	0,83

*Die Rekultivierungsschicht bis 200 mm in Teterow ist nicht aus Baggertgut sondern aus Mergel aufgebaut, deshalb die Unterschiede zu den anderen Schichten!*

Auf Standorten wo das Baggertgut beim Einbau mehrfach überfahren wurde und so eine leichte Verdichtung erfolgte bzw. wo Mergel als oberste Bodenschicht eingebaut wurde, wurden auch im Oberboden hohe Scherfestigkeiten von 70 - 80 kPa und sogar



100 - 120 kPa gemessen. An einem Standort ist überhaupt keine Differenzierung über die Tiefe festzustellen, so dass anzunehmen ist, dass alle Lagen mit gleicher Dichte eingebaut wurden. Bei anderen Standorten weisen die Messungen eine deutlich tiefenabhängige Staffelung auf. In den oberen, locker eingebauten Schichten wurden Scherfestigkeiten von „nur“ knapp 20 - 33 kPa ermittelt. Diese Lockerheit ist dann besonders auf den hohen Gehalt an Organischer Substanz und die intensive Durchwurzelung zurückzuführen. In den darunter liegenden Schichten wurden Scherfestigkeiten vom mehr als 100 kPa gemessen.

Die gemessenen Scherfestigkeiten entsprechen Vergleichswerten für halbfeste bindige Böden (Lehm, Schluff).

### 4.3.2 Wasserdurchlässigkeitsbeiwert

Die Ermittlung erfolgte im Felde mit dem Feldinfiltrometer (ungesättigte Leitfähigkeit) und im Labor (gesättigte Leitfähigkeit) an Stechzylindern (500 cm<sup>3</sup> oder 250 cm<sup>3</sup>)

Die Wasserdurchlässigkeit der Rekultivierungsschichten ist, obwohl keine zielgerichtete Verdichtung der eingebauten Schichten erfolgte (i.d.R. nur Einbau mit Raupe oder Langarmschaufel), sehr gering. Sie schwankt in Abhängigkeit des Untersuchungsverfahrens (Feld- [FM] oder Labormethode [LM]) zwischen  $8,1 \times 10^{-6}$  -  $1,2 \times 10^{-7}$  m/s (LM) bzw.  $2,18 \times 10^{-6}$  -  $1,98 \times 10^{-8}$  m/s (FM) und nimmt in der Regel erwartungsgemäß von oben nach unten hin ab.

### 4.3.3 Porenvolumen und Dichten

Das Gesamtporenvolumen (GPV) der eingebauten Baggergutssubstrate liegt auch nach mehreren Jahren (einschließlich Verlusten durch eventuell leichte Setzungen nach dem Einbau) i.d.R. über 50 %, oft über 60 %. Dieses große Gesamtporenvolumen spiegelt sich auch in den sehr geringen Lagerungsdichten von meist nur 0,8 - 1,1 g/cm<sup>3</sup> wieder (Tab. 7). Beides ist unabhängig von der Tiefe. Sowohl Letzteres als auch die an allen Standorten angetroffene Einbauhöhe von ca. 1 m widerspricht der Befürchtung, dass nach dem Einbau noch erhebliche Setzungen stattgefunden haben.

### 4.3.4 Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität

Das hohe Gesamtporenvolumen ermöglicht auch hohe Feldkapazitäten und nutzbare Feldkapazitäten.

Aufgrund des hohen Anteils von Mittel- und Feinporen (schluffig-toniges Baggergut, Schlick) kann der überwiegende Teil des Porenvolumens Wasser gegen die Gravita-



tion speichern (sehr hohe Feldkapazität, oft > 50 %). Oftmals sind mehr als die Hälfte, aber mindestens mehr als 35 % des Porenvolumens, als nutzbare Feldkapazität für die Pflanzen verfügbar. Die nutzbare Feldkapazität liegt fast immer über 20 Volumen-%, z.T. sogar über 30 Volumen-%. Die Forderungen der DepV nach 140 mm bzw. 220 mm (Wasserhaushaltsschicht) nFK werden immer erfüllt, und das Jahre nach dem Einbau des aufbereiteten Nassbaggertgutes in die Rekultivierungsschichten, deshalb sollten sich auch Wasserhaushaltsschichten problemlos aus Baggertgut herstellen lassen (Tab. 7).

Tab. 7 Bodenphysikalische Eigenschaften der Rekultivierungsschichten

Standort	Tiefe	TM	OS	CaCO <sub>3</sub>	Lagerungs- dichte	Substanz- dichte	PV	WV	LK	FK	nFK
	mm	%			g/cm <sup>3</sup>		Vol %				
Marlow Schürf 1	100	78,7	4,8	3,6	1,11	2,52	56,1	37,9	6,1	50,0	33,7
	350	78,3	4,8	3,2	1,10	2,52	56,2	43,6	8,8	47,4	29,5
	700	75,2	6,9	3,8	1,14	2,47	53,8	49,1	0,8	53,0	23,4
Marlow Schürf 2	150	71,1	7,6	3,1	1,00	2,49	59,7	37,4	4,8	54,9	37,2
	400	73,2	5,6	3,3	0,98	2,51	61,2	41,0	11,8	49,4	29,1
	750	67,8	7,8	4,7	1,05	2,47	57,3	45,4	4,2	53,2	20,5
NIR Schürf 1	150	61,8	8,2	3,4	0,88	2,42	63,8	49,3	12,5	51,3	25,9
	450	66,8	7,4	3,4	1,03	2,45	58,1	46,7	5,6	52,4	24,1
	850	62,9	7,0	2,4	0,89	2,45	63,8	55,8	7,9	55,9	35,1
NIR Schürf 2	150	76,9	7,4	3,8	0,87	2,48	64,7	32,0	25,6	39,1	21,1
	400	72,1	8,7	2,9	0,90	2,43	62,8	43,3	9,7	53,1	30,2
	850	69,9	9,8	2,7	0,88	2,42	63,6	42,3	8,9	54,7	28,7
Teterow Schürf 1	100 - 200	86,9	1,4	12,5	1,80	2,64	31,6	24,1	6,9	24,7	2,8
	400 - 500	75,5	5,3	5,1	1,12	2,54	51,4	49,7	6,1	45,3	20,2
	800 - 850	70,2	6,5	4,2	1,01	2,48	59,5	51,3	4,2	55,2	25,0
Teterow Schürf 2	100 - 200	96,0	1,8	6,3	1,64	2,63	37,8	13,0	12,3	25,5	11,2
	350 - 450	63,1	9,0	4,8	0,99	2,42	59,3	60,1	-3,0	62,4	24,6
	800 - 850	72,2	6,1	4,6	1,14	2,51	51,6	48,4	1,6	50,1	20,4
Grimmen Schürf 1	100 - 200	74,4	9,7	2,7	0,88	2,40	63,3	44,0	10,9	52,4	23,0
	400 - 500	66,5	8,9	2,0	0,89	2,42	63,4	55,3	3,3	60,1	28,7
	800	62,2	9,8	2,4	0,88	2,43	63,8	55,2	4,2	59,6	24,5
Grimmen Schürf 2	200 - 250	74,4	11,3	2,6	0,82	2,35	65,0	41,2	7,2	57,8	28,1
	550	58,7	12,8	4,8	0,77	2,32	66,8	59,9	0,8	66,0	24,2
	800	57,1	11,8	4,3	0,83	2,45	66,1	56,9	4,8	65,2	22,9

Die Rekultivierungsschicht bis 200 mm in Teterow ist nicht aus Baggertgut sondern aus Mergel aufgebaut, deshalb die Unterschiede zu den anderen Schichten!



Die relativ geringe Lagerungsdichte führt insbesondere in der Oberbodenschicht (0 - 30 cm) oft zu einem hohen Luftporenvolumen (Luftkapazität) z.T. größer als 10 %. In Verbindung mit der sehr guten Wasserversorgung (sehr hohe nutzbare Feldkapazität) und den ausreichend verfügbaren Nährstoffen sind ausgezeichnete Bedingungen für ein kräftiges Pflanzenwachstum gegeben.

Die Kennzahlen Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität erfüllen die Forderungen der Deponieverordnung, der BQS 7-1 und 7-2 und der GDA-Empfehlungen E 2-31 und E 2-32. Beim Einsatz von aufbereitetem Nassbaggergut (Schlick) in der gesamten Rekultivierungsschichtmächtigkeit, werden 500 - 610 mm FK bzw. 230 - 290 mm nFK je Meter erreicht. Diese Werte wurden auch in den seit mehreren Jahren liegenden Rekultivierungsschichten gemessen!

#### 4.3.5 Simulation des Wasserhaushalts mit HELP

Die DepV fordert den Nachweis der Versickerungsraten. Die Simulation des Wasserhaushaltes erfolgte mit dem Modell HELP 3.90 D.

Diese Simulation wurde auch an den untersuchten Rekultivierungsschichten durchgeführt (Berger 2012). Die Simulationen wurden sowohl mit den Daten der Normalperiode 1961 - 1990 als auch mit den Daten der Jahre 2000 - 2010 durchgeführt. Das Jahrzehnt 2000 - 2010 zeigt deutliche Veränderungen bezüglich der Faktoren, die die Wirksamkeit einer Rekultivierungsschicht besonders herausfordern. Die erste Dekade dieses Jahrhunderts zeigt bei allen Stationen sowohl deutlich höhere Jahresniederschläge (ca. 10%) als auch deutlich höhere Jahresmitteltemperaturen (ca. 1°C).

Tab. 8 Mittlerer jährlicher Wasserhaushalt der Profile (2000 - 2010) (Berger 2012)

Parameter [mm]	TET		M		GR		NIR	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Niederschlag	653,1		620,5		662,4		631,3	
Oberfl.abfluss	7,8	8,1	3,1	3,3	11,7	14,5	2,7	2,5
ETp	665,6		654,0		678,6		753,3	
ETa	478,2	493,9	491,6	486,0	519,6	510,2	558,3	558,7
Versickerung	165,3	148,9	122,2	127,8	122,4	130,7	61,8	61,2
$\Delta W_g$	1,8	2,2	3,5	3,3	8,8	7,0	8,4	8,9
FK	431	464	504	526	576	617	535	495
nFK	169	170	283	282	253	233	290	268

ETa Tatsächliche/reale Verdunstung, ETp Potentielle Verdunstung,  $\Delta W_g$  Änderung des Wasservorrats

Die mittlere jährliche Versickerung aus der Rekultivierungsschicht liegt am Deponiestandort NIR Rostock bei rund 60 mm. Marlow (M) und Grimmen (GR) erreichen mittlere Versickerungen von rund 120 - 130 mm/a. Die höchsten Werte treten in Teterow

6. Praxistagung Deponie 2014 www.wasteconsult.de



(TET) mit rund 150 – 165 mm/a auf. Bei den recht guten Daten für nFK und FK und kaum beobachteten Sickerwasserabläufen, verwundern diese Daten.

„Eine gewisse Unsicherheit ergibt sich aus der offenen Frage, inwieweit sich das Baggergut mit seinem hohen Organikanteil bodenhydrologisch wie Mineralboden verhält, der den Modellierungsansätzen von HELP zugrunde liegt. Ob das Wasserhaltevermögen des Baggerguts besser als in HELP modelliert ist und dadurch die Versickerung von HELP etwas überschätzt wird ist jedoch Spekulation.“ (Berger 2012)

Deutlich zeigen sich aber die positiven Eigenschaften des Baggergutes im Vergleich zu Mergel. Die Rekultivierungsschicht der Deponie TET ist in den oberen ca. 30 cm aus Mergel aufgebaut, die geringere nFK und die höhere Durchsickerung sind aber recht deutlich.

Kritisch zu hinterfragen bleibt allerdings, wie „normale“ Substrate (Bodenarten) die Anforderungen der Deponieverordnung, der BQS 7-1 und 7-2 erfüllen sollen, wenn selbst ein Substrat mit extrem hoher FK und nFK dazu scheinbar nicht in der Lage ist, wenn man die Ergebnisse der HELP-Berechnungen zu Rate zieht.

## 5 Empfehlungen für den Baggerguteinsatz

Prinzipiell ist das gereifte Nassbaggergut für die Nutzung in Deponierekultivierungsschichten geeignet. Die Einordnung laut BQS in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ würde in der Kategorie „B“ erfolgen. Der hohe Anteil Organischer Substanz im Baggergut beeinflusst dessen Eigenschaften bezüglich der hohen nutzbaren Feldkapazität.

Generell sollte das Material nie zu nass in die Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Empfohlen wird ein Wassergehalt, der geringer ist als der optimale Wassergehalt. Für den Einbau können „normale“ Erdbaugeräte (Bagger, Raupen) verwendet werden. Verdichtungsgeräte sollten nicht eingesetzt werden.

Bei der Grasansaat ist eine Herbstansaat vorzuziehen und zu beachten, dass Gräser Lichtkeimer sind.

Die bewachsenen Rekultivierungsschichten sollten jährlich gemäht werden, eine Beweidung ist vorteilhaft.

Nutzungen der Rekultivierungsschicht sind aus bodenmechanischer Sicht ebenso problematisch wie auf anderen Rekultivierungsmaterialien. Die Nutzung als Standort von Photovoltaikanlagen ist bei Berücksichtigung und Einhaltung der sich aus dem BQS 7-4 ergebenden Anforderungen möglich.



## 6 Zusammenfassung

In Mecklenburg-Vorpommern werden seit 15 Jahren Deponien auch mit aufbereitetem Nassbaggergut rekultiviert. Dieses Rekultivierungssubstrat wird bei Baggerungen zur Erhaltung der Gewässertiefen im Rostocker Hafen gewonnen. Anschließend wird das Nassbaggergut in einer Industriellen Absetzanlage im Längsstromverfahren klassiert. Grobe Bestandteile (Kiese und Sande) werden in der Bauindustrie eingesetzt. Die Mischböden gehen in den Landschaftsbau und die organikreichen, schluffig tonigen Substrate werden nach der Entwässerung und Reifung in Rekultivierungsschichten von Deponieabdichtungssystemen eingesetzt. Möglich sind all diese Verwertungsvarianten nur, weil das Rostocker Nassbaggergut nicht mit Schadstoffen belastet ist.

Da die DepV den Nachweis des Wasserspeichervermögens (nutzbare Feldkapazität) für Deponierekultivierungsschichten fordert, wurde auf bereits mit aufbereitetem Nassbaggergut rekultivierten Deponien, dessen Eignung überprüft.

Auf vier Deponien wurden 2 bis 15 Jahre nach der Rekultivierung Messungen der Porenraumverteilung (FK, nFK), der Wasserdurchlässigkeiten, mechanischer Eigenschaften und des Chemismus vorgenommen. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Forderungen der DepV bezüglich der nFK auch viele Jahre nach der Rekultivierung sicher eingehalten werden.

Dem weiteren Einsatz von aufbereitetem Nassbaggergut in Rekultivierungsschichten steht nach entsprechender Prüfung und Einhaltung der sich aus der DepV ergebenden deponierechtlichen und technischen Anforderungen nichts im Weg.

## LITERATUR

- |        |      |   |
|--------|------|---|
| Anonym | 2011 | Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1 "Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen" vom 23.05.2011  |
| Anonym | 2011 | Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-2 "Wasserhaushaltsschichten in Deponieoberflächenabdichtungen" vom 20.10.2011   |
| Anonym | 2012 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27.04.2009, BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 |



- |                                      |      |   |
|--------------------------------------|------|---|
| Berger, K.                           | 2012 | Simulation des Wasserhaushalts mit HELP 3.90 D für vier Deponiestandorte in Mecklenburg-Vorpommern. Berechnungen an der Universität Hamburg; Gutachten vom 13.04.2012, unveröffentlicht |
| Deutsche Gesellschaft für Geotechnik | 2006 | GDA-Empfehlung E2-31 Rekultivierungsschichten; <a href="http://www.gdaonline.de/pdf/E2-31.pdf">http://www.gdaonline.de/pdf/E2-31.pdf</a>  |
| Deutsche Gesellschaft für Geotechnik | 2010 | GDA-Empfehlung E2-32 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien; <a href="http://www.gdaonline.de/pdf/E2-32.pdf">http://www.gdaonline.de/pdf/E2-32.pdf</a>                             |

Dr. Gert Morscheck; Prof. Dr. mont. Michael Nelles

Universität Rostock; Lehrstuhl Abfall- und Stoffstromwirtschaft

18051 Rostock

Telefon +49 381 498 3401

Email [asw@uni-rostock.de](mailto:asw@uni-rostock.de)

Dr. agr. Michael Henneberg

Steinbeis Transferzentrum (STZ) Angewandte Landschaftsplanung Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6

18059 Rostock

Telefon +49 381 498 3246

Email [michael.henneberg@uni-rostock.de](mailto:michael.henneberg@uni-rostock.de)



# Rekultivierung von Deponien mithilfe von Abwasserschlammmhumus zum Anbau von Energiepflanzen

S. Knorre, S. Bernsdorf und R. Meissner

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

## 1 Einleitung und Zielstellung

Zur Schaffung einer begrünungsfähigen Schicht im Landschaftsbau sind Materialien mit hohem Wasserspeichervermögen und guter Nährstoffverfügbarkeit notwendig. Das zur Verfügung stehende Bodenmaterial von anthropogen stark beanspruchten Flächen (Tagebaurestlöcher, Halden, Deponien) bestehen in der Regel aus Mineralböden, welche eine geringe Wasserhaltefähigkeit und geringe Nährstoffverfügbarkeit aufweisen. Zur Rekultivierung diese Böden und Sicherung eines nachhaltigen Pflanzenwachstums sind vor allem die oben genannten Eigenschaften zu verbessern.

Auf Deponien ist der Aufbau einer funktionsfähigen begrünten Wasserhaushaltsschicht zur Reduzierung der Sickerwassermenge wichtig. Allerdings stehen zur Herstellung einer funktionierenden Wasserhaushaltsschicht nicht genügend große Mengen an Mineraloberboden mit den oben genannten Eigenschaften zur Verfügung. Hier kann der Einsatz von Abwasserschlammmhumus (ASH) sowohl die Wasserhaltefähigkeit als auch die Nährstoffverfügbarkeit des zur Verfügung stehenden Mineralbodens erhöhen.

Bisher gemachte Untersuchungen zum Einsatz von Abwasserschlammmhumus als Rekultivierungsmaterial beim Aufbau von Wasserhaushaltsschichten befassten sich mit dem Bodenwasser- und Stoffhaushalt pflanzlicher Biomasse (TAUCHNITZ, 2006; BERNSDORF et al., 2008). In Fortsetzung bisheriger Forschungsarbeiten zur Begrünung von Halden, Deponien und Rekultivierungsflächen mit Hilfe von Abwasserschlammmhumus wurde auf der Deponie Erfurt-Schwerborn 2013 ein Versuch angelegt. Dabei wurden Varianten mit differenzierten Anteilen an Abwasserschlammmhumus geprüft. Zur Anwendung kamen unterschiedliche Fruchtarten, die sich aus energetischer Sicht eignen, aber auch die Funktionen des Landschaftsbaus erfüllen. Neben Abwasserschlammmhumus wurde auch vergleichend der Einsatz von Grünschnittkompost (GSK) untersucht. Durch den Einsatz von ASH in der Rekultivierung wird auch Phosphor, welcher als Makronährstoff für das Pflanzenwachstum wichtig ist, ohne großen Energieaufwand zurückgewonnen.





Untersuchungen von TAUCHNITZ (2006) zeigten, dass die chemischen und physikalischen Eigenschaften von ASH als Mischung mit dem mineralischen Bodenmaterial sowohl die Wasserspeicherfähigkeit als auch die Nährstoffverfügbarkeit steigern und somit das Pflanzenwachstum positiv beeinflussen. Eine weitere Folge der gesteigerten Biomasseproduktion ist eine Reduzierung der Sickerwassermengen. Der verwendete Abwasserschlammmhumus erfüllt alle gesetzlichen Anforderungen als Rekultivierungsmaterial im Hinblick auf die enthaltenen Schwermetalle. Durch die Kompostierung von Klärschlamm gemeinsam mit Grünschnitt zu Abwasserschlammmhumus findet auch gleichzeitig eine Hygienisierung statt, eine wesentliche Forderung für die stoffliche Verwertung.

Nach LIEMEN (2013) haben die durch die Pflanzenbiomasse aufgenommenen Schwermetalle aus dem Boden keine negativen Auswirkungen auf den Biogasprozess im Fermenter. Hierbei wurden einjährige ackerbaulich genutzte Kulturen geprüft. Jedoch weisen einige angebaute Kulturarten trotz Luxuskonsums an pflanzenverfügbaren Makronährstoffen im Boden einen leichten Mangel auf. Deshalb soll das Anbausystem diesbezüglich weiter überprüft und ggf. durch zusätzliche Düngung optimiert werden. Da bei einjährigen Kulturen nach der Ernte bis zur Aussaat meist keine Bodenbedeckung in Form von Biomasse vorhanden ist, kommt es je nach Niederschlagsverteilung zu erheblichen Bodenerosionen, welche die Funktionalität der Wasserhaushaltsschicht negativ beeinflussen. Auch sind Raumkulturen wie Mais oder Hirse aufgrund der hohen Reihenabstände von 75 cm noch bis weit in Ihre Jugendentwicklung bei Starkniederschlägen erosionsgefährdet. Um die Erosionsgefahr zu mindern, wird im aktuellen Forschungsvorhaben der Anbau von mehrjährigen bodenbedeckenden Kulturen untersucht.

Der Versuch wurde im Frühjahr 2013 begonnen. Untersuchungsparameter beziehen sich auf das Rekultivierungsmaterial (Boden, Abwasserschlammmhumus, Grünschnittkompost) nach den gesetzlichen Vorgaben sowie auf das Sickerwasser und auf die pflanzliche Biomasse (Inhaltsstoffe, TM-Ertrag, Methanertrag). Mit Hilfe von Sickerwassersammlern wird das anfallende Sickerwasser erfasst.

Erste Ergebnisse des Projektes aus dem Jahr 2013 und 2014 werden vorgestellt und die Versuchsmethodik auf der Deponie Erfurt-Schwerborn dargelegt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen soll dabei auf Verfahrenstechnik, ökonomische und ökologische Aspekte gelegt werden, mit dem Ziel, die bisherigen Erkenntnisse zu vertiefen und ganzheitlich in Form von Bilanzen (Phosphor) zu betrachten.



## 2 Material und Methode

Auf dem 1. Erweiterungsabschnitt der Deponie Erfurt-Schwerborn wurde auf 5040 m<sup>2</sup> eine Versuchsfläche angelegt. Ab April 2013 wurde ein Mineralboden (MB) mit 110 cm Mächtigkeit auf der gesamten Versuchsfläche am Rande des oberen Plateaus aufgebracht. Bei der Versuchsanlage handelt es sich um eine zweifaktorielle Spaltanlage mit vier Wiederholungen. Ab Ende Mai wurden Abwasserschlammmhumus (ASH) oder Grünschnitt-kompost (GSK) mit einem Radlader aufgetragen und zweimalig (längs und quer zum Hang) mit einer Umkehrfräse ca. 30 cm tief eingearbeitet. Es wurden dabei folgende Mischungsverhältnisse an ASH bzw. GSK mit dem Mineralboden aufgebaut: 0 Vol. %, 15 Vol. % ASH, 30 Vol. % ASH, 30 Vol. % GSK. Somit ergaben sich vier Varianten mit je vier Wiederholungen. Zu den angebauten Dauerkulturen gehörten: Durchwachsene Silphie, Szarvasigras, mehrjährige Blümmischung, Energiegrasmischung. Als Referenzpflanzen für die Biogaserzeugung wurde zusätzlich noch die einjährige Kultur Mais, sowohl in Hauptfruchtstellung, als auch in Zweitfruchtstellung nach Grünschnittroggen angebaut.

TABELLE 1: Ausgewählte chemische Eigenschaften des Kultursubstrates  
– Nährstoffgehalte

Parameter	Einheit	0 Vol. %	15 Vol. %	30 Vol. %	30 Vol. %
		ASH	ASH	ASH	GSK
pH-Wert		7,8	7,9	7,9	7,9
Leitfähigkeit	µS/cm	615	470	570	620
DOC	mg/l	32	27	26	42
N <sub>t</sub>	%	0,15	0,30	0,40	0,60
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	0,2	0,02	0,3	0,5
NO <sub>3</sub> -N	mg/l	1,4	0,6	9,0	8,9
C <sub>t</sub>	%	5,1	6,0	8,0	8,9
C/N		34,0	20,0	20,0	14,8
P <sub>t</sub>	mg/100g	84	92	260	270
K <sub>t</sub>	mg/100g	570	520	410	400
N <sub>t</sub> Aufgebracht	kg/ha	0	2258	4517	3805
P <sub>t</sub> Aufgebracht	kg/ha	0	3089	6178	684
K <sub>t</sub> Aufgebracht	kg/ha	0	588	1176	3649



In TABELLE 1 sind ausgewählte chemische Eigenschaften des Kultursubstrates der auf-gebrachten ASH- und GSK-Varianten dargestellt. Der Gesamtstickstoffgehalt ( $N_t$ ) steigt mit zunehmender Menge an ASH bzw. GSK von 2258 kg/ha auf 4517 kg/ha bzw. 3805 kg/ha an. Auch die mit den Komposten aufgebrachten Mengen an Gesamtphosphor ( $P_t$ ) und Gesamtkalium ( $K_t$ ) stiegen mit zunehmenden Kompostmengen an. Allerdings lag der Hauptteil des  $N_t$  in organisch gebundener Form vor.

TABELLE 2: Ausgewählte chemische Eigenschaften des Kultursubstrates - Schadstoffgehalte

Parameter	Einheit	0 Vol. %	15 Vol. %	30 Vol. %	30 Vol. %	Grenz- wert
		ASH	ASH	ASH	GSK	
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	44	25	46	56	140
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	45	30	40	58	120
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	0,2	0,2	0,5	0,5	1
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	36	26	32	42	100
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	100	95	260	255	300
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	0,1	0,1	0,2	0,2	1
<b>Summe PAK</b>	<b>µg/kg</b>	2073	3365	2113	2159	5000
<b>Summe PCB 6</b>	<b>µg/kg</b>	11	7,3	22	27	100

TABELLE 2 zeigt die Schadstoffgehalte der vier Bodenvarianten und den dazugehörigen Grenzwert der in der Deponieverordnung für Rekultivierungsschichten. Die Analysewerte zeigen keine Überschreitung der Grenzwerte, jedoch ist schon in der Nullvariante eine gesteigerte Grundbelastung des Bodens erkennbar.

TABELLE 3: Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts (n=4)

Parameter	Einheit	0 Vol. %	15 Vol. %	30 Vol. %	30 Vol. %
		ASH	ASH	ASH	GSK
<b>FK</b>	<b>Vol. %</b>	30,6	37,8	42,5	38,6
<b>PWP</b>	<b>Vol. %</b>	15,0	14,1	14,3	11,8
<b>nFK</b>	<b>Vol. %</b>	15,6	23,7	28,2	26,8



In TABELLE 3 werden die Kenngrößen des Wasserhaushalts aufgezeigt. Dabei war zu erkennen, dass mit zunehmendem Anteil Kompost die Feldkapazität (FK) und die nutzbare Feldkapazität (nFK) stiegen.

Abwasserschlammmhumus wurde durch aerobe Kompostierung von gleichen Volumenanteilen Klärschlamm (kommunaler Herkunft, anaerob behandelt) mit Strukturmaterial (Grünschnitt, Rinde, Holz) bis zu den Rottegraden IV und V gewonnen (LIEMEN 2013).

### 3 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Trockenmasseerträge, Methanausbeuten und Methanerträge aus der Dissertation LIEMEN (2013) aus Versuchen auf der Kalirückstandshalde Sondershausen aus dem Jahr 2008 dargestellt. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Trockenmasseerträge der Erntejahre 2013 und 2014 der Deponie Erfurt-Schwerborn.

TABELLE 4: Trockenmasseerträge ausgewählter Pflanzenarten bei 100 cm Mächtigkeit des Kultursubstrates (LIEMEN 2013)

Zumischung ASH [Vol. %]	Roggen	Weizen	Sudangras	Mais	Raps
	[t/ha]				
<b>0 ASH</b>	1,5 ± 0,3	4,2 ± 2,1	0,8 ± 0,3	1,4 ± 0,5	n.b.
<b>50 ASH</b>	10,8 ± 2,0	15,1 ± 1,7	10,8 ± 1,6	9,9 ± 6,7	7,4 ± 1,1
<b>75 ASH</b>	8,1 ± 0,9	16,7 ± 1,6	13,5 ± 2,0	20,3 ± 8,9	8,1 ± 0,8

In TABELLE 4 sind die Trockenmasseerträge ausgewählter Pflanzenarten bei 100 cm Mächtigkeit des Kultursubstrates dargestellt. Für alle Kulturen außer Roggen war mit zunehmendem Gehalt an ASH (Vol. %) ein Ertragszuwachs zu verzeichnen. Lediglich beim Roggen fiel der Ertrag von 10,8 t/ha (50 Vol.%) auf 8,1 t/ha (75 Vol. %) ab. Alle Kulturen zeigten einen deutlichen Anstieg der Trockenmasseerträge bei Zumischung von ASH (50 Vol. %) im Vergleich zur Nullvariante.



TABELLE 5: Methanausbeute ausgewählter Pflanzenarten bei 100 cm Mächtigkeit des Kultursubstrates (LIEMEN 2013)

Zumischung ASH [Vol. %]	Roggen	Weizen	Sudangras [l/kg oTS]	Mais	Raps
<b>50 ASH</b>	244	265	226	296	241
<b>75 ASH</b>	244	254	224	283	244

Die in TABELLE 5 dargestellten Methanausbeuten zeigten innerhalb einer Pflanzenart kaum Unterschiede zwischen den Zumischungsvarianten an ASH. Auch unterschieden sich die Pflanzenarten untereinander nur gering im Hinblick auf ihre Methanausbeute.

TABELLE 6: Methanerträge ausgewählter Pflanzenarten bei 100 cm Mächtigkeit des Kultursubstrates (LIEMEN 2013)

Zumischung ASH [Vol. %]	Roggen	Weizen	Sudangras [m <sup>3</sup> /ha*a]	Mais	Raps
<b>50 ASH</b>	2272	3753	2208	3510	1592
<b>75 ASH</b>	2032	3935	2733	5291	1765

TABELLE 6 stellt die unterschiedlichen Methanerträge der Pflanzenarten in Abhängigkeit der Zumischung an ASH im Kultursubstrat dar. Da sich die Methanausbeuten (vgl. TABELLE 5) nur geringfügig unterschieden, ist der Unterschied in den Methanerträgen hauptsächlich auf die unterschiedlich hohen Trockenmasseerträge (vgl. TABELLE 4) zurückzuführen.

Erste Ergebnisse der Ertragsmessung der Ernten 2013/14 auf der Deponie Erfurt-Schwerborn wurden in TABELLE 7 dargestellt. Die Trockenmasseerträge der 1. Ernte der mehrjährigen Blühmischung 2013 zeigten einen Anstieg von der Nullvariante zur 15 Vol. % ASH-Variante. Mit Zunahme des ASH- bzw. GSK-Anteils nahm der Ertrag wieder ab. Die Ursache ist einerseits den geringen Niederschlägen im Juli/August 2013, andererseits in den hohen Salzgehalten der Kultursubstrate (vgl. TABELLE 1) zu suchen. Durch den hohen Salzgehalt, vor allem in der 30 Vol. % GSK-Variante ist der Anteil sowie die Masse an Sonnenblumen (Hauptertragsbildner im 1. Erntejahr) stark reduziert. Anzu-



merken hierbei ist jedoch noch, dass die mehrjährige Blütmischung in jeder Parzelle eine unterschiedliche Artenzusammensetzung (%) aufwies. Auch für die anderen Kulturen zeigte sich ein Anstieg der Trockenmasseerträge mit Zunahme der Menge an eingesetztem Kompost. Die Energiegrasmischung, Szarvasigras sowie der Mais (HF und ZF) zeigen bei 30 Vol. % ASH ihren höchsten Trockenmasseertrag. Bei Silphie, der mehrjährigen Blütmischung und dem Grünschnittroggen führt eine Erhöhung der ASH-Menge von 15 Vol. % auf 30 Vol. % nicht zu einer Steigerung der TM-Erträge. Die TM-Erträge auf den Parzellen mit Grünschnittkompost liegen meist zwischen den beiden ASH-Varianten. Lediglich der 2. Schnitt vom Energiegras liegt darüber.

TABELLE 7: Trockenmasseerträge der angebauten Kulturpflanzen in Abhängigkeit des Kultursubstrates (n=4)

Kultur	0 Vol. %	15 Vol. %	30 Vol. %	30 Vol. %
	ASH	ASH	ASH	GSK
	[t/ha]			
mehrjährige Blütmischung `13	0,87 ± 0,14	2,09 ± 0,65	1,89 ± 0,61	0,70 ± 0,27
Grünschnittroggen `14	0,07 ± 0,14	0,75 ± 1,50	0,46 ± 0,91	0,60 ± 1,19
Energiegras 1. Schnitt `14	1,75 ± 0,92	3,44 ± 0,79	3,66 ± 0,81	3,30 ± 1,05
Szarvasigras 1. Schnitt `14	3,06 ± 1,04	6,72 ± 1,20	7,26 ± 1,10	6,46 ± 1,51
mehrjährige Blütmischung `14	4,08 ± 1,04	6,08 ± 0,90	5,78 ± 1,49	5,33 ± 1,55
Energiegras 2. Schnitt `14	2,79 ± 0,99	2,85 ± 0,23	2,80 ± 0,71	2,94 ± 0,73
Mais (HF) `14	4,02 ± 0,85	6,53 ± 1,33	11,11 ± 1,86	6,99 ± 0,59
Mais (ZF) `14	2,97 ± 0,44	7,41 ± 1,07	7,60 ± 1,29	7,43 ± 1,08
Silphie `14	0,68 ± 0,10	2,46 ± 0,78	1,98 ± 0,27	1,29 ± 0,36

## 4 Zusammenfassung

Der Einsatz von Klärschlammkompost als Rekultivierungsmaterial zeigt eine positive Wirkung auf das Pflanzenwachstum. Durch dessen Einsatz als Mischung mit vorhandenem Mineralboden wird sowohl die Wasserspeicherefähigkeit der Böden, als auch die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen verbessert, was sich in höheren Biomasseerträgen zeigt. Die Sickerwassermengen können dadurch reduziert werden (TAUCHNITZ





2006; LIEMEN 2013). Auch lässt sich durch die Verwendung von Klärschlammkompost ein Phosphoreservoir im Boden schaffen.

In fortführenden Untersuchungen soll neben den ökonomischen und ökologischen Aspekten auch eine ganzheitliche Bilanzierung der Nährstoffe (vor allem Phosphor) im Kreislauf betrachtet werden.

---

Gefördert wird dieses Projekt vom Land Thüringen, der Gemes Abfallentsorgung und Recycling GmbH in Schöngleina und der SWE Stadtwirtschaft GmbH / B&R Bioverwertung und Recycling GmbH in Erfurt.

## 5 Literatur

- |   |      |  |
|---|------|--|
| BBodSchV  | 2009 | Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 36. 1554-1582.  |
| Bernsdorf, S., S. Tauchnitz, F. Liemen und R. Meißner                         | 2008 | Eignung von Klärschlammkompost als Rekultivierungsmaterial im Landschaftsbau. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 55. 1323-1328.                                      |
| BioAbfV   | 1998 | Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Bundesgesetzblatt Teil 1. Nr. 65. 2955-2981. |
| DepV  | 2009 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 22. 900-950.   |
| Liemen, F.  | 2013 | Eignung von Klärschlammkompost als Rekultivierungsmaterial zum Anbau von Energiepflanzen. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.                      |
| Tauchnitz, S.   | 2006 | Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Stickstoffumsatz von Rekultivierungsschichten aus Klärschlammkomposten. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.  |
| Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten | 1991 | Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage. Darmstadt: VDLUFA-Verlag.   |

**Anschrift der Verfasser**

M. Sc. Stephan Knorre  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften  
Julius-Kühn-Straße 23  
D-06112 Halle (Saale)  
Telefon +49 345 55 22 767  
Mobil +49 176 620 76 981  
Email [stephan.knorre@landw.uni-halle.de](mailto:stephan.knorre@landw.uni-halle.de)



# Landfill Mining - Nassmechanische Aufbereitung von Feinmaterial

**Sebastian Wanka, Klaus Fricke, Kai Münnich**

Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß- Institut für Wasserbau,  
Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft

## Zusammenfassung

Der Rückbau von Deponien kann unter verschiedenen Aspekten erfolgen. Bisher durchgeführte Rückbaumaßnahmen resultierten vorrangig aus umweltrelevanten Aspekten oder vor dem Hintergrund, die Nutzungsdauer bestehender Deponieflächen zu verlängern. Ein weiterer Aspekt, welcher mehr und mehr an Bedeutung gewinnt, ist die Betrachtung der Deponiekörper als Lagerstätte für Sekundärrohstoffe. Die technische Umsetzung von Deponierückbaumaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Rohstoffgewinnung und der Erzeugung von vermarktungsfähigen Produkten ist abhängig von der Quantität und Qualität der in dem Deponiekörper eingebauten Stoffe. Prognosen zu erzielbaren Produktqualitäten oder auch zu geeigneten Aufbereitungsverfahren sind aufgrund mangelnden Wissensstandes kaum möglich, dies gilt insbesondere für das Feinmaterial aus welchem das Deponat hauptsächlich besteht. Das im Jahr 2012 begonnene BMBF Forschungsvorhaben soll Erkenntnisse zu erzielbaren Produktqualitäten und geeigneten Aufbereitungstechniken unter Einbeziehung ökonomischer und ökologischer Aspekte liefern bzw. erweitern. Die Ergebnisse des Vorhabens werden in Form eines Leitfadens den Fachleuten aus Praxis und Verwaltung zur Verfügung gestellt.

## Stichworte

Landfill Mining, Deponierückbau, Feinmaterial, Ressourcenpotential, Nassmechanische Aufbereitung, Mineralische Fraktion, Heizwertreiche Fraktion, Nachsorge, Leitfaden

## 1 Ansatz

Bei dem Deponierückbauprojekt handelt es sich um ein BMBF- Forschungsvorhaben, dessen Ziel eine ganzheitliche Untersuchung und Entwicklung eines Konzeptes zum Rückbau bestehender Siedlungsabfall- und Schlackedeponien sowie eine weitestgehende Nutzung der darin enthaltenen Ressourcen ist. Neben der Betrachtung der in den Deponien enthaltenen Ressourcenpotentiale sollen ökonomisch-ökologische Gesamtkonzepte zur Gewinnung und Nutzung entwickelt werden. Dem Leichtweiß- Institut, Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft, der TU Braunschweig kommt dabei unter anderem die Aufgabe zu, die Feinfraktion < 60 mm des rückgebauten Deponats hinsichtlich Ressourcenpotential und geeigneten Aufbereitungsverfahren zu untersuchen. Da das Deponat gemäß seiner Zusammensetzung ein trennschwieriges Gemisch dar-



stellt, ist es durch rein mechanische und/oder biologische Behandlungsverfahren nicht möglich, wesentliche Anteile der mineralischen Feinfraktion aus dem Deponat abzutrennen. Aus diesem Grund soll gezielt der Ansatz der nassmechanischen Aufbereitung des Deponats verfolgt werden. Dieses Verfahrensprinzip beruht auf einer Dichtentrennung des Stoffstromes, so dass neben dem mineralischen Stoffstrom, nachfolgend als Schwergut bezeichnet, auch ein Leichtgut erzeugt wird. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf der Abtrennung mineralischer Bestandteile. Unter der mineralischen Feinfraktion ist im allgemeinen Bauschutt, aber auch Metall, Glas und Keramik zu verstehen, welche im Siedlungsrestabfall im Wertebereich von 20 – 40 M.-% vorliegen (Turk T. et al., 1996). Beide Stoffströme sollen dabei möglichst einer Verwertung zugeführt werden. So sollen neben dem Stoffaufschluss und der Stoffstromtrennung, mit Hilfe des im Aufbereitungsprozess eingesetzten Wassers, Produktqualitäten für die gewonnene mineralische Fraktion erzeugt werden, welche z.B. den Zuordnungswerten Z 2 der LAGA (2003) entsprechen und damit einen Einsatz als Bau- oder Zuschlagstoffe ermöglichen. Die erfolgreiche Abtrennung der mineralischen Feinfraktion bzw. der Leichtfraktion kann einerseits Ressourcen schonen und andererseits zu einer Einsparung von Deponievolumen bei der Wiederablagerung nicht zu vermeidender Reststoffe führen bzw. auch die Nachsorgekosten minimieren.

## 2 Material

Das Probenmaterial für die Versuchsdurchführungen zur nassmechanischen Aufbereitung im halbtechnischen Maßstab stammt aus der Deponie des Entsorgungszentrums Pohlsche Heide im Kreis Minden-Lübbecke. Bei der Deponie handelt es sich um eine Haus- und Gewerbeabfalldeponie, die im Zeitraum von 1989 bis 2005 betrieben wurde. Bei den verarbeiteten Proben handelt es sich um Mischproben aus verschiedenen Schürfen. Die Aufbereitung des gesamten ausgebaggerten Deponats erfolgt mit konventionellen Aufbereitungstechniken (Zerkleinerer und Siebung < 60 mm), die in der Abfallwirtschaft bereits Stand der Technik sind. Für die nassmechanische Aufbereitung wurde Deponat in den Korngrößen < 60 mm, < 25 mm und 10 – 60 mm untersucht, welches direkt auf der Deponie abgesiebt wurde. Die Konfektionierung und Weiterverarbeitung des Grobgutes wird im Rahmen des Forschungsprojektes getrennt betrachtet. In der Abbildung 1 sind die Sieblinien des Deponates im Originalzustand aus 2 verschiedenen Schürfen, bezeichnet mit K1 und K2, dargestellt. Der erste Siebschnitt erfolgte dabei bei 140 mm. Der Anteil der Feinfraktion < 60 mm beträgt dabei ca. 60 – 70 M. % und bei der Fraktion < 25 mm etwa 50 M. % des Gesamtmaterials. Diese Ergebnisse decken sich mit Werten aus weiteren Untersuchungen zum Rückbau von Siedlungsabfalldeponien (DWA, 2012; VAN VOSSEN, 2011)

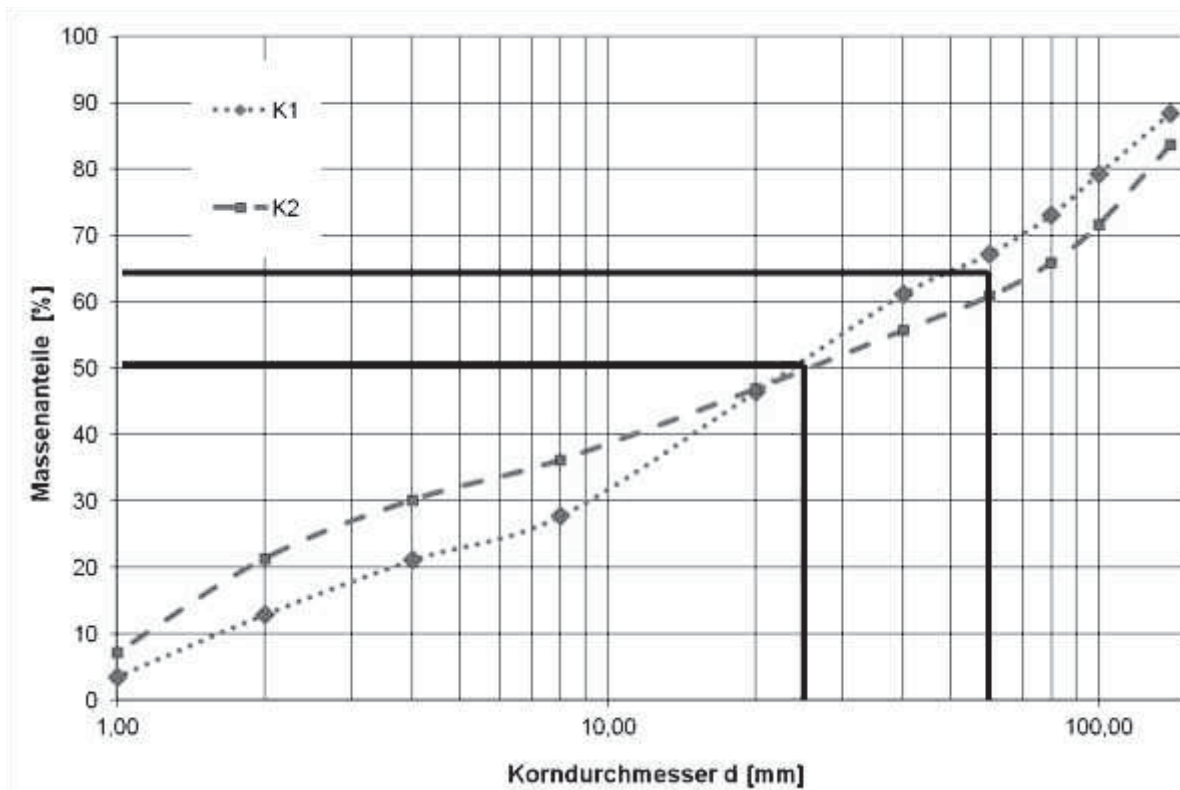


Abbildung 1: Sieblinien des Deponats

Anhand der Sieblinien wird deutlich, welchen hohen Anteil die Feinfraktion am Gesamtdeponat einnimmt. Informationen zur Aufbereitung dieser Feinfraktion mit bis dato in der Abfallwirtschaft eingesetzten Technik sind kaum vorhanden. Oft werden diese Feinfraktionen ohne weitere Behandlung wieder abgelagert (Umweltbundesamt, 2011). Werden Deponierückbaumaßnahmen vor dem Hintergrund betrachtet, möglichst hohe Ausbeuten von Wertstoffen zu erreichen bzw. den Anteil des wieder zu deponierenden Materials auf ein Minimum zu senken, so sind Untersuchungen notwendig, welche Verfahrenstechnik für eine Aufbereitung dieser Feinfraktion geeignet ist, bzw. welche Qualitäten damit erzeugt werden können.

### 3 Wertstoffpotentiale im Feinmaterial

Eine Aufbereitung der Feinfraktion kommt nur dann in Betracht, wenn diese entsprechende Wertstoffpotentiale in sich birgt. Um die stoffliche Zusammensetzung des Feinmaterials einschätzen zu können, kann zunächst anhand von Literaturwerten die Deponiegutzusammensetzung herangezogen werden. Als Beispiel können die Daten der Kreismülldeponie Hechingen, die mit nicht vorbehandelten Abfällen im Zeitraum zwischen 1982 und 2005 verfüllt wurde, verwendet werden (Gäth et al., 2011). Der Anteil an Feinmaterial < 35 mm ist mit ca. 60 % des gesamten Deponiegutes in der gleichen Größenordnung wie auf der Deponie Pohlsche Heide. Die Zusammensetzung des Materials < 35 mm ist in der Abbildung 2 dargestellt. Den größten macht die Fraktion < 5



mm mit 64,7 M. % aus. In der Fraktion 5 – 35 mm liegt der Anteil der heizwertreichen Fraktionen bei etwa 15,1 M. % und der Anteil mineralischer Stoffe bei etwa 13,3 M. %.

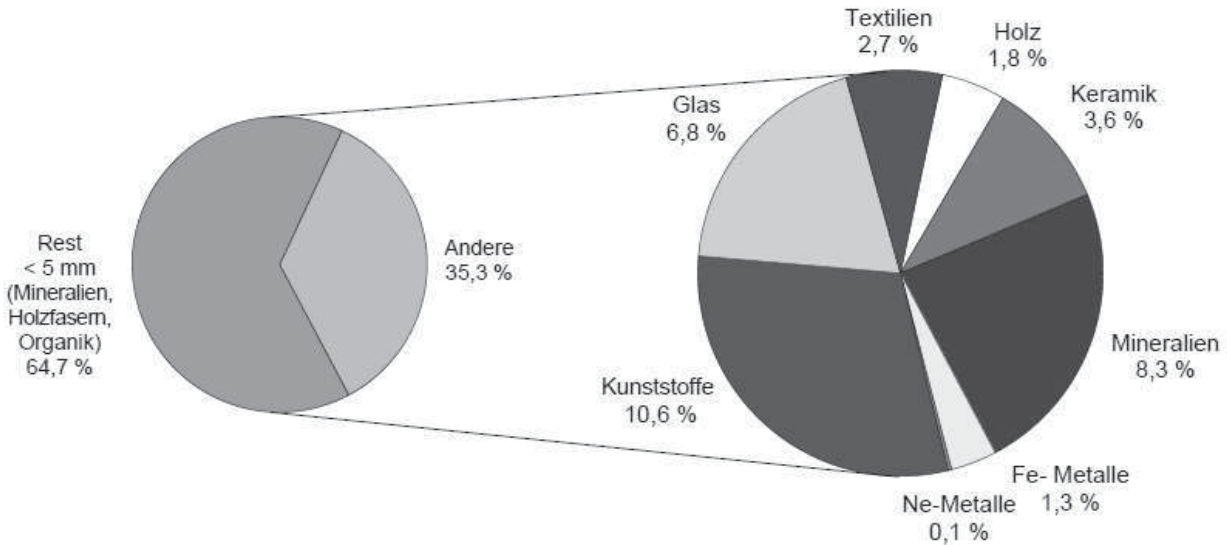


Abbildung 2: Deponiegutzusammensetzung der Fraktion < 35 mm der Deponie Hechingen (Gäth et al., 2011)

Die Abschätzung der Wertstoffpotentiale des zu behandelnden Deponates < 60 mm erfolgt mittels Sortieranalysen bis 20 mm. Der Anteil der mineralischen Bestandteile wurde in erster Abschätzung über den Glühverlust bestimmt. So liegen die ermittelten Glühverluste der Fraktion < 60 mm in einem Bereich zwischen 8,5 M. % und 33,3 M. %. Der mineralische Anteil dieser Fraktion beträgt somit mindestens 2/3 der Gesamtmasse.

Der Gesamtgehalt an heizwertreichen Bestandteilen im Deponat liegt gemäß Sortieranalysen bei etwa 30 M. %, wobei sich ca. 20 % der heizwertreichen Fraktion im Partikelgrößenbereich von 20 – 60 mm befinden. Hinsichtlich der relativ hohen Anteile an mineralischen Bestandteilen als auch der heizwertreichen Komponenten scheint eine Aufbereitung des Feingutes in diesem Fall sinnvoll.

Tabelle 1: Verteilung heizwertreicher Fraktionen im Deponat

	Heizwertreiche Fraktion [Ma.-%]			Anteil 20 - 60 mm [%]
	(20 - 60 mm) [M. %]	> 60 mm [M. %]	Gesamtgehalt [M. %]	
K 1	6,51	21,19	27,70	23,52
K 2	5,83	26,20	32,03	18,20





## 4 Aufbereitungskonzept

Die Verfahren der nassmechanischen Aufbereitung finden vor allem bei der Erz-, Sand- und Kiesgewinnung Verwendung. Zunehmend wird diese Technik aber auch im Rahmen des Recyclings eingesetzt, wie zum Beispiel in der Stahlschrott- oder Baustoffaufbereitung (Schubert, 1996), wo bei letzterem Verunreinigungen wie bspw. Lehm, Papier, Humusstoffe oder Kunststoffe durch einen Waschvorgang aus dem trennschwierigen Ausgangsstoff abgetrennt werden können. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Bodenwäsche zur Abreicherung von Schadstoffen dar (Handbuch Bodenwäsche, 1993). Anhand des Forschungsvorhabens soll untersucht werden, in wieweit die Setzbetttechnik zur Aufbereitung von Deponat angewendet werden kann. Gewählt wurde hierbei das Verfahren der Setzbetttechnik, da dieses aufgrund seiner Einfachheit und Robustheit am besten für diese anspruchsvolle Aufgabe geeignet erscheint.

Die Stoffstromtrennung mittels Nasssetzmaschine basiert auf einer Dichtentrennung. Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 3 dargestellt. Zunächst gelangt das Material über einen Aufgabetrichter in das Setzfass bzw. auf den Setzbetträger, welcher aus einem Siebbelag mit Spaltöffnungen besteht. Das Schüttgut wird an dieser Stelle von dem Waschwasser vertikal von unten durchströmt und aufgelockert. Auf dem Setzbetträger bildet sich das Setzbett aus, welches aus Material mit spezifisch höherer Dichte, dem Schwergut, besteht. Leichtere Bestandteile ordnen sich aufgrund des vertikalen Impulses und der niedrigeren Dichte oberhalb des Setzbettes an und werden anschließend mit dem Waschwasser aus dem Setzfass befördert. Der Materialtransport des Setzbettes erfolgt aufgrund der Neigung des Setzbetträgers und der Hubarbeit. Das Schwergut wird über eine Zellenrad-Schleuse aus dem Setzfass ausgetragen. Der Austrag des Schwergutes erfolgt dabei wahlweise sensorgesteuert oder manuell. Über eine Schwimmer-Abtastung kann die Höhe des Setzbettes erfasst werden und der Austrag in Abhängigkeit der Setzbethöhe gesteuert werden. Zusätzlich in den Waschwasserkreislauf integriert ist ein Hydrozyklon. Dieser ermöglicht das Abscheiden feiner, vorwiegend mineralischer Bestandteile, welche über das Sieb im Setzbettfass (Siebdurchgang 2 mm) oder während der Entwässerung der Stoffströme auf den Entwässerungssieben (Siebdurchgang 2 mm) in das Waschwasser gelangen. Das über den Zyklon aufbereitete Waschwasser wird anschließend wieder dem Waschwasserkreislauf zugeführt. Insgesamt lassen sich die Vorgänge innerhalb der Nasssetzmaschine folgendermaßen untergliedern (Magin, 1997).

- Auflockern des Setzbettes,
- Sortieren der Partikel nach der Dichte während der Sedimentationsphase,
- Transport,



- Austrag der Stoffströme.

Die vertikale Bewegung des Waschwassers innerhalb der Setzmaschine erfolgt über Hubmembranen, wobei die Hubfrequenz der Maschine als auch die Amplitude des Setzimpulses regelbar ist. Bei der Festlegung dieser beiden Parameter ist zu beachten, je größer das Aufgabegut ist, desto größer muss die Setzbetthöhe sein. Weiterhin gilt, dass für das Setzen von Grobkorn längere Hübe und geringere Hubzahlen als beim Setzen von Feinkorn zu wählen sind (Schubert, 1996).

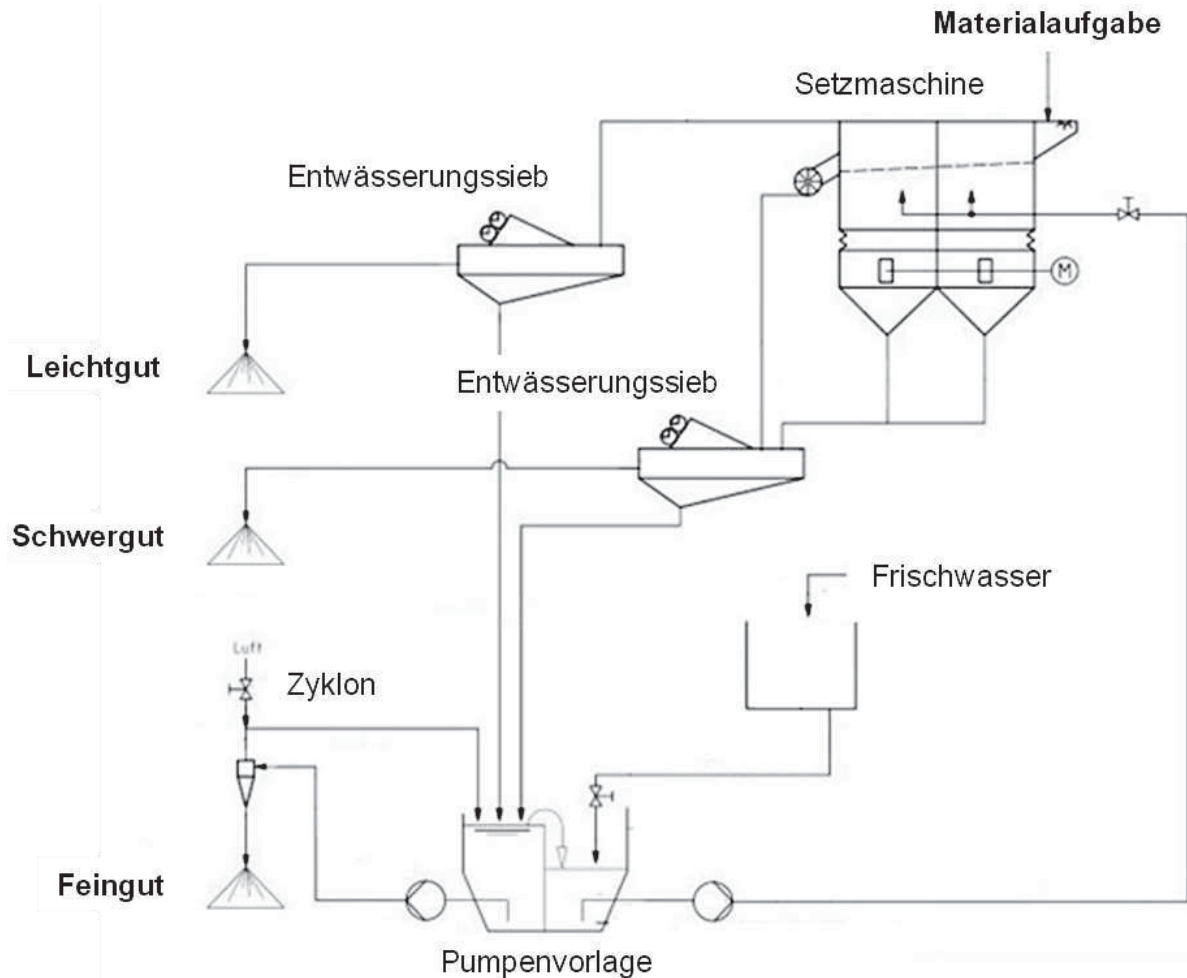


Abbildung 3: Verfahrensfliessbild zur Nassmechanischen Aufbereitung von Deponat mittels Nassetzmaschine Triple A

Der Hub, die Hubfrequenz, das Setzhub-Diagramm als auch der Unterwasserstrom beeinflussen die Schichtung nach der Korngröße (Schubert, 1996). Weiterhin begünstigt der Unterwasserzusatz die Auflockerung des Materials. Für die Festlegung dieser Maschinenparameter gibt es einige Empfehlungen aus der Literatur. Der Hub beispielsweise ist anhängig von der Setzbetthöhe, welche wiederum mindestens dem dreifachen der oberen Korngröße entsprechen sollte. Die Hubzahl ist anschließend in Abhängigkeit vom Hub und dem Unterwasserstrom festzulegen, wobei der Unterwasserstrom eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,6 cm/s nicht überschreiten sollte (Schubert, 1996).



Aus der Erz- und Kohleaufbereitung sind entsprechende Richtwerte für diese Parameter aus der Praxis bekannt. Im Gegensatz dazu ist die Materialbeschaffenheit des hier betrachteten Deponates sehr inhomogen. Auf entsprechende Erfahrungswerte kann nicht direkt zurückgegriffen werden. Für nachfolgende Versuche wurden deshalb ausschließlich vom Anlagenhersteller empfohlene Werte für die Setzbethöhe, Hubzahl und Hubfrequenz verwendet. Die Parameter wurden über den gesamten Versuchszeitraum nicht verändert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen. Verschiedene Arten von Hubbewegungen finden in der Praxis Anwendung. Im Rahmen dieser Versuchsdurchführung wurde eine asymmetrische Schwingungsform vom Anlagenbetreiber empfohlen. Das Material wird dabei zunächst intensiv angehoben und aufgelockert. Während des Abwärtshubes erfolgt schließlich die Sortierung nach der Dichte. Dieser Prozess wird durch laminare Verhältnisse begünstigt, weshalb der Abwärtshub auch deutlich langsamer erfolgt als der Aufwärtshub. Untersuchungen zur Optimierung der Setzbettechnik haben bestätigt, dass der asymmetrische Hub die Trennwirkung begünstigt (Müller et al., 2004).

## 5 Versuchsauswertung

Insgesamt wurden 17 Versuchsdurchführungen im halbtechnischen Maßstab im Zeitraum zwischen Februar und Mai 2014 durchgeführt, wobei jeweils pro Versuchsdurchführung zwischen 700 und 900 kg Frischdeponat behandelt wurden. Verwendet wurden dabei die Fraktionen  $< 25$  mm,  $< 60$  mm sowie eine Versuchsdurchführung mit Deponat der Partikelgröße 10 – 60 mm. Insgesamt konnte bei allen Versuchsdurchführung eine gute Stoffstromtrennung erreicht werden. Im Hinblick auf die Erzeugung von Produktqualitäten soll nachfolgend jedoch nur auf die Verarbeitung der Fraktion 10 – 60 mm eingegangen werden. Grund dafür ist, dass das Gesamtdeponat zu etwa 35 M. % aus erdähnlichem Material  $< 10$  mm mit geringem Glühverlust besteht. Dieses Material gelangt bei der Dichtentrennung in das Leichtgut und wirkt sich bei der gewünschten Erzeugung einer heizwertreichen Fraktion nachteilig aus, ausserdem kann bei der Abscheidung dieser Fraktion vor der nassmechanischen Aufbereitung der Trennerfolg der Maschine verbessert werden sowie die Einsatzdauer des Waschmediums verlängert werden. Die Aufteilung der erzeugten Masseströme ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

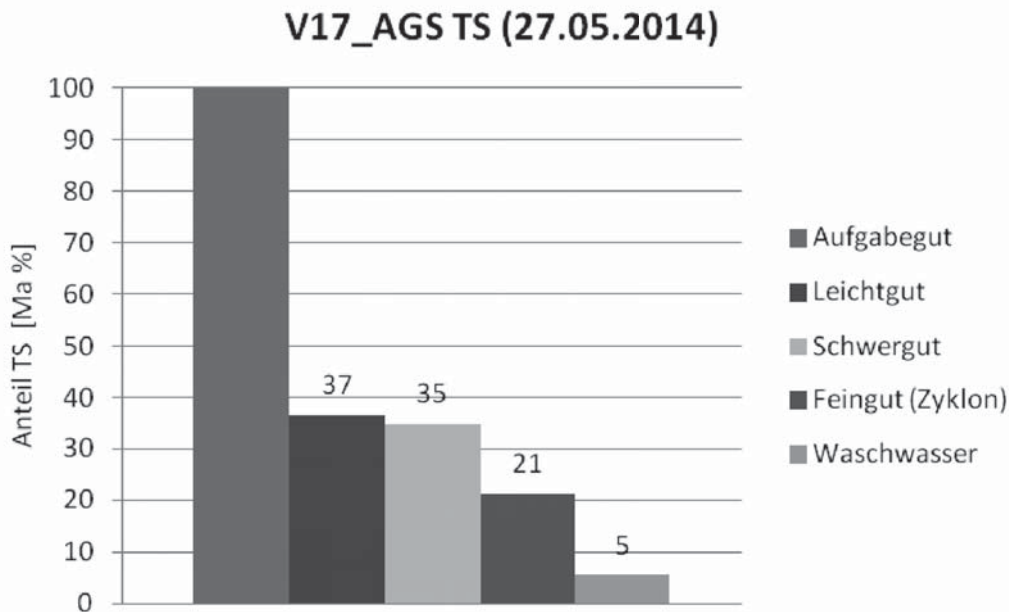


Abbildung 4: Stoffstromaufteilung

Wichtige Kenngrößen für die nassmechanische Aufbereitung stellen der spezifische Durchsatz als auch der Wasserverbrauch und die Trennleistung dar. Der spezifische Durchsatz wird vorrangig durch die Trennschärfe, aber auch durch das Transport- und Austragsverhalten des Materiales bestimmt. Voraussetzung für hohe Trennschärfen ist die gleichmäßige Beschickung der Setzmaschine, damit sich ein gleichmäßiges Setzbett ausbilden kann. Für die Aufbereitung von Erzen liegen im Gegensatz zu dem hier verwendetem Material entsprechende Kennzahlen zu spezifischen Durchsätzen von Hydrosetzmaschinen vor (Schubert, 1996). Der spezifische Durchsatz der hier betrachteten Untersuchungen liegt im Bereich zwischen 1,5 bis 3,9 Mg TS/(m<sup>2</sup>\*h) und damit im unteren Bereich im Vergleich zu den in der Erzaufbereitung üblichen Durchsätzen (Schubert, 1996). Bei den hier durchgeführten Versuchen mit Frischwasser wurden zwischen 2,7 – 4,5 l Wasser / kg TS eingesetzt. Bei der Mehrfachnutzung des Waschwassers lag der Verbrauch bei 1,5 – 2,7 l Wasser / kg TS. Die mehrmalige Nutzung des Wassers führt zu einer Aufkonzentration von Schadstoffen bzw. zu einer Erhöhung des Feststoffgehaltes des Waschwassers. Negative Auswirkungen durch Mehrfachnutzung hinsichtlich Produktqualitäten oder Trennleistung konnten nicht festgestellt werden, so dass ein Wasserverbrauch von 1,5 – 2,7 l Wasser / kg TS für die Bearbeitung von Deponat möglich ist. In der Praxis wird der Materialdurchsatz von Schwingsetzmaschinen mit bis zu 120 m<sup>3</sup> FS / h und der Wasserbedarf mit bis zu 300 m<sup>3</sup> Waschwasser / h angegeben (Schubert, 1996) was einem Verhältnis von Waschwasser zu Frischsubstanz von 2,5: 1 entspricht und damit vergleichbar ist mit dem Waschwassereinsatz der Versuchsanlage.



## 6 Stoffströme

Im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung entstehen zwei mineralische Stoffströme, das Schwergut und das Feinmaterial aus dem Zyklon sowie das Leichtgut, welches mit einer heizwertreichen Fraktion verglichen werden kann. Eine weitestgehende Verwertung dieser Stoffströme wird angestrebt. Um Verwertungsmöglichkeiten aufzuzeigen, sollte zunächst die Zusammensetzung der einzelnen Stoffströme bekannt sein.

Das erzeugte Schwergut setzt sich vorrangig aus Steinen und Glas zusammen. Der Glühverlust dieser Stoffströme liegt im Bereich zwischen 4 M. % und 9 M. %. Für das Schwergut konnten Produktqualitäten nach LAGA M20 für Bauschutt für die Klassen Z1.2 bzw. Z2 erreicht werden. Durch nochmaliges Waschen im Labormaßstab konnten die Produktqualitäten nochmals deutlich verbessert werden.

Das Feingut wird über den Setzgutträger mit einer Maschenweite von 2 mm von dem Deponat abgeschieden und gelangt in das Waschwasser, wo es anschließend von dem Zyklon abgeschieden wird. Das Feingut besteht zu 7 M.-% aus Feinkorn (< 0,063 mm) und zu 3 M.-% aus Grobkorn (> 2mm). Damit besteht das Material zu 90 M.-% aus Mittelkorn (0,063 – 2 mm). Der Glühverlust des Zyklonmaterials liegt im Bereich zwischen 4 M. % bis 7 M. %. Der Stoffstrom ist sehr homogen in seiner Zusammensetzung und hält im insgesamt die LAGA Zuordnungswerte für die Klasse Z 2 (Bauschutt) ein, wobei der Grund für diese Einstufung lediglich auf die erhöhten Sulfatgehalte zurückzuführen ist.

Das erzeugte Leichtgut setzt sich hauptsächlich aus Folien, Hartkunststoff, Holz und Textilien zusammen. Der Stoffstrom weist noch deutliche Anhaftungen, vorwiegend mineralischen Ursprunges, auf. Der Glühverlust dieser Fraktion lag bei dieser Fraktion während den Untersuchungen bei ca. 60 M. %. Für eine thermische Verwertung scheint diese Fraktion zunächst aufgrund zu niedriger Glühverluste, welche zum einen durch die verschiedenen Einzelkomponenten als auch durch die noch vorhandenen Anhaftungen bestimmt werden, nicht geeignet. Durch Waschversuche im Labormaßstab konnten die Glühverluste jedoch durch das Entfernen der Anhaftungen von 60 M. % auf maximal 80 M. % gesteigert werden, so dass eine Verwertung als Ersatzbrennstoff bzw. zur Mitverbrennung möglich erscheint.

## 7 Ausblick

Mit der nassmechanische Aufbereitung von Deponat < 60 mm konnten in diesem Forschungsvorhaben positive Ergebnisse erzielt werden. Das Verfahren ist einfach zu bedienen und bietet die notwendige Robustheit. Eine Stoffstromtrennung war für alle untersuchten Materialien auch über den eigentlichen Anwendungsbereich der Maschine





hinaus, welcher bei einer maximalen Korngröße von 35 mm lag, mühelos möglich. Sämtliche Partikel der einzelnen Stoffströme sind nach der Aufbereitung mit sehr feinen Anhaftungen überzogen, welche maßgeblich die gewünschten Produktqualitäten beeinflussen. Aufgrund der fehlenden intensiven Durchmischung im Setzbett findet dort vorrangig eine Dichtentrennung statt. Eine Reinigung konnte nur für die Parameter Sulfat und Chlorid festgestellt werden. Eine nachgeschaltete Reinigung lässt sich jedoch mit geringem Aufwand und am Markt vorhandener Technik einfach realisieren. So ist bspw. eine Reinigung des Schwergutes auf den Entwässerungssieben möglich bzw. die Aufbereitung des Leitgutes mittels Waschtrommel. Gleiches gilt für den Sand aus dem Zyklon. Durch das dafür verwendete Frischwasser kann der Frischwasserbedarf der gesamten Anlage gedeckt werden bzw. Verluste durch Wasseraustrag.

Eine genaue Überprüfung der erzeugten Stoffströme hinsichtlich Verwertungsmöglichkeiten wird derzeit durchgeführt. Realistisch scheint dabei die Mitverbrennung des Leichtgutes in EBS-Kraftwerken. Ein großes Potential bietet auch der Sand aus dem Zyklon als Ersatz- oder Deponiebaustoff. Da auch Ersatzbaustoffe den Anforderungen herkömmlicher Baustoffe entsprechen müssen, werden derzeit entsprechende Nachweise geführt. Aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung des Schwergutes scheint hier eine Verwertung, gerade hinsichtlich bautechnischer Anforderungen, schwieriger. Insgesamt wird jedoch weiter nach Möglichkeiten der mineralischen Stoffströme im z.B. im allgemeinen Tiefbau, Straßen- und Wegebau oder im Deponiebau gesucht. Ein höherwertiger Einsatz der mineralischen Fraktionen in der Baustoffindustrie oder im Hochbau ist z.B. aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung nicht zu erwarten.

Bei der hier betrachteten Versuchsdurchführung fällt eine Fraktion von Deponat < 10 mm Partikelgröße an welche nicht nassmechanisch aufbereitet wird und wieder deponiert werden muss. Eine Anreicherung von Schadstoffen konnte in dem erdähnlichem Material nicht festgestellt werden. Das Material entspricht mit Ausnahme des Glühverlustes und des TOC den Anforderungen der Deponieklasse DK I. Durch Entnahme der genannten Stoffströme kann somit das ursprüngliche Deponievolumen stark verringert werden und möglicherweise sogar Nachsorgezeiten verkürzt bzw. der erforderliche Aufwand während der Nachsorge verringert werden.

Die nassmechanische Aufbereitung mittels Setzbetttechnik im halbtechnischen Versuchsmaßstab entspricht hinsichtlich der in der Setzbetttechnik verwendeten Kennwerten, wie zum Beispiel dem Wasserverbrauche, der spez. Durchsatzrate und der Trennschärfe, den in der Erzaufbereitung eingesetzten Aggregaten. Eine erste Abschätzung der reinen Behandlungskosten einer Maschine mit einem Durchsatz von 10 Mg TS/h und einem Betrachtungszeitraum von 10 Jahren ergab einen Aufwand von ca. 16 €/Mg TS. Mögliche Erlöse wurden hierbei nicht berücksichtigt.





## 8 Literatur

- |                                |      |  |
|--------------------------------|------|--|
| Umweltbundesamt                | 2011 | Deponierückbau- Wirtschaftlichkeit, Ressourcenpotential und Klimarelevanz, Reports, REP-0378 Umweltbundesamt. Wien   |
| DWA                            | 2012 | DWA- Themen, Rückbau von deponierten Abfällen. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ISBN 978-3-942964-45-6                             |
| Gäth, S. et al.                | 2011 | Ressourcenpotential von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. Müll und Abfall, 2/2011: 61-67, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. Kg, Berlin, ISSN 0027-2957           |
| Landesanstalt für Umweltschutz | 1993 | Handbuch Bodenwäsche. 1. Auflage. Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe  |
| LAGA                           | 2003 | Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall(LAGA), Mainz   |
| Magin, S                       | 1997 | Verfahrenstechnische Auslegung von Schwingsetzmaschinen. Fachhochschule Düsseldorf: Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik   |
| Müller, A. et al.              | 2004 | Untersuchungen zur Optimierung der Setzmaschinenteknik. Ratgeber Abbruch & Recycling, Stein- Verlag Baden-Baden GmbH   |
| Schubert, S.                   | 1996 | Aufbereitung fester Stoffe, Band II Sortierprozesse, S. 41 – 73. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, ISBN 3-342-00555-6                                   |
| Turk, T. et al.                | 1996 | Stoffspezifische Abfallbehandlung: Abtrennung mineralischer Fraktionen aus festen Siedlungsabfällen, Der Städtetag, 10/1996  |
| VAN VOSSEN W.J. et al.         | 2011 | Sardinia Symposium 2011, FEASIBILITY STUDY SUSTAINABLE MATERIAL AND ENERGY RECOVERY FROM LANDFILLS IN EUROPE, Sardinia   |
| Weimann K.                     | 2008 | Untersuchung zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik, Bundesamt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, ISBN 978-3-981290-7-0 |

**Anschrift der Verfasser(innen)**

Dipl.-Ing (FH), Dipl. UWT Sebastian Wanka  
Leichtweiß- Institut für Wasserbau,  
Abteilung Abfall und Ressourcenwirtschaft  
Beethovenstrasse 51a  
D-38106 Braunschweig  
Telefon +49 531- 391-3982  
Email [s.wanka@tu-braunschweig.de](mailto:s.wanka@tu-braunschweig.de)  
Website: <https://www.tu-braunschweig.de/lwi/abwi>



# Erkenntnisse aus Szenarienanalysen zum Rückbau einer Hausmülldeponie in OWL

Ernst Reuter\*, Sebastian Schulze\*, Reinhard Kahmen\*\*

\*IWA Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Abfallwirtschaft mbH & Co. KG, Minden

\*\*AV.E Eigenbetrieb Kreis Paderborn

## Inhaltsangabe

Das Entsorgungszentrum „Alte Schanze“ des Kreises Paderborn in Ostwestfalen (OWL) erstreckt sich über eine Fläche von ca. 158 Hektar, wovon ca. 90 Hektar für die Abfallablagerung planfestgestellt worden sind. Gemäß den aktuellen abfallrechtlichen Anforderungen ist zukünftig eine endgültige Oberflächenabdichtung und Rekultivierung der verfüllten Ablagerungsflächen erforderlich. Die IWA Ingenieurgesellschaft wurde vom Deponiebetreiber AV.E Eigenbetrieb Kreis Paderborn beauftragt, eine Machbarkeitsstudie über Kostenaufwand (für den vollständigen Rückbau) und mögliche Kosteneinsparungen (infolge Rohstoffverwertung und Entfall von Oberflächenabdichtung und Reduzierung der Deponienachsorge) als alternative Stilllegungsstrategie aufzustellen. Dabei wurde bewusst auf kostenträchtige Stichproben durch Felduntersuchungen verzichtet und stattdessen auf die Auswertung der Betreiberdaten und die Anfertigung umfangreicher Kosten-Erlös-Szenarien gesetzt. Im Ergebnis wird festgestellt, dass ein Deponierückbau unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen (Rohstoff- und Energiepreise, Entsorgungskosten und Verwertungserlöse) keine wirtschaftliche Alternative zur Oberflächenabdichtung und Nachsorge nach Beendigung der Ablagerungsphase ist. Ein Rückbau der Deponie Alte Schanze kann erst auf sehr lange Sicht – voraussichtlich deutlich nach dem Jahr 2050 - und bei Eintreten derzeit noch hochspekulativer Annahmen wirtschaftlich werden und dann das Defizit der aktuellen abfallrechtlichen Stilllegungsstrategie in Hinblick auf eine ökologisch anzustrebende Nachsorgefreiheit beheben. Langfristige ökologische Bewertungen sind in die vorliegenden Kosten-Nutzen-Untersuchungen allerdings nicht eingeflossen, weil hierzu keine monetär bewertbaren Maßstäbe vorliegen.

## Stichworte

Hausmülldeponie DK – II, Deponierückbau, Ressourcenpotential, Belüftung, mechanische Aufbereitung, Thermische Verwertung, Metallverwertungserlöse, Stilllegungskosten, Kosten-Nutzen-Berechnung



# 1 Einleitung

## 1.1 Defizite der aktuellen abfallrechtlichen Stilllegungsstrategie

Heutzutage muss davon ausgegangen werden, dass alle Haus- bzw. Siedlungsabfalldeponien oder einzelne Deponieabschnitte, die vor 2005 betrieben worden sind, eine nicht vollständig beschreibbare Mischung aus Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Sperrmüll, Klärschlamm, Bauschutt und Boden und in Einzelfällen – untergeordnet - auch Industrieabfälle enthalten. Sie werden gemäß aktueller abfallrechtlicher Klassifizierung – eingeführt 2001 in der Abfallablagerversordnung (AbfAbV)- als Deponietyp DK II kategorisiert.

Mit der 2009 in Kraft getretenen und heute gültigen Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) werden diejenigen Deponien, die sich bei Inkrafttreten der DepV am 16. Juli 2009 in Ablagerungs-, Stilllegungs- oder Nachsorgephase befanden, als Altdeponien bezeichnet. Nach Auswertung früherer Deponiestatistiken des Umweltbundesamtes (veröffentlicht in der Reihe „Daten zur Umwelt“) ist davon auszugehen, dass mehrere Tausend dieser Altdeponien nach 1993 stillgelegt wurden bzw. werden und für diese das in der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASI) beschriebene Multibarrierenkonzept mit zwei unabhängig voneinander wirkenden Dichtungskomponenten als Oberflächenabdichtungssystemen ausgeführt worden ist. Die ursprünglich mit der TASI angestrebte „Nachsorgefreiheit“ wurde mittlerweile umweltpolitisch auf „nachsorgearm“ reduziert und abfallrechtlich mit zwei technischen Grundanforderungen verbunden:

- Zum einen müssen Altdeponien unverzüglich nach Ende der Ablagerungsphase mit einem – auch im weltweitem Vergleich - qualitativ hochwertigen Abdichtungssystem oberflächengedichtet werden, für das im Rahmen von Eignungsprüfungen der Nachweis zu erbringen ist, dass alle Komponenten (auch mineralische Abdichtungen!) unter den gegebenen Randbedingungen der Deponiestilllegung eine Funktionsfähigkeit besitzen, die über eine Zeitspanne von mindestens 100 Jahren reicht.
- Zum anderen verbindet das Abfallrecht den Abschluss der Nachsorge in jedem Einzelfall mit dem Nachweis, dass „zukünftig keine Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit zu erwarten sind“ und formuliert diesbezüglich im Anhang 5, Nr. 10 zur DepV neun Kriterien, die bei der Feststellung des Abschlusses der Nachsorgephase im Einzelfall „insbesondere“ zu Grunde zu legen sind.

Bis heute scheint die nach den Zulassungskriterien der BAM verlegte PEHD-Dichtungsbahn von allen eignungsfestgestellten Dichtungskomponenten das langfristig zuverlässigste Element zu sein. Andere Komponenten zeigen in Feldstudien langfristig



mehr oder weniger große Undichtigkeiten (HENKEN-MELLIES 2012; SOKOLLEK 2006). Aber auch ein noch so hochwertig hergestelltes und eingebautes Industrieprodukt kann keine zeitlich unbegrenzte Funktionsfähigkeit sicherstellen.

Man kann allerdings erwarten, dass bei ordnungsgemäßer Umsetzung der derzeitigen abfallrechtlichen Stilllegungsvorgaben in Bezug auf Altdeponien, deren Deponiekörper wesentlich durch organische Inhaltsstoffe geprägt sind, über einen langen, mindestens jedoch 100-jährigen Zeitraum keine Schädigungen des Wohls der Allgemeinheit auftreten werden. Die vorstehend erwähnten Kriterien der Deponieverordnung zur Entlassung aus der Nachsorge sind zwar technisch formuliert, dienen in erster Linie jedoch der Definition des rechtlichen Übergangs hinaus aus dem Deponierecht (mit der Nachsorgeverantwortung des Deponiebetreibers und der Finanzierung aller Deponieaufwendungen aus Rückstellungen des Gebührenzahlers) hinein in das Bodenschutz- und Altlastenrecht mit deutlich geringeren Handlungszwängen und der Finanzierung gegebenenfalls erforderlicher Aufwendungen aus Steuermitteln. Nur mit derartigen Festlegungen ist es allen Deponiebetreibern möglich, den Rückstellungsbedarf konkret zu kalkulieren und Deponiegebühren rechtssicher festzulegen. Die aktuellen abfallrechtlichen Stilllegungsvorgaben für Altdeponien mit organischen Ablagerungen sind demzufolge zur Schaffung von Rechts- und Gebührensicherheit erforderlich; gleichzeitig können sie den maximal möglichen Umweltschutz bezüglich gas- und sickerwasserförmiger Emissionen für mindestens 100 Jahre sichern. Die in den neunziger Jahren angestrebte dauerhafte, also zeitlich unbegrenzte, nachsorgefreie Lösung, ist damit nicht erreichbar!

## 1.2 Deponiebelüftung als ergänzende Maßnahme

Eine nachträgliche, ergänzende Maßnahme zur Verbesserung des Emissionsverhaltens hausmüllähnlicher Altdeponien stellt die aerobe In-situ Belüftung dar. Sie hat das Ziel, die im Deponiekörper ablaufenden Reaktionen zu beschleunigen und den Deponiekörper zu stabilisieren. Damit soll ein emissionsarmer Zustand erreicht und mögliche Umweltbeeinträchtigungen reduziert werden.

Die Belüftungsdauer hängt stark von den Behandlungszielen ab, für die es noch keine abfallrechtlichen Anforderungen durch die Behörde gibt. Bei durchschnittlichen Deponiebedingungen sind Belüftungszeiträume von 4-8 Jahren vorgesehen, um die gewünschte Emissionsminimierung zu erlangen. Die Kosten werden gegenwärtig mit 0,5 – 3 €/m<sup>3</sup> Deponieinhalt beziffert (STEGMANN ET AL. 2014).

Für den Gaspfad ergibt sich hieraus eine deutliche Reduzierung (Minimierung) der Emissionen. Die Bildungsrate von Kohlenstoffdioxid und Wasser wird erhöht, während der Restmethangehalt des Deponiegases deutlich reduziert wird. Dies ist ein Effekt, der sich entsprechend positiv auf den Klimaschutz auswirkt. Daraus resultierend hat der



Verordnungsgeber den Anwendern dieser nachträglichen Stabilisierungsmaßnahme durch den möglichen Entfall einer Dichtungskomponente im Deponieoberflächenabdichtungssystem einen besonderen wirtschaftlichen Anreiz gegeben. Außerdem wurde die Deponiebelüftung 2012 im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative der Bundesregierung in das Förderprogramm „Investive Maßnahmen, die zu einer Treibhausgas-Emissionsminderung führen“ aufgenommen.

Werden allerdings die positiven Auswirkungen auf den Wasserpfad betrachtet, so ergeben sich hier keine ausreichenden Verbesserungen bezüglich einer tolerierbaren Sickerwasseremission nach potentielltem Versagen der Oberflächenabdichtung. Durch die Belüftung verkürzen sich zwar die Nachsorgezeiträume für den Emissionspfad Wasser gegenüber strikt anaeroben Bedingungen um mehrere Jahrzehnte, doch liegen die emissionsrelevanten Zeiträume bei mehreren Jahrhunderten (KRUSE 1994). Durch die In-situ Belüftung wird also das Gefährdungspotenzial für den Sickerwasserpfad nicht bis auf Nachsorgefreiheit reduziert. In (STEGMANN ET AL. 2014) wird demgemäß die Kombination der In-situ Belüftung mit einer erhöhten Sickerwasserkreislaufführung zur künstlichen Auswaschung des Deponiekörpers als anschließende weitere Maßnahme empfohlen. Allerdings gibt es hierfür noch keine großtechnischen Erfahrungen.

Die nachträgliche In-situ Belüftung ist demzufolge weder geeignet noch zugelassen, das Deponieverhalten einer Altdeponie so zu verbessern, dass sie ohne ein funktionsfähiges Deponieoberflächenabdichtungssystem aus der Nachsorge entlassen werden könnte. Der vorstehend beschriebene Mumifizierungseffekt wird dem Grunde nach auch bei belüfteten Altdeponien eintreten, wenn auch ohne kritische Auswirkungen durch gasförmige Emissionen. Forderungen nach einem dauerhaften, zeitlich unbegrenzten Grundwasserschutz bleiben auch in diesen Anwendungsfällen ungelöst.

## 2 Deponierückbau

### 2.1 Allgemeines

Befürworter des Deponierückbaus haben die herrschenden Widersprüche zwischen der Forderung nach einer nachsorgefreien Deponie und den zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten früh erkannt. Projekterfahrungen gibt es seit vielen Jahren. Die Zielsetzungen veränderten sich in den letzten Jahrzehnten allerdings stark.

In den 80er und 90er Jahren war der Hauptzweck, innerhalb eines vorhandenen Deponiestandortes durch Rückbau und Umlagerung mit hochverdichtetem Wiedereinbau neues Deponievolumen zu gewinnen. Teilweise erfolgte der Wiedereinbau auf Flächen mit neuen Basisabdichtungssystemen. Andere Rückbaumaßnahmen dienten der Gefahrenabwehr im Grundwasserschutz.





In Europa fanden die ersten Deponieumlagerungen 1988 im Saarland (Fitten) und 1990 in Wien (Kaisermühlen) statt. In Wien erfolgte erstmals eine Umstellung des Deponiekörpers von anaeroben auf aerobe Bedingungen als Maßnahme der In-situ Vorbehandlung, die die Umlagerung überhaupt möglich machte. In der Schweiz wird zur Gefahrenabwehr seit 2006 die Sonderabfalldeponie Kölliken unter kompletter Einhausung zurückgebaut. Die Kosten dieses langjährigen Projektes werden mit bis zu 1.000 €/m<sup>3</sup> angegeben.

Eine Übersicht über die bekanntesten Umlagerungs- bzw. Rückbauprojekte in Deutschland mit den dazugehörigen Rahmendaten und Kosten sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Neben den zuvor genannten Gründen für den Deponierückbau wurden in den letzten Jahren mehr und mehr Überlegungen angestellt, ob sich nicht auch eine stoffliche und energetische Verwertung des Abfalls aus wirtschaftlicher Sicht lohnen würde. Grund dafür ist die steigende Ressourcenknappheit infolge der weltweit stark wachsenden Bevölkerung und der Anstieg der Rohstoffpreise in den letzten Jahren. Der unter diesen Gesichtspunkten durchgeführte Deponierückbau wird auch als Landfill Mining bezeichnet, ein Teilbereich des Urban Mining.

Extrapoliert man die Kostenangaben der Tabelle 1 auf das Jahr 2014 unter Berücksichtigung einer 2%igen, jährlichen Preissteigerung können in Abhängigkeit von Vorgehensweise und Recyclingaufwand drei Kostengrößenordnungen unterschieden werden:

- a) Die Projekterfahrungen für einen Rückbau zum Zwecke der Umlagerung am gleichen Standort ohne Maßnahmen zur stoffstromspezifischen Behandlung führen zu Kosten zwischen 7,5 - 17,5 €/m<sup>3</sup> Ablagerungsvolumen.
- b) Die Projekterfahrungen für einen Rückbau mit einfacher maschineller Sortiertechnik und Maßnahmen zur stoffstromspezifischen Behandlung weniger Hauptfraktionen (z.B. Fe/NE-Metalle, Ersatzbrennstoffe, Steine/grober Bauschutt) führen zu einer Kostengrößenordnung bis 55 €/m<sup>3</sup> Ablagerungsvolumen.
- c) Die Projekterfahrungen für einen Rückbau mit teilweise händischer Sortiertechnik und weitgehenden Maßnahmen zur stoffstromspezifischen Aufbereitung/Verwertung führen zu einer Kostengrößenordnung von mindestens 200 €/m<sup>3</sup> Ablagerungsvolumen.



*Tabelle 1: Fallbeispiele zur Umlagerung bzw. zum Rückbau von Deponien und Altlasten in Deutschland*

Deponie	Region	Zeit (ab)	Menge (Tm <sup>3</sup> )	Spez. Kosten (€/m <sup>3</sup> )	Anmerkung
Merzig-Fitten	Saarland	1988	200	5	Umlagerung DK II ohne Vorbelüftung
Burghof	Ludwigsburg	1993	120	160-220	Rückbau DK II, FE-Modellprojekt mit Vorbelüftung und teilweiser Handsortierung
Rennerod	Westerwald	1996	800	8-9	Umlagerung DK II mit Vorbelüftung, 93% Wiederaufbau, 7% stoffliche Verwertung
Bardowick	Lüneburg	1996	1.500	5	Umlagerung DK II, ohne Vorbelüftung
Deiderode	Göttingen	1996	475	4	Umlagerung DK II mit Vorbelüftung
Westheim	Germersheim	1997	91	12-13	Umlagerung DK II ohne Vorbelüftung
Wilsum	Grafenschaft Bentheim	2009	80	50	Umlagerung DK II ohne Vorbelüftung, probeweiser Rückbau mit maschineller Sortiertechnik und Aufbereitung
Jagerbergl	Chiemgau	2009	13	230	Rückbau DK II mit Aufbereitungsanlage und teilweiser Handsortierung

Eine Übersicht über die erforderlichen, kostenträchtigen Verfahrensschritte zum „vollständigen“ Landfill Mining (Kategorie c) zeigt Abbildung 1.

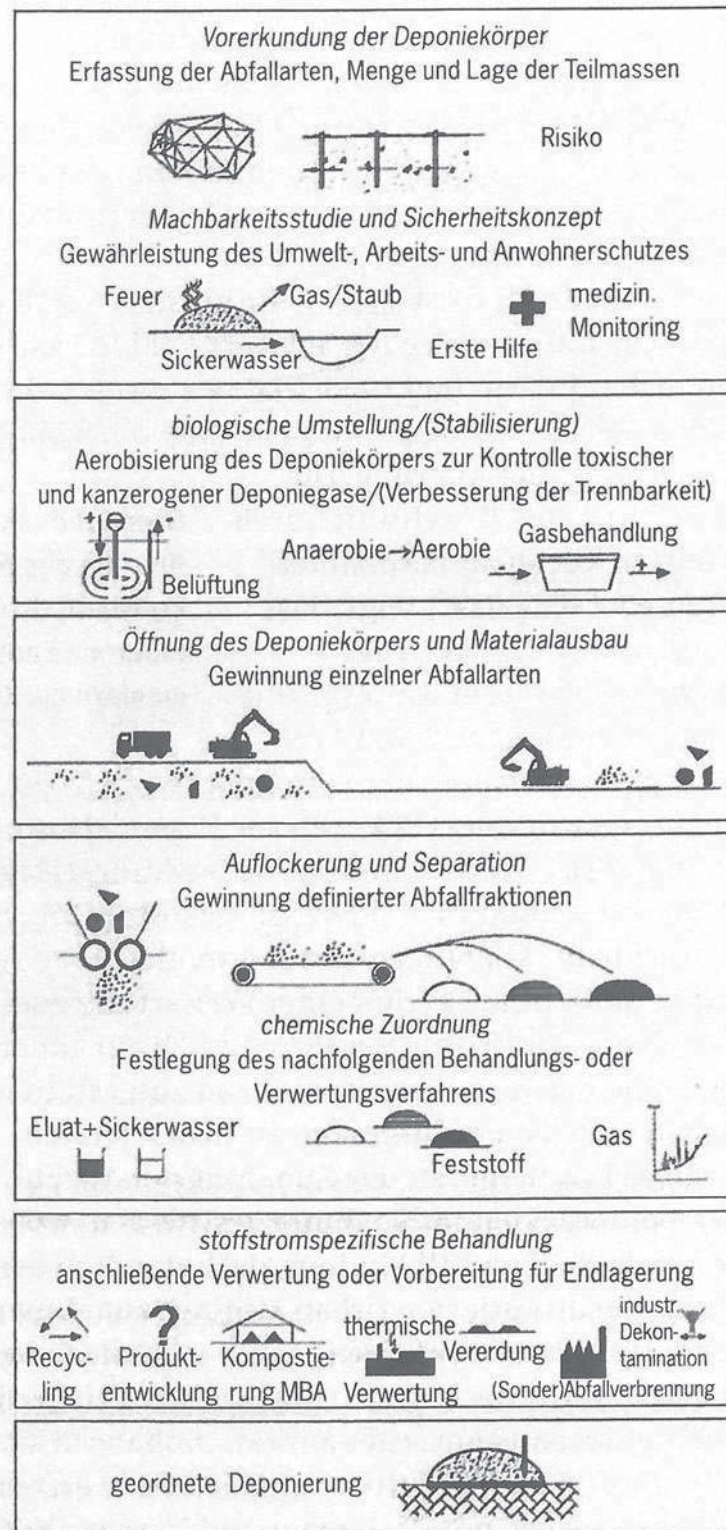


Abbildung 1: Verfahrensschritte des Landfill Mining (FRICKE 2013)

Leider werden immer wieder Kosten-Nutzen-Analysen veröffentlicht, in denen bei den Kosten Mischangaben zu Grunde gelegt werden, die der Kategorie a) und b) entsprechen, obwohl beim Ressourcenpotential auf eine weitgehende Aufbereitung und Verwertung der Kategorie c) reflektiert wird. In anderen Fällen wird der Entfall des Oberflä-



chenabdichtungssysteme zugrunde gelegt ohne für den Rückbauzeitraum Kosten für die Sickerwasserentsorgung zu kalkulieren. Teilweise werden Verwertungserlöse mit optimistischen Steigerungsraten auf lange Zeiträume extrapoliert ohne gleichzeitig die Teuerungsraten der Rückbaukosten zu berücksichtigen.

Auf den Unterschied zwischen detaillierter Voruntersuchung (gemäß Kategorie c)) und maschineller, gröberer Durchführung im Praxisbetrieb (gemäß Kategorie b)) wird z.B. in (HÖLZLE 2010) hingewiesen: „Bei der Betrachtung des Wertstoffpotenzials einer Deponie muss jedoch zwischen theoretischem Potenzial und den tatsächlich trennbaren Wertstoffmengen unterschieden werden. Ersteres wird in der Regel in kleinen Versuchen per händischer Trennung ermittelt. Letztere stellen die Mengen der Wertstoffe dar, die durch großmaschinelle automatisierte Trennung im Feld erreicht werden“. Ein deutlicher Unterschied zeigte sich beim Deponierückbau in Sharjah (Vereinigte Arabische Emirate (HÖLZLE 2010). Die Vorsortierungsversuche führten zu neun verschiedene Fraktionen im Vergleich zu vier später maschinell gewonnenen Fraktionen beim Rückbau (Abbildung 2).

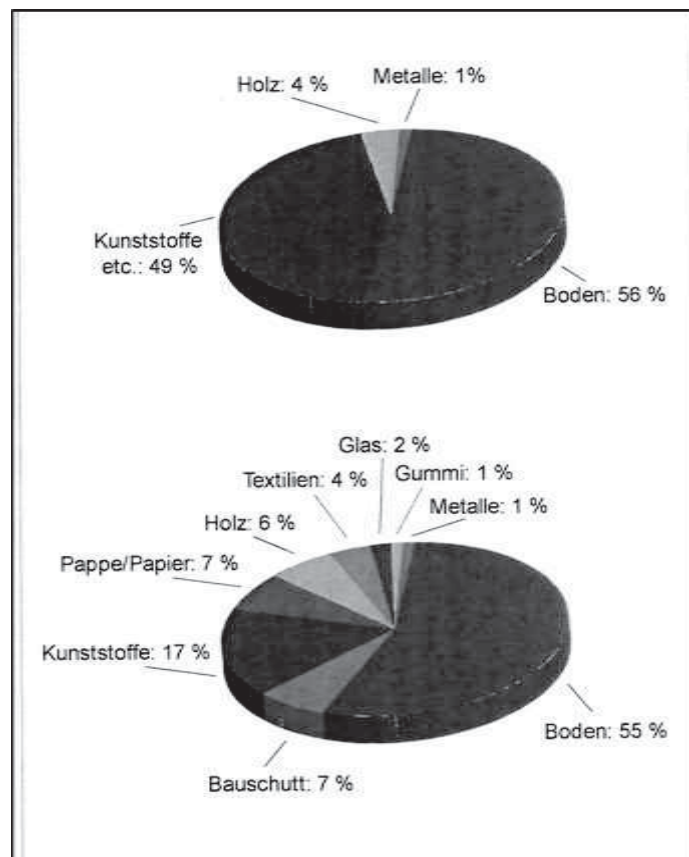


Abbildung 2: Verschiedene Wertstofffraktionen der manuellen Voruntersuchung (unten) und der maschinellen Trennung (oben) (HÖLZLE 2010)

Die aus Betreiberdaten in Verbindung mit stichprobenartigen Felduntersuchungen und händischen Sortieranalysen abgeleiteten Stoffströme werden häufig als theoretisches





Ressourcenpotential bezeichnet. Für die Szenarienanalysen zum Rückbau der Deponie Alte Schanze wurde in erster Näherung als Rückbau- und Verwertungskonzept eine Vorgehensweise gemäß Kategorie b) gewählt. Das so abgeschätzte Ressourcenpotential wird als „maschinelles“ Ressourcenpotential“ (für: „maschinell realisierbare Aufbereitung“) bezeichnet.

## 2.2 Praxisbeispiel Rückbau Deponie Jagerbergl

Für die Szenarienanalysen zum Rückbau der Deponie Alte Schanze wurden zahlreiche öffentlich zugängliche Dokumentationen zu den vorstehend genannten Projektbeispielen ausgewertet. Über ein Fallbeispiel, das vergleichsweise wenig bekannt ist, soll nachfolgend detaillierter berichtet werden:

Sehr umfangreiche Sortiersversuche führte die Alz Kies und Recycling GmbH (AKR) in Tacherting/Bayern bei dem Rückbau der Deponie Jagerbergl bei Marquartstein im Jahr 2009 durch (s. Abbildung 3) (HÖLZLE 2010).



*Abbildung 3: Trennverfahren auf dem Gelände der AKR. V.l.n.r. Schwerlastsieveanlage mit manueller Nachsortierung, Schwerefaller und Spannwellensieb (HÖLZLE 2010)*

Ca. 18.000 Tonnen Hausmüll, der bis Mitte der 70er Jahre auf der Deponie abgelagert wurde, durchlief mehrere Trennverfahren (s. Abbildung 4). Auf der Deponie und dem Betriebsgelände fand erst eine Grobabtrennung großer Gegenstände wie Schrott, Betonbrocken, Holz und Reifen mittels Bagger und Radlader statt. Das verbliebene Depoat durchlief anschließend eine Schwerlastsieveanlage (Stangensizer und Schwingsieb)



mit drei Trennschnitten (0–35 mm / 35–80 mm / > 80 mm). Ziel war es, eine mineralische Feinfraktion (<35 mm) mit weniger als 5 % Fremdanteil zu erhalten, um diese nach Deponieverordnung verwerten zu können. Die gewonnene Mittelfraktion (35–80 mm) gelangte zur weiteren Trennung in eine Schwerefalle. Die Grobfraktion unterließ anschließend eine händische Trennung (Metalle, Reifen, Mineralik, Kunststoffe u. ä.).

In der Mineralik der Grobfraktion befand sich ein bemerkenswerter Anteil an Glasflaschen. Folgende Materialien stellten für den Betrieb der Schwerlastsieveanlage ein Problem dar:

- Strumpfhosen, die sich verwickelten und verhängten
- Folien, die Sieböffnungen verdeckten
- Gesteinsbrocken, die der Anlage Schäden zufügten

Bei der Schwerefalle entstanden eine Fraktion mit Mineralik und schwereren Plastikgegenständen sowie eine Leichtfraktion mit Sand, Schluff, Textilien und Kunststoffen. Die Mineralik-Plastik-Fraktion wurde anschließend in einer Brech- und Siebanlage aufgetrennt. Die Leichtfraktion gelangte direkt in eine Spannwellensieveanlage, bei der eine Trennung in eine mineralische Feinfraktion und eine Kunststoff-Textil-Fraktion erfolgte.

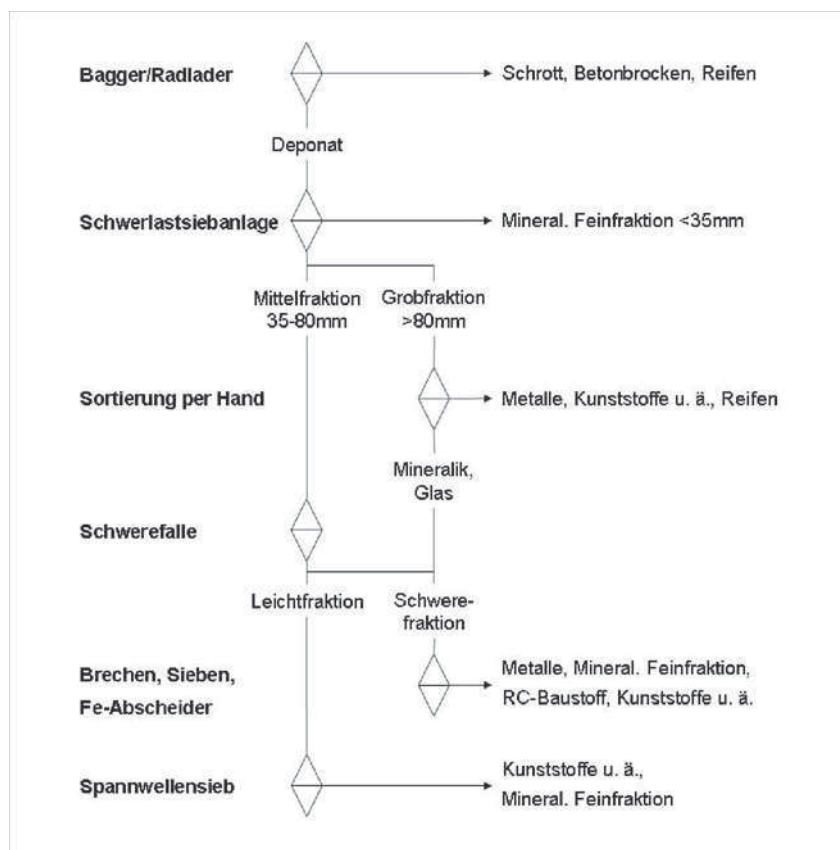


Abbildung 4: Trennprozessschritte und Fraktionen bei der Deponie Jägerberg/  
durch die AKR (HÖLZLE 2010)



Die Kosten werden in (HÖLZLE 2010) mit ca. 230 €/m<sup>3</sup>Ablagerungsvolumen angegeben.

### 2.3 Weitere Projekterfahrungen

Auf dem r<sup>3</sup>-Statusseminar 2014 wurde in einem Vortrag (KRÜGER ET AL. 2014) die mittlere, auf der Auswertung von 60 Rückbauprojekten basierende Abfallzusammensetzung in Massen-% dokumentiert. In der Praxis wäre eine derartig feine Stoffstromfraktionierung nur unter zu Hilfenahme manueller Sortiertechniken zu extrem hohen Kosten erreichbar. Die Daten zeigt Abbildung 5.

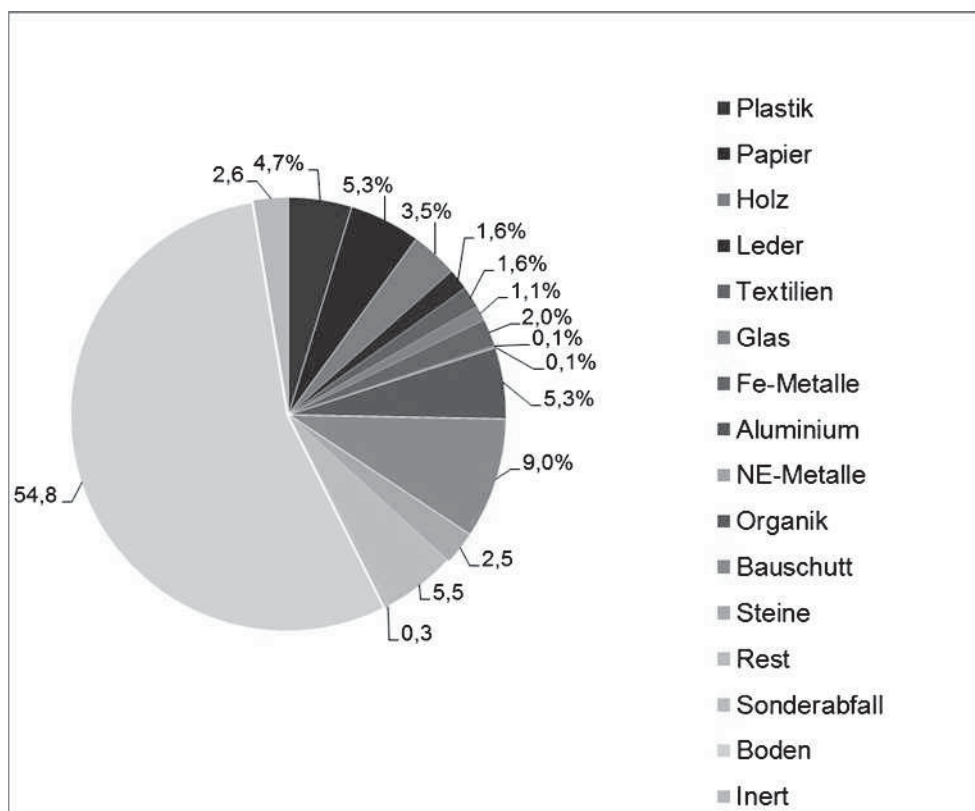


Abbildung 5: Mittlerer Deponieinput in MA-% (aus 60 Rückbauprojekten) (KRÜGER ET AL. 2014)

Aus dem Deponieinput kann näherungsweise auf das maschinelle Ressourcenpotential geschlossen werden, wenn die einzelnen Stoffströme zu dem entsprechenden Verwertungsweg nach folgendem Schlüssel zusammengefasst werden:

- NE- und Fe-Metalle werden als stofflich verwertbare Fraktionen entsprechend den Angaben übernommen
- Kunststoffe, Papier, Holz, Leder, Textilien, Organik und Restabfälle werden einer thermischen Verwertung zugeführt



- Glas, Bauschutt, Steine und Boden werden als Inertstoffe der erneuten Deponierung (DK I / DK II) zugewiesen
- Sonderabfall wird getrennt entsorgt (z.B. (z.B. DK III))

Damit ergibt sich das in Abbildung 6 dargestellte maschinelle Ressourcenpotential als Erfahrungsmittelwert der 60 Rückbauprojekte.

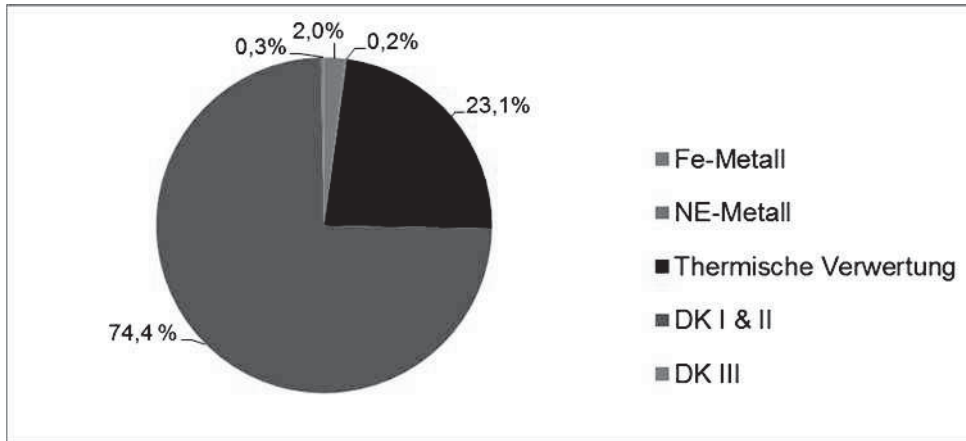


Abbildung 6: Maschinelles Ressourcenpotential für 60 Projekte (nach Abbildung 5)

Werden weitere bekannte Fallbeispiele nach gleichen Kriterien ausgewertet ergibt sich die Zuordnung nach Abbildung 7.

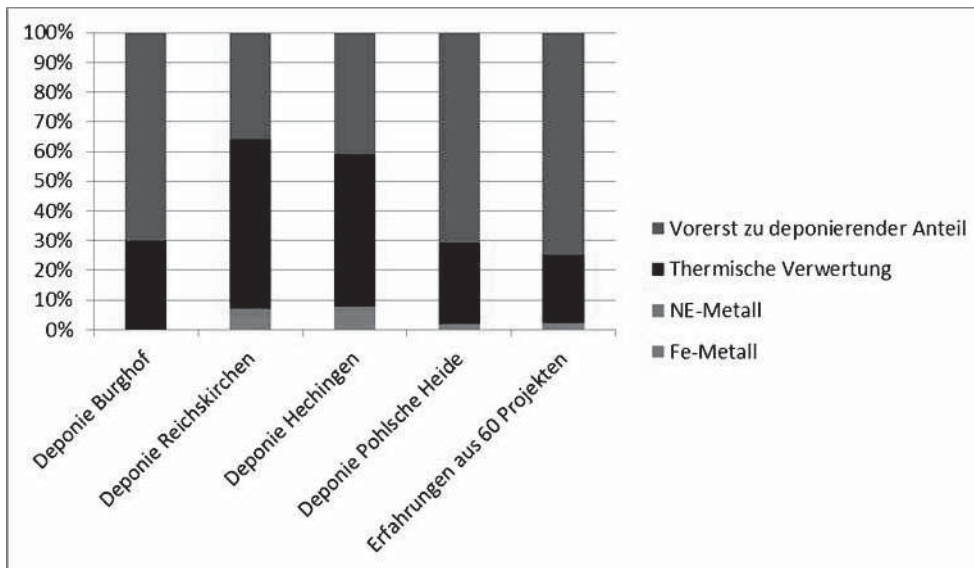


Abbildung 7: Maschinelles Ressourcenpotential verschiedener Fallbeispiele (Angaben in MA-%)

Abbildung 7 zeigt, dass das maschinelle Ressourcenpotential der Fallbeispiele Burghof und Pohlsche Heide sehr gut vergleichbar ist; für die Deponien Reichskirchen und Hechingen wird in (GÄTH ET AL. 2011; GÄTH 2014) ein deutlich geringerer Anteil an nicht weiter verwertbaren Stoffen ausgewiesen. Dies kann möglicherweise auf den wesentlich größeren Sortieraufwand zurückgeführt werden, der bei den entsprechenden

Felduntersuchungen angewendet wurde. Da im Fall der Alten Schanze kein vergleichbar großer Aufbereitungsaufwand vorgesehen ist, wurden die beiden Fallbeispiele Reichskirchen und Hechingen zur Abschätzung des maschinellen Ressourcenpotentials der Deponie Alte Schanze nicht weiter berücksichtigt.

Das Kuchendiagramm in Abbildung 8 zeigt das zu Grunde gelegte maschinelle Ressourcenpotential der Deponie Alte Schanze als gemittelte Erfahrungswerte der genannten Referenzprojekte Burghof, Pohlsche Heide und dem in (KRÜGER ET AL. 2014) angegebenen Erfahrungswert für 60 ausgewertete Projekte.

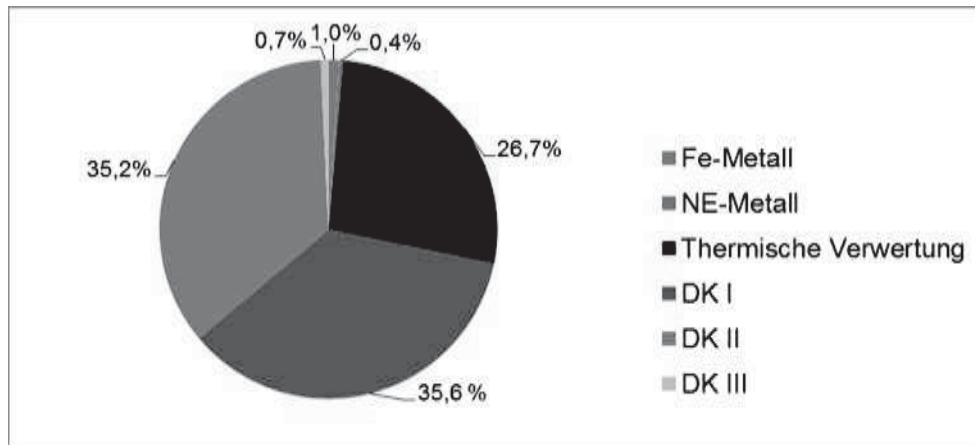


Abbildung 8: Annahme zum maschinellen Ressourcenpotential der Deponie Alte Schanze (Angaben in MA-%)

### 3 Rückbaukonzept

Grundsätzlich soll der angenommene Deponierückbau den in Abbildung 1 dargestellten Verfahrensschritten folgen. Zur Stabilisierung der Milieubedingungen und aus arbeitsschutztechnischen Gründen wird eine Vorbelüftung als notwendig erachtet.

Der Materialausbau erfolgt dann mit üblichen, selbstbelüfteten Erdbaugeräten im sicherheitstechnischen Schwarzbereich der Rückbaustelle.

Die Materialaufbereitung soll der Kategorie b) gemäß Abschnitt 2.1 genügen; es wird von einer ausschließlich maschinellen Separation und Behandlung mit Zielrichtung auf folgende Stoffströme ausgegangen:

- Fe- Metalle
- NE-Metalle
- Thermisch verwertbare Fraktion (leichte Grobfraction)
- Erneut (vorerst) zu deponierender Rest (mineralisch-organische Feinfraktion)



➤ Problem- und Gefahrstoffe (zur Sonderabfallentsorgung)

Das Ausgangsszenario soll mit der Freilegung der Basisfläche enden. Der Rückbau der vorhandenen Basisabdichtungssysteme und gegebenenfalls notwendig werdende Sanierungsmaßnahmen möglicher Untergrundkontaminationen sind nicht einkalkuliert, um einen möglichst breiten Kostenvergleich mit anderen Rückbauprojekten zu ermöglichen (wo dies in der Regel auch nicht einkalkuliert worden ist).

Hinsichtlich des vorhandenen Deponieinputs von ca. 5,2 Mio. m<sup>3</sup> bzw. ca. 6,2 Mio. t wurde von ca. 30 Jahren Projektdauer bei einer jährlichen Rückbauleistung von ca. 220.000 t/Jahr bei einer ca. 95 %igen Verfügbarkeit einer Aufbereitungsanlage Vor-Ort ausgegangen.

Weitere Hinweise werden im Vortrag erläutert.

## 4 Kosten-Nutzen-Berechnungen

### 4.1 Mengengerüst

Als Basis der Kosten-Nutzen-Berechnungen dienten die Ablagerungsstatistiken des AV.E zum Deponieinput. In der Historie der Siedlungsabfalldeponie der Deponie Alte Schanze gab es nach Betreiberangaben vier Ablagerungszeiträume, die sich durch unterschiedliche abfallwirtschaftliche Randbedingungen unterscheiden:

1. Ablagerungszeitraum (1979-1990): Inbetriebnahme als Abfalldeponie mit hohem Anteil an Inertstoffen.
2. Ablagerungszeitraum (1991-1995): Inbetriebnahme einer externen Boden- und Bauschuttdeponie (Atlas 2). Annahme von Boden- und Bauschutt nur noch als Ersatzbaustoff auf der Siedlungsabfalldeponie.
3. Ablagerungszeitraum (1996-2005): Einführung der flächendeckenden Biotonne, flächendeckende Rücknahme von LVP, Papier + Pappe im Holsystem und Glas- und Metalle im Bringsystem, Teilverwertung der Klärschlämme bis zum endgültigen Rückgang der Ablagerung.
4. Ablagerungszeitraum (2006-2013): Vorbehandlung von Abfällen zur Ablagerung mit hohem Organikanteil.

Aus den Jahresberichten der Deponie lassen sich aufgrund der seit 1994 durchgeführten Wiegen die eingelagerten Abfallmengen für den Zeitraum von 1994 - 2013 sehr genau bestimmen. Dabei wurden vor allem folgende Abfallarten differenziert:



- Haus- und Sperrmüll
- Gewerbe-/Misch-/Krankenhausabfälle
- Klärschlamm
- Ölverunreinigte Böden
- Produktionsspezifische Gewerbeabfälle
- Mineralische Abfälle für betriebliche Maßnahmen
- Bodenaushub und Bauschutt
- MVA Schlacke
- Hausmüll-Anlieferungen aus anderen Kommunen

Innerhalb dieses Zeitraums wurden Ablagerungen in einer Menge von 2.275.869 t dokumentiert. Dabei konnten die Ablagerungszeiträume 3 und 4 vollständig nachvollzogen werden. Im Ablagerungszeitraum 2 fehlen Daten für die Jahre 1991-1993. Diese wurden als Mittelwert der entsprechenden jährlich abgelagerten Abfälle aus den Daten der Jahre 1994 und 1995 gebildet, die bei vergleichbaren abfallwirtschaftlichen Randbedingungen registriert worden sind.

Umfangreichere Annahmen mussten lediglich für den Ablagerungszeitraum 1 (1979-1990) getroffen werden: Der Anteil an Inertstoffen aus Boden- und Bauschutt im Ablagerungszeitraum 1 wurde aus den für die Jahre 2002 - 2012 gültigen Annahmedaten der kreiseigenen Boden- und Bauschuttdeponie „Atlas 2“ ( im Mittel 138.593 m<sup>3</sup>/Jahr) in Abstimmung mit dem AV.E wie folgt rekonstruiert: Es wurde unterstellt, dass seit 1979 konstant ein Anteil von 70% der mittleren aktuellen Boden- und Bauschutt-ablagerungsmengen (97.015 m<sup>3</sup>/Jahr) auf der Deponie „Alte Schanze“ abgelagert worden ist. Die restlichen 30% sind in dieser Annahme auf kleinere Halden in der Umgebung verteilt worden. Ansonsten gelten die Daten des Ablagerungszeitraums 2. Abbildung 9 zeigt die Deponieinputanalyse im Säulendiagramm.

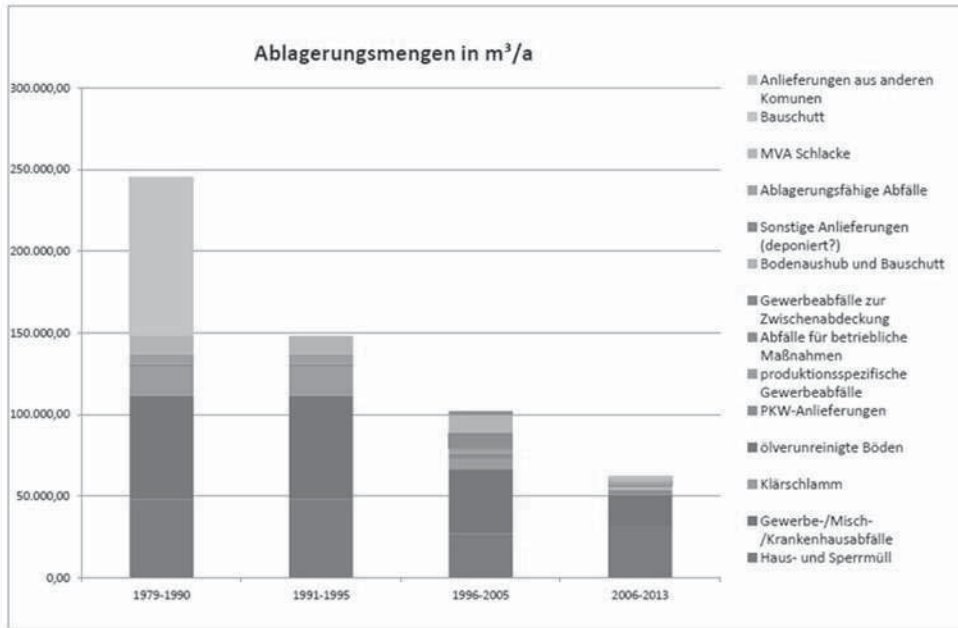


Abbildung 9: Ablagerungszeiträume und Jahresmengen der Deponie Alte Schanze

## 4.2 Kalkulatorische Rückbaukosten

Die Kalkulationsansätze für die verschiedenen Rückbaukosten zeigt Tabelle 2 (Erläuterungen s. Vortrag).

Tabelle 3: Kalkulationsansätze der Rückbaukosten

Vorgang	Einheitspreis
Belüftung des Deponiekörpers	1,5 €/m³
Abgraben, Laden (einschließlich Arbeitsschutz)	4 €/m³
Transport (im Schwarz-Bereich der Deponie)	2 €/m³
Mechanische Aufbereitung vor Ort	25 €/t
Mechanische Aufbereitung extern (inkl. 100 km Transport)	35 €/t
Deponierung DK I (inkl. 100 km Transport)	15 €/t
Deponierung DK II (inkl. 100 km Transport)	50 €/t
Sonderabfallentsorgung (inkl. 100 km Transport)	125 €/t
Thermische Verwertung der Leichtfraktion (inkl. 100 km Transport)	80 €/t
Thermische Verwertung der Leichtfraktion (inkl. 100 km Transport)	50 €/t





### 4.3 Reduzierung des Stilllegungs- und Nachsorgeaufwandes

Häufig wird in den Berechnungen zu Rückbauprojekten der Entfall eines Oberflächenabdichtungssystems als Beitrag zur Reduzierung des Nachsorge- und Stilllegungsaufwandes angenommen. Unberücksichtigt bleibt dabei, dass bei einem Entfall des Oberflächenabdichtungssystems im günstigsten Fall – wenn nämlich ein funktionsfähiges Basisabdichtungssystem vorhanden ist - mit weiteren Aufwendungen zur Fassung und Behandlung des Sickerwassers über die gesamte Rückbauperiode gerechnet werden muss. Wenn kein Basisabdichtungssystem vorhanden ist, muss im Einzelfall überprüft werden, ob eine fortdauernde Grundwasserbeeinträchtigung über die Rückbauperiode wasserrechtlich zulässig ist; gegebenenfalls muss der Rückbau durch eine parallel durchgeführte hydraulische Sicherung begleitet werden. In diesem Fall wären entsprechende zusätzliche Kosten zu berücksichtigen. Der wirtschaftliche Vorteil des Entfalls des Oberflächenabdichtungssystems wurde am Beispiel der Deponie Alte Schanze auf Basis der vorliegenden Rückstellungsberechnungen untersucht.

Für die Deponie Alte Schanze lag zum Zeitpunkt der Bearbeitung eine Kostenermittlung des Stilllegungs- und Nachsorgeaufwandes aus dem Jahr 2010 vor, die einen Stilllegungs- und Nachsorgeaufwand von 10,7 €/m<sup>3</sup> Deponieinput angibt. Davon entfallen ca. 49 % (entsprechend ca. 5,2 €/m<sup>3</sup>) auf Oberflächenabdichtung und Rekultivierung und ca. 38 % (entsprechend 4,1 €/m<sup>3</sup>) auf Sickerwasserfassung und Behandlung. Die Rückstellungsberechnung geht davon aus, dass die Sickerwasserbehandlung in der bestehenden Anlage vor Ort ca. 12 Jahre nach Fertigstellung der Oberflächenabdichtung eingestellt werden kann.

Hinsichtlich der Kosten für Gasfassung und Behandlung wird in Anbetracht der mehrere Jahrzehnte andauernden Rückbauphase von einer Kostenneutralität ausgegangen.

Bei einem 30 Jahre andauernden Deponierückbau fallen über die gesamte Zeitspanne jedoch weiterhin signifikante Kosten für die Sickerwasserbehandlung an. Die Menge des Sickerwassers kann in erster Näherung über 30 Jahre linear rückläufig angesetzt werden, wenn sich die Deponiegrundfläche von Jahr zu Jahr gleichmäßig reduziert. Die Menge und Behandlungskosten des Sickerwassers konnten den Betriebsdaten des AV.E entnommen werden. Bei Entfall der Oberflächenabdichtung resultiert hieraus ein Kostenblock von 3,7 €/m<sup>3</sup> Deponievolumen, der auch bei einem Deponierückbau anfallen. Somit dürfen bei einem Kosten-Nutzen-Vergleich nicht die vollen 9,3 €/m<sup>3</sup> (aus eingesparter Oberflächenabdichtung und Sickerwasserbehandlung) als Ersparnis angesetzt werden sondern lediglich 5,6 €/m<sup>3</sup>.



#### 4.4 Kalkulatorische Erlöse

Auf der Erlösseite beim Rückbau der Deponie Alte Schanze sind neben den vorgenannten Einsparungen in erster Linie die zu erwartende Erlöse der Eisen- und Nichteisenmetall-Vermarktung zu berücksichtigen. Hierzu sei folgendes angemerkt:

Die Rohstoffpreisentwicklung im Bereich Fe- und NE-Metalle ist stark volatil. Die Vermarktung geschieht häufig auf Basis von Quartalspreisen, bei kleineren Händlern und Chargen auch auf Tagespreisbasis. Der Europäische Wirtschaftsdienst (EUWID), Bereich Recycling und Entsorgung, informiert regelmäßig über die Preisentwicklung. Darüber hinaus wurde die Erlössituation im Bereich Metallrecycling bei verschiedenen Kunden der IWA abgefragt (Preisstand Sommer 2014). Das Ergebnis kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Stahl Mischschrott, einfache Qualität / schlechte Sortierung, erzielte Preise zwischen ca. 200 – 250 €/t, i.M. 225 €/t
- Im NE-Metallbereich erzielt Kupfer, 1 A-Qualität, sauber und sortenrein, die höchsten Preise zwischen ca. 4.000 – 4.500 €/t, i.M. 4.250 €/t
- Die untere Preisspanne im NE-Metallbereich bildet Aluminium 1 A-Qualität, sauber und sortenrein, mit Preisen zwischen ca. 800 – 1.200 €/t, i.M. 1.000 €/t

Nach unserer Auffassung sollten die vorstehenden Angaben für hochwertige Kupfer- bzw. Aluminiummetalle nicht unkorrigiert auf NE-Metallschrotte umgelegt werden, die mehrere Jahrzehnte im Deponiegas- und Sickerwassermilieu gelegen haben und durch einfache maschinelle Aufbereitung und Sortierung gewonnen werden. Wir haben die genannten Mittelpreise in dieser Kategorie deshalb auf 75 % reduziert.

Eine Übersicht der verwendeten Kalkulationsansätze zeigt Tabelle 4. Bei den NE-Metallen handelt sich um einen Mischpreis (Kupfer : Aluminium = 1 : 1).

*Tabelle 4: Kalkulationsansätze aus der Vermarktung von Metallschrott aus Deponierückbau (Stand Sommer 2014)*

Produkt	Einheitspreis
Fe-Metallschrott	225 €/t
NE-Metallschrott	1.969 €/t

#### 4.5 Ergebnisse

Zielvorgabe: Untersuchungsgegenstand war in allen Szenarien die Zielvorstellung, nach Abschluss des Rückbaus die gesamte Deponiefläche einer neuen Nutzung zuführen zu können. Für unterschiedliche Szenarien, z.B. Vor-Ort-Aufbereitung mit Fe- / NE-



Metallausschleusung und Verwertung und thermischer Verwertung der Leichtfraktion sowie (vorläufiger) Deponierung der z.Zt. nicht verwertbaren mineralisch-organischen Feinfraktion auf externen Deponien, wurden deshalb die entsprechenden Mengenangaben zum maschinellen Rückbaupotential (Verknüpfung von Abbildung 8 und 9) mit den jeweiligen Rückbaukosten (Tabelle 3) und Erlösen (Tabelle 4) multipliziert. Beispielrechnungen werden im Vortrag erläutert.

Um die zukünftigen Potentiale zu untersuchen wurde das Kosten-Nutzen-Verhältnis beim Rückbau mit kostengünstigerer Vor-Ort-Aufbereitung in zwei weiteren Szenarien auf zukünftige Zeiträume extrapoliert. Hierfür wurden die Jahre 2044 und 2074 ausgewählt, um die zeitliche Verschiebung um jeweils mindestens 30 Jahre abzudecken. Die bis dahin zu erwartende jährliche Teuerungsrate für den Rückbau wurde aus Grunddaten des Statistischen Bundesamtes, Baupreisindex für Erdarbeiten im Tiefbau, unter Zugrundelegung des 10jährigen Zeitraumes 2001 – 2011 abgeleitet. Hinsichtlich der zu erwartenden Metallverwertungserlöse wurden die Steigerungsraten unterstellt, die GÄTH ET AL. 2012 für den gleichen Zeitraum angesetzt haben. Sie werden für Kupfer als einem wesentlichen Repräsentanten im NE-Metallbereich z.B. mit ca. 400 €/Mg x Jahr angegeben.

Im Ergebnis kann zusammenfassend folgendes festgehalten werden: Keines der untersuchten Szenarien führte in den untersuchten Zeitschritten (Jahre 2014, 2044, 2074) auch nur annähernd zu einer kostendeckenden Bilanzierung der Erlöse, auch nicht unter Berücksichtigung der Einsparungen aus dem Entfall eines Oberflächenabdichtungssystems.

Erst wenn die Metallverwertungspotentiale im Deponieinput die in zahlreichen Fallbeispielen dokumentierten Mengenansätze gemäß Abbildung 6 deutlich übertreffen (Achtung: Die Angaben der bundesweiten Hausmüllanalysen 1979/80 und 1985 geben hierfür keine Begründung!)

und wenn sich langfristig die Vermarktungserlöse insbesondere im NE-Metallbereich mit jährlichen Preissteigerungen um ca. 400 €/Mg x Jahr stark positiv entwickeln, die Teuerungsrate der Rückbaukosten dagegen im langjährigen Mittel 1,3 % nicht übersteigt

und wenn zumindest die kostenneutrale Verwertung der Leichtfraktion möglich wird,

nur dann ist für die Grunddaten der Deponie Alte Schanze frühestens ab dem Jahr 2050 mit einem wirtschaftlichen Deponierückbau zu rechnen.

Die Ergebnisse dieses sogenannten best-case-Szenarios zeigt Abbildung 10.

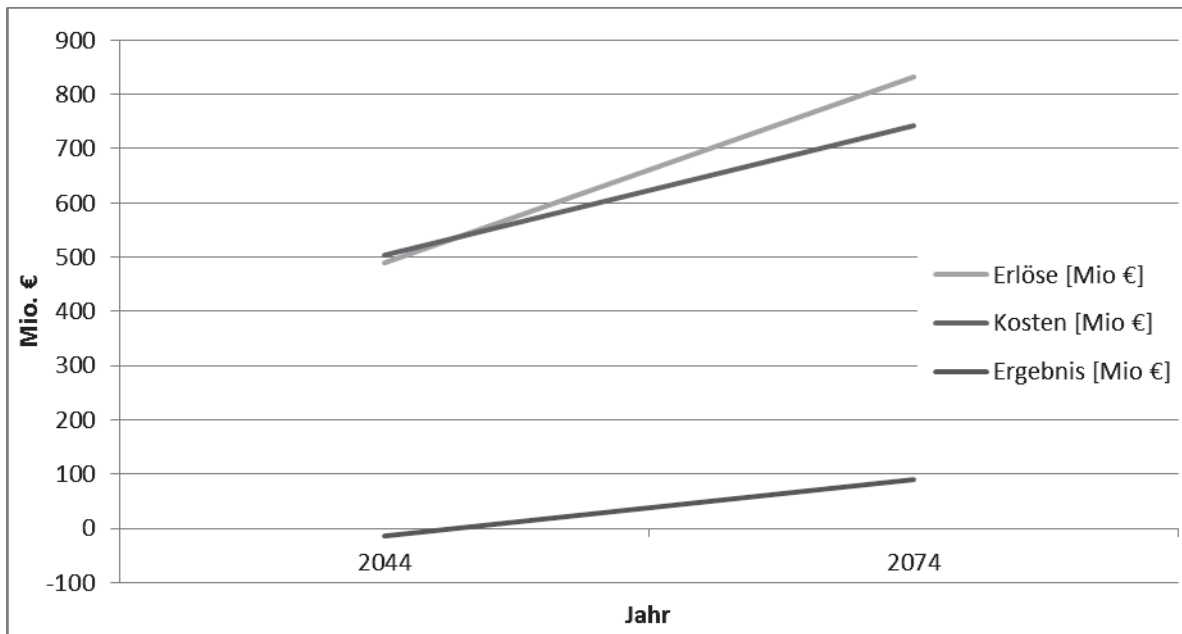


Abbildung 10: Ergebnisse der best-case-Szenarien für den Deponierückbau Alte Schanze

Die genannte Zeitspanne kann sich verkürzen, wenn sich die Rahmenbedingungen schneller als gegenwärtig zu erwarten ist, zum wirtschaftlichen Vorteil eines Rückbaus verändern. Hierfür müssten sich allerdings mehrere, vorstehend genannte Voraussetzungen gleichzeitig signifikant bessern und die Teuerungsrate auf Jahrzehnte hinaus auf dem heutigen Niveau bleiben. Wenn die genannten Grundvoraussetzungen nicht eintreffen, bleibt der Deponierückbau mit einem Kostenrisiko von mehreren Hundert Mio. Euro verbunden!

Die Abfallzusammensetzung der ehemaligen Hausmülldeponie Alte Schanze (vgl. Abbildungen 8 bzw. 9) kann u.E. als typisch für zahlreiche andere ehemalige Hausmülldeponien im ländlichen Raum gelten. Die Übertragung der grundsätzlichen Einschätzung auf andere Standorte erscheint uns auch bei geringen Abweichungen zum Deponieinput durchaus gegeben. Bestärkt wird diese Annahme durch die aktuelle Info in EUWID (2014) zum geplanten Rückbau der Deponie Dyckerhoffbruch/Wiesbaden.

Deponierückbau ist demnach unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen (Rohstoff- und Energiepreise, Entsorgungskosten und Verwertungserlöse) keine wirtschaftliche Alternative zur Oberflächenabdichtung nach Beendigung der Ablagerungsphase. Ein Deponierückbau kann aber auf sehr lange Sicht wirtschaftlich werden und dann das Defizit der aktuellen abfallrechtlichen Stilllegungsstrategie in Hinblick auf eine ökologisch anzustrebende Nachsorgefreiheit beheben. Langfristige ökologische Bewertungen sind in die vorliegenden Kosten-Nutzen-Untersuchungen nicht eingeflossen, weil hierzu bisher keine monetär bewertbaren Maßstäbe vorliegen.



## 5 Literatur

- HENKEN-MELLIES, U. 2012 „Deponie-Forschung – Untersuchung bayerischer Versuchsfelder nach 10 bis 14jährigem Testbetrieb“, Gutachten des TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH Grundbauinstitut im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Teilbericht A: Zustand der Versuchsfelder und der getesteten Abdichtungs-komponenten, 05.12.2012, 44 Seiten, 6 Anlagen
- SOKOLLEK, V./ MELCHIOR, S./BERGER, K./STEINERT, B.: 2006 „Achtzehn Jahre Überwachung der gesicherten Deponie Georgswerder/Hamburg“, Deponieworkshop Liberec-Zittau 2006, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau-Görlitz, Heft 91, Eigenverlag
- STEGMANN, R./HUPE, K./HEYER, K.-U. 2014 „Deponiebelüftung: Erfahrungen, Strategien, Zeiträume und Abluftbehandlung“, Hamburger Berichte Bd. 40 - Dokumentation der 9. Hamburger Abfallwirtschaftstage vom 21./22.01.2014, Verlag Abfall aktuell
- KRUSE, K. 1994 „Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldeponien“, Heft 54 der Mitteilungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft. Technische Universität Braunschweig, Eigenverlag
- FRICKE, K. 2013 „Landfill Mining – ein Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcensicherung“, Müll und Abfall, Heft 11, 45. Jahrgang
- HÖLZLE, I. 2010 „Vom Deponierückbau bis zum landfill mining – eine Synthese internationaler Untersuchungen“, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 7-8
- KRÜGER, M.; BREITENSTEIN, B. 2014 „Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfalldeponien“, Vortrag r<sup>3</sup>-Statusseminar 11./12.06.2014, Essen
- GÄTH, S./NISPEL, J. 2011 „Ressourcenpotential von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland“, Müll und Abfall, Heft 2, 43. Jahrgang



- GÄTH, S. 2014 „Unsere Hausmülldeponien – ein Ressourcendepot von morgen? Abschätzung der Potentiale und Risiken“, Vortrag beim 20jährigen Jubiläum des AV.E Eigenbetriebs Kreis Paderborn am 04.02.2014
- GÄTH, S./NISPEL, J. 2012 „Betrachtung des Ressourcenpotentials der Kreis-  
mülldeponie Hechingen – Eine ressourcenorientierte,  
ökonomische, ökologische und technische Abschät-  
zung“, Abschlussbericht, Justus-Liebig–Universität  
Gießen, Institut für Landschaftsökologie und Res-  
sourcenmanagement, Professur für Abfallwirtschaft  
in Zusammenarbeit mit dem Abfallwirtschaftsamt des  
Zollernalbkreis“, Juni 2012, [www.lubw.baden-  
wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-<br/>wuerttemberg.de)
- EUWID 2014 „Wiesbaden: Kein Grund für einen Deponierückbau“,  
EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG; Ausga-  
be 29.2014

**Anschrift des Verfassers:**

Dr.-Ing. Ernst Reuter

IWA Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Abfallwirtschaft mbH & Co. KG

Marienstraße 122

D-32425 Minden

Telefon +49 571 94618 11

Email: [reuter@iwa-minden.de](mailto:reuter@iwa-minden.de)

Website: [www.iwa-minden.de](http://www.iwa-minden.de)





# depSIM – Einsatz und Potentiale der numerischen Deponiesimulation

Sebastian Schmuck<sup>1</sup>, Renatus Widmann<sup>1</sup>, Tim Ricken<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft, Universität Duisburg-Essen

<sup>2</sup>Lehrstuhl Mechanik Statik Dynamik, Technische Universität Dortmund

## Inhaltsangabe

Im Beitrag wird ein mechanisches Modell zur gekoppelten Berechnung der wesentlichen Prozesse innerhalb des Deponiekörpers vorgestellt. Als Randbedingungen können die äußere Temperatur, Druck und die Verschiebung vorgegeben werden.

DepSIM ermöglicht eine örtlich und zeitlich differenzierte Berechnung und Darstellung der Temperatur, der Abbaurate der Organik, der lokalen Druckverhältnisse und die daraus resultierenden Gasströmungsgeschwindigkeiten. Durch die detaillierte Berechnung der Gasgeschwindigkeiten an jedem Punkt der Deponie ergibt sich eine wesentliche Verbesserung gegenüber konventionellen Rechenmodellen zur Gasprognose und -erfassung. Diese bisherigen Prognosemodelle basieren auf abgeschätzten Eingangsparametern, die jeweils für eine komplette Deponie oder einen Deponieabschnitt gemittelt werden und keine gekoppelte Berechnung der relevanten Parameter ermöglichen. Dadurch ist eine räumlich differenzierte Betrachtung der Gasproduktion nicht möglich. Doch gerade eine räumlich exakte, quantitative Prognose der zu erwartenden Gasproduktion, die depSIM leisten kann, ist für Deponiebetreiber zur richtigen Dimensionierung der Gasfassung und -behandlung zwingend notwendig. Ebenfalls lassen sich die Gasströme entlang der Deponieoberfläche räumlich und zeitlich differenziert darstellen. Dies ermöglicht eine lokal differenzierte Deponiegasbewirtschaftung mit einer Unterteilung in Bereiche mit aktiver oder passiver Gasfassung oder um die Realisierbarkeit einer Methanoxidationsschicht abzuschätzen. Anhand von ausgewählten Praxisbeispielen wird das Optimierungspotential für unterschiedliche Deponien aufgezeigt und erläutert.

## Stichworte

Deponiesimulation, Nachsorge, Gasprognose, Setzungsverhalten, Methanoxidation, Gasverwertung, Simulation, Langzeitverhalten



# 1 Einleitung

Siedlungsabfalldeponien haben eine inhomogene und komplexe Zusammensetzung. In ihnen finden sich Materialien unterschiedlichster Herkunft und Eigenschaft. Durch die Ablagerungen von teils großen Mengen organischer Abfälle stehen diese mit ihrem Potenzial zur Deponiegasbildung im besonderen Fokus. Unter der Beteiligung verschiedener Bakterien wird das organische Material im Deponiekörper für kurze Zeit aerob, danach die längste Zeit anaerob umgesetzt und das über einen Zeitraum von bis zu 200 Jahren, siehe Abbildung 1. Das Endprodukt dieser organischen Umsetzung sind neben Spurenelementen im Wesentlichen Kohlendioxid (ca. 45%) und Methan (ca. 55%). Beide Gase werden als Treibhausgase eingestuft, wobei das Methan im Vergleich zu Kohlendioxid eine über das 23-fache höhere Wirkung (Aufgrund des COP-Beschlusses ab 2012) auf die Klimaerwärmung hat. Hieraus leitet sich die Auflage ab, dass Deponiegasemissionen kontrolliert abgeführt werden müssen. Solange das Methan in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung steht, kann das Gas z. B. mittels Blockheizkraftwerken verstromt und damit wirtschaftlich genutzt werden. Nimmt die Methangasproduktion ab (s. Abbildung 1) ist eine wirtschaftlich rentable Nutzung des Methangases nicht mehr möglich. Dennoch sind die Deponiebetreiber verpflichtet, auch in der Nachsorgephase die Gasemissionen aus der Deponie zu behandeln. Um die Methanoxidationsschicht optimal auslegen zu können ist es nötig, sowohl Kenntniss über die anströmende Gasmenge zu erlangen als auch die Grenzfunktionsbereiche der methanotrophen Bakterien zu bestimmen, sodass die Funktionalität der Methanoxidationsschicht auch unter ungünstigen äußeren Betriebsbedingungen gewährleistet werden kann.

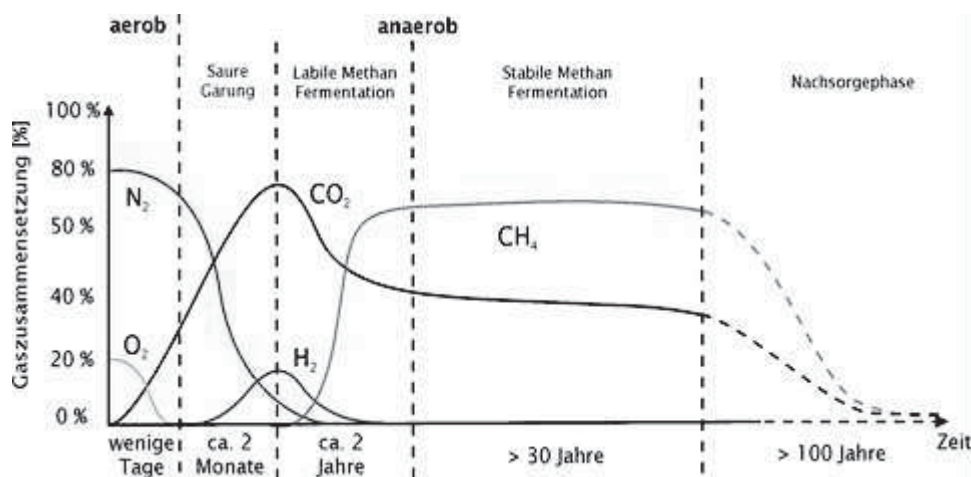


Abbildung 1: Zusammensetzung des aus der biologischen Umsetzung resultierenden Deponiegases (nach Pohland, 2003 [1]).

Bis heute werden in der Abfallwirtschaft zur Beschreibung der Prozesse einfache Modellansätze verwendet, welche jedoch aufgrund der Komplexität keine verlässlichen Prognosen erlauben, weder im Hinblick auf das zeitliche noch räumliche Verhalten der



Deponie. Durch die Nutzung des im Folgenden detailliert beschriebenen Deponiesimulationsmodells (DepSim) ist eine räumlich und zeitlich aufgeschlüsselte Beschreibung und Prognostizierung der Umsetzungsprozesse im Deponiekörper und in Methanoxidationsschichten möglich. Hierzu wird die Genese der Deponie nachgebildet. Das Modell kann mittels historischer Messwerte kalibriert und durch Nutzung der aktuellen Messwerte überprüft werden. Dies ermöglicht valide Prognosen von Setzungen, der Gas- und Wasserphase.

## 2 Beschreibung des Simulationsmodells

Die wesentliche Grundlage des Deponiesimulationsmodells liegt in der Theorie der porösen Medien.

Die Theorie poröser Medien basiert auf den Arbeiten zur Mischungstheorie von Truesdell & Toupin [9], welche bereits in den 1980ziger Jahren zuerst von Bowen [2,3] und danach von de Boer und Ehlers entwickelt wurde, siehe z. B. das Buch von de Boer [1] oder den Übersichtsbeitrag von Ehlers [4]. Der Mischungstheorie liegt die Annahme zu Grunde, dass sich die Bestandteile des Körpers vollständig vermengen, jedoch nicht molekular vermischen. Die heterogene Verteilung der Konstituierenden wird auf der mikroskopischen Ebene innerhalb eines Volumenelements unter Berücksichtigung ihrer volumetrischen Anteile homogenisiert. Über das Konzept der Volumenanteile kann eine Verbindung zwischen der mikro- und makroskopischen Ebene hergestellt werden, wobei die von Truesdell [8] formulierten metaphysischen Prinzipien beachtet werden müssen.

Im Falle der Deponie besteht der Mischungskörper aus einer organischen ( $\alpha=O$ ) und einer anorganischen ( $\alpha=S$ ) Festkörperphase, einer Flüssigphase ( $\alpha=L$ ) und einer Gasphase ( $\alpha=G$ ). In Abbildung 2 sind deren Homogenisierung und das Konzept der Volumenanteile veranschaulicht. Die Vorteile der homogenisierten kontinuierlichen Darstellung müssen mit der Formulierung von Interaktionsgrößen für die parallel existierenden Kontinua bezahlt werden, womit die gegenseitige Beeinflussung der Konstituierenden beschrieben werden kann. Korrespondierend zu den Bilanzgleichungen der Masse, der Bewegungsgröße und der Energie werden dazu je Konstituierende ein Massenaustausch-, ein Impulsaustausch- und ein Energieaustauschterm eingeführt. Unter Einbeziehung der Interaktionsgrößen können dann die Bilanzgleichung für die Konstituierenden formuliert werden. Entsprechend Truesdells drittem metaphysischen Gesetz muss sich die Summe der jeweiligen Interaktionsgrößen zu Null ergänzen, damit der Gesamtmischungskörper wieder als Einphasenmaterial beschrieben werden kann.

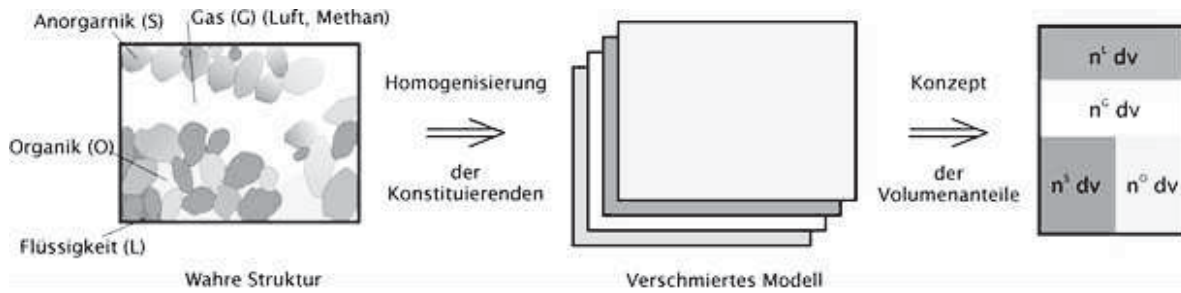


Abbildung 2: Homogenisierung und Konzept der Volumenanteile

Die ingenieurtechnische Herausforderung besteht nun darin, für die untersuchte Deponie die Material- und Interaktionsgrößen so zu bestimmen, dass zum einen der Berechnungsaufwand vertretbar ist, zum anderen aber das Materialverhalten noch hinreichend genau abgebildet werden kann. Es empfiehlt sich, den Mischungskörper gedanklich in eine Makro- und Mikroebene zu unterteilen. Auf der Makroebene werden die einzelnen Phasen unterschieden, welche über die Volumenanteile und ihre unabhängige Bewegung im Modell identifiziert werden können. Für alle Freiwerte, welche auf dieser Ebene berücksichtigt werden, wird ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem aufgestellt, welches zum Beispiel im Rahmen der Finiten-Element-Methode numerisch gelöst werden kann. Es werden neben den Volumenanteilen und der Bewegung auch die Temperatur, chemische Konzentrationen und weitere Größen in die Betrachtung mit aufgenommen. Die noch fehlenden Materialgleichungen werden auf der Mikroebene formuliert, wobei als makroskopische Eingangsgrößen die Freiwerte des gekoppelten Differentialgleichungssystems verwendet werden dürfen, siehe Abbildung 3.

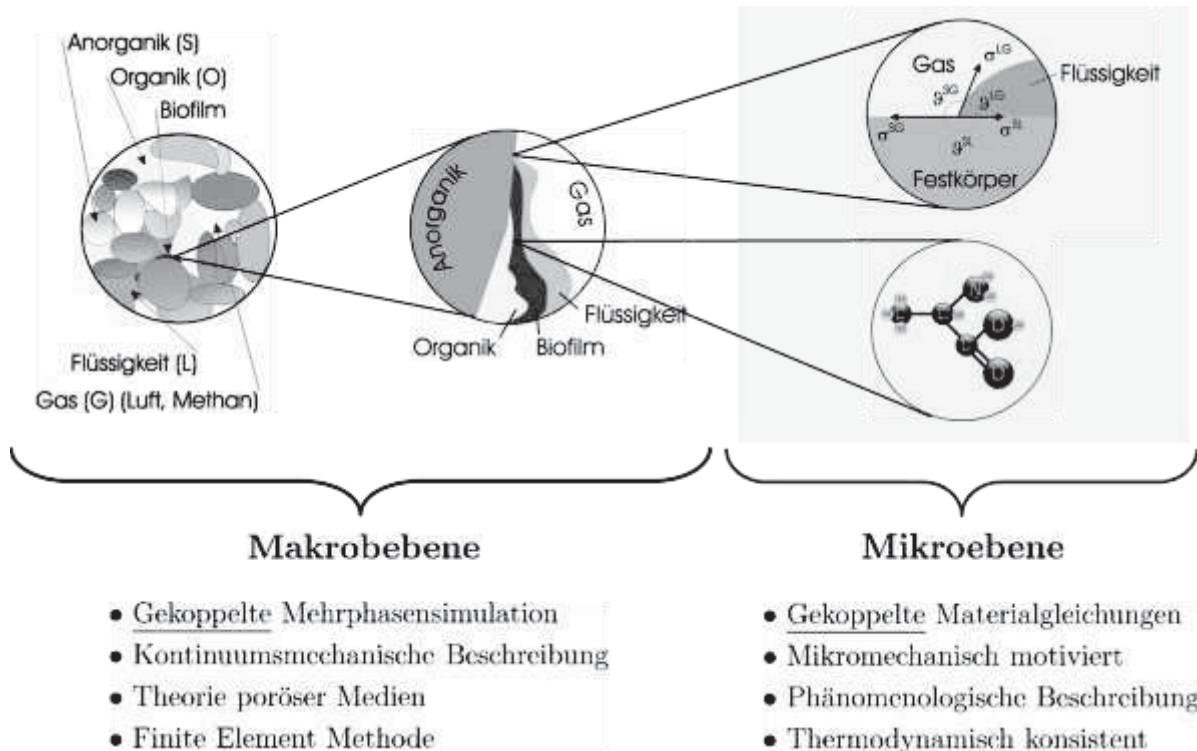


Abbildung 3: Zusammenfassung des Modellierungskonzepts



Hier können dann physikalische Phänomene wie die Kapillarität oder chemische Reaktionen wie z. B. Phasenumwandlungen in das Modell integriert werden. Die Beachtung der Restriktionen aus der Auswertung der Entropiegleichung bezüglich des Mischungskörpers sichert dabei die thermodynamische Konsistenz. Die Formulierung der Materialgleichung erfolgt zumeist phänomenologisch, wobei neben den globalen Freiwerten auch interne Variablen verwendet werden können, welche beispielsweise über Evolutionsgleichungen gesteuert werden. Voraussetzung dafür ist bekanntlich, dass die internen Variablen schwach gekoppelt sind und nur einen lokal und keinen graduellen Einfluss auf die Lösung haben. Im Falle der Deponie stellen beispielsweise der pH-Wert und die lokale Bakterienpopulation interne Variablen dar, welche zwar zur organischen Umsetzung gekoppelt und zeitlich veränderlich sind, ansonsten aber keinen Einfluss auf die Lösung haben. Der organische Massenaustausch beschreibt die Änderungen der organischen Phase durch die bakterielle Aktivität und wird hier exemplarisch als Materialgleichung vorgestellt. Die übrigen konstitutiven Gleichungen können Ricken & Ustohalova [6] entnommen werden.

Nach Monod [5] ist die Abbaurate der organischen Substanzen negativ proportional zu der Wachstumsrate der Bakterien und somit zur Methangasproduktionsgeschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor beschreibt die Abhängigkeit zu den biologischen Reaktionsprozessen. Er wird bestimmt über die maximal aktive Biomasse, die Temperatur, die Substratkonzentration, definiert als partielle Dichte der feuchten organischen Masse, die pH-Konzentration sowie über möglich Hemmstoffe. Exemplarisch sind die Verläufe der Proportionalitätsfaktoren für die Temperatur und den Substratgehalt in Bild 6 dargestellt. Der organische Massenaustausch beschreibt somit die Änderungen in der organischen Phase durch die bakterielle Aktivität, bei der die organische Substanz abgebaut und in Gas umgewandelt wird. Je mehr organischer Abfall im Deponiekörper vorhanden ist, desto mehr Deponiegas wird durch die bakterielle Aktivität in Abhängigkeit vom Wärme- und Feuchtegehalt produziert.

### 3 Simulationsbeispiel

Für die Simulation einer Deponie muss eine detaillierte Datensammlung über die Menge und Zusammensetzungen der Deponieabfälle erfolgen, möglichst aufgeschlüsselt mit Zeit- und Ortsangaben der Ablagerung.

Darauf aufbauend wird die Geometrie der Deponie elektronisch erfasst, inklusive der Gestalt der zeitlich veränderlichen Ablagerungsabschnitte, was für die Simulation einen wesentlichen Punkt darstellt. Üblicherweise wird die Genese der Deponie für die Simulation in Jahresschritten berücksichtigt, wobei die Berechnungsschritte in Monaten erfolgen. Bei der Simulation von unterschiedlichen Deponiestandorten konnte gezeigt werden, dass für die Simulation eine Reihe von Vereinfachungen in der Geometrie kei-





nen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. So werden beispielsweise Deponieströßen nicht berücksichtigt. Ebenfalls können spitze Winkel, wie sie meist an sehr flach auslaufenden Böschungen auftreten nicht dargestellt werden. Diese werden im Modell speziell angepasst.

In Abbildung 4 ist der vernetzte Geometriekörper einer Deponie mit vier unterschiedlichen Schüttbereichen dargestellt.

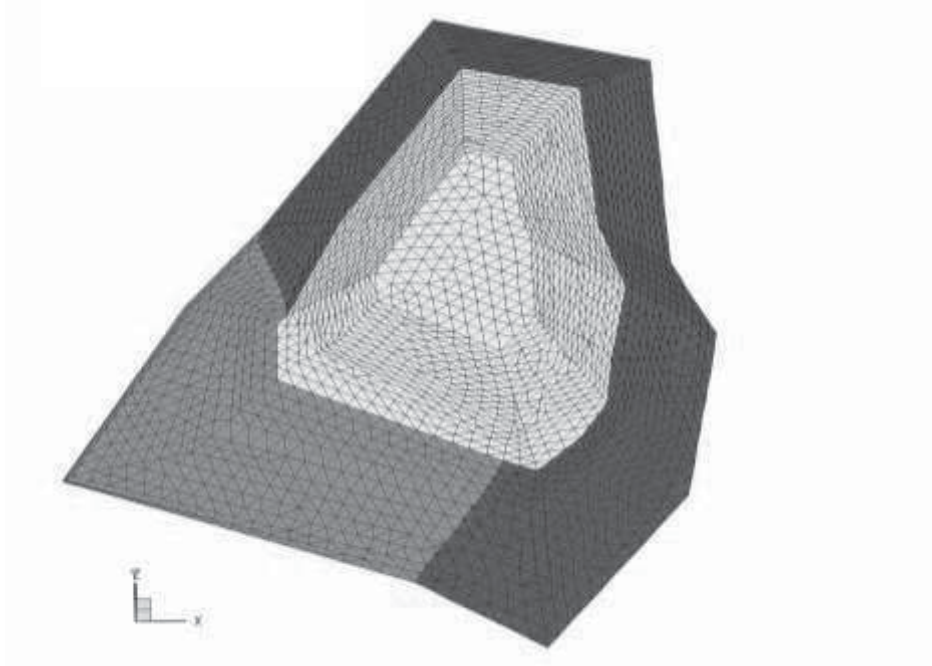


Abbildung 4: vernetzter Geometriekörper einer Deponie

Die untersuchte Deponie zeigt eine große Inhomogenität, welcher auch die Biodegeneration in der Deponie unterworfen ist. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, mit vereinfachten Überschlagsrechnungen das komplexe Deponieverhalten abzuschätzen. Die hierfür in der Praxis z. B. nach Tabasaran & Rettenberger [7] verwendeten Modelle führen zu Überschätzungen der tatsächlich anfallenden Deponiegasmengen von bis zu 300%, was aufgrund der dargestellten Inhomogenitäten und gegenseitigen Kopplungen nicht weiter überrascht. Durch die hier vorgestellte Simulation ist es möglich die Deponiegenese und die innere Inhomogenität zu berücksichtigen, was zu einer wesentlichen Verbesserung der Deponiegasprognose führt. Durch die gekoppelte Berechnung ist es möglich das Setzungsverhalten unterschiedlicher Deponieabschnitte genauer zu beschreiben, siehe Abbildung 5. Hierdurch ist es möglich die Oberflächenabdichtung nach abgeschlossener Setzungen für zeitversetzt für unterschiedliche Teilbereiche durchzuführen.



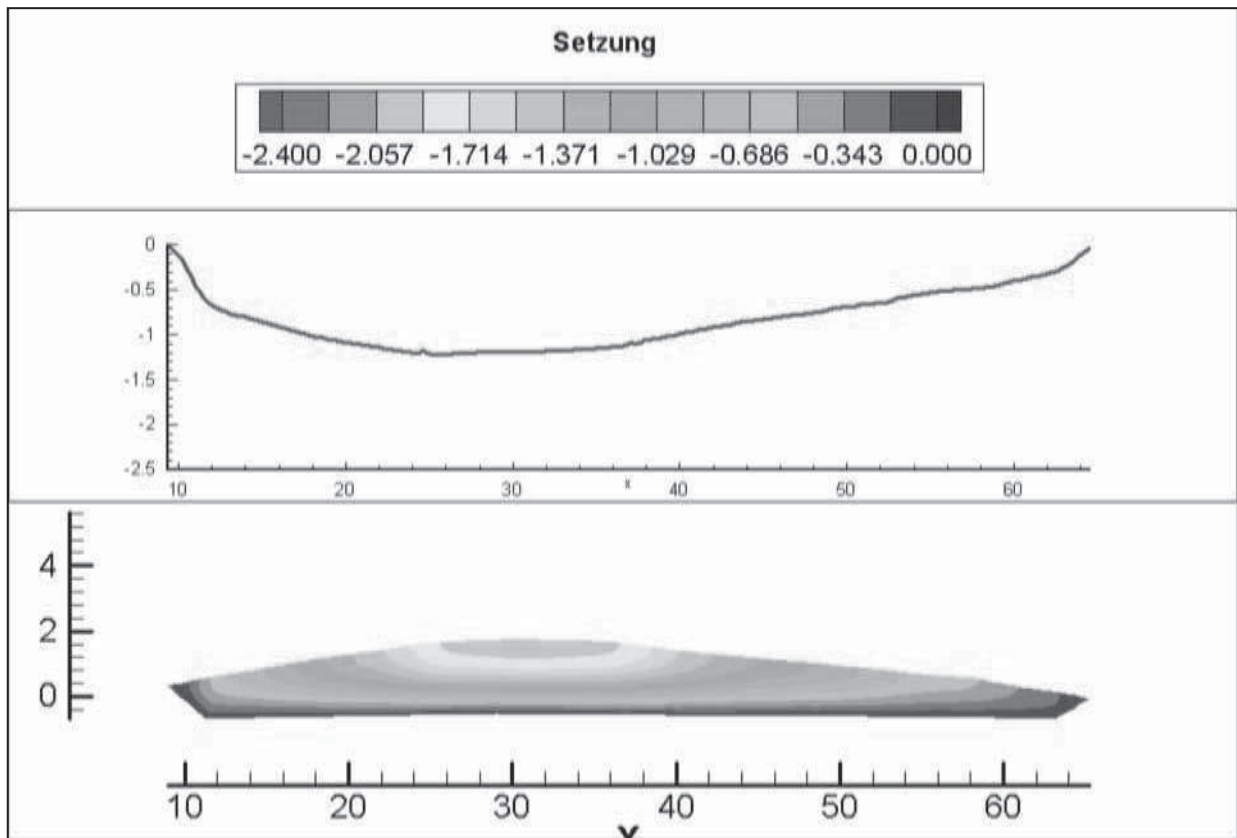


Abbildung 5: Setzungsverlauf

Die Aktivität innerhalb des Deponiekörpers wird im Wesentlichen durch die Temperatur beeinflusst. Es ist möglich die Temperatur für alle Teilbereiche genau zu berechnen und mit Messergebnissen zu überlagern. Abbildung 6 zeigt die drei dimensionale Darstellung einer Beispieldeponie zu unterschiedlichen Zeitpunkten, so dass hierdurch die Entwicklung gut nachvollziehbar wird.

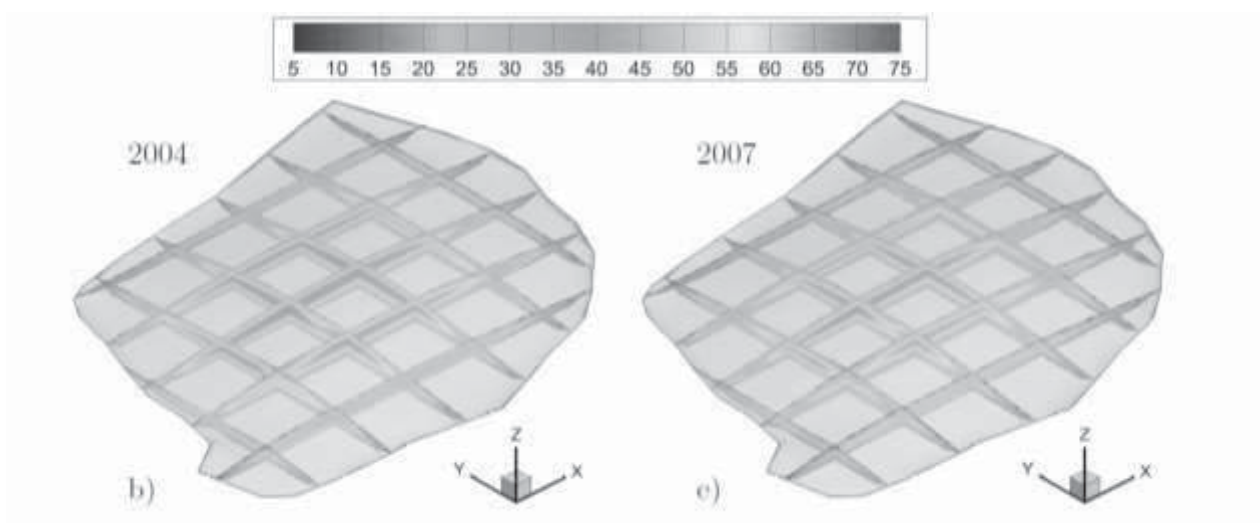


Abbildung 6: 3D-Temperaturverlauf innerhalb des Deponiekörpers [12]



Meist ist finales Ziel der Simulation die Gasgeschwindigkeiten und Gasmengen an der Deponieoberfläche zu bestimmen, um so zum einen die Gasprognose zu verbessern und hierdurch das bestehende Gassystem zu optimieren oder ggf. weitergehende Optimierungen von Gasfassung und Gasnutzung zu ermöglichen. Abbildung 7 zeigt die Gasgeschwindigkeitsvektoren an der Deponieoberfläche.

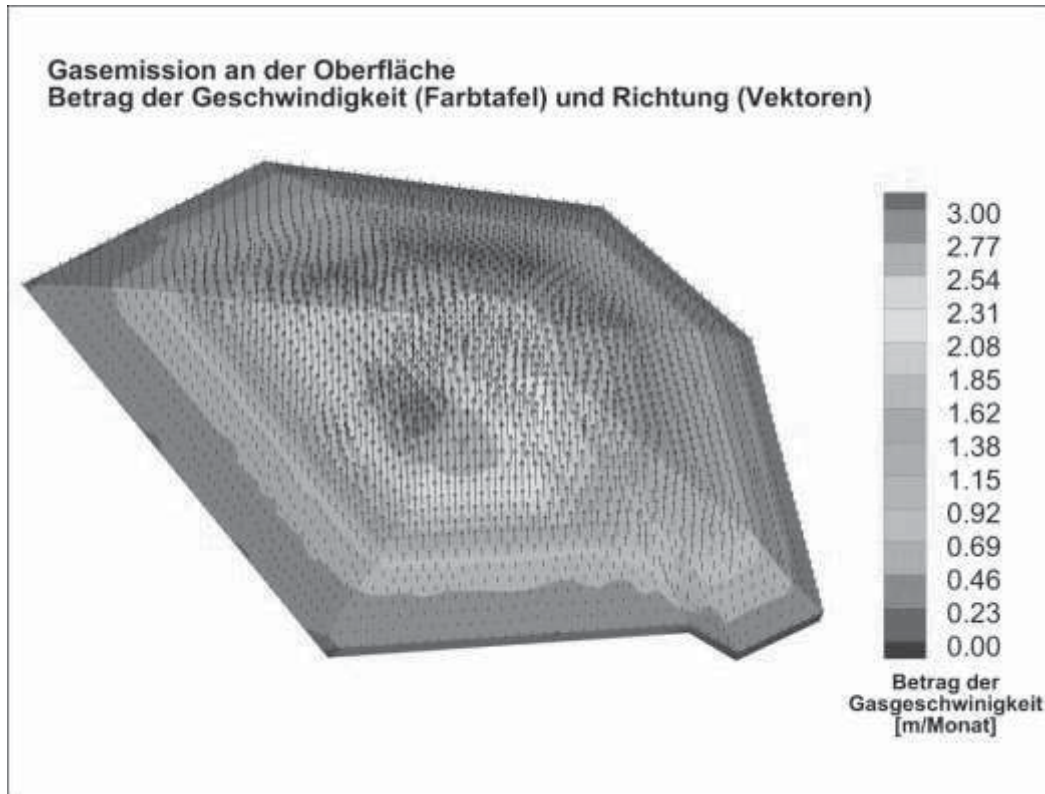


Abbildung 7: Gasgeschwindigkeitsvektoren an der Deponieoberfläche [12]

In einem derzeit laufenden DFG Forschungsprogrammes wird nun die Methanoxidationsschritt in einem Simulationsmodell erfasst, womit schließlich ein geschlossenes Modell zur Bewertung von Deponiegasemissionen bereitgestellt werden kann, was dazu beiträgt, den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen zu verringern.



## 4 Zusammenfassung

Das entwickelte Modell ermöglicht eine örtlich und zeitlich differenzierte Berechnung und Darstellung der Temperatur, der Abbaurate der Organik, der lokalen Druckverhältnisse und die daraus resultierenden Gasströmungsgeschwindigkeiten. Durch die detaillierte Berechnung der Gasgeschwindigkeiten an jedem Punkt der Deponie ergibt sich eine wesentliche Verbesserung gegenüber konventionellen Rechenmodellen zur Gasprognose und -erfassung. Diese bisherigen Prognosemodelle basieren auf abgeschätzten Eingangsparametern, die jeweils für eine komplette Deponie oder einen Deponieabschnitt gemittelt werden und keine gekoppelte Berechnung der relevanten Parameter ermöglichen. Dadurch ist eine räumlich differenzierte Betrachtung der Gasproduktion nicht möglich. Doch gerade eine räumlich exakte, quantitative Prognose der zu erwartenden Gasproduktion, die das neue Simulationsmodell leisten kann, ist für Deponiebetreiber zur richtigen Dimensionierung der Gasfassung und -behandlung zwingend notwendig[12]. Des Weiteren lassen sich mit dem Simulationsmodell die Gasströme entlang der Deponieoberfläche räumlich und zeitlich differenziert darstellen. Dies ermöglicht eine lokal differenzierte Deponiegasbewirtschaftung mit einer Unterteilung in Bereiche mit aktiver oder passiver Gasfassung oder um die Realisierbarkeit einer Methanoxidationsschicht abzuschätzen.

Für die Nutzung des Deponiesimulationsmodells (DepSim) werden einige spezifische Daten der Deponie benötigt.

### Benötigte Daten:

- Meteorologie (Niederschlag, Temperatur, Wind)
- Emissionen (Wasser-, Sickerwasser-, Gasmenge und -qualität)
- Deponiekörper (Aufbau, Zusammensetzung, Setzung)
- Grundwasserstände

Die folgenden für eine Deponie relevanten Ergebnisse können analog zum Beispiel Deponiegas mit DepSim in beliebiger Raum- und Zeitaufösung ermittelt werden:

### Deformationen durch Organikabbau:

- Volumenänderungen des Porenraumes
- Setzungen (Basis, Oberfläche, Teilbereiche)
- Verformungen (Basis, Oberfläche, Teilbereiche)

**Biochemische Prozesse und Phasenumwandlung:**

- Fest-, Flüssig-, Gasphasen-Übergänge (auch Methanoxidation)
- Energie-,Wärmeproduktion

**Transportprozesse und innerer Wasserhaushalt:**

- Gas
- Wasserhaushalt (Oberflächen-, Grund-, Sickerwasser)
- Wärme (Temperatur)

Für folgende Anwendungen kann DepSim Entscheidungshilfe sein:

**Optimierung der Deponieplanung:**

- Geometrie (Deponiekörper, Basis, Oberfläche)
- Bauablauf (Oberflächenabdeckung, -dichtung)
- Sickerwasserfassungssystem
- Deponiegasfassungssystem und Gasemissionen
- Nachsorge (Verkürzung der Aktivphase, Sickerwasser, Deponiegas)

**Optimierung des Deponiebetriebes**

- Wassermengenoptimierung
- Gasmengenoptimierung (Tiefenabsaugung)
- Temperaturverhältnisse (Oberfläche, Basis, Teilbereiche)
- Aktiv-Passivsysteme (Methanoxidation, Deponiebelüftung)

**Deponieüberwachung (Zustandsbeschreibung und Prognosen, z.B. 10, .50, .100a)**

- Wasserhaushalt (Grund-, Oberflächen- Fremd-, Sickerwasser-Fassung)
- Deponiegas (Menge, Qualität, Entgasungsanlage, Emissionen)
- Setzung - Ablagerungsverhalten



## 5 Literatur

- [1] Pohland, G. F., The Bioreactor Landfill Paradigm, EPA Bioreactor Landfills Workshop, Arlington, VA, USAA, 2003
- [2] de Boer, R., Theory of Porous Media -- highlights in the historical development and current state, Springer-Verlag Berlin, 2000.
- [3] Bowen, R.M., Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures, International Journal of Engineering Science, 18, 1129 – 1148, 1980.
- [4] Bowen, R.M., Compressible porous media models by use of the theory of mixtures, International Journal of Engineering Science, 20, 697-735, 1982.
- [5] Ehlers, W., Foundations of multiphasic and porous materials, in Ehlers, W. und Bluhm, J. (ed.) Porous Media: Theory, Experiments and Numerical Applications, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [6] Monod, J, Sur l'expression analytique de la croissance des populations bactériennes, en collaboration avec F. Morin, Rev. Scient., 5, pp. 227-229, 1942.
- [7] Ricken, T., Ustohalova, V., Modeling of thermal mass transfer in porous media with applications to the organic phase transition in landfills, Computational Materials Science 32 (3-4), 498 – 508, 2005.
- [12] Rettenberger, G, Grundlagen der Entgasungstechnik und Stand der Deponie-gasverwertung, aus „Deponie: Ablagerung von Abfällen“, K. J. Thomé- Kosmiensky, EF-Verlag für Energie- u. Umwelttechnik, Berlin 1987
- [13] Robeck, M., A FEM simulation of transport and conversion processes in landfills using a multiphase model based on the theory of porous media Shaker-Verlag, Aachen, 2012
- [8] Tabasaran, O., Rettenberger, G., Grundlage zur Planung von Entgasungsanlagen, Müllhandbuch Nr. 4547, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1987.
- [9] Truesdell, C., Thermodynamics of diffusion. In Truesdell, C. (ed.), Rational Thermodynamics. Springer-Verlag, New York, 219-236, 1984.
- [10] Truesdell, C. & Toupin, R.A., The classical field theories. In Flügge, S. (ed.): Handbuch der Physik, Band III/1. Springer-Verlag, Berlin, 1960.
- [11] Ustohalova, V., Process oriented modeling of long-term behavior impact of landfills in closure care and post closer care – decompositions and transport processes, Shaker-Verlag, Aachen, 2006.

**Anschrift der Verfasser**

Dr.-Ing. Sebastian Schmuck  
Universität Duisburg - Essen Campus Essen  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Abteilung Bauwissenschaft  
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft  
Universitätsstr. 15  
D-45141 Essen  
Telefon: +49 201 183 4475  
E-Mail: [sebastian.schmuck@uni-due.de](mailto:sebastian.schmuck@uni-due.de)  
Webseite: [www.uni-due.de/siwawi](http://www.uni-due.de/siwawi)

Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann  
Universität Duisburg - Essen Campus Essen  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Abteilung Bauwissenschaft  
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft  
Universitätsstr. 15  
D-45141 Essen  
Telefon: +49 201 183  
E-Mail: [renatus.widmann@uni-due.de](mailto:renatus.widmann@uni-due.de)  
Webseite: [www.uni-due.de/siwawi](http://www.uni-due.de/siwawi)

Prof. Dr.-Ing. Tim Ricken  
Technische Universität Dortmund  
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen  
Lehrstuhl Mechanik Statik Dynamik  
August-Schmidt-Str. 6  
44227 Dortmund  
Telefon: +49 231 - 755 – 2536  
E-Mail: [tim.ricken@tu-dortmund.de](mailto:tim.ricken@tu-dortmund.de)  
Webseite: <http://www.bauwesen.tu-dortmund.de/ms/de/Aktuell/>





# 3D-Rauminformationen mittels unbemannter Flugzeuge

Werner Mayr

GerMAP GmbH, Welzheim

## Inhaltsangabe

3D-Rauminformationen sind in vielen Bereichen grundlegende, betriebliche Infrastruktur. Sie dienen der Planung, Darstellung, Dokumentation und Kommunikation betrieblicher Abläufe und sind in täglichem Gebrauch. Dies gilt im Großen wie im Kleinen. Großflächige Oberflächen-Bestandsänderungen ebenso wie z.B. Volumenänderungen sind für Deponiebetreiber wichtige, stets zu aktualisierende 3D-Rauminformationen, die gleichermaßen bedeutsam wie Planung und Bau von kleinräumigen in-door Leitungssystemen sind. Zur Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen, Ermittlung von Volumenänderungen und z.B. Ableitung von Profilen oder Schichtenlinien werden seit kurzem vermehrt mit Kameras ausgestattete unbemannte Flugzeuge eingesetzt. Miniaturisierung, neue Materialien und Technologien, sowie erprobte Methoden ermöglichen Entwicklung, Bau und nunmehr Einsatz von unbemannten Flugkörpern. Diese werden im Englischen oftmals mit unmanned aerial vehicle (UAV) oder die rechtliche Verantwortung betonend mit RPAS (remotely piloted aircraft system) bezeichnet.

Der Beitrag berichtet anhand verschiedener, für Deponiebetreiber ausgeführter Dienstleistungsaufträge über den Einsatz von RPAS mit einem Gesamtgewicht kleiner 4 kg Gewicht. Zweck der Luftbildbefliegungen waren Erstellung von hochgenauen, feinstrukturierten Oberflächenmodellen des Deponiekörpers, sowie in Kombination mit Bauplänen und Endausbauplanungen Ermittlung und Visualisierungen des gegenwärtigen, verfüllten Volumens versus des noch verfügbaren Verfüllvolumens oder z.B. des benötigten Volumens für Rekultivierung. Die bildhafte, meist farbkodierte Rauminformations-Darstellung von Veränderungen oder Unterschieden gegenüber ursprünglichen Planungen sind oftmals das benötigte Produkt. Derartige 3D-Rauminformationen lassen sich aus Luftbildbefliegungen mittels unbemannter Flugzeuge kostengünstig und zeitnah gewinnen und ableiten. Hierüber wird in diesem Beitrag berichtet. Ebenso findet sich ein Überblick über die eingesetzte RPAS-Technologie sowie einen Ausblick zur weitergehenden Nutzung unbemannter Flugzeuge.

**Stichworte:** Deponie, Vermessung, Luftbild, UAV, 3D-Rauminformation

## 1 Einleitung

Im Jahr 2006 befassten wir uns mit dem Gedanken, bis dahin klassische Luftbildphotogrammetrie-Auswertetechnologie auf kleine Luftbilder zu übertragen, die aus Befliegungen mit manuell gesteuerten und kleinen Kameras ausgestatteten Modellflugzeugen stammten. Hierzu verwendete man einen kleinen, aus dem sehr strapazierfähigen Material Coroplast hergestellten Nurfügler, in dessen rechte Flügelhälfte eine Canon Ixus 50 Kamera und in dessen linke Flügelhälfte ein kleiner GPS-Empfänger integriert waren, siehe Abbildung 1 (links). Zum damaligen Zeitpunkt war es noch Vision, das Flugzeug eigenständig fliegen und automatisch gleichabständig Luftbildaufnahmen für die photogrammetrische Auswertung auslösen zu lassen.



Ein paar Jahre später war die Vision wahr geworden. Nunmehr gibt es in Europa einige Firmen, die sich auf Dienstleistung mit Luftbildvermessungs-UAV oder Herstellung derartiger Systeme spezialisiert haben. An vielfältigen Stellen finden sich Einsatz- und Anwendungsbeispiele von UAS, z.B. (EISENBEISS, 2011), (GRENZDÖRFFER, 2011), (MAYR, 2009, 2011, 2013). Mehrere Luftfahrzeugtypen sind für diese Art der Fernerkundung im Einsatz. Die beiden Hauptvertreter sind Drehflügel-basierte Luftfahrzeuge und Tragflächenflugzeuge. Auch sind Gleitschirme, Ballone und Luftfahrtschiffe im Einsatz. Eine andere Kategorisierung für das Luftfahrzeug zieht dessen maximales Abfluggewicht, engl. "maximum take-off weight" (MTOW), heran, was nicht nur Auswirkungen auf die Flugdynamik sondern auch auf rechtliche Bestimmungen hat.

Der in Abbildung 1 (links) gezeigte Demonstrator eines Vermessungs-Modellflugzeugs entwickelte sich weiter zum unbemannten Flugzeugsystem-Produkt SmartOneC für Luftbildvermessung, Hersteller: SmartPlanes AB, Schweden. Da der/die Pilot/in die Verantwortung für das automatisch fliegende Flugsystem trägt, wird ein solches Gesamtsystem auch mit „RPAS“, engl. für "remotely piloted aircraft system" bezeichnet, siehe Abbildung 1 (rechts), (COLOMINA, 2014).

Im Weiteren wird das Akronym RPAS für ein unbemannt fliegendes Luftfahrzeugsystem genutzt. Technologie ist jedoch nur ein Teil des großen Ganzen. Weitere Anteile der Gesamtbetrachtung sind operationeller und rechtlicher Natur. Hier wird anhand einiger Beispiele die Anwendung von RPAS für die Erstellung von Geoinformationen für Deponien aufgezeigt.




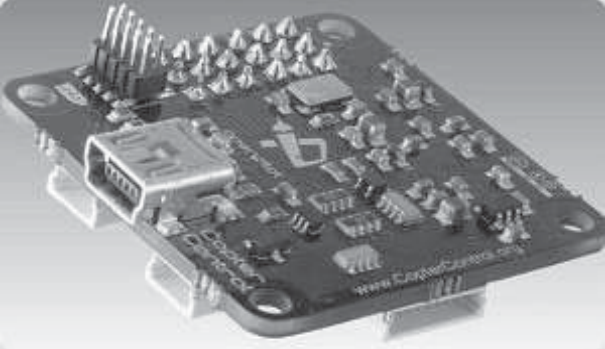
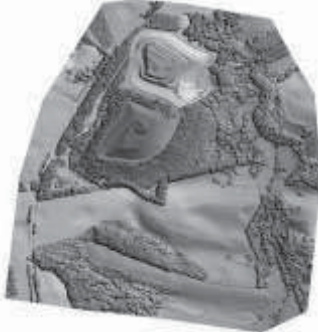
*Abbildung 1 Nurflügler-Demonstrator 2006 (links) mit Kamera (linke Flügelhälfte) und GPS (rechte Flügelhälfte) und SmartOneC Produkt-Level RPAS (rechts), 1.2 kg MTOW, 120 cm Spannweite; Hersteller: jeweils SmartPlanes, Schweden*



## 2 RPAS – Wesentliche Komponenten

Das Kürzel RPAS indiziert nicht den Typ des Luftfahrzeugs. Jedoch gibt es genau an, dass ein (menschlicher) Pilot das Luftfahrzeug verantwortet, auch wenn es automatisch fliegt und hierzu mit einem Autopiloten ausgestattet ist. Tabelle 1 zeigt die Hauptkomponenten eines RPAS auf.

Tabelle 1 RPAS – Hauptkomponenten

<p><b>System / Gerätschaft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tragflächenflugzeug (= Starrflügler)</li> <li>• Drehflügler (hier: = Multicopter)</li> <li>• Luftschiff, Ballon, Gleitschirm, u.s.w.</li> <li>• Bodenstationssoftware</li> </ul>	 <p>© www.germap.com      © www.aibotix.de</p>
<p><b>Autopilot</b></p> <p><i>Autopilot fliegt UAV wenn auf Mission</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flugweg geladen oder interaktiv änderbar</li> <li>• Bidirektionaler Link mit Bodenstation</li> <li>• Automatischer Flug via Auto-pilot</li> <li>• Notwendige Hilfssensoren: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ GPS (immer)</li> <li>◦ Stabilisierung (immer), z.B. mittels inertialer Meßeinheit oder Thermalsensoren</li> <li>◦ Flughöhe, z.B. barometrisch, Ultraschall oder Lasersensor</li> </ul> </li> <li>• Steuert Luftfahrzeug und Datenaufzeichnung</li> </ul> <p><i>Der Pilot kann jederzeit den Autopilot außer Kraft setzen und die Steuerung des Luftfahrzeugs selbst übernehmen.</i></p>	 <p>© www.openpilot.org</p>
<p><b>Fernerkundung &amp; Datenaufzeichnung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kamera: Luftbildvermessung, ortsgebundene Dokumentation, Videoaufzeichnung</li> <li>• Datenaufzeichnung von: Temperatur, Luftdruck, elektrischer Luftladung, Strahlung, Luftverschmutzung u.v.a.m.</li> </ul>	 <p>© www.germap.com</p>



Der Autopilot ist ein kleines, leichtes Elektronikboard und das Herzstück eines RPAS. Die Aufgaben eines Autopilots sind das Fliegen eines Luftfahrzeugs gemäß dessen Flugmechanik und seine Flugsteuerung gemäß eines vorab definierten Wegplans, um Fernerkundungsdaten aufzuzeichnen. Eine derartige Methode zum Erhalt von Fernerkundungsdaten wie z.B. Luftbilder bezeichnet man mit "RPAS-Mapping", (MAYR, 2013).

Die derzeit in RPAS eingesetzten Autopilots repräsentieren eher das untere Ende der Fähigkeiten von Autopilots. Ihre Kernfunktionalität sind Fliegen und Navigieren, letzteres entlang eines Flugweges, der entweder vorab definiert oder interaktiv durch eine Bodenstation geändert werden kann. Beim Fliegen im "Auto-Modus" spricht man vom "automatischen Fliegen". Höherwertige Autopilots verfügen mittels "Sense and Avoid"-Technologie über eine eigene Intelligenz, die sie in die Lage versetzt, eigenständig Gefahren und Hindernisse zu erkennen und darauf zu reagieren, d.h. sie modifizieren eigenständig den vorab definierten Flugweg, weichen aus und setzen den ursprünglichen Flugweg fort. Fliegen in diesem "Auto-Modus" ist "autonomes Fliegen". Alle dem Autor bekannten Autopilots, die in RPAS-Mapping Einsatz finden, realisieren das "automatische Fliegen". Autonomes Fliegen benötigt zusätzliche Sensoren und enorme Rechenleistung. Beides resultiert in ein deutlich höheres Gewicht.

Ob automatischer oder autonomer Flug, gemeinsam ist allen RPAS, dass alleine ein Mensch, der Pilot, die Verantwortung trägt und die ultimative Entscheidungsgewalt und Verantwortung hat, zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Steuerung des UAV zu 100% direkt selbst in seine Hände zu nehmen. Ein System ohne diese Eigenschaft ist kein RPAS, und es unwahrscheinlich, dass es in Europa eine Fluggenehmigung erteilt bekommt.

### 3 Anwendungsbeispiele

Nach unserer Erfahrung ist RPAS-Mapping für Objekte flächenhafter Ausdehnung gut einsetzbar, die aus wirtschaftlicher Sicht zu klein für bemannte Vermessungsflugzeuge oder zu aufwendig für terrestrisches Aufmaß sind. Sicherlich gibt es Überlappungen. Überwiegend kommen bei GerMAP Tragflächenflugzeug-RPAS zum Einsatz, um flächenhafte Objekte wie z.B. Deponien oder Tagebaustellen effizient zu erfassen. Multicopter sind ebenfalls im Gebrauch, und auch hier gibt es Anwendungsüberlappungen zu Tragflächen-RPAS. Primär kommen Multicopter bei vertikal orientierten Aufgabensstellungen wie Inspektionen von Brücken, Schornsteinen, Türmen, Steinbruchwänden und dergleichen, aber auch zur Erfassung kleiner, urbaner Flächen zum Einsatz.

Tabelle 2 informiert zu einigen Fixed-Wing-RPAS-Projekten und gibt deren wichtigste Projektparameter und Liefergegenstände wieder. Hier wurden Deponien, Tagebau, Golfplätze, Neubaugebiete und z.B. Katasterflächen befliegen und ausgewertet. Die La-

gegenauigkeit der Geodaten, insbesondere der Orthomosaik = Luftbildkarten, liegt in der Größenordnung der halben Pixelgröße im Orthomosaik und die Höhengenaugkeit zwischen 0.8 bis 1.2 Orthomosaikpixel. Die Pixelgröße wird oftmals auch mit Bodenauf- lösung oder aus dem Englischen kommend mit GSD = Ground Sampling Distance be- zeichnet. Alle aufgeführten Projekte wurden mit Canon S95 oder Canon S100 Digital- kameras geflogen. Zwischenzeitlich setzen wir vermehrt RicohGR Kameras ein, die im Unterschied zu den vorgenannten Canon-Kameras über eine feste Brennweite und ei- nen 16.2 Mpixel CMOS-Chips mit größeren Pixeln im Chip verfügt, womit die Bildquali- tät gesteigert werden kann.

Proj. ID	Anwendung	Liefergegenstände	Anz. Blöcke	Anz. Luft- bilder	Ortho- GSD [cm]	DOM- Raster [cm]	Planim. Gen. ± [cm]	Höhen- gen. ± [cm]	Fläche [ha]
1	Deponie1	Volumen, Profile, Orthomosaik, DGM, DOM, 3D-Ansichten	1	193	7,5	50	3	3,1	33
2	Deponie2	Volumen, Profile, Orthomosaik, DGM, DOM, 3D-Ansichten	3	691	8	35	3,5	5,2	113
3	Deponie3	Volumen, Profile, Orthomosaik, DGM, DOM, 3D-Ansichten	3	983	6	50	2,5	3,8	117
4	Golfplatz1	Orthomosaik, DGM, DOM, 3D- Ansichten	4	1126	8	50	3	3,8	170
5	Golfplatz2	Orthomosaik, DOM, 3D- Ansichten	2	332	7,5	50	3	7,2	70
6	Golfplatz3	Orthomosaik, DGM, DOM, 3D- Ansichten	2	346	7,5	50	3,5	6,4	88
7	Steinbruch	Volumen, Orthomosaik, DOM	3	707	10	30	2,5	6	117
8	Kadaster	Orthomosaik, 3D-Ansichten	2	445	6	40	2	1,5	64
9	Neubaugebiet	Orthomosaik, DGM	3	557	6	40	3	6,8	104

Tabelle 2 RPAS-Anwendungsbeispiele mit wichtigen Parametern

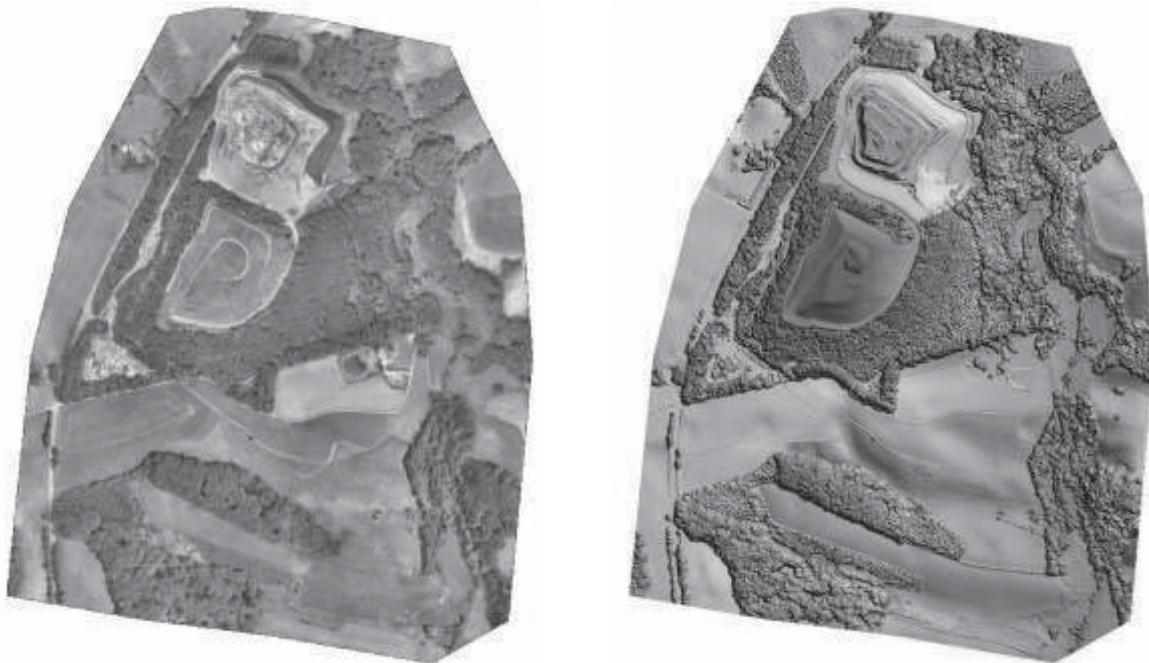
Die folgenden Beispiele zu Deponien, siehe Abbildungen 3 bis 6, repräsentieren typi- sche Anwendungen, wie GerMAP sie als Dienstleistung ausführt. Der Kunde bestellt verschiedene Liefergegenstände, z.B. mehrere Volumenberechnungen, ein Orthomosaik in digitaler und analoger Form, ein digitales Oberflächenmodell (DOM) mit und ohne Rekultivierungsmassen, perspektive Ansichten, verschiedene weitere 3D- Modellierungen, sowie die Integration der Ergebnisse in vorhandene Bestandspläne, siehe Abbildung 6. Zur Volumenbestimmung stellen Auftraggeber i.d.R. Baupläne der Deponie bereit, wobei diese meist nach verschiedenen Verfüllgruben unterscheiden. Oftmals sind die Maßnahmen zur Rekultivierung sowie die Endausbaustufe planmäßig ebenfalls verfügbar, so dass das verbleibende, verfüllbare Restvolumen ermittelt und der abschließende, geplante "Deckel" dargestellt werden können. Mittels dieser Infor-





mationen leiten wir das absolute Endvolumen ab, sowie die benötigte Rekultivierungsmasse, das aktuell verfüllte Volumen und Differenzvolumina. Weiterhin kann man mit dem photogrammetrischen Ansatz sehr einfach Zuviel- und Zuwenigablagerung gegenüber dem geplanten Deckel visuell darstellen, lokalisieren und quantifizieren. Die DOM-Rasterweite variiert zwischen 30 cm und 50 cm, und die Höhengenaugigkeit jedes DOM-Rasterpunktes liegt zwischen  $\pm 3$  cm bis  $\pm 7$  cm, siehe Tabelle 2. So liegen bei einer Flächenausdehnung von z.B. 1.200 m x 600 m, also 0.7 km<sup>2</sup>, und 30 cm DOM-Rasterpunkt Abstand ca. 8.000.000 Oberflächenpunkte dieser Güte vor.

Meistens sind für eine Deponie 1 bis 3 Befliegungsblöcke je 20 min bis 30 min Flugzeit zur vollständigen Flächenabdeckung erforderlich. Pro Block rechnen wir mit einer Stunde Gesamtaufwand, der Auf- und Abbau, Anpassung der Flugplanung, Befliegung und Standortwechsel beinhaltet. Typischerweise fallen bei einer Deponiebefliegung zwischen 250 bis 1000 Luftbilder zu je 12 MB für Canon S100 oder 16 MB für RicohGR an. In einem Projekt mit 3 Blöcken und großer Flächenausdehnung wurden 15 Bodenpaßpunkte in 3D eingemessen und zur Georeferenzierung und Kamerakalibrierung verwendet. Die Datenprozessierung von Georeferenzierung über DOM-Modellierung, Orthomosaikableitung bis hin zu Volumenmodellierungen, 3D-Ansichten und Profilen nimmt ca. 2 – 3 Arbeitstage in Anspruch, z.B. ProjektID 3 in Tabelle 2. Abbildungen 3 bis 6 vermitteln einen Eindruck der Liefergegenstände.



© www.germap.com

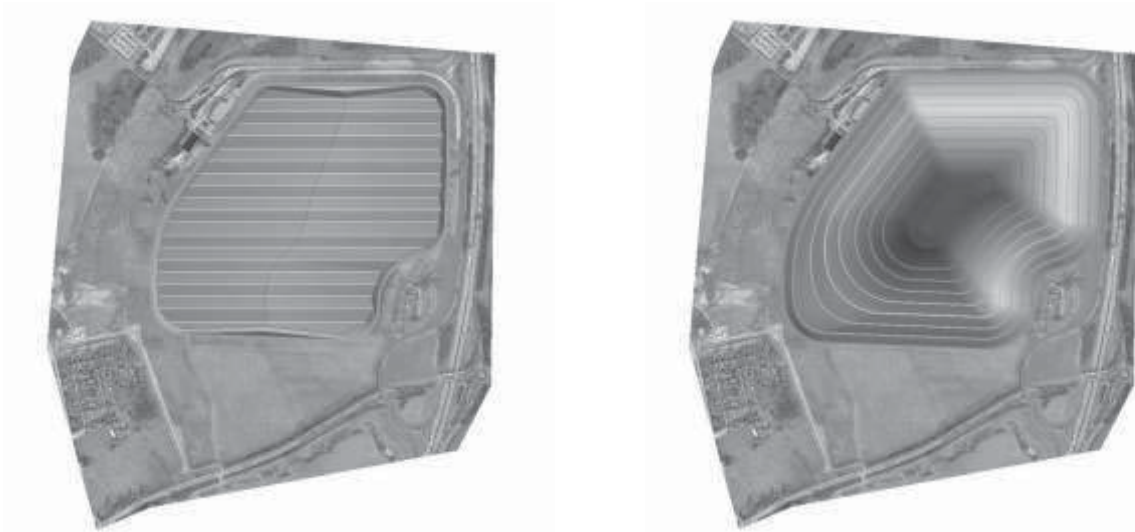
Abbildung 3 Orthomosaik (links) und DOM (rechts) einer Deponie; 3 RPAS-Blöcke, 983 Luftbilder

Ursprünglich geplanter Bauzustand sowie künftige Endausbaustufe einer Deponie müssen modelliert und können in die gegenwärtige Orthomosaikumgebung integriert wer-





den, siehe Abbildung 4. Somit sind Baumaßnahmen auch im amtlichen Kartenwerkshintergrund einfach darstellbar und präsentierbar.



© www.germap.com

Abbildung 4 Modellierung der Grube einer Deponie (links), und geplanter Abschlußform (rechts)

Die Referenzfläche, quasi der Kellerboden, wird den Planungsunterlagen entnommen und ins übergeordnete Landeskoordinatensystem übertragen, siehe linke Abbildung 4, womit die Verbindung zum Orthomosaik und damit zum z.B. Landeskoordinatensystem gewährleistet ist. Gleichmaßen wird bei der Modellierung der Form des abschließenden Zustandes der Deponie vorgegangen, siehe rechte Abbildung 4, welches somit das maximale, (noch) verfügbare Volumen beschreibt.



© www.germap.com

Abbildung 5 Perspektive Ansicht eines Deponieteils überzogen mit Orthomosaik (links) und farbkodiertem DOM (rechts)

Aufgrund der hohen Oberflächenauflösung von wenigen Zentimetern Rasterpunktstand im DOM liefert der RPAS-Mapping Ansatz sehr hohen Detailreichtum in der Oberflächenmodellierung, siehe Abbildung 5, welchen der klassische, terrestrische Vermessungsansatz mit Messung ausgewählter, einzelner 3D-Punkte und Aufbau eines Dreiecksnetzes nur mit erheblichem wirtschaftlichen Aufwand realisieren kann. Des weite-



ren kann der Deponiebetreiber mittels eines aus RPAS-Mapping abgeleiteten, sehr dichten DOM beliebige Profile hochgenau abgreifen und auch Orte mit zu viel und zu wenig Verfüllmasse gegenüber der geplanten Endausbaustufe lokalisieren und quantifizieren.

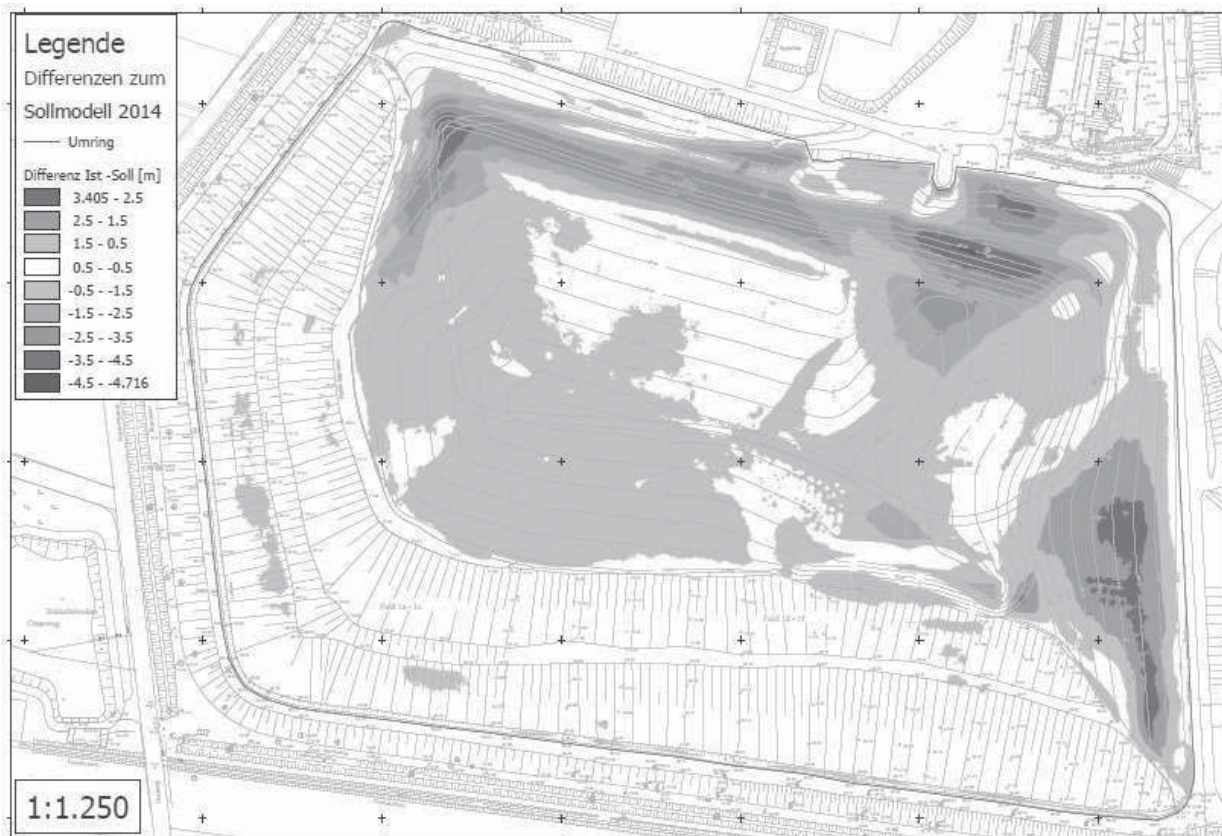


Abbildung 6: Bestandsplan mit farbkodierter Darstellung von Differenzen zum Sollmodell, abgeleitet aus RPAS-Mapping

Eine weitere Darstellmöglichkeit ist die Kombination der Soll-Ist-Differenzen gegenüber der geplanten Sollfläche der Endausbaustufe zusammen mit dem gültigen Bestandsplan. Abbildung 6 zeigt eine solche Darstellung integriert in den Deponie-Bestandsplan. Darin sind in Grüntönen die Abstände zur Endausbaustufe, als noch verfügbares Volumen, und somit auch die Orte angezeigt. Umgekehrt stellen die rötlich markierten Flächen Orte und Mengen vorhandener „Überablagerungen“ dar.

## 4 Schlußfolgerungen und Ausblick

RPAS ist eine funktionierende Technologie und hat Eingang in die raumbezogene Datenerfassung und Datenverarbeitung gefunden. Sie etabliert sich als ein weiteres Tool. Es gibt eine Vielzahl kommerzieller Anwendungen. Ein RPAS zu fliegen kann man in



wenigen Tagen erlernen. Das darf jedoch nicht damit verwechselt werden, danach ein erfahrener Modellflugzeugpilot zu sein. Jedoch unterstützt die Flugregelungselektronik in Form des Autopiloten das Fliegen ungemein, auch beim Starten und Landen und bis hin zu vollautomatischen Start- und Landevorgängen.

Die Verarbeitung der RPAS-Luftbilddaten kann mit klassischen, photogrammetrischen Luftbildauswertesystemen erfolgen und wird auch durch neuere, weitgehend vollautomatische Systeme unterstützt, was der vermehrten Anwendung von RPAS-Mapping förderlich sein wird. Der Umgang mit Luftbildern für die Geoinformatik ist um einiges einfacher und robuster geworden, was ebenfalls die Akzeptanz von RPAS-Mapping unterstützen wird. Dies zeigt sich auch in vermehrten Nachfragen von Deponiebetreibern, luftbildgestützte Geodatenauswertungen neben ihren traditionellen Vermessungsdienstleistungen in Anspruch zu nehmen und teilweise auf RPAS-Mapping zu verlagern. Insbesondere ist der Kostenfaktor im Vergleich zur klassischen Luftbildphotogrammetrie mit bemannten Flugzeugen signifikant wirtschaftlicher geworden. Hier zeigt sich, dass RPAS-Mapping besonders zur schnellen, hochgenauen Erfassung kleinräumiger Objekte bestens geeignet ist. Die Qualität, sprich Genauigkeit der Geometriedaten sowie der Bilddaten, ist sehr gut und durchaus vergleichbar mit herkömmlichen Methoden.

Nicht ausführlich angesprochen wurden Multicopter, sogenannte VTOL-Devices (vertical take off and landing systems). Multicopter verfügen i.d.R. über einen skelettartigen Aufbau mit 4, 6, 8 oder gar mehr Rotoren. Sie sind auf Distanz, z.B. 200 m, kaum bis nicht mehr sichtbar und damit nicht mehr durch den Piloten steuerbar. Das aber sind die gesetzlichen Auflagen, Sichtbarkeit und jederzeitige Übernahme der manuellen Steuerung durch den Piloten. Daher sind Multicopter zu vielen Starts und Landungen verbunden mit Ortswechseln gezwungen, um z.B. eine großflächige Deponie per Bildflug abzudecken. Tragflächen-RPAS eignen sich hierfür weitaus besser. Multicopter finden vorzugsweise in urbanem Areal vielfältige Einsatzmöglichkeiten, z.B. für Inspektionsaufgaben, Dokumentationen, Videoaufnahmen und andere Fernerkundungs- aber auch Transportaufgaben. Sie bilden die Mehrheit heutiger RPAS-Systeme.

Umgang und Regulierung der kommerziellen Nutzung von RPAS wird derzeit auf EU-Level breit diskutiert, siehe (KÄMPE, 2013). Jedoch sind noch immer nationale Vorschriften maßgebend, in Deutschland auf Bundeslandebene, für das Betreiben von RPAS.

RPAS wird nicht nur für Luftbildvermessung eingesetzt. Auch in der Meteorologie, Filmindustrie und anderen Bereichen finden sich nennenswerte und neue Anwendungsfelder. Die Möglichkeiten der RPAS-Nutzung sind enorm vielfältig, weshalb dieser Technologie als Grundagententechnologie für Fernerkundung, Transport, und anderen Wirtschaftssektoren künftig sehr breiter Raum eingeräumt werden darf. Allen RPAS-Piloten wünsche ich allzeit sichere Landungen!



## 5 Literatur

- Colomina, I., Molina, P.; 2014 Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92 (2014) Elsevier, pp. 79-97.
- Eisenbeiss, H.; 2011 The Potential of Unmanned Aerial Vehivcles for Mapping. *Proceedings Photogrammetric Week 2011*. Wichmann Verlag, pp.147-154.
- Grenzdörffer, G., F. Niemeyer; 2011 UAV based BRDF-Measurements of Agricultural Surfaces with Pfiffikus. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zurich, Switzerland, September 14-16, 2011, ISSN 1682-1777.
- Kämpfe, F.; 2013 RPAS in international , European and national air law – a short overview. *RPAS/UAS Workshop – A challenge for international, European and national air law; presentation; Cologne May23/24, 2013*.
- Mayr, W.; 2009 PAMS – Personal Aerial Mapping System. White Paper, now downloadable from [www.germap.com/downloads](http://www.germap.com/downloads)
- Mayr, W.; 2011 Unmanned Aerial Systems in Use for Mapping at Blom. *Proceedings Photogrammetric Week 2011*. Wichmann Verlag, pp.125-134.
- Mayr, W.; 2013 Unmanned Aerial Systems – for the Rest of Us. *Proceedings Photogrammetric Week 2013*, Wichmann Verlag, pp.151-163.

### Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Werner Mayr  
 GerMAP GmbH  
 Justinus-Kerner-Str. 8  
 D-73642 Welzheim  
 Telephon: +49.7182.9359320  
 Email: [werner.mayr@germap.com](mailto:werner.mayr@germap.com)  
 Website: [www.germap.com](http://www.germap.com)





# Zukunftsweisende Software-Konzepte für das kontinuierliche Anlagen-Monitoring von Abfalldeponien

Irene Priebes, Dr. Andreas Abecker, Dr. Thomas Egloffstein, Gerd Burkhardt

## Inhaltsangabe

Mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) führt die Disy Informationssysteme GmbH (Disy) zusammen mit der Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH (ICP) in den folgenden zwei Jahren ein Forschungsprojekt zur intelligenten Überwachung von Deponien durch. Dabei sollen zukunftsweisende Hardware- und Softwaretechnologien entwickelt werden, die ein automatisiertes und sicheres Monitoring von Deponien ermöglichen. Die ICP stellt mit ihrer fachlichen Expertise das Bindeglied zwischen der Messtechnik und der Datenanalyse dar. Disy wiederum entwickelt - ausgehend von einem fundierten Datenmanagement- und GIS-Know-how - Technologien für ein zukunftsweisendes Deponie-Monitoring. Gemeinsam wollen die beiden Unternehmen eine Lösung entwickeln, die eine wissensbasierte Erkennung komplexer Ereignisse anhand von räumlich-zeitlichen Datenmustern ermöglicht. Zukünftig könnten darüber sowohl Prognosen zu bestimmten Prozessen innerhalb der Deponie als auch zu entsprechend frühzeitigen Optimierungsmaßnahmen möglich sein.

Deponiebetreiber können sich am Forschungsprojekt beteiligen und den Ansatz auf ihrer Deponie praktisch anwenden.

**Stichworte** *Sensornetzwerk, Deponie-Monitoring, intelligente Datenanalyse*

## 1 Ausgangspunkt: Datenmanagement im Deponiebetrieb

Nach der Deponieverordnung (DepV) sind Deponiebetreiber verpflichtet, Deponien auch nach Abschluss der Betriebsphase zu überwachen, um langfristig einen sicheren und ökonomischen Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Hierzu sind zahlreiche Messwerte zu erfassen, was nach dem heutigen Stand der Technik für viele Messgrößen im Rahmen von Begehungen an zahlreichen unterschiedlichen Messstellen erfolgt.

Die Deponiebetreiber verwenden bei der Umsetzung ihrer umfangreichen Kontroll- und Erfassungspflichten derzeit eine Vielzahl von Spezialsoftware oder geben Daten händisch in Excel ein. Die Auswertung dieser Daten erfolgt z.T. durch den Deponiebetreiber selbst und z.T. durch Ingenieurbüros. Häufig müssen die Daten zeitaufwändig aus den unterschiedlichen Formaten und Programmen zusammengeführt, aggregiert und für



den Jahresbericht zum Deponieverhalten für die Überwachungsbehörde weiterverarbeitet werden.

Damit die Deponiebetreiber ihren Kontroll- und Erfassungspflichten leichter nachkommen, ist es notwendig, dass sie die Daten zentral und einheitlich erfassen können. Durch eine strukturierte Datenhaltung wird weiterhin eine Vergleichbarkeit dieser Daten geschaffen. Um dies zu ermöglichen, hat Disy auf der Grundlage der Software Cadenza den Deponie-Manager entwickelt: Eine Branchenlösung, die speziell auf die Anforderungen der Deponiebetreiber zugeschnitten ist.

## **1.1 Die Grundlage: Die Branchenlösung Cadenza Deponie-Manager**

Mit dem Cadenza Deponie-Manager hat Disy eine Branchenlösung geschaffen, mit der Deponiebetreiber ihre Datenflut bündeln, vereinheitlichen und neben den jährlichen Berichtspflichten auch ein permanentes Monitoring im laufenden Betrieb sicherstellen können.

Für die benutzerfreundliche Bedienung wurde diese Lösung nach den Aufgabengebieten Datenerfassung, Monitoring, Geodaten und Jahresbericht strukturiert. In jedem Bereich finden sich die für den Deponiebetrieb relevanten Themen wie beispielsweise Gas, Sickerwasser, Abfall, Setzungen, Grundwasser, Oberflächenwasser oder Meteorologie mit den dazugehörigen Abfragen, Auswertungen und Karten. Das bedeutet, unabhängig von der Aufgabenstellung stehen alle Daten für alle Aufgabengebiete jederzeit zur Verfügung. Zusätzlich lässt sich die Software flexibel an die individuellen Anforderungen der jeweiligen Deponie anpassen.

Der Deponie-Manager kann über einen Desktop-, Web- oder Mobilzugang genutzt werden.

Sämtliche Daten- und Kartenauswertungen können am Bildschirm angezeigt werden, aber auch gedruckt, geplottet oder für Weiterverarbeitung exportiert werden.

### **1.1.1 Datenerfassung**

Die Daten können auf drei verschiedene Arten erfasst bzw. integriert werden: Für die manuelle Erfassung der Messdaten bietet der Cadenza Deponie-Manager eine komfortable Web-Oberfläche (Abb. 1). Für die Erfassung kontinuierlich gemessener Daten, wozu beispielsweise Wetterstationsdaten, Messungen der Durchflussmengen an den IDM-Anlagen oder Setzungen sowie Kamerabefahrungsdaten zählen, stehen Importschnittstellen zur Verfügung. Daten, die in Spezialsoftware erhoben und dort als Primärdaten erhalten bleiben sollen (z.B. Wägedaten), werden über eine standardisierte Schnittstelle eingebunden.



Die Erfassung wurde so konzipiert, dass lediglich die gemessenen Daten eingegeben werden müssen. Das System übernimmt alle für die Eigenkontrolle benötigten Berechnungen, wie beispielsweise Volumenstrom, langjährige Mittel oder Wasserbilanz.

Datum	Quartal	Analyselabor	Untersuchungsumfang	Bemerkung	Fehlmessung?
12.05.2012	3	UCL	S		Nein
04.09.2012	3	UCL	S		Nein
11.12.2012	4	UCL	S		Nein
01.03.2013	1	UCL	U		Nein
29.05.2013	2	UCL	S		Nein

Eintrag	Wert	Einheit	01.03.2013	11.12.2012	04.09.2012
Farbung	farblos	keine Angabe	farblos	farblos	farblos
Trübung	keine	keine Angabe	keine	keine	keine
Geruch	neutral	keine Angabe	neutral	neutral	neutral
H2S (Schnelltest)	negativ	keine Angabe	negativ	negativ	negativ
Wassertemperatur	11	°C	10,9000	12,5000	13,7000
pH-Wert (vor Ort)	7,05	keine Angabe	6,9800	6,9000	6,8700
Redox-Spannung	-16	mV	326,0000	151,0000	182,0000
spezifische elektr. Leitfähigkeit (25°C) (vo...	728	µS/cm	752,0000	2000,0000	2000,0000

Abbildung 1: Manuelle Web-Erfassung: Eingabemaske Labormessung Grundwasser

### 1.1.2 Monitoring und Optimierung

Für das tägliche, permanente Monitoring stehen wiederholbare, vordefinierte Abfragen zur Verfügung. Hiermit erhält der Anwender schnell und regelmäßig eine Übersicht über den aktuellen sach- und kartenbezogenen Stand der Deponie. Beispiele hierfür sind die CH<sub>4</sub>-Entwicklung an einzelnen Gasbrunnen, der Zustand der Deponieabdeckung (FID-Messergebnisse, Setzungen) oder Fragen zum Sickerwasseraufkommen und -entsorgung. Wiederkehrende Einstellungen sind bereits gespeichert und werden automatisch für die Auswertung verwendet. Weil zu jeder Zeit auf den aktuellen Datenbestand zugegriffen werden kann, ist der Anwender ad-hoc auskunftsfähig und kann bei Entwicklungen und Änderungen umgehend steuernd eingreifen.

Für darüber hinaus gehende Anforderungen und Fragestellungen können auch eigene Abfragen definiert werden. Dadurch kann das Monitoring im Deponie-Manager auf Ent-

wicklungen und Änderungen im Deponiebetrieb oder aufgrund veränderter gesetzlicher Vorgaben jederzeit flexibel angepasst werden.

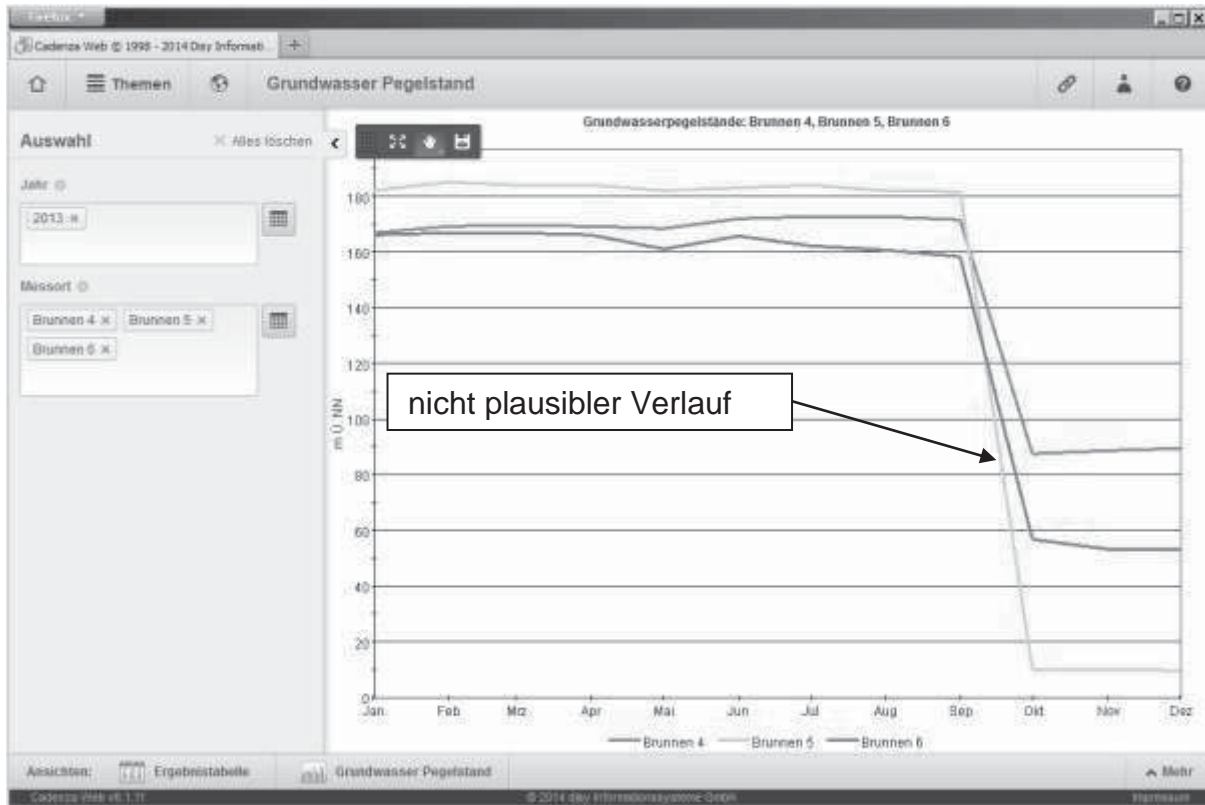


Abbildung 2: Auswertung im Bereich Monitoring; Grundwasser Pegelstände als Liniendiagramm

Um die Daten hinsichtlich ihrer Qualität zu prüfen, greift der Anwender ebenfalls auf Berichtsvorlagen und vorgefertigten Auswertungen zu. Über die Visualisierung der Messdaten als Diagramm lassen sich beispielsweise Messausreißer und -abweichungen schnell identifizieren (siehe Abb. 2). Weiterhin übernimmt das System die Überprüfung anhand hinterlegter Referenzdaten und hebt Abweichungen hervor. So erfolgt unter anderem eine automatische Prüfung der eingegebenen Grundwasser-Labormessdaten gegen die hinterlegten Auslöseschwellen.

### 1.1.3 Geodaten

Mit dem im Deponie-Manager integrierten Geoinformationssystem (GIS) lassen sich die Standorte aller Deponie-Anlagen in Karten darstellen. Dazu gehören beispielsweise Gasbrunnen, Gasleitungen, Sickerwasser-Dränage-Leitungen oder auch Gebäudeteile. Neben DXF-, und Shape-Daten können Orthofotos und ALK-Daten der Landesvermessung eingebunden werden. Je nach Fragestellung werden per Mausklick zusätzlich Sachdaten eingeblendet, wie der Stand der letzten Wartung, Fotos der Messstellen oder einzelne Auswertungen der Messdaten einer bestimmten Anlage.

Zusätzlich lassen sich die Messdaten mit den Karten verknüpfen, um typische Fragestellungen direkt aus der Karte zu beantworten und daraus kurzfristig Maßnahmen abzuleiten, oder umgekehrt die Sachdaten in den Karten zu visualisieren (Abb. 3). Auch hier stehen vorformatierte Workflows und Auswertungen zur Verfügung, um mit wenigen Mausklicks die gewünschten Informationen zu erhalten.

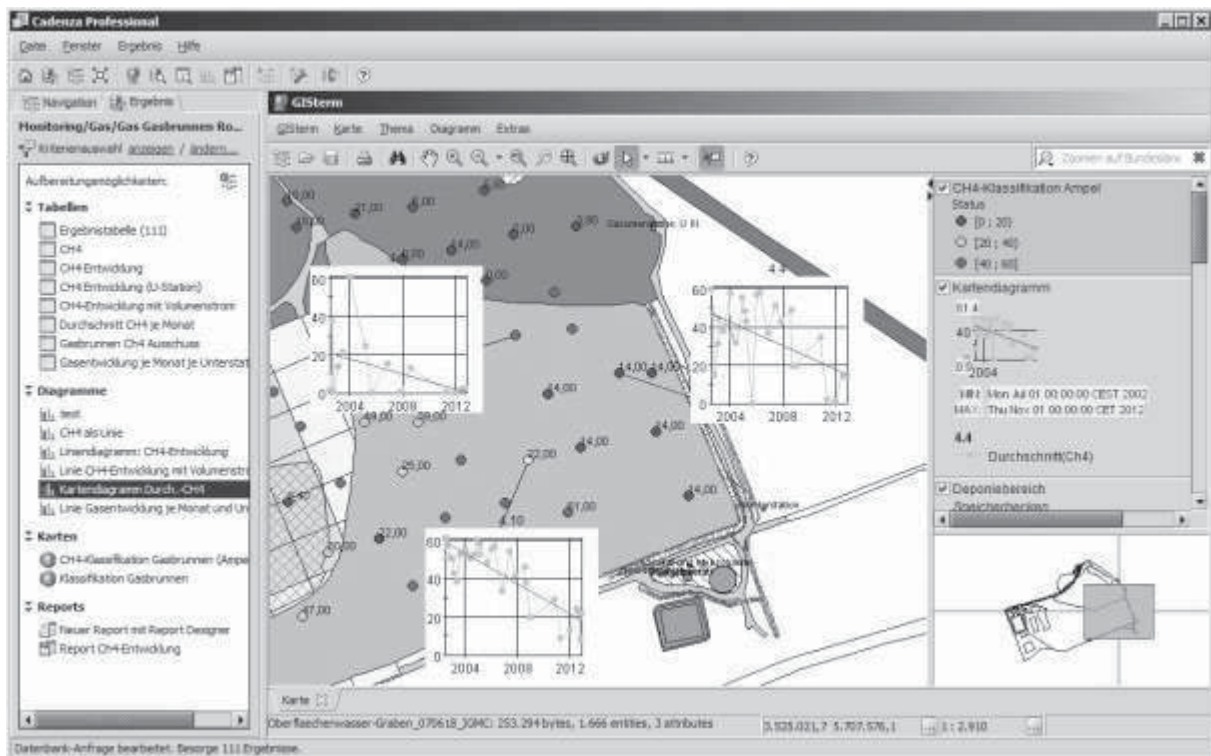


Abbildung 3: GIS-Anlagenkataster; Auswertung von Messdaten in einer Karte: Klassifikation der Gasbrunnen nach Methangehalten

#### 1.1.4 Jahresbericht und Eigenkontrolle

Für die vereinfachte Jahresberichterstellung und die Eigenkontrolle wurden je Thema Berichtsvorlagen definiert. Beim Aufruf dieser Berichtsvorlagen greift das System auf aktuelle Daten zu und führt notwendige Berechnungen im Hintergrund durch. Durch die Standardisierung und Automatisierung stehen alle gewünschten Tabellen und Diagramme innerhalb weniger Minuten zur Verfügung und können in verschiedenen Formaten wie beispielsweise PDF oder Word (Abb. 4) ausgegeben werden. Zusätzlich wurde eine Vorlage für jedes Thema in Word erstellt, die in ein Hauptdokument für den Jahresbericht integriert und in den Folgejahren nur noch durch Aktualisierung auf den neuesten Stand gebracht wird. Diese Vorgehensweise reduziert den Zeit- und Kostenaufwand der Jahresberichterstellung um bis zu 75 %. Durch die Automatisierung und Standardisierung verringert sich zudem die Fehleranfälligkeit und die Datenqualität des Jahresberichts erhöht sich.

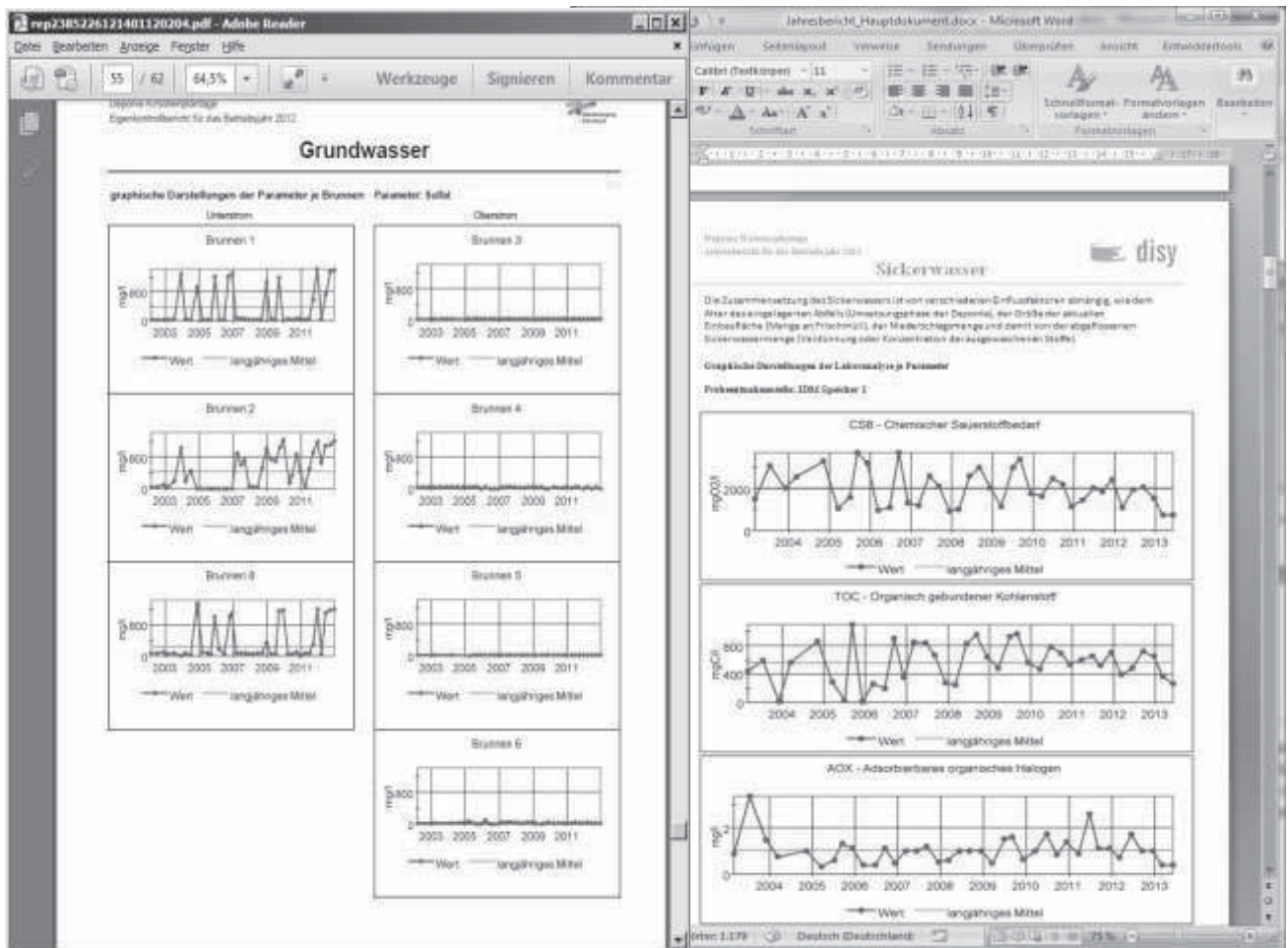


Abbildung 4: Jahresbericht als PDF: Teilbericht Grundwasseranalyse im Vergleich

## 1.2 Die Weiterentwicklung: Das Forschungsprojekt

Die umfangreiche Überwachung von Deponien sowie die Erhebung von Messdaten erfordern einen hohen Personalaufwand und erlauben nur eine vergleichsweise grobmaschige Überwachung. Zudem ist es nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich, durch äußere Einflüsse (Luftdruckschwankungen, extreme Wetterereignisse) verursachte Ereignisse wie Änderungen der Deponiegasemissionen oder Störfälle wie Rutschungen automatisch zu erkennen oder gar vorherzusehen.

Daher arbeiten aktuell die Disy Informationssysteme GmbH (Disy) und die ICP Prof. Czurda und Partner mbH (ICP) zusammen mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) an einem Forschungsprojekt zur Vereinfachung und Automatisierung dieser Aufgaben. Dazu wird gemeinsam ein automatisiertes System zur kontinuierlichen Online-Deponieüberwachung in Echtzeit entwickelt, das räumlich-zeitliche Zusammenhänge, etwa zwischen Wetterdaten oder hydrologischen Daten und Ereignissen wie der Deponiegasemission und dem Auftreten bestimmter Störfälle (v.a. Standsicherheitsprobleme, Rutschungen) erlernen und diese Ereignisse prognostizieren soll.





## 2 Projektbeschreibung

### 2.1 Die Datenerhebung

#### 2.1.1 Telemetrisch angebundenes Sensornetzwerk

Eine erste Innovation des Forschungsprojekts soll darin bestehen, ein integriertes Sensornetzwerk zu schaffen, das die wesentlichen für die Deponieüberwachung relevanten Daten kontinuierlich in Echtzeit erfassen kann. Dabei soll einerseits auf vorhandene Sensorik zurückgegriffen werden, andererseits innovative Lösungen für einzelne Überwachungsaufgaben entwickelt werden. Diese sind unten als weitere Entwicklungsschwerpunkte separat aufgeführt.

Der Stand der Technik der Deponieüberwachung ist im Wesentlichen durch die diskontinuierliche Offline-Überwachung gekennzeichnet und basiert auf einer Vielzahl unterschiedlicher Messinstrumente für einzelne Parameter oder -gruppen. Besondere Herausforderungen bei der Integration in ein Sensornetzwerk liegen u. a. in der räumlichen Verteilung der Messpunkte auf der Deponieoberfläche bzw. im Deponiekörper. Dabei sind auch grundlegende logistische Probleme wie die Frage der Energieversorgung zu untersuchen und zu lösen. Über eine telemetrische Anbindung soll die Grundlage für ein umfassendes Online-Sensornetzwerk geschaffen werden.

#### 2.1.2 Automatisierte Deponiegasmessung

Im Projekt soll eine automatisierte Deponiegasmessung an der Deponieoberfläche durch z.B. IR Laser-Absorptionsspektrometrie mit einem abstimmbaren Dioden-Laser Absorptionsspektrometer (TDLAS) untersucht werden.

Die Bestimmung von Methan basiert dabei auf der Absorption von infrarotem Licht einer bestimmten Wellenlänge durch die zu quantifizierende Komponente Methan. Hierbei sind Messstrecken bis zu einem Kilometer möglich, solange Sichtkontakt zwischen der IR-Lichtquelle und dem Retroreflektor besteht. Die angezeigten Methangehalte sind Mittelwerte über die Entfernung zwischen Lichtquelle und Retroreflektor. Die Angabe der Konzentration erfolgt dann unmittelbar in „ppm m“. Über die Länge der Messstrecken kann eine Umrechnung in den Mittelwert der Konzentration für die Gesamtstrecke erfolgen.

Dabei hat die geplante integrale Messung Vorteile gegenüber den derzeit üblichen punktförmigen Messungen über FID-Begehungen, die je nach Austrittsstelle sehr stark schwanken können und dadurch schwieriger auf die insgesamt austretende Methanmenge der Gesamtdeponie umzurechnen sind. Nach der Ausrichtung von Messgerät und Retroreflektor läuft die Messung automatisch über lange Zeit stabil, da ständig



ein Abgleich über eine interne Messzelle erfolgt, durch den störende Einflüsse wie Temperaturschwankungen kompensiert werden. Eine Differenzierung der Methangehalte innerhalb des Messprofils und Lokalisieren von stärkeren Austritten ist über die Verschiebung der Lichtquelle und des Reflektors möglich. Lokale Austrittsstellen müssten nach Eingrenzung über eine konventionelle FID-Begehung über das Längsprofil detektiert werden.

Alternativ kann die Messung mit dem Laser auch "flächig" erfolgen. Hier wird eine vergleichbare Messmethode an einem mobilen Messeinrichtungsträger befestigt. Über eine GPS-Koordinatenerfassung kann die punktuelle Messung den jeweiligen überfahrenen / überflogenen Koordinaten zugeordnet werden.

Diese Methode ermöglicht die vollautomatisierte Erhebung von sehr viel detaillierten Daten in sehr viel größerer Dichte.

### **2.1.3 Automatisiertes Überwachungssystem für Deponiebewegungen**

Vor allem für den Einsatz in Deponien mit Standsicherheitsproblemen ist im Projekt die Entwicklung eines automatisierten Überwachungssystems für Deponiebewegungen auf Grundlage eines faseroptischen Tensiometers geplant. Dabei sollen faseroptische Sensorkabel als Linienprofil quer zur Rutschungsrichtung verlegt werden, um Bewegungen im Untergrund quantitativ erfassen. Auch die Geschwindigkeitszunahme von latenten und sehr langsamen Kriechbewegungen zu gefährlichen Rutschungsbewegungen könnte so in situ gemessen und online überwacht werden.

Das Prinzip der integralen Messung von Längenänderungen im Boden im Millimeter- und Submillimeterbereich (ab ca. 0,05 mm) basiert auf der Messung der Laufzeit des Lichtes und dessen Veränderung durch eine Längenänderung des Leiters. Durch eine Dehnung des Lichtwellenleiters wird die Laufzeit verändert, was vom Extensiometer registriert wird. Das Signal geht über den Lichtwellenleiter, der entlang eines Hanges verlegt wurde. Es kommt über eine Schleife zurück, wird wieder gemessen, dann werden beide Signale verglichen. Aus diesem Vergleich kann man die Laufzeitveränderung als Maß für die Längenänderung des Lichtwellenleiters bestimmen. Wenn sich die Länge des Lichtwellenleiters verändert, weil sich der Boden bewegt, dann ist das eine Änderung der Laufzeit. Dabei kann der Lichtwellenleiter in beliebiger Form verlegt werden. Der Lichtwellenleiter kann eine Länge von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern haben.

## **2.2 Die Auswertung und Interpretation der Daten**

Das geplante Software-System basiert auf der im Forschungsprojekt von ICP realisierten Erfassung zahlreicher Daten der Deponie und der Deponieumgebung in einem Mul-



tisensor-Netzwerk. Es wird realisiert durch das Zusammenspiel zweier neuartiger Software-Komponenten, die grundlegende softwaretechnische bzw. algorithmische Herausforderungen beinhalten:

1. Modul zur räumlichen Datenanalyse („spatial data mining“) für deponiespezifische Fragestellungen. Dieses Modul soll lernende Verfahren der Datenanalyse einsetzen, um die gesammelten Daten so zu korrelieren, dass Zusammenhänge und Muster erkennbar werden, die für eine automatisierte Deponieüberwachung eingesetzt werden können.
2. Modul zur wissensbasierten Erkennung komplexer Ereignisse mit räumlich-zeitlichen Ereignismustern („knowledge-based spatial CEP“) für den Einsatz in der Deponiekontrolle und -steuerung. Dieses Modul soll die im ersten Schritt gefundenen Muster einsetzen, um komplexe Aufgaben der Betriebssteuerung in Echtzeit mithilfe der erfassten Sensordatenströme zu automatisieren.

Ein Schema der geplanten Software-Architektur aus den beschriebenen Modulen und weiteren Komponenten ist in Abb. 5 gezeigt.

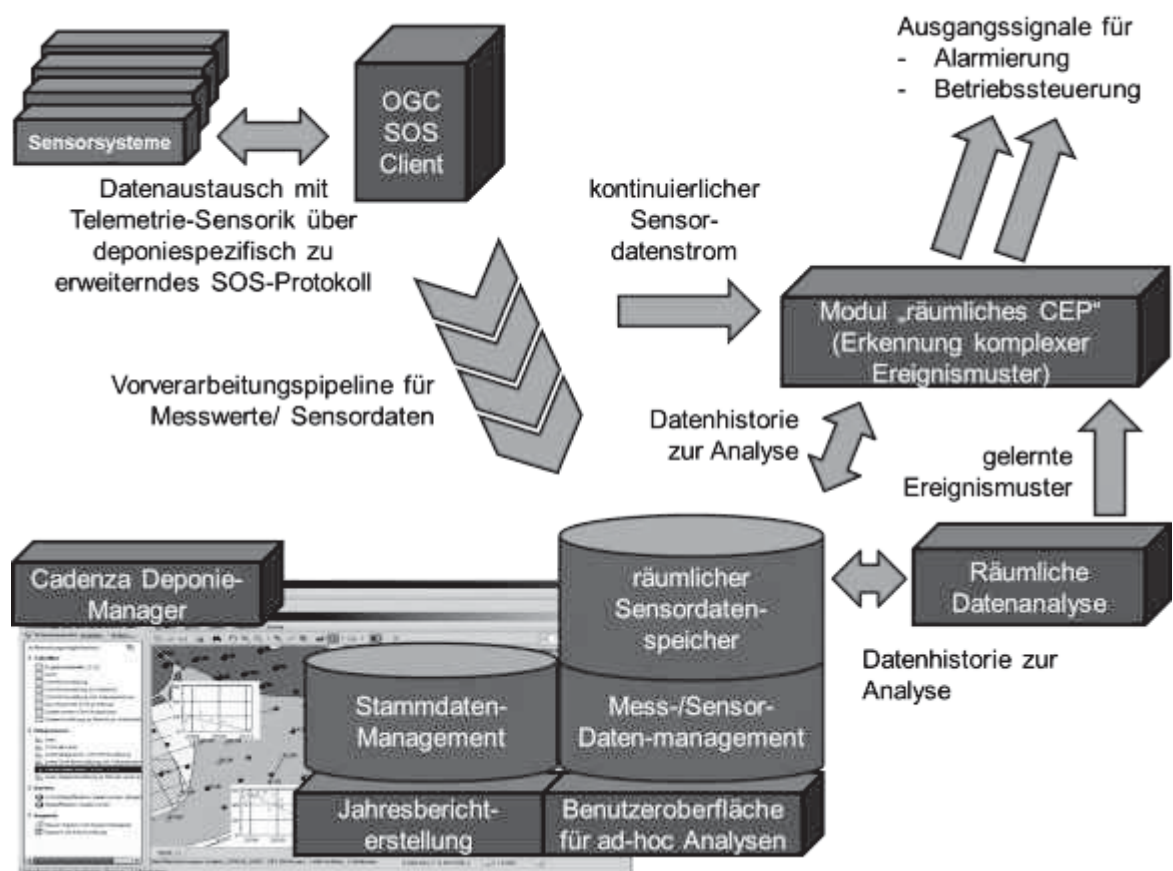


Abb. 5: Schematische Darstellung der im Projekt von Disy geplanten Systemarchitektur



### 2.2.1 Modul 1: Räumliche Datenanalyse für deponiespezifische Fragestellungen

Hier sind intelligente, lernende Auswertungen der zu sammelnden Sensor- und Umgebungsdaten zu realisieren. Abgestimmt mit den domänenspezifischen Anforderungen von Testanwendern und ICP werden die relevanten fachlichen Lern-/ Datenanalyse-Probleme identifiziert (z. B. Zusammenhang von Wetterdaten und Rutschungsverhalten des Deponiekörpers, Zusammenhang von Wetterdaten und Deponiegasentwicklung usw.).

Diese fachlichen Analyseprobleme werden auf passende generische Data Mining Aufgaben abgebildet (wie z. B. Klassifikation, Gruppierung/Clustering, Prognose/ Regressionsanalyse). Für jede der generischen Data Mining Aufgaben gibt es eine Vielzahl konkreter Algorithmen, Lösungsansätze und Technologien (wie z. B. neuronale Netze, logistische Regression, Nearest-Neighbour Klassifikation, Bayes-Klassifikatoren, Support-Vector-Machines, Gaußprozesse, etc.). Die Eignung eines bestimmten Verfahrens für ein konkretes fachliches Problem hängt i. A. von vielerlei spezifischen Parametern der aktuellen Aufgabenstellung ab und ist in der Praxis häufig nur durch systematische Experimente herauszufinden. Ferner verwendet man ein bestimmtes Verfahren für ein gegebenes Problem typischerweise mit einem bestimmten Satz an Verfahrensparametern (z. B. Topologie eines neuronalen Netzes) und in Verbindung mit einer Reihe von Datenvorverarbeitungsschritten (z. B. zum Skalenabgleich, zur Elimination von Nullwerten oder offensichtlichen Ausreißerwerten, zur Herstellung verfahrensspezifischer Datenrepräsentationen, etc.). Auch diese Verfahrensparametrierung und Datenvorverarbeitungsschritte müssen i. A. in aufwändigen Experimentalzyklen optimiert werden, um akzeptable Ergebnisse zu erzielen. Die Gesamtheit von ausgewähltem Verfahren, Verfahrensparametern und Vorverarbeitungsschritten nennen wir Verfahrenskonfiguration.

Um alle entsprechenden Bausteine für eine solche Verfahrenskonfiguration an der Hand zu haben und systematische Experimente durchführen zu können, verwendet man Algorithmenbibliotheken mit entsprechenden graphischen und programmatischen Benutzerzugängen. Die weltweit führenden „Werkzeugkästen“ mit Data Mining Methoden aus dem maschinellen Lernen und der klassischen Statistik sind RapidMiner/WEKA und R.

Im vorliegenden Fall haben wir es mit Daten zu tun, bei denen die räumliche Komponente eine große Rolle spielen kann (z. B. ist die Stärke der Deponiegasentwicklung über das Deponiegelände hinweg unterschiedlich verteilt bzw. die Gefahr einer Rutschung ist hochgradig von der Form eines Deponiekörpers und seiner einbettenden Landschaft abhängig). Deshalb sind geostatistische Erweiterungen der Lernverfahren hier besonders interessant. Räumliche Aspekte bringen in vielerlei Verfahren der Datenanalyse und -verarbeitung eine zusätzliche Komplexitätsstufe, (i) weil sie spezielle statistische Effekte bewirken (statistische Abhängigkeiten räumlich benachbarter Zu-



fallsvariablen – räumliche Autokorrelation; implizite Beziehungen zwischen Objekten), (ii) weil sie vom Menschen mit spezifischen Sichtweisen und Sprachmitteln verarbeitet werden (Common Sense, Raumkognition) und (iii) weil sie in aller Regel die Algorithmen sehr viel rechenintensiver machen. Daher gibt es auch spezielle räumliche Datenanalyse-Aufgaben (Spatial Data Mining), wie z. B. die Hotspot-Analyse, die räumliche Trendanalyse, die Ko-Lokationsanalyse, räumliche Klassifikation und räumliche Assoziation, etc.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird eine Gesamtarchitektur entworfen, die aufeinander abgestimmte Module für die Sensordatenhaltung und -logistik, die Sensordatenvorverarbeitung und die intelligente räumliche Datenanalyse enthält. Dabei gehen wir davon aus, dass für das Datenmanagement eine spezielle „Datenvorverarbeitungs-pipeline“ implementiert wird, welche die Sensordaten in die Form bringt, die für die nachgelagerten Analysestufen erforderlich sind.

### 2.2.2 Modul 2: Wissensbasierte Erkennung komplexer Ereignismuster

Die computergestützte Verarbeitung komplexer Ereignisse („complex event processing“, CEP) befasst sich mit der Erkennung, Analyse, Gruppierung und Verarbeitung voneinander abhängiger Ereignisse (Events). CEP umfasst Methoden, Techniken und Werkzeuge, um Ereignisse kontinuierlich zu verarbeiten, während sie passieren, also in Nah-Echtzeit. CEP leitet aus Ereignissen (z. B. aus kontinuierlichen Sensordatenströmen) höheres, potenziell nützliches Wissen in Form sogenannter komplexer Ereignisse ab, d.h. Situationen, die sich nur als Kombination mehrerer Ereignisse erkennen lassen. Komplexe Ereignisse werden traditionell als zeitliche Auftretismuster einfacherer Ereignisse definiert, für deren Beschreibung verschiedene Operatoren verwendet werden können („Ereignis A tritt n-mal hintereinander auf“, „Ereignis B folgt innerhalb einer Minute nach Ereignis A“, ...). CEP-Systeme in der industriellen Praxis verwenden sehr einfache Mustersprachen und befassen sich mit der effizienten Verarbeitung sehr großer Ereignisströme (z. B. Zehntausend einfache Ereignisse pro Sekunde in der Anlagenüberwachung). Herausforderungen bei der Umsetzung von CEP-Systemen sind insbesondere die hoch performante Erkennung auch kompliziert definierter Muster bei der Verarbeitung von Datenströmen, aber auch problemadäquate Musterbeschreibungssprachen und Mustereditoren.

Bei der wissensbasierten Erkennung komplexer Ereignisse („knowledge-based CEP“) verknüpft man Methoden des CEP mit denen der formalen Wissensverarbeitung (Nutzung von Hintergrundwissen, logisches Schlussfolgern, ...), um intelligentere Auswertungen zu ermöglichen bzw. kompaktere Software-Systeme zu bauen. Eine andere Erweiterung einfacher CEP-Ansätze besteht darin, die Operatorsprache zur Musterbeschreibung um räumliche Aspekte zu erweitern („spatial CEP“, z. B. „Ereignis B tritt in-



nerhalb von 5 Minuten im 500 m-Umkreis von Ereignis A auf“, „mindestens drei Ereignisse des Typs X treten im Gebiet Y auf“). Ähnlich wie das Spatial Data Mining ist auch das Spatial CEP hochgradig rechenaufwändig und ebenfalls noch Gegenstand aktueller Forschungen.

In diesem Forschungsprojekt soll ein Software-Verfahren entwickelt werden, das die für das Anwendungsfeld der Deponieüberwachung erforderliche Operatorsprache, Bedienbarkeit und Effizienz aufweist, um räumlich-zeitliche Ereignismuster der telemetrischen Deponie-Sensorik im laufenden Betrieb zu verarbeiten und dabei sowohl Steuersignale für den Deponiebetrieb (insbesondere: Deponiegasmanagement) als auch für die Deponieüberwachung (Alarmierung bei außergewöhnlichen bzw. gefährlichen Ereignissen, Vorwarnung bei Rutschgefahr des Deponiekörpers, ...) zu erzeugen.

### 3 Herausforderungen und Ausblick

Die Realisierung des skizzierten Forschungsprojekts bietet einige spannende Herausforderungen:

Zu diesen zählt die Identifikation der wichtigsten fachlichen Fragestellungen auf der Deponie und der entsprechenden Sensorik, die eine Echtzeit-Überwachung erfordern bzw. von ihr profitieren können (beispielsweise durch jederzeitige Überprüfungsmöglichkeit, automatische Alarmgenerierung oder sogar automatische Reaktion der Anlagensteuerung).

Ferner haben unsere Recherchen ergeben, dass im Bereich der Deponien zurzeit kein allgemein verwendetes Protokoll zur Übertragung telemetrisch erfasster Daten von den Sensoren in eine zentrale Datenhaltung existiert. Hier gilt es im Zuge des Forschungsprojektes ein derartiges Protokoll zu definieren, welches auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist.

Für die automatische Interpretation der betrachteten komplexen natürlichen Phänomene bedarf es zahlreicher Experimente, um herauszufinden, ob die sachlogischen Zusammenhänge aus den verfügbaren Daten allein überhaupt ableitbar sind.

Am Ende steht dann die Frage nach der Nutzbarkeit für die Anwender: Obwohl komplexe IT-Methoden in diesem Forschungsprojekt zur Anwendung kommen, sollen diese durch die Fachanwender einfach nutzbar und konfigurierbar sein. Die Gebrauchstauglichkeit (Verständlichkeit, effiziente Handhabbarkeit) der Benutzungsoberflächen ist daher ein zentraler Aspekt.

Für die Zukunft können sich die Projektpartner vorstellen, das System um ein Prognosewerkzeug zu erweitern. Dabei sollen mögliche eintretende Phänomene simuliert und die Interdependenzen mit den anderen Themenfeldern prognostiziert werden. Dies er-



möglicht den Deponiebetreibern und Ingenieurbüros, frühzeitig Schwachstellen oder ungünstige Konstellation zu identifizieren und im Vorfeld Einfluss auf geplante Maßnahmen zu nehmen und diese zu optimieren.



# Spundwand aus Kunststoff

**Hans Gust, Wolfgang Behrens, Jan Schröder**

G quadrat Geokunststoffgesellschaft mbH, Krefeld

## Inhaltsangabe

Grundsätzlich sind Spundwände aus Kunststoff in allen Bereichen einsetzbar, in der auch die traditionelle Stahlbohle Verwendung findet. Spundwände aus Kunststoff lassen sich wie die traditionellen Spundwände aus Stahl im Vibrations-, Ramm-, oder Eingravingsverfahren in den Boden einbringen. Die Vorteile sind die extrem lange Beständigkeit des Kunststoffes und die Wirtschaftlichkeit aufgrund des geringen Profildgewichtes ( $\text{kg/m}^2$ ) und der einfachen Verarbeitung.

## Stichworte

Kunststoffspundwand, Dichtwand, Hochwasserschutz, Deponie, Deichbau, Deichsanierung, Spundwand, Schlossdichtung

## 1 Kunststoffspundwände allgemein

### 1.1 Herstellung und Eigenschaften

Die Kunststoffspundwände "DuoLock©" werden aus qualitativ hochwertigem, regeneriertem Kunststoff im Extrusionsverfahren hergestellt. Man unterscheidet zwischen Mono- und Coexprofilen. Während Monoprofile ausschließlich aus Regenerat hergestellt werden, wird bei Coexprofilen die äußere Schicht aus Neumaterial ("Virginmaterial") gefertigt. Durch die Verwendung von Neumaterial kann die äußere Schicht projektspezifisch mit speziellen Eigenschaften versehen werden (Farbgebung, UV-Beständigkeit etc.).

Der Rohstoff ist ein Restprodukt aus der Fensterrahmen-Produktion und verfügt über konstante Eigenschaften. Dank der durchweg homogenen Qualität sind die Materialkennwerte für das Produkt konstant und liefern, zusammen mit den geometrischen Abmessungen, alle für eine Dimensionierung notwendigen Kennwerte.

Nach EN ISO 527 hat das Material eine Dauerzugfestigkeit von 40 MPa und einen Dauerelastizitätsmodul (Biegung) von 1.500 MPa. Die Bemessung des Materials lehnt sich an das Nachweisverfahren "Elastisch-Elastisch" der DIN 18800 an. Zur Erddruckberechnung wird ein Wandreibungswinkel in den Grenzen von  $-\varphi/3$  (passiver Zustand) und  $+2\varphi/3$  (aktiver Zustand) angesetzt. Ansonsten gelten alle üblichen Regelwerke wie DIN 1054, DIN 1055, DIN 4084, sowie EAB bzw. EAU uneingeschränkt.





## 1.2 Anwendungsgebiete

Grundsätzlich sind Kunststoffspundwände in allen Bereichen einsetzbar, in der auch die traditionelle Stahlbohle Verwendung findet. Auch ist der Einsatz von Ankerlagen oder Aussteifungen möglich.

Die klassischen Anwendungsbereiche sind:

- Flussbettstabilisierung, Dammsicherung und Erosionsschutz von Fließgewässern
- Ufersicherung zur Verhinderung von Erosionserscheinungen in Dämmen und Böschungen
- Einsatz als Wurzel- oder Wühltiersperre
- Sicherung von Uferbereichen mit schwankendem Wasserstand
- Innendichtung in Deichen an Fließgewässern, insbesondere bei Deichsanierungen
- Vertikaldichtung im Deponiebau

Der größte Anwendungsbereich liegt im Dichtungsbau, besonders beim Bau von Vertikalabdichtungen. Beim Dammbau wird durch eine vertikale Abdichtung (Kerndichtung) der Aufbau einer Sickerlinie zeitlich verzögert. Im Hochwasserfall wird so das Aufweichen des Dammes (Wassersättigung) mit möglichen Brucherscheinungen für den Zeitraum des Hochwasserereignisses verhindert. Die statische Funktion der Spundwand tritt hierbei im Vergleich zur erforderlichen hydraulischen Dichtwirkung in den Hintergrund und ist durch Spundwände aus Kunststoff problemlos erfüllbar.

Zur Sicherung einer Altlast werden Dichtwände deponieumschließend eingebaut. So kann ein Schadstoffeintrag in den angrenzenden Untergrund, insbesondere in das Grundwasser, verhindert werden. Hierbei ist die extrem lange Beständigkeit des Kunststoffes besonders von Vorteil.

Die Wirtschaftlichkeit des Systems ergibt sich vor allem aus dem geringen Profilgewicht ( $\text{kg/m}^2$ ) und der einfachen Verarbeitung (Abbildung 1).



Abbildung 1: Einfache Handhabung der Kunststoffbohlen auf der Baustelle

## 2 Anwendung von Kunststoffspundwänden

### 2.1 Einbringverfahren

Spundwände aus Kunststoff lassen sich grundsätzlich wie die traditionellen Spundwände aus Stahl im Vibrations-, Ramm-, oder Eingrabungsverfahren in den Boden einbringen.

Bei Böden die aufgrund ihrer Beschaffenheit für ein direktes Rammen ungeeignet wären, können die Kunststoffspundwände mithilfe einer Mutterbohle aus Stahl (gleiche Geometrie wie die Kunststoffbohle, vorlaufend oder mitlaufend) eingebracht werden.

Bei der vorlaufenden Mutterbohle wird das Stahlprofil über das Spundwandschloss mit der Kunststoffbohle zu einer Doppelbohle verbunden. Anschließend wird die Doppel-



bohle eingerammt. Hierbei wird der Boden durch die vorlaufende Mutterbohle profilgerecht aufgelockert und die Kunststoffbohle im selben Arbeitsgang im vorher aufgelockerten Bereich eingebracht. (Abbildung 2)



*Abbildung 2: Kunststoffbohle mit vorlaufender Mutterbohle*

Alternativ wird die mitlaufende Mutterbohle mit der Kunststoffbohle zu einer Bohle verbunden („Sandwich“). Am Kopf der mitlaufenden Mutterbohle wird die Kunststoffbohle z. B. durch Holzkeile temporär befestigt. Am Fußpunkt werden die beiden Bohlen durch Stahlklammern miteinander verbunden (Abbildung 3). Die Stahlklammern dienen zum einen als Verbindungselement, und zum anderen als Rammschuh. Nach dem Ziehen der Führungsbohle verbleiben die Stahlklammern im Boden.

Die Verwendung einer vorlaufenden oder mitlaufenden Mutterbohle hat folgende Vorteile:

- Die gesamte Rammenergie des Einbringgerätes wird über den Stahl ins Erdreich übertragen.



- Das lotrechte Einrammen der Mutterbohle ist am Kopf kontrollierbar (ein Abdriften aufgrund von Rammhindernissen wäre sofort sichtbar).
- Da die Mutterbohle nach jedem Rammvorhang gezogen wird, ist eine Beschädigung der Mutterbohle und damit der Kunststoffbohle am Ende eines jeden Rammvorganges sichtbar.



Abbildung 3: Mitlaufende Mutterbohle und Stahlklammern

Gegebenenfalls sind Bodenschichten vorhanden, die das Einrammen von Spundwänden unabhängig vom Werkstoff behindern können. Um diese Schichten aufzulockern gibt es weitere Möglichkeiten wie spülen, vorbohren und schlitzen.

Beim Spülen wird mithilfe von Wasserdruck das fest gelagerte Gestein unterhalb der Mutterbohle aufgelockert. Hierdurch wird der notwendige Spitzendruck so weit reduziert, dass ein einrammen der Kunststoffbohle möglich wird.

Das Eingraben ist eine Variante zur Installation von Kunststoffbohlen bei sehr steinigen oder felsigen Böden. Die Spundwände werden in einen ausgehobenen Graben eingestellt. Der verbleibende Aushubraum wird anschließend mit geeignetem Material verfüllt und verdichtet.

Ein solcher Graben kann bis zu einer Tiefe von ca. 6m in Form eines schmalen Schlitzes auch mit einer Tiefenfräse hergestellt werden (Abbildung 4). Je nach Bodeneigenschaft kann der Schlitz temporär durch einen Verbauschlitten gestützt werden. In den Schlitz werden die Profile eingestellt, bevor dieser mit geeignetem Material verfüllt wird. Durch das händische Einstellen der Kunststoffbohlen in den Graben sind Schlos Sprengungen ausgeschlossen.



Abbildung 4: Tiefenfräse ohne und mit Verbauschlitten (Quelle: Christoffers Kulturbau GmbH)

## 2.2 Dichtwirkung

Die einzelnen Bohlen der Kunststoffspundwand können als technisch wasserdicht angesehen werden. Wie bei allen Spundwandkonstruktionen ergibt sich die Durchlässigkeit des Kunststoffspundwand-Systems durch die Schlösser.

Grundsätzlich setzen sich Spundwandschlösser durch den Eintrag von Feinstkorn zu. Der sehr geringe Wasserstrom in Richtung der Schlösser trägt Feinstkorn aus dem Erdreich aus und setzt sich im Schloss ab, wodurch eine Verringerung der Durchflussrate erreicht wird.

Falls trotzdem eine vollständige Wasserdichtigkeit gefordert wird, lässt sich dies mithilfe polymerer Quellbänder erreichen. Diese werden in das Schloss eingeklebt und vervielfachen ihr Volumen bei Kontakt mit Wasser. Durch diese Quellbänder wird eine zusätzliche Dichtigkeit des Gesamtsystems erreicht, die die geforderten Durchlässigkeitsbeiwerte übersteigt.

## 3 Referenzen

### 3.1 Hochwasserrückhaltebecken Niederorschel

Bei dem Bauvorhaben "Projekt HRB Niederorschel" wurden erfolgreich 2.500m<sup>2</sup> des DuoLock© Systems DL 300/5.5 als Dichtwand für ein Hochwasserrückhaltebecken verbaut.

Die wichtigsten Randdaten zu dem Projekt sind:





**Bauherr:** Gewässerunterhaltungszweckverband Eichsfeld

**Baufirma:** Erd- und Tiefbau GmbH, Waltershausen

**Leistungen:**

- 20.000m<sup>3</sup> Oberboden, 30.000m<sup>3</sup> Aushub
- 3.500m<sup>3</sup> Dammbau, 2.000m<sup>2</sup> Bodenverbesserung
- 15.000m<sup>2</sup> Wasserhaltung, GW-Absenkung
- Ein- und Auslaufbauwerk, 25m DN600-Kanal
- 2.500m<sup>2</sup> Vertikaldichtung, DuoLock DL 300/5.5

Das Hochwasserrückhaltebecken wurde gebaut um den angrenzenden Fluss "Ohne" davon abzuhalten in Hochwasserzeiten die angrenzenden Bezirke zu überfluten. Aufgrund der anstehenden Bodenverhältnisse war es notwendig eine Vertikaldichtung in den Untergrund einzubringen. Aus dem Bodengutachten ist ein repräsentatives Beispiel für den anstehenden Boden entnommen (Abbildung 5). Nach einer ca. 1,2m starken Schicht aus tonigem Oberboden und Auelehm kommt eine ca. 3,4m starke Schicht aus Kies, die die größte Herausforderung an das Einbringen der Kunststoffbohlen stellte. Ziel war es die 5m langen Kunststoffbohlen in den Tonstein einzubinden, der aufgrund des hohen Tonanteils eine ausreichend hohe Dichtigkeit aufweist.

Um die Verwendbarkeit der Kunststoffbohlen projektspezifisch nachzuweisen wurde ein Testfeld angelegt. Wichtig für das Testfeld waren die identischen Bodenverhältnisse wie beim Hauptgewerk. Geplant und ausgeführt wurde ein 3m x 6m großer und 5m tiefer Kasten aus Kunststoffbohlen. Die Ecken wurden mit speziellen Eckprofilen hergestellt. Es wurden die geplanten Gerätschaften und Spezialanfertigungen (Mutterbohle, Rammführung etc.) in situ getestet und gegebenenfalls optimiert.

Nach dem Einbau der Kunststoffbohlen wurde der Kasten auf Dichtigkeit geprüft. Hierzu wurden Grundwassermessstellen innerhalb und außerhalb des Kastens angelegt. Nach dem Abpumpen des Wassers aus dem Inneren des Kastens wurde die Dichtheit des Systems über die Differenz und die Veränderung der gemessenen Wasserpegel nachgewiesen.

Ein großer Vorteil des Testfeldes bestand darin, dass die Fragen der am Bau beteiligten Personen/Firmen/Behörden bereits vor Beginn der Hauptmaßnahme geklärt werden konnten.



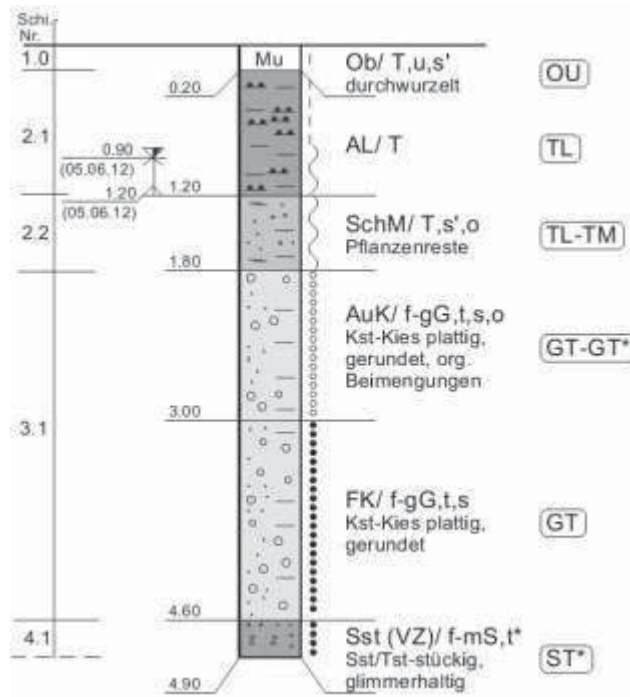


Abbildung 5: Bodenaufschluss

Aufgrund des Bauablaufs wurde direkt nach dem Oberbodenabtrag damit begonnen die Kunststoffbohlen in den Boden einzubringen. Mithilfe der schon im Testfeld erfolgreich eingesetzten Mutterbohle konnten die Kunststoffbohlen ohne Probleme eingebracht werden (Abbildung 6).



Abbildung 6: fertiggestellte Kunststoffspundwand



### 3.2 Bau einer Gasmessanlage

Für einen Energiebetreiber sollte eine Gasmessanlage auf schwierigem Baugrund errichtet werden. Unter einem 0,4m mächtigen, breiigen, schluffigen Oberboden wurden bis in eine Tiefe von 4,2m unter Geländeoberkante weiche bis steife Geschiebemergel angetroffen. Unter dem Geschiebemergel folgte bis zur Sondierendtiefe von 5,0m ein dicht gelagerter Feinsand. Wasser wurde im Bohrloch nicht angetroffen.

Vom Ingenieurbüro Geonovo OHG aus Leer wurde als Alternative zu einem vollständigen Bodenaustausch ein partieller Bodenaustausch in Kombination mit einer Kunststoffspundwand untersucht. Die Abmessungen der Baugrube würden sich auf 5,0m x 9,0m reduzieren, gegenüber 16,2m x 19,2m bei Vollaustausch. Die Aushubtiefe bleibt bei 4,2m. Der ausgehobene Boden wird gegen einen standsicheren und frostsicheren Sand ausgetauscht, der lagenweise in die Grube eingebaut und verdichtet wird.

Aus wirtschaftlichen Gründen entschied man sich für den partiellen Bodenaustausch in Kombination mit einer Kunststoffspundwand. Um die Baugrube wurde eine Kunststoffspundwand bis in eine Tiefe von 7,0m unter Geländeoberkante eingezogen. Die eingesetzte Kunststoffspundwand verhindert, dass durch den benachbarten Geschiebelehm eine Grundbruchgleitfläche unterhalb der Fundamentaussenbegrenzung ausgebildet wird. Das statische Modell ist in Abbildung 7 dargestellt.

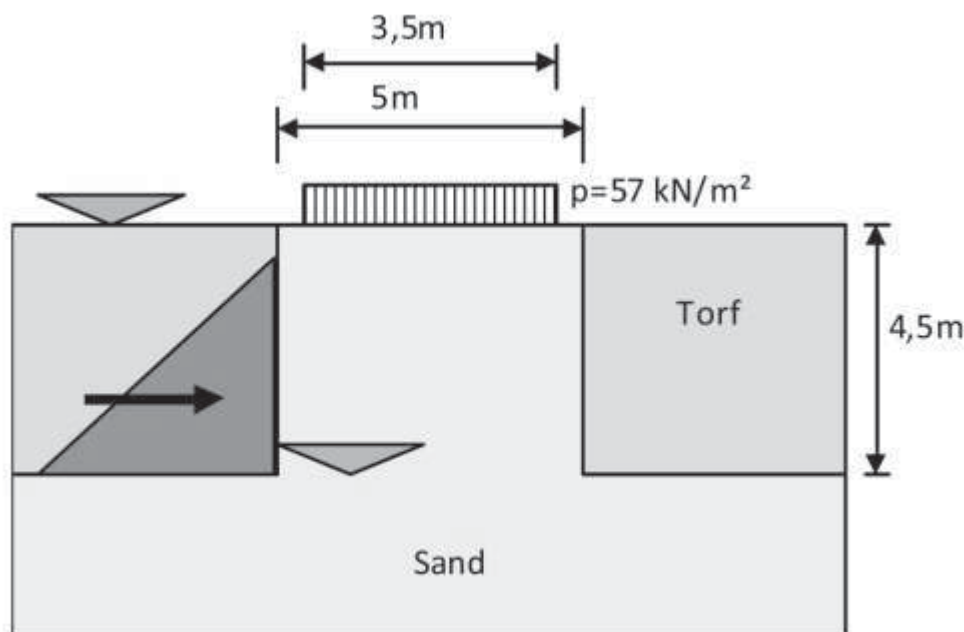


Abbildung 7: statisches Modell für die Gründung der Gasmessanlage

Die Kunststoffspundbohlen konnten durch eine mitlaufende Mutterbohle problemlos eingebracht und das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden (Abbildung 8).



Abbildung 8: partieller Bodenaustausch mit Kunststoffspundwand (Quelle EWE Netz GmbH)

## 4 Literaturverzeichnis

- |                              |      |   |
|------------------------------|------|---|
| Busse M,                     | 2013 | 29. Fachtagung "Die sichere Deponie - Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen", Spundwände aus Kunststoff - Innovative Lösungen für den Tiefbau und für den Wasserbau" Abfallforschungstage.  |
| Schröder, J., Klapperich, H  | 2013 | 6. Symposium Umweltgeotechnik & 7. Freiburger Geotechnik-Kolloquium "Ressourcen & Geotechnik", Freiberg "Innovative Lösungen in der Umweltgeotechnik - Spundwände aus Kunststoff: Konzept und Entwicklung".   |
| Schröder, J.                 | 2013 | 7. DeichTage der „Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)“, TAGUNG 08.-09. Oktober, "Spundwände als Dichtungs- und Stabilitätselement im Deichquerschnitt und am wasserseitigen Deichfuß (Kunststoff Spundwände)". |
| Piyush K. Dutta, Uday Vaidya | 2003 | A study of the long-term applications of vinyl sheet piles  |
| National Engineering         | 2007 | Technical Supplement 14R, Design and Use of   |



Handbook Part 654

Sheet Pile Walls in Stream Restoration and Stabilization

Dipl.-Geol. Frauke Menzel    2013    Baugrundgutachten: „Bau einer Gasmessanlage“  
Dipl.-Geol. Andreas Grabe



# Prinzip Vorsorge zur Beendigung der Nachsorge – Erläutert anhand von Fallbeispielen

**Klemens Finsterwalder, Daniela Sager**

Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Bernau a. Ch./ Hittenkirchen

## Inhaltsangabe

In der Bautechnik wird zusammen mit der Objektplanung eines Bauwerks durch die Fachplanung ein Festigkeits- oder Standsicherheitsnachweis (Eignung) vor der Errichtung einer Baukonstruktion erbracht. Die Entwicklung der Errichtungskriterien erfolgt auf Grundlage einer Bemessung der Konstruktion auf Basis von Werten. Diese Werte sind in entsprechenden DIN-Normen nachzuschlagen. Vor der Schlussabnahme wird überprüft, ob die Errichtungskriterien erfüllt wurden. Angewendet auf die Deponietechnik bedeutet dies, dass eine Bemessung eine Beurteilung der Standsicherheit zusammen mit der Emissionssicherheit über die Nutzungszeit der Deponie ist, welche die Betriebsphase und den Zustand nach der Schließung inkl. der Nachsorgedauer umfasst. Wird das Prinzip der Vorsorge angewendet, kann über diese Nutzungszeit, analog zum Bauwesen, ebenfalls auf Basis von Werten (Prinzip der Vorsorge) unter Berücksichtigung von umfassenden Standortdaten der Nachweis der Eignung und Wirksamkeit der Deponiesicherung durch Verknüpfung mit den Auslöseschwellenwerten geführt werden. Die Nachweisführung der Wirksamkeit erfolgt bereits im Rahmen der Planung und Genehmigung mit Hilfe der sogenannten Emissionsgrenzwertanalyse. Dieses Berechnungsverfahren basiert auf naturwissenschaftlichen Grundlagen und ermöglicht Analysen über beliebige Zeiträume. Man kann mit dieser Anwendung bereits zum Zeitpunkt der Planung der Sicherungsmaßnahme feststellen, ob die Belastungen des Grundwasserleiters dauerhaft kleiner als die behördlich vorgegebenen Auslöseschwellen für den Standort sein werden. Abschließend wird mit den Daten der Qualitätssicherung der Bauausführung die Emissionsgrenzwertanalyse aus der Planungsphase verifiziert. Somit kann die Wartung des Deponiebauwerks nach der Fertigstellung der endgültigen Deponiesicherung beendet werden.

Die Anforderungen an den Nachweis der Emissionssicherheit sind hoch. Im Unterschied zum Bauwesen können die Risiken nicht mit Sicherheitsbeiwerten zu einem Gebrauchszustand bewertet werden, weil für eine Deponie die „Sicherheitsbeiwerte“ keine feste Größe darstellen. Sie sind abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, d.h. dem Standort in Wechselbeziehung mit den Sicherungsmaßnahmen und dem Nutzungszeitraum. Dieser Umstand wird mit der für Deponiebauwerke eingeführten Berücksichtigung der Datenstreuung um einen Mittelwert aller emissionsbestimmenden Eingabedaten und ihrer zeitabhängige Veränderung gelöst. Das Ergebnis ist für den untersuchten Stoff nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung ein Emissionsfeld, in dem die Emissionen auftreten können. Die Inhalte dieses Beitrags beziehen sich allein auf die Emissionen durch mobile Sickerwasserinhaltsstoffe aus dem Deponiekörper (Emissionsquelle) über die ungesättigte Bodenzone in den Grundwasserleiter. Bei einer Bewertung von Altdeponien muss allenfalls eine mögliche Gasbildung gleichrangig behandelt werden.

## Stichworte

Planungsphase, Vorsorge, Wirkungsnachweis, Emissionsgrenzwertanalyse, Sickerwasser, Stofftransportgesetz, Grundwasserschutz, Qualitätssicherung, Deponieschließung, Entlassung aus der Nachsorge





# 1 Einleitung

## 1.1 Entwurf und Bemessung der Deponiesicherung nach Verordnung, Ist-Situation entsprechend dem Prinzip Nachsorge

Die Deponiesicherungsmaßnahmen müssen einerseits die Forderungen der DepV 2009 erfüllen und andererseits so bemessen sein, dass die Voraussetzung zur Entlassung aus der Nachsorge gegeben ist. Im Zuge der Objekt- und Fachplanung für ein Deponiebauwerk werden normalerweise Aspekte der statischen Sicherheit im Sinne von Standsicherheit oder Festigkeit ermittelt. Zur Entwurfsplanung liegen für technische Abdichtungssysteme Eignungsnachweise in Bezug auf Anforderungen an die Qualität, Leistungsfähigkeit, Materialbeständigkeit, Eignungsprüfung, Einbauvorschriften, etc. der LAGA Ad-hoc AG „Deponietechnik“ vor. Diese Festlegungen gelten allgemein und beziehen sich nicht auf standortspezifische Randbedingungen. Man hat damit im Vorfeld keine Kenntnis über die Wirksamkeit einer bestimmten Maßnahme für die Randbedingungen eines bestimmten Standortes und kann vorsorglich keine Aussage darüber treffen, ob durch Anwendung einer bestimmten Maßnahme die Zielwerten der Behörde, die sogenannten Auslöseschwellenwerte, langfristig eingehalten werden. Eine standortspezifische Beurteilung unter dem Aspekt Stoffmobilität, als wesentlicher Bestandteil der Nachweisführung der Emissionssicherheit, findet entsprechend dem Prinzip Nachsorge nicht statt. Diese Ist-Situation zeigt Abbildung 1.



Abbildung 1 Entwurf und Bemessung der Deponiesicherung nach Verordnung, Ist-Situation gemäß dem Prinzip der maßnahmenorientierten Nachsorge, gleichbedeutend dem Begriff „Gefahrenabwehr“.

Vielmehr wurde zur Verhinderung von Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit, gleichbedeutend dem Begriff der maßnahmenorientierten Gefahrenabwehr, die sogenannte Nachsorgephase eingeführt. Im Rahmen dieser werden Langzeitbeobachtungen, wie Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen, auf unbestimmte Zeit zur Bewahrung der Grundwasserqualität durchgeführt. Bei einer Überschreitung der Auslöse-



schwellen müssen entsprechende Maßnahmen zur Sicherung der Grundwasserqualität erfolgen. Für eine Feststellung des Abschlusses der Nachsorge durch die Behörde ist nach DepV bei Deponien der Klasse 0 vorerst von einem Nachsorgezeitraum von mindestens zehn Jahren, bei den Deponien der Klassen I bis IV von mindestens 30 Jahren auszugehen. Eine belastbare Aussage auf Grundlage von punktuellen Messungen zur Langzeitentwicklung der möglichen zukünftigen Emissionen in den Grundwasserleiter kann aber nicht getätigt werden. Das bedeutet für eine Beendigung der Nachsorge ein nicht kalkulierbares Risiko in Bezug auf Dauer und Kosten, weil weder lineare Gesetzmäßigkeiten noch feste Rahmenbedingungen vorliegen.

## 1.2 Entwurf und Bemessung der Deponiesicherung gemäß dem Prinzip Vorsorge mit Nachweis der Eignung und Wirksamkeit

Die Abbildung 2 zeigt die Weiterentwicklung der Vorgehensweise bei der Objekt- und Fachplanung sowie dem Entwurf der Sicherungsmaßnahmen im Vergleich zu Beurteilung alleinig auf Basis nach Verordnung. Diese Vorgehensweise ist eine standortbezogene Bewertung jeder Deponiesicherungsmaßnahme, ungeachtet ihrer Bauart. Das entspricht der bis dato fehlenden Fachplanung „Stoffmobilität“. Hier wird bereits in der Planungsphase, gemäß dem Prinzip der Vorsorge, über den Weg der Ermittlung von Emissionsfeldern in den Grundwasserleiter die Verknüpfung zu den Auslöseschwellen zum Schutz der Grundwasserqualität über beliebige Zeiträume geschaffen.



Abbildung 2 Entwurf und Bemessung der Deponiesicherung gemäß dem Prinzip Vorsorge als Teil der Planungsaufgabe: Quantitative Verknüpfung der gewählten Sicherungsmaßnahme mit der Zielvorgabe (Auslöseschwellen) - Wirkungsnachweis.

Auf dieser einheitlichen Basis einer „echten“ Bemessung eines Deponiebauwerkes kann jede Maßnahme in ihrem ökologischen Nutzen bewertet werden und ein Wirkungsnachweis, als entscheidender Bestandteil der Nachweisführung der Emissionssicherheit, vorgelegt werden. Mit dem rechnerischen Wirkungsnachweis, dass nach Be-



endigung der Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen die behördlich vorgegebenen Auslöseschwellenwerte sicher eingehalten werden, wird die Voraussetzung zur Beendigung der Nachsorge geschaffen. Eine Nachsorgephase im herkömmlichen Sinn zur Gefahrenabwehr ist nicht erforderlich, eine festgelegte Dauer und im Vorfeld definierte Maßnahmen sind vielmehr Teil der Bauphase unter Berücksichtigung der anzuwendenden Regelwerke, u.a. DepV (§11 Abs. 2, Anhang 5 Nr. 10) und KrWG (§ 40 Abs. 5). Die Festlegung der Nachsorgemaßnahmen mit der Bestimmung der maximalen Nachsorgedauer als Teil der Baugenehmigung ermöglicht somit eine zuverlässige Kalkulation der Schließungskosten einschließlich der Nachsorgekosten.

### 1.3 Ablauf der Nachweisführung für die Emissionssicherheit gemäß dem Prinzip Vorsorge

In der Planungsphase werden die Grundlagen für die Nachweisführung zusammengestellt und mit den Beteiligten (Landesamt, Wasserwirtschaftsamt, etc.) die Bedingungen zur Beendigung der Nachsorge festgelegt. Die Auswahl der für den Standort besten Lösung erfolgt gemäß dem Vorgehen in Abbildung 3.

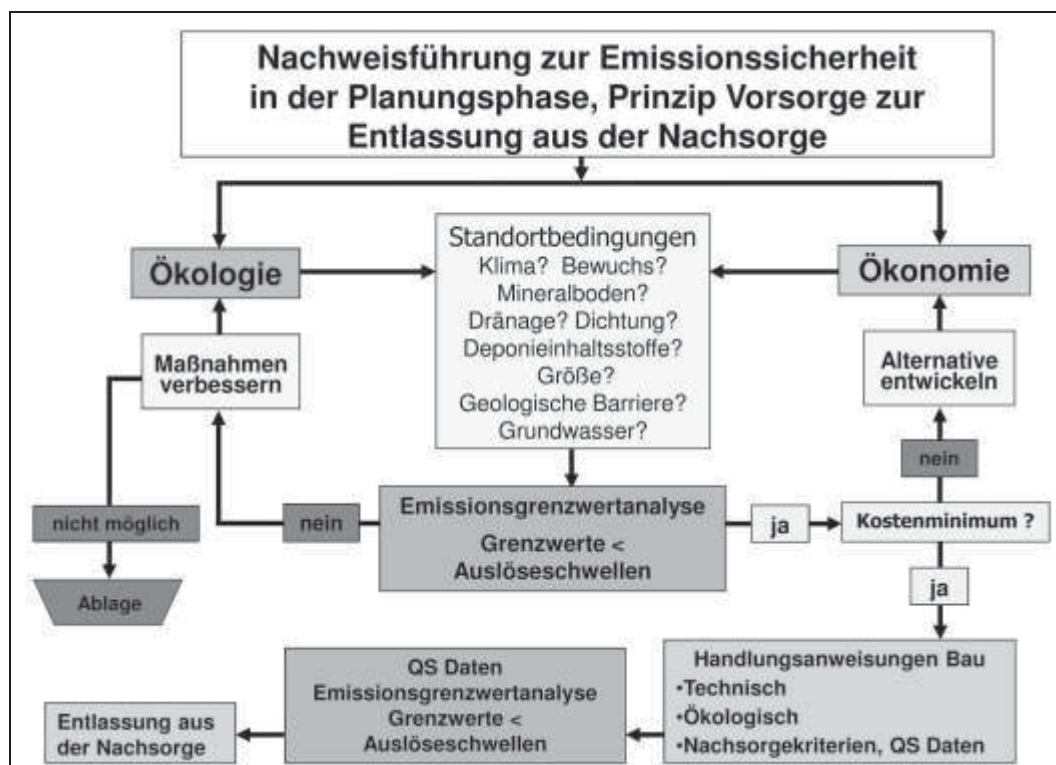


Abbildung 3 Vorgehen bei der Nachweisführung zur Emissionssicherheit.

Gleichberechtigt steht immer die Beurteilung in ökologischer, wie ökonomischer Zielsetzung. Im Rahmen der Entwurfsplanung werden also parallel in einem iterativen Verfahren die Einflüsse einer Konstruktionsänderung auf beide Größen solange untersucht, bis ein für alle Verantwortlichen zufrieden stellendes Ergebnis erzielt ist. Die Eigen-



schaften der Sicherungsmaßnahme sind immer ein Ergebnis der Bemessung nach standortspezifischen Vorgaben. Denkbare Maßnahmen zur Deponiesicherung können gemäß dem Prinzip der Vorsorge auf einer einheitlichen Grundlage verglichen werden. Das bedeutet, dass man im Zuge eines Variantenvergleichs jene Maßnahmen ausscheiden kann, die dem ökologischen Standard der Behörde nicht genügen, d.h. standortspezifisch die Auslöseschwellen nicht dauerhaft unterschreiten. Unter den Varianten, die die Vorgaben der DepV (Nachsorgekriterien) und die Auslöseschwellenwerte einhalten, wird das für die Genehmigungs- und Ausführungsplanung ausgesucht, das den besten Kompromiss zwischen den ökologischen und ökonomischen Zielen darstellt. Ist die „Beste Lösung“ gefunden, werden die Qualitätsanforderungen an die Baustoffe und Systeme festgelegt, die den Richtlinien der bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS, LAGA) zugeordnet werden. Nachdem die Baufreigabe erfolgt ist, werden die in der Entwurfsbearbeitung entwickelten Grundlagen im Rahmen der Ausführungsbearbeitung in Handlungsanweisungen für die Errichtung umgesetzt und im Rahmen der Qualitätssicherung dokumentiert. Die Kontrolle erfolgt durch eine Auswertung der Daten der Qualitätssicherung der Bauausführung mit der Emissionsgrenzwertanalyse. Mit der Entlassung aus der Nachsorgephase, die Teil der Bauphase ist, bedarf es somit keines weiteren technischen und finanziellen Aufwandes für Bauarbeiten, Emissionsminderung und Überwachung (Wartungsfreiheit).

## 2 Bewertungsmethode

### 2.1 Emissionsgrenzwertanalyse

Generell können keine allgemeingültigen Aussagen zur Eignung und Wirksamkeit einer bestimmten Sicherungsmaßnahme zutreffend für jeden Standort gemacht werden. Die qualifizierten Aussagen beziehen sich immer auf einen bestimmten Standort und sind auch jeweils immer nur auf diesen Standort zutreffend. Dieses Zusammenspiel wird in Abbildung 4 dargestellt. Die Berechnung der Stofffrachten in das Grundwasser erfolgt mit dem Programm DESi Variation (**D**eponie **E**mission **S**icherheit). Das Werkzeug „DESi Variation“ ist eine Entwicklung der Finsterwalder Umwelttechnik und baut auf 26 Jahren Forschung und Entwicklung auf (Finsterwalder 1988, 2001) und ist validiert und verifiziert. Die Emissionsgrenzwertanalyse, durchgeführt mit DESi Variation, ermöglicht auf einer einheitlichen Grundlage einen objektiven Vergleich verschiedener Deponiesicherungsmaßnahmen in Bezug auf ihre Wirksamkeit oder den Vergleich von Standorten zur Beurteilung ihrer Eignung.

Bei Durchführung der Emissionsgrenzwertanalyse beeinflussen die folgenden Eingangsdaten die langfristige Belastung des Grundwasserleiters:



- Deponiegröße im Grundriss (Beachtung der Ausrichtung der Deponie zum Grundwasserstrom).
- Deponievolumen (beeinflusst Dauer und Verlauf der Emissionsgrenzwerte).
- Mobiler Deponieinhalt (Benennung aller löslichen Deponieinhaltsstoffe).
- Menge an Sickerwasser (Zielvorgaben Behörde und Deponieeigner).
- Konzentration des Sickerwassers (gesteuert durch Art und Menge der eingelagerten Abfallfraktionen, variiert je nach Deponietyp).
- Eigenschaften der Oberflächenabdichtung und Deponiebasis als technische Maßnahme zur Verringerung der Mobilität der Deponieinhaltsstoffe (Durchlässigkeit der Oberflächenabdichtung und der Basisabdichtung müssen aufeinander abgestimmt sein).
- Mächtigkeit des Grundwasserstroms (Gefälle, Fließgeschwindigkeit, Tiefenausbreitung, Aufsummierung der Stoffeinträge unter dem Deponiekörper über die Fließlänge in Grundwasserströmungsrichtung).

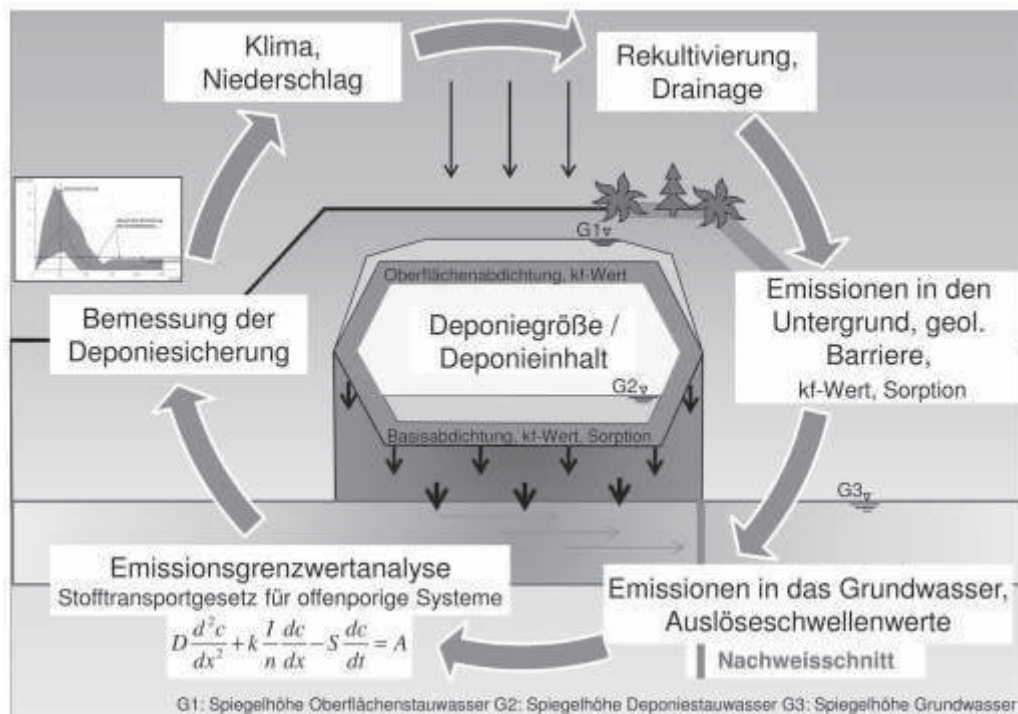


Abbildung 4 Zusammenhang zwischen Standortdaten, Deponieinhalt und Grundwasserbelastung und dem Stofftransportgesetz für offene Systeme.

Je nachdem, wie die Emissionen aus dem Deponiekörper über den Wasserpfad durch die Konzentrationsunterschiede zwischen Deponat und Umgebung oder durch konvektive Einflüsse über Sickerwassereintrag von der Oberfläche bestimmt werden, muss bei der Bemessung und Optimierung der Deponiesicherungsmaßnahme mittels einer Minimierung der Konzentrationsgradienten oder durch Reduzierung der Wasserbewegung im System reagiert werden. Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass man mit technischen Maßnahmen die Emissionen vermindern kann. Eine sogenannte Nullemission





sion ist gemäß der physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Stofftransports nicht erreichbar, weil eine Deponie dadurch gekennzeichnet ist, dass ein Konzentrationsgefälle von innen nach außen besteht. Das bedeutet aber auch, dass eine Emission über Diffusion, ungeachtet der Bauart der Sicherung, immer stattfinden kann. Das bedeutet weiter, dass generell lediglich reduzierende Maßnahmen zur Verfügung stehen (diese dürfen keine begrenzte Lebensdauer haben).

### 2.1.1 Naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten

Der physikalisch-chemische Zusammenhang für die Emissionsgrenzwertanalyse für offenporige Systeme wird durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, Gesetz des Stofftransports 1952 nach Lapidus und Amundson, beschrieben (Gleichung 1):

$$D \frac{d^2c}{dx^2} + k \frac{I}{n} \frac{dc}{dx} - S \frac{dc}{dt} = A \quad \text{Gleichung 1}$$

Darin bedeuten:

D	Diffusionskoeffizient nach Fick, 1855 Diffusionsgesetz	[m/s]
k	Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy, 1856 Konvektionsgesetz	[m/s]
S	Sorptionsanteil nach Langmuir, 1918 Sorptionsgesetz	[-]
I	hydraulischer Gradient	[-]
c	Konzentration der gelösten Stoffe im Porenwasser	[kg/m <sup>3</sup> ]
n	Porenanteil des Bodens	[-]
x	Koordinate x der Transportachse	[m]
t	Zeit	[s]
A	Ausfällung durch Reaktion des Sickerwasserinhaltsstoffs = 0	[kg]

Die Differentialgleichung zweiter Ordnung beschreibt die Wanderung des Ionenschwarms aus dem Deponiekörper über das Porenwasser des Bodens in den Grundwasserleiter. Diese Stoffwanderung ist vergleichbar mit der Funktion eines Ionenchromatographen zur quantitativen Bestimmung von Anionen- und Kationenkonzentrationen aus wässrigen Lösungen. Das Messprinzip eines Ionenchromatographen beruht darauf, dass jede Ionensorte eine charakteristische Laufzeit für den Transport über eine Trennsäule benötigt (Retentionszeit). Damit können die verschiedenen Signale (Peaks) den entsprechenden Ionensorten zugeordnet werden. Über einen Detektor wird ein Signal gegen die Zeit aufgetragen und über die Fläche der Peaks die Höhe der Konzentration ermittelt. Ein Ionenchromatograph ist ein System im Labormaßstab mit definierten Randbedingungen. Die Emissionsgrenzwertanalyse basiert ebenfalls auf der Berechnung des beweglichen Ionenschwarms aus der Stoffquelle, unter Berücksichtigung von Molekulargewicht, Ladungsart, Wertigkeit und Halbwertszeit aller mobilen Deponieinhaltsstoffe aus dem Deponiekörper (Emissionsquelle). Stoffe jeglicher Art kön-



nen in ihrem Wanderungsverhalten, ausgehend von der Quelle in die Umgebung, in Bezug auf Menge und Zeit (Emissionsgrenzwerte), untersucht werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Randbedingungen des Systems Deponie, ein Ionenchromatograph im Feldmaßstab, räumlich variieren (Berücksichtigung der Datenstreuung der Eingangsdaten).

### 2.1.2 Emissionsfelder als Ergebnis der Emissionsgrenzwertanalyse

Bereits in der Planungsphase erhält man als Ergebnis die realen Emissionsgrenzwerte (Abbildung 5), die sich aus der Überlagerung der denkbar günstigsten und ungünstigsten Bedingungen als Funktion der Zeit errechnen (Verknüpfung über das Stofftransportgesetz). Die obere Grenze beschreibt die Maximalwerte, die untere die Minimalwerte und eine Linie im Diagramm den Bereich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit.

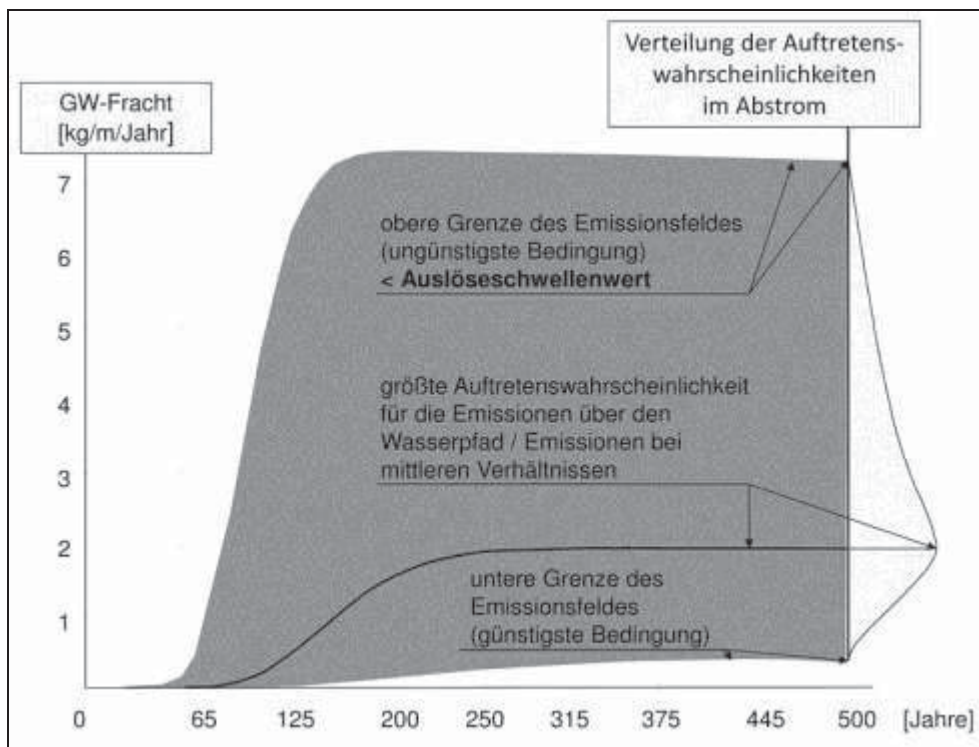


Abbildung 5 Verlauf einer Grundwasserfracht (kg Deponieinhaltsstoff pro Meter Deponiebreite und Jahr) mit eingetragener Verteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit.

Die Randbedingungen einer Deponie sind entsprechenden Streuungen unterworfen. Die Emissionsfelder ergeben sich jeweils aus den Streubreiten der zur Emissionsgrenzwertanalyse verwendeten Eingangsdaten. Die Emissionsfelder stellen nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung Bereiche dar, in denen Emissionen auftreten können. Es wird der Anspruch erhoben, dass alle in Zukunft eintretenden Emissionen im errechneten Emissionsfeld liegen werden und nicht außerhalb der Emissionsgrenzen liegen können, wenn die in der Emissionsgrenzwertanalyse verwendeten Eigenschaften über die Qualitätssicherung der Bauausführung nachgewiesen werden (Prüfung der Erfüllung





der Nachsorgekriterien). Es ist jedoch für eine Bewertung eines Deponiestandortes unerheblich, ob und wann ein Grenzzustand jemals erreicht wird. Ziel ist die Nachweisführung, dass für einen Standort die Auslöseschwellenwerte im Grundwasser auch unter Annahme der ungünstigen möglichen Bedingungen (Emissionsgrenzwerte niedrige Wahrscheinlichkeit) für beliebige Zeiträume dauerhaft unterschritten werden (Bild 3.1.1). Damit sind die Vorgaben zur Entlassung aus der Nachsorge erfüllt. Wenn nicht, werden die Eigenschaften der Deponiesicherung solange verbessert, bis das ökologische und ökonomische Optimum erreicht ist.

Emissionen und Frachten für jeden einzelnen Deponieinhaltsstoff werden in der Größe und im zeitlichen Verlauf (für Obertagedeponien > 250 – 5.000 Jahre) ermittelt. Auch wenn nur einzelne Stoffe in einer Berechnung interessieren, ist es dennoch erforderlich, alle löslichen Bestandteile in die Berechnung einzuführen, um den Einfluss auf die Belegung der freien Sorptionsplätze, Wechselwirkung unter allen Inhaltsstoffen, zu berücksichtigen. Um eine erste Vorstellung zu bekommen, welche Stoffe für die Berechnung wichtig sind, werden die maximalen Sickerwasserkonzentrationen ins Verhältnis zu den Auslöseschwellen gesetzt. Nach Identifikation der Leitparameter durch Emissionsgrenzwertanalysen wird die Bemessung der Sicherungsmaßnahme durchgeführt. Im Folgenden wird anhand von zwei Fallbeispielen die Anwendung der Emissionsgrenzwertanalyse diskutiert. Zum einen handelt es sich um eine Altdeponie für Siedlungsabfälle ohne Basisabdichtung und zum anderen um eine Obertagedeponie für Schlacken aus der Müllverbrennung mit entsprechender Basissicherung.

## 2.2 Fallbeispiele 1 und 2

Bei Fallbeispiel 1 wurde eine Wasserhaushaltsschicht als Maßnahme zur Oberflächensicherung gewählt (Abbildung 6). Die technische Ausführung der Wasserhaushaltsschicht im Zusammenwirken mit der Bepflanzung wird im Rahmen einer Nachsorgephase bis zur vollständigen Wirksamkeit geprüft. Als Leitparameter wurde am Standort Mangan identifiziert. Für Fallbeispiel 1 kann nach dieser Nachsorgephase die Nachweisführung zur Emissionssicherheit beendet werden und der Antrag auf Beendigung der Nachsorge gestellt werden.

Bei Fallbeispiel 2 ist es das Ziel, eine dem Standort und auch den Eigenschaften der Basisabdichtung angemessene Oberflächenabdeckung zu planen und zu errichten (Abbildung 7, Beispiel mineralische Oberflächenabdichtung, 60 cm, 8 % Na-Bentonit, ein Ergebnis der Variantenstudie). In diesem Fall kann das Ende der Nachsorge unmittelbar nach Fertigstellung der Sicherungsmaßnahmen erfolgen, weil mit der Verifizierung unter Verwendung der Ergebnisse der Qualitätssicherung aus der Bauausführung die Nachweisführung beendet ist.

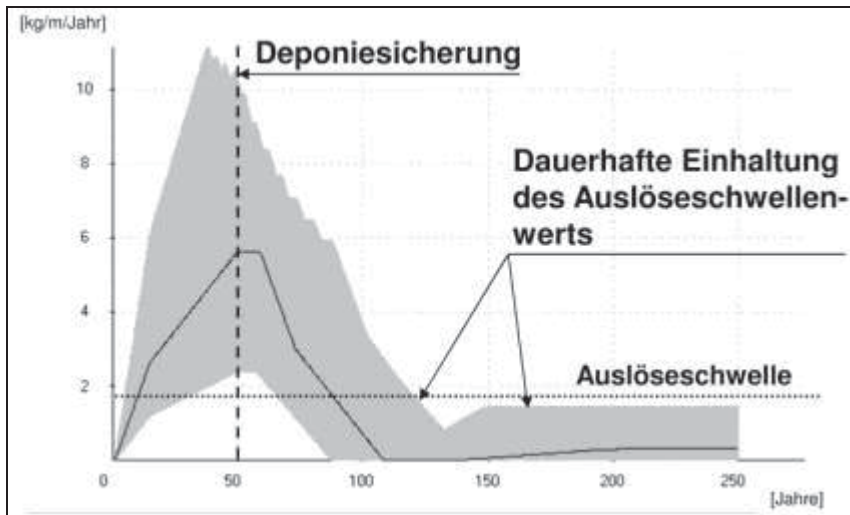


Abbildung 6 Emissionsgrenzwertanalyse Fallbeispiel 1 / Wasserhaushaltsschicht, Leitparameter Mangan. Analysenzeitraum 250 Jahre. Nachweis der dauerhaften Unterschreitung der Auslöseschwelle Mangan:  $1,8 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{a})$ .

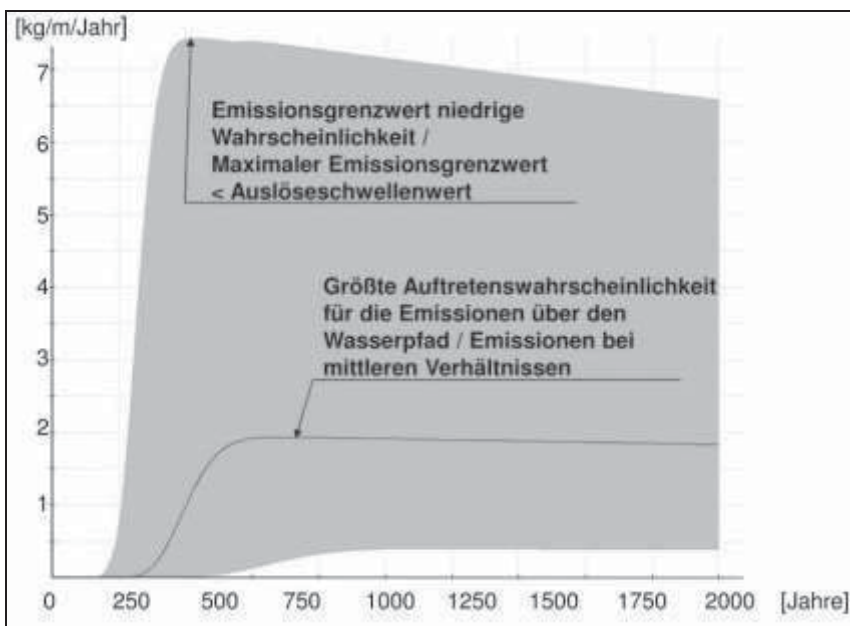


Abbildung 7 Emissionsgrenzwertanalyse Fallbeispiel 2 / mineralischen Oberflächenabdichtung, Leitparameter Sulfat. Analysenzeitraum 2.000 Jahre. Nachweis der dauerhaften Unterschreitung der Auslöseschwelle Sulfat:  $7,5 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{a})$ .

### 3 Diskussion und Zusammenfassung

Die Emissionsgrenzwertanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von verschiedenen Sicherungsmaßnahmen trägt im Rahmen der Nachweisführung der Emissionssicherheit wesentlich als Entscheidungshilfe bei. Für Beispiel 1 bedeutet dies einen Mindestbeobachtungszeitraum von 100 Jahren nach Deponiesicherung, da aufgrund der nicht vorhandenen Basisabdichtung bereits Stoffe in die geologische Barriere transportiert



wurden, die in einer Übergangszeit bis zum Erreichen eines stationären Zustandes in den Grundwasserleiter emittiert werden. Für das Fallbeispiel 2 sind es ca. 300 Jahre. Hier erkennt man sehr deutlich den Einfluss der Mächtigkeit der geologischen Barriere. Ist diese vergleichsweise mächtig, so wird u.a. aufgrund der Sorptionseigenschaften ein Austrag in den Grundwasserleiter zeitlich verzögert. Aus diesem Zusammenhang wird deutlich, dass man eine Festlegung zur Beendigung der Nachsorge nach mind. 30 Jahren Nachsorgedauer auf Grundlage von Langzeitüberwachungen (Prinzip Nachsorge) zum Nachweis der Einhaltung der Auslöseschwellen für diese Standorte nicht durchführen kann. Man kann das mögliche Maximum an Emissionen in den Grundwasserleiter, basierend auf punktuellen Messungen, nicht erkennen und darauf auch nicht angemessen reagieren. Das Vorgehen unter Anwendung des Prinzips der Vorsorge hat den Vorteil, dass man die maximal möglichen Belastungen des Grundwassers und Sickerwassers durch Inhaltstoffe aus dem Deponiekörper als Funktion der Zeit kennt. Man weiß also schon in der Planungsphase, ob die an den Standort und die Rahmenbedingungen angepassten Sicherungsmaßnahmen auch den langfristig geforderten Standard einhalten. Zudem kann der erforderliche Aufwand an Kosten bestimmt und optimiert werden. Eingeschlossen in diese Betrachtungen ist auch die Zeit der Nachsorge, weil abhängig von der Art der Sicherung auch in dieser Phase erhebliche Kosten entstehen können. Im Rahmen der Analysen werden zudem Ereignisse mit berücksichtigt, die außerhalb der Betriebsphase und nach Beendigung aller Wartungsmaßnahmen liegen. Eine Aussage zum Ende der Nachsorge, als Teil der Bauphase, wird so bereits in der Genehmigung verankert und die Bedingungen hierzu fixiert. Unter Anwendung des Prinzips der Vorsorge (wertorientiert) sind für beide Fallbeispiele die Voraussetzungen für die Entlassung aus der Nachsorge erfüllt, weil durch Anwendung der Emissionsgrenzwertanalyse mit der Bemessung die Verbindung der ökologischen Forderungen (Auslöseschwellenwerte) und der geplanten Deponiesicherungsmaßnahme hergestellt wurde. Nach der Errichtung erfolgt über eine erneute Grenzwertanalyse die Verifizierung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Qualitätssicherung der Bauausführung.

## 4 Literatur

- |                   |      |  |
|-------------------|------|--|
| Finsterwalder K.  | 1988 | Die Deponie eine Abfalllagerstätte für geologische Zeiträume. Workshop: Die Bemessung mineralischer Ummantelungssysteme in Theorie und praktischer Anwendung, Ruhruniversität Bochum, Nov. 1988.   |
| Finsterwalder, K. | 2001 | Nachweise der Emissionen und Frachten und Entwicklung der Kriterien zur Beendigung der Nachsorge für ausgewählte Standorte (Deponie A, B, C): Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und Bayer. Landesamt für Umweltschutz. |

**Anschrift der Verfasser(innen):**

Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder  
Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG  
Mailing Weg 5  
D 83233 Bernau a. Ch./ Hittenkirchen  
Telefon +49 80 51 96 59 10 10  
Email [k.finsterwalder@fitec.com](mailto:k.finsterwalder@fitec.com)  
Website: [www.fitec.com](http://www.fitec.com)

Dr. Daniela Sager  
Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG  
Mailing Weg 5  
D-3233 Bernau a. Ch./ Hittenkirchen  
Telefon +49 80 51 96 59 10 22  
Email [d.sager@fitec.com](mailto:d.sager@fitec.com)

## 5 Anhang: Begriffsbestimmungen

- Bemessung: „Beurteilung basierend auf Werten, welche Sicherungsmaßnahme ökologisch und ökonomisch für einen bestimmten Standort geeignet ist. Auf der Grundlage dieser Werte wird iterativ berechnet, wie eine Maßnahme ausgeführt werden muss, sodass sowohl der Standard nach Deponieverordnung, als auch die Unterschreitung der Auslöseschwellenwerte erfüllt werden“;
- Eignungsnachweis: „Technische Beurteilung der Eignung und Qualität einer Sicherungsmaßnahme (LAGA Ad-hoc AG „Deponietechnik“), beinhaltet per se keine Verknüpfung der ökologischen Forderung (Auslöseschwellenwert) mit der Wirksamkeit der Maßnahme für einen Standort, sondern nur die Stoffeigenschaften.“
- Emissionsgrenzwertanalyse: „Berechnungsverfahren auf naturwissenschaftlicher Basis, welches unter Berücksichtigung der Streuung der Eingangsdaten Analysen über beliebige Zeiträume ermöglicht. Der untersuchte Zeitraum muss mindestens so groß gewählt werden, dass die Maxima der Grundwasserbelastung erkannt werden. Das Ergebnis ist ein Wirkungsnachweis in der Planungsphase.“
- Wirkungsnachweis: „Beinhaltet die Verknüpfung der Wirksamkeit einer bestimmten Maßnahme mit den jeweiligen Bedingungen vor Ort und ihrer zeitabhängigen Veränderung sowie der ökologischen Zielsetzung der Genehmigungsbehörde für einen bestimmten Standort. Damit ist eine Nachweisführung zur Emissionssicherheit möglich.“



# Deponieentgasung im Rahmen von PTJ - Projekten zur vorzeitigen CO<sub>2</sub> – Klimabilanzverbesserung an den konkreten Beispielen: LK Grafschaft Bentheim (Deponie Wilsum), LK Fulda (Deponie Steinau – Petersberg), AWV Vechta (Deponie Tonnenmoor).

Wolfgang H. Stachowitz, Co Autor Falko Ender

DAS - IB GmbH, Kiel

## Inhaltsangabe

Im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative wurde die DAS - IB GmbH an drei Standorten mit der Durchführung der „Potentialanalyse“ bzw. mit der praktischen Umsetzung von Ingenieurdienstleistungen u.a. für die Bestandsaufnahme mit Auswertungen, Tests (Potentialanalyse) und die Ausführung von investiven Maßnahmen beauftragt. Ziel der ptj - Klimaschutzinitiative ist die Reduzierung klimarelevanter CO<sub>2</sub> - Emissionen durch rasche und nachhaltige Überführung stillgelegter Siedlungsabfalldeponien in einen stabilen Zustand.

## Stichworte

nationale Klimaschutzinitiative, Potenzialanalyse, investive Maßnahmen, CO<sub>2</sub> - Emissionen, Siedlungsabfalldeponie, ptj - Projekt, mobile Kleinstfackel, Deponiegasabsaugung, Gasbrunnen, Entgasungssystem, Methanemissionsreduzierung, mobile Gasverdichterstation, Analysen, Deponiegasfackel

## 1 Was sind PTJ – Projekte ?

Auf Initiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) wurden seit 2008 mehr als 5.000 Klimaschutzprojekte umgesetzt und ca. 2.500 Kommunen unterstützt. /1/

Der Projektträger Jülich (PTJ) berät das Ministerium sowie die Kommunen zum Förderprogramm von der Antragstellung, über die Zahlungsmodalitäten bis zum abschließenden Verwendungsnachweis der Fördermittel. /1/

Die nachfolgend vorgestellten PTJ-Projekte zur nachhaltigen Reduzierung von **Treibhausgas(THG)**-Emissionen durch sog. in-situ Stabilisierung bestehen im Wesentlichen aus zwei aufeinander aufbauenden Phasen, der „Potenzialanalyse“ und der „investiven Maßnahme“.

Ziel der Potenzialanalyse ist es die spezifische Ausgangssituation sowie die technisch und wirtschaftlich umsetzbaren Treibhausgasreduzierungspotenziale zu analysieren, geeignete Verfahren zu erkunden und das Emissions- und Optimierungspotenzial zu er-





mitteln und zu bewerten. Im Rahmen der investiven Maßnahme erfolgt die techn. Umsetzung des geeigneten Verfahrens am Standort.

Hinweise zu den Voraussetzungen (u. a. mind. 50 % **CO<sub>2</sub>-Äquivalent** (CO<sub>2</sub> eq) - Minderungspotential gegenüber existierenden Verfahren), der Antragsstellung und den Fördermöglichkeiten (u.a. max. 250.000 € für investive Maßnahmen) sind im „Merkblatt Erstellung von Klimaschutzteilkonzepten“ bzw. im „Merkblatt investive Klimaschutzmaßnahmen“ unter <https://www.ptj.de/klimaschutzinitiative-kommunen/klimaschutzkonzepte> zu erhalten.

## 2 Deponieentgasung im Rahmen von PTJ - Projekten

In Zusammenarbeit mit den kommunalen Betreibern erfolgte im April 2014 in enger Abstimmung mit der DAS - IB GmbH die Antragstellung zur Potenzialanalyse für die Standorte Deponie Steinau – Petersberg (Landkreis Fulda) und Deponie Tonnenmoor (Abfallwirtschaft Vechta - AWV). Die Umsetzung der Potenzialanalyse erfolgt ab der Jahreswende 2014 / 2015.

Am Standort auf der Deponie Wilsum (LK Grafschaft Bentheim) wurde ab April 2014 die praktische Durchführung der Potenzialanalyse durchgeführt. Der Antragstellung zur Potenzialanalyse erfolgt an diesem Standort direkt durch den Abfallwirtschaftsbetrieb des LK Grafschaft Bentheim ohne die Beteiligung der DAS - IB GmbH.

Alle drei Standorte stehen mit der Potenzialanalyse somit am Anfang der PTJ-Projekte. Wobei auf der Deponie Wilsum von uns die IST – Aufnahme, die Ausschreibung und die baubegleitenden Maßnahmen zur Realisierung von zwei neuen Gasbrunnen am Standort ausgeführt worden sind.

### 2.1 Antragstellung zur Potenzialanalyse auf der Deponie Petersberg - Steinau und Vechta - Tonnenmoor

Die Altdeponie Petersberg - Steinau wurde bis 1982 betrieben. Ab 1989 wurde das Gas über Gasbrunnen und eine Gasverdichterstation abgesaugt. Aufgrund geringer Fördermengen wurde 1999 die energetische Verwertung außer Betrieb genommen und im Anschluss daran bis 2007 eine Schwachgasbehandlungsanlage (VocsiBox®) betrieben. Im Zeitraum von 1999 bis 2003 wurde eine mineralische Oberflächenabdichtung eingebracht.





Abbildung 1, Luftbild der Deponie Petersberg - Steinau aus dem Jahre 2013 [Google. Inc.]

Bereits Anfang der 70er Jahre betrieb die Stadt Vechta am heutigen Standort Tonnenmoor eine Vorläuferdeponie, in die neben den Abfällen aus dem Stadtgebiet auch Abfälle aus dem Nordkreis Vechta abgekippt wurden. Am 1.1.1975 übernahm der Landkreis Vechta die Zuständigkeit. Ab dem Zeitpunkt wurden auch die Abfälle aus Lohne und Dinklage dort abgelagert. Seit 1979 wurden die gesamten Abfälle des Landkreises Vechta an diesem Standort entsorgt, nachdem die Deponie Neuenwalde bei Damme geschlossen worden war. Mit der Fertigstellung eines neuen Deponiebereiches (Tonnenmoor II) wurde der Betrieb auf der Altdeponie (Tonnenmoor I) 1988 eingestellt.

Das Deponiegas der Altdeponie wurde bis Anfang 2013 in einer angrenzenden Ziegelfabrik als Sekundär-Brennstoff energetisch verwertet. Die Deponie Tonnenmoor I ist eine ehemalige Hausmülldeponie mit einer TASI-konformen Oberflächenabdichtung.



Abbildung 2, Luftbild der Deponie Tonnenmoor I aus dem Jahre 2013 [Google Inc.]

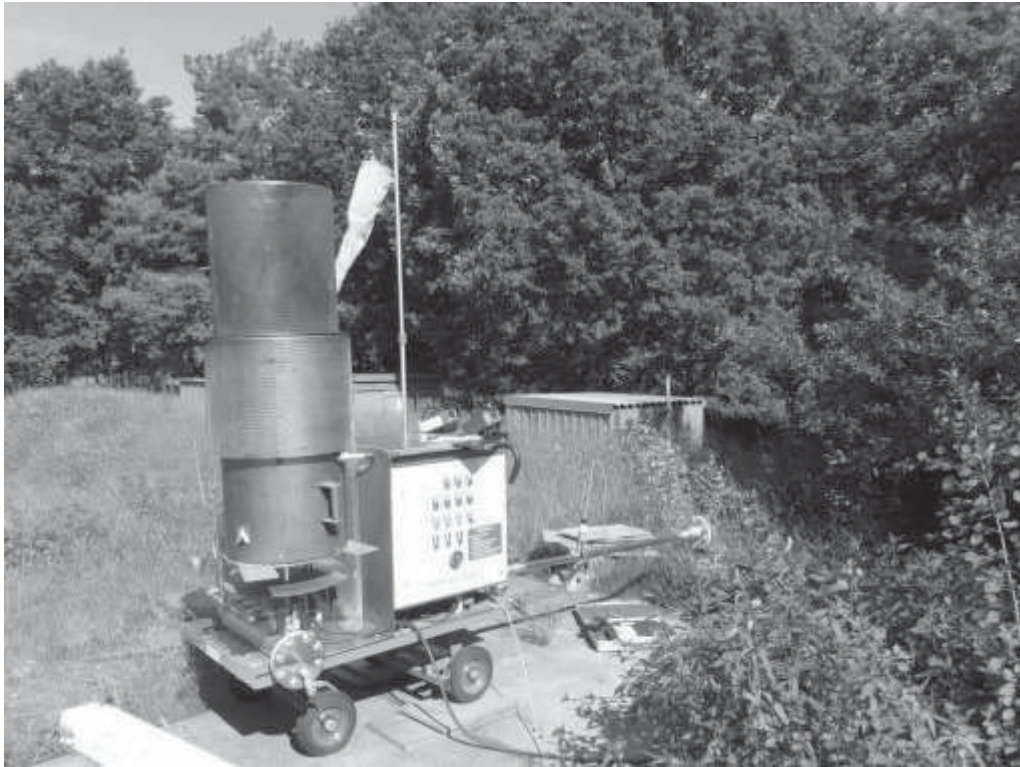
Aufgrund mangelnder Informationen / Dokumentation aus „Altzeiten“ über den aktuellen Zustand der Deponie sind weitere Untersuchungen der bestehenden Gasfassungssysteme geplant. Nach Erhalt der beiden positiven Zuwendungsbescheide im August 2014 werden ab November 2014 neben der Zusammenstellung von Bestandsunterlagen auch ab Ende Januar 2015 qualifizierte Absaugversuche an einzelnen Gasbrunnen bzw. dem gesamten Gasfassungssystem von uns vorgenommen.

Im ersten Schritt, der sog. Bestandsprüfung, werden die bestehenden Unterlagen zu den Deponieabschnitten gesammelt und ausgewertet. Dabei werden insb. die folgenden Punkte herausgearbeitet werden:

- Zusammenstellen der Bestandsunterlagen sowie der Anlagen- und Standortdokumentation mit Informationen zur Deponiefläche, Form, Volumen, Ablagemengen und Zeiträume sowie der Abfallbeschaffenheit.
- Verifizierung und Evaluation der bereits durchgeführten Absaugversuche.
- Erfassung des (technischen) Zustands der vorhandenen Anlagentechnik mit dem Gasfassungssystem und Entwässerungen (Kondensattrennung)
- Voruntersuchung des bestehenden Gasfassungssystems u. a. mit Kamerabefahrung bzw. Lichtlotmessung zur Überprüfung der Beschaffenheit (Filterzustand, Wassereinstau, mechanische Beeinträchtigung) von Gasbrunnen- und Gasrohrleitungen.
- Abgleich Gasprognosemodelle mit aktuellem IST – Zustand am Standort



Nach Abschluß der Bestandsprüfung erfolgen zunächst an ausgewählten Gasbrunnen und im Anschluß daran über das gesamte Gasfassungssystem qualifizierte und repräsentative Absaugversuche mittels mobiler Fackel- / Absauganlage. Die dabei zum Einsatz kommende mobile Kleinstfackel der DAS - IB GmbH ist mit einem Gasverdichter und einer Brennkammer für bis zu 3 Brenner (ca. 10 kW<sub>therm</sub> bis 100 kW<sub>therm</sub>.) ausgestattet und kann über eine flexible Rohrleitung und angepaßte Meßstrecken u.a. für den Deponie - Rohgasdurchfluß direkt an die Gasbrunnen bzw. den Gassammelbalken angeschlossen werden.



*Abbildung 3, Einsatz der mobilen Kleinstfackel DMF V mit mobiler Gasanalyse und Durchflussmessung auf dem Standort in Vechta - Tonnemoor [DAS - IB GmbH] als Ersatz für die ursprüngliche Gasentsorgung im Tonwerk*

Anhand der Bestandsprüfung und den v.g. repräsentativen und qualifizierten Absaugversuchen wird die Potenzialanalyse durchgeführt. Darin wird über die Erstellung einer Gasprognose bzw. Abschätzung des Gasbildungspotenzials nach first order Decay Methode (IPCC Guidelines 1996) od. glw. die Darstellung des Meßergebnisses aus den Voruntersuchungen und des Istzustandes, der Analyse und Hinweise zur Optimierung des Gasfassungssystems sowie des Einsatz von Schwachgassystemen geprüft, inwieweit eine mögliche anaerobe und aerobe in situ Stabilisierung erfolgen kann.





## 2.2 Umsetzung der Potenzialanalyse auf der Deponie Wilsum

Die DAS - IB GmbH wurde im März 2014 vom Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreis Grafschaft Bentheim mit der Erstellung einer Konzeptstudie im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative für die Deponie Wilsum beauftragt, um u. a. die Bestandprüfung durchzuführen. Schon im April 2014 erfolgte der erste Absaugversuch am bestehenden Gasfassungssystem mit 24 horizontalen Gasbrunnen auf zwei Ebenen.

Über einen mobilen Gasverdichter wurde dazu jeder Gasbrunnen einzeln abgesaugt. Während des Versuches wurden der Durchfluss, die Temperatur, der Saugdruck und die Gaszusammensetzung ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{CO}$ ) bestimmt.

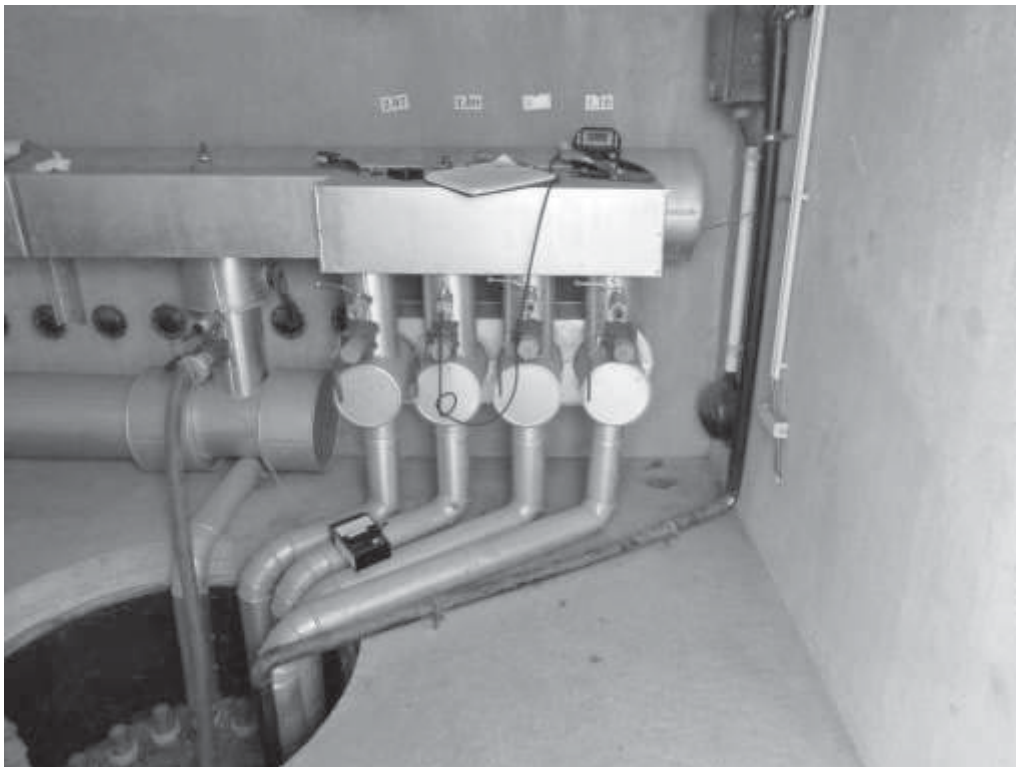


Abbildung 4, Meßaufbau innerhalb der Gassammelstation [DAS - IB GmbH]

Im Ergebnis wurden 3 Gasbrunnen von den insgesamt 24 Gasbrunnen in den Teilbereichen als geeignet („biologisch aktiv“) eingestuft. Bei 12 Gasbrunnen konnte kein Durchfluss gemessen werden. Bei den verbleibenden Gasbrunnen ist aufgrund der Gaszusammensetzung nur mit einer geringen bzw. keiner stabilen Deponiegasproduktion zu rechnen. Aufgrund ansteigender  $\text{O}_2$  - Konzentration in zwei Gasbrunnen ist eine Leckage im Rohrleitungssystem in diesem Teilbereich zu vermuten. Die Sichtung und Auswertung der Bestandsunterlagen verstärkten die Aussage des erstens Absaugversuchs, sodass davon auszugehen ist, dass durch eine Erneuerung und Optimierung / Ertüchtigung des Gasfassungssystems das restliche Deponiegas erfasst werden kann.



In das im Vorfeld von Abfallwirtschaftsbetrieb des LK Grafschaft Bentheim erstellte Leistungsverzeichnis wurde die Abteufung von zwei speziell (tiefen-)verfilterten vertikalen Gasbrunnen von uns geplant, ausgeschrieben und baubegleitend von der Firma bds ausgeführt.

Nach der Erstellung eines extra gewünschten Zwischenberichtes mit Empfehlungen für die weiteren Maßnahmen über ein Wochenende zur Vorbereitung der monatlichen Sitzungen des zuständigen Ausschusses des Abfallwirtschaftsbetriebes des LK Grafschaft Bentheim sowie weiterer gewünschten Zusatzarbeiten / Empfehlungen wurde der Vertrag mit der DAS - IB GmbH gekündigt. (Anmerkung: Eventl. waren die Ergebnisse unserer Maßnahmenempfehlungen anfangs unangenehm). Nach aktuellem Kenntnisstand wurden mittlerweile jedoch unsere Hinweise und Empfehlungen durch den Abfallwirtschaftsbetrieb des LK Grafschaft Bentheim direkt (?) umgesetzt.

### **3 Zusammenfassung**

Im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative wird an den stillgelegten Siedlungsabfalldeponien Wilsum, Petersberg - Steinau und Tonnenmoor I eine Potentialstudie zum Einsatz geeigneter Technologien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Rahmen eines ptj-Projekts durchgeführt. Ziel ist nachhaltige Reduzierung der Emissionen von mind. 50 % zur klassischen Deponiegasfassung und -behandlung über die in-situ Stabilisierung.

Die DAS - IB GmbH unterstützte die Betreiber bei Antragsstellung und führt ab Anfang Februar 2015 qualifizierte Absaugversuche zur Abschätzung des Restgaspotenzials durch. Auf Grundlage der Messungen sowie den Erkenntnissen der Bestandsanalyse werden anlagen- und betreiberspezifische Verfahren herausgearbeitet und dann im Rahmen der investiven Maßnahme mit erneuter Unterstützung der PTJ gefördert und umgesetzt.



## 4 Literatur

- 1 Ch. Freund PTJ - Berlin 2014 Deponietechnik 2014, Verlag Abfall aktuell, Hamburger Berichte Band 40, ISBN 978-3-9815546-1-8, 2014.

### Anschrift der Verfasser:

**Wolfgang Horst Stachowitz**

\*\*\*\*\*

**DAS - IB GmbH**

**kaufm. Sitz (Rechnungsanschrift) :**

**Flintbeker Str. 55, D 24113 Kiel**

**techn. Sitz (Postanschrift) :**

**Preetzer Str. 207, D 24147 Kiel**

HRB 5879 - Amtsgericht Kiel -

GF: Wolfgang H. Stachowitz

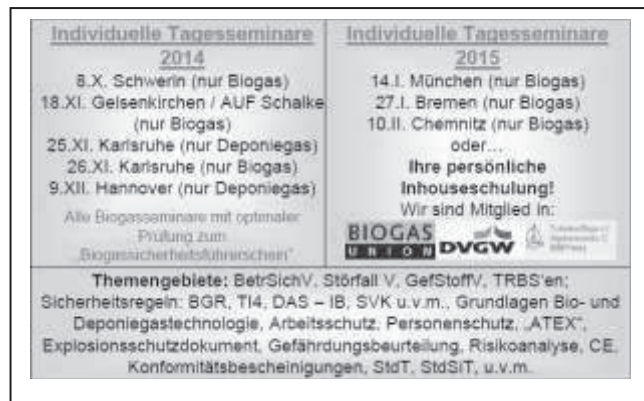
\*\*\*\*\*

**www.das-ib.de**

phone: # 49 / 431 / 68 38 14 u. / 534433 - 6, - 8

fax # 49 / 431 / 200 41 37 u. / 534433 - 7

mobile: # 49 (0) / 170 / 4037939



**DAS - IB GmbH**

**DeponieAnlagenbauStachowitz**

**Biogas - & LFG - Technology**

Biogas-, Klärgas- und Deponiegastechnologie:

- Beratung, Planung, Projektierung
- Schulung von Betreiberpersonal
- Sachverständigentätigkeit (u.a. § 29a nach BImSchG und Befähigte Person iSd BetrSichV und TRBS 1203 )





# **inspiro - Environmental Excessive Extraction**

## **Klimaschutz mittels kontrollierter und effizienter Deponieentgasung**

**Joachim Lehner**

contec Ingenieurgesellschaft für Energie und Umwelttechnik mbH, Herrenberg

## **1 Konventionelle Deponieentgasung**

### **1.1 Ausgangssituation**

Bis Mitte 2005 war in Deutschland die Ablagerung unvorbehandelter Siedlungsabfälle mit organischen Inhaltstoffen zugelassen. Durch mikrobielle Umsetzung wird nach wie vor Deponiegas in erheblichem Umfang gebildet.

Bei der konventionellen Entgasung der Deponien liegt der Fokus auf der Absaugung von möglichst hohen Methangehalten. Den Deponien fällt es mit zunehmendem Alter jedoch immer schwerer, diese hohen Methan-Konzentrationen aufrecht zu halten. Aus diesem Grund werden die Absaugmengen zurückgenommen. Mit der Folgewirkung: der Erfassungsgrad des Entgasungssystems nimmt ab und die Deponiegasemissionen nehmen zu.

### **1.2 Klimaschädlichkeit und Risiken**

Methan als Hauptbestandteil des Deponiegasgemisches wird eine 25mal klimaschädlichere Wirkung im Vergleich zu Kohlendioxid zugesprochen. Nicht gefasstes Deponiegas verstärkt den Treibhauseffekt und schädigt somit das Klima.

Das Gefährdungspotenzial durch unkontrollierte Gasemissionen sowie Gasmigrationen ins Deponieumfeld, in Gebäude und Schächte nimmt mit zunehmenden Deponiealter eher zu als ab. Die Explosionsgefahr und die Gefährdung durch hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen steigen an.



## 2 Offene Fragen

Unter umwelt- und klimaschutzrelevanten Gesichtspunkten stellen sich hinsichtlich der Bewertung einer effektiven Deponieentgasung nach Beendigung der Ablagerungsphase bzw. in der Nachsorgephase eine Reihe offener Fragen.

### 1. Was bewirkt eine Reduzierung der Absaugmenge?

Eine Rücknahme der Absaugmenge ist immer auch gekoppelt mit

- einem Rückgang des Einzugsbereiches der Gasfassungselemente und
- einer Schwächung der Strömungs- und Unterdruckverhältnisse

### 2. Ist eine Rücknahme der Absaugmenge überhaupt sinnvoll?

Mit Blick auf eine Gasverwertung mit unflexiblen Grenzwerten für Methan: **Antwort: Ja**

Aus Klimaschutzgründen: **Antwort: definitiv Nein**

### 3. Kann man Deponien „übersaugen“?

**Antwort: NEIN**

Deponien können gut oder schlecht, wirksam oder weniger wirksam abgesaugt werden.

### 4. „Bricht“ der Gashaushalt bei stärkerer Absaugung zusammen?

**Antwort: NEIN**

Eine stärkere Absaugung verändert die Milieubedingungen im Deponiekörper.

Es kommt zu keinem Abbruch der Gasproduktion sondern zu einer Verschiebung des CH<sub>4</sub>-/CO<sub>2</sub>-Gleichgewichts.

### 5. Ist eine hohe CH<sub>4</sub>-Konzentration gleichzusetzen mit „viel Gas“?

**Antwort: definitiv NEIN**

Die Gasproduktion und der Gashaushalt sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Die CH<sub>4</sub>-Konzentration bzw. genauer das CH<sub>4</sub>-/CO<sub>2</sub>-Verhältnis ist Ausdruck der Abbau- und Absaugbedingungen in den Einzugsbereichen der jeweiligen Gaskollektoren.

### 7. Wie viele Gasfassungselemente sind für eine effektive Absaugung notwendig?

**Antwort: Bei einer effektiven Absaugung - weniger als gemeinhin angenommen**



Bei hohen Absaugmengen und kontrollierter Absaugung kommt es verstärkt zu Querbeeinflussungen unter den Gasfassungselementen. Die Anzahl der direkt abgesaugten Gaskollektoren kann daher reduziert werden. Die Effektivität der indirekten Absaugung von Gaskollektoren lässt sich über Druckmessungen nachweisen und kontrollieren.

### **8. Kommt es - bei Deponien mit Oberflächenabdichtungssystemen - infolge der Absaugung zu einem „Austrocknen“ der Deponie?**

**Antwort: NEIN**

Aufgrund der biologischen Abbauprozesse und Gasabsaugung werden organische Bestandteile in die Gasphase überführt. Damit „löst“ sich die Wasserhaltende Trägermatrix auf. Es kommt zu einer Wasserfreisetzung aufgrund der Abbauprozesse.

### **9. Wie bzw. über welche Wege gelangt der für eine in-situ-Stabilisierung benötigte Luftsaauerstoff bei einer Saugbelüftung in den Deponiekörper?**

**Antwort: Über die vorgegebenen Wege mit dem geringsten Widerstand**

Dies sind u. a. das Entwässerungssystem, Kabelzugrohre, Schächte, gaswegige mineralische Abfälle und Schichten sowie Undichtigkeiten an Bauwerken, Abdichtungen und Durchdringungselementen. Sehr leicht nachzuweisen mit einer FID-Messung als Schwachstellenmessung bei abgeschalteter Entgasungsanlage.

## **3 Deponieentgasung aus der Perspektive des Klimaschutzes - „Entgasung neu denken“**

### **3.1 Leitlinien**

1. Die Betriebsführung der Gasverwertung- und Gasbehandlungsanlagen ist an den Gashaushalt der Deponie anzupassen und nicht umgekehrt.
2. Erste Priorität hat eine effektive und kontrollierte Entgasung der Deponie.
3. Das Ziel einer Gasverwertung ist wünschenswert aber nachrangig.
4. Die CH<sub>4</sub>-Konzentration ist kein wesentlich begrenzender Faktor für die Absaugung der Deponie.
5. Eine Deponieentgasung mit konstant hoher Absaugmenge gewährleistet einen hohen Gaserfassungsgrad und eine optimale Gaserfassung.



### 3.2 Erfolgsfaktoren - Leistungskriterien - Kennziffern

1. Qualifizierter Absaugversuch mit konstant hoher Absaugmenge und Gasabsaugung in „bislang unbekanntem“ Konzentrationsbereichen ( $\text{CH}_4 < 20 \text{ Vol.-%}$ )
2. Das  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ -Verhältnis ist die Kennziffer zur Beurteilung der Effektivität von Maßnahmen zur Aerobisierung/in-situ-Stabilisierung.
3. Die Rest-Sauerstoffkonzentration im abgesaugten Deponiegas ist möglichst gering zu halten.
4. Unterdruck sollte im gesamten Deponiekörper vorherrschen.
5. Präzision bei der Einstellung des Entgasungssystems ist einer der Erfolgsfaktoren

## 4 Alternativen zur bisherigen Gasverwertung/-behandlung

Die bislang bei der konventionellen Deponieentgasung eingesetzten Verwertungs- und Behandlungsanlagen (Gasmotoren, Hochtemperaturfackeln, etc.) sind aufgrund der sich verändernden deponiegasspezifischen Randbedingungen mit sinkenden Methangehalten in der Regel überdimensioniert und nicht mehr geeignet Deponien ordnungsgemäß zu entgasen.

Dies trägt zur beschriebenen Ausgangssituation (siehe Kap. 1.1), der Klimaschädigung und Erhöhung des Gefährdungspotenzials auf Deponien (siehe Kap. 1.2) bei.

Auf vielen Deponien ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Verwertungsanlage nicht mehr gewährleistet.

Mittlerweile stehen neue alternative Verwertungs-/Behandlungstechniken für Deponiegas zur Verfügung, die eine kontrollierte und effiziente Entgasung von Deponien auch bei niedrigeren  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen ermöglichen.

### 4.1 Gasverwertung - Perspektiven

#### Beispiel: Stirlingmotor, Schwachgasmotoren

Strom- und Wärmegewinnung aus „Schwachgasen“ ab 20 - 30 Vol.-% Methan

Ziel: Eigenstromversorgung, energieautarker Betrieb der Anlage und Minimierung der Sekundäremissionen

Konzept: Auftrennung des Gasstromes in Gut-/Schwachgas



## 4.2 Gasbehandlung - Perspektiven

### thermisch

Verbrennung unter Einsatz innovativer Schwachgasbehandlungstechniken (Flammenlos, Wirbelschicht, etc.) mit der Option Wärmenutzung

### biologisch

„aktive“ Methanoxidationsfilter mit Luftbeimischung

## 5 inspiro



**effiziente Deponieentgasung  
=  
effizienter Klimaschutz**

### 5.1 DIE KENNZEICHEN



Abb. 1 Kennzeichen des inspiro Verfahrens



## 5.2 DAS VERFAHREN

- » inspiro ist das Verfahren zur nachhaltigen Entgasung von ehemaligen Siedlungsabfalldeponien und Altablagerungen durch kontrollierte, kontinuierliche und effiziente Absaugung.
- » Die Steuerung des Prozesses erfolgt durch die kontinuierliche Absaugung im Unterdruckbereich. Der erforderliche Sauerstoff wird ausschließlich durch das Ansaugen von Umgebungsluft bereitgestellt.
- » inspiro senkt damit substantziell die klimaschädlichen Methan-Emissionen.
- » Mikroorganismen werden zielgerichtet mit Luftsauerstoff versorgt. Folge: Aerobe verdrängen anaerobe Mikroorganismen, der organisch abbaubare Kohlenstoff wird hauptsächlich zu Kohlendioxid verstoffwechselt.
- » Die vorhandenen Einrichtungen zur Gaserfassung werden unter veränderten Betriebsbedingungen genutzt. Es müssen keine zusätzlichen Einrichtungen aufgebaut werden.



### 5.3 DER PROZESS

- Steigerung der Absaugmenge
- konstante, kontinuierliche Absaugung

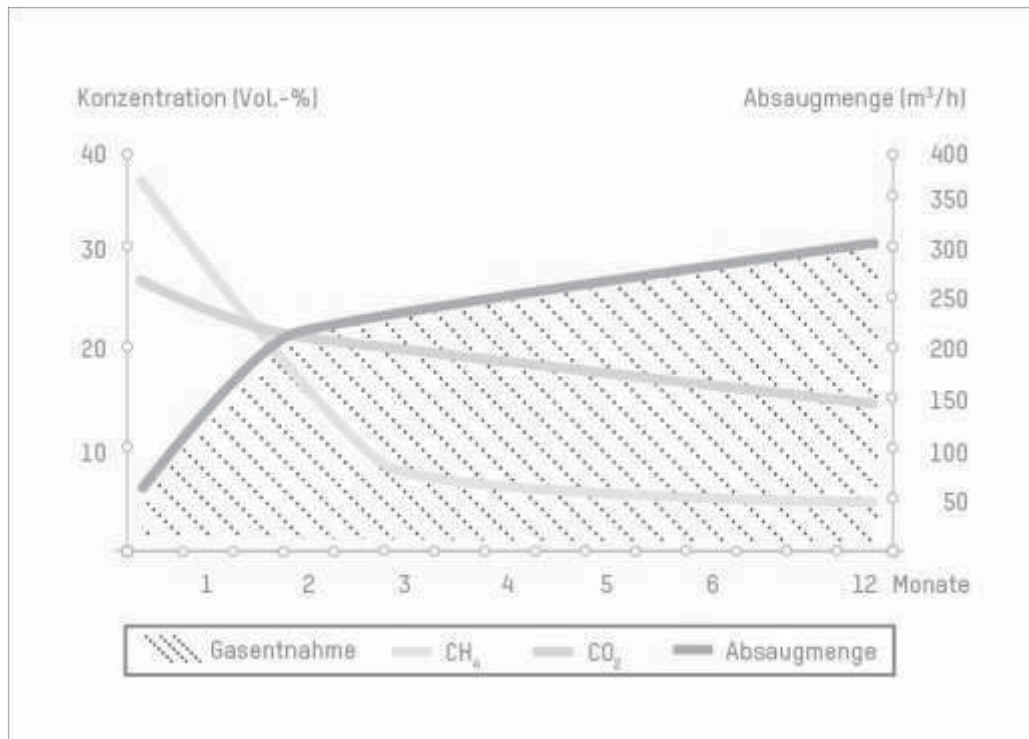


Abb. 2 inspiro Prozess

### 5.4 DER EFFEKT

- Steigerung des Gaserfassungsgrades
- Verschiebung des Methan-Kohlendioxid-Gleichgewichtes; die Methankonzentrationen werden dauerhaft in Bereiche < 10 bis < 15 Vol.-% abgesenkt. Das CH<sub>4</sub>-/CO<sub>2</sub>-Verhältnis kippt von > 1 auf < 1.
- inspiro unterstützt die Deponien hierbei durch kontinuierliche und kontrollierte Entgasung gleichsam „beim Einatmen“<sup>1</sup>
- Unterdruck im gesamten Deponiekörper
- aktiver Lufteintrag durch Gasabsaugung im Unterdruckbereich, gezielte und Bedarfsgesteuerte Sauerstoffversorgung

<sup>1</sup> lat.: inspiro einatmen, einhauchen



## 5.5 DAS ERGEBNIS

### KOHLENSTOFF-BILANZIERUNG - Kohlenstoff-Austrag über den Gaspfad<sup>2</sup>

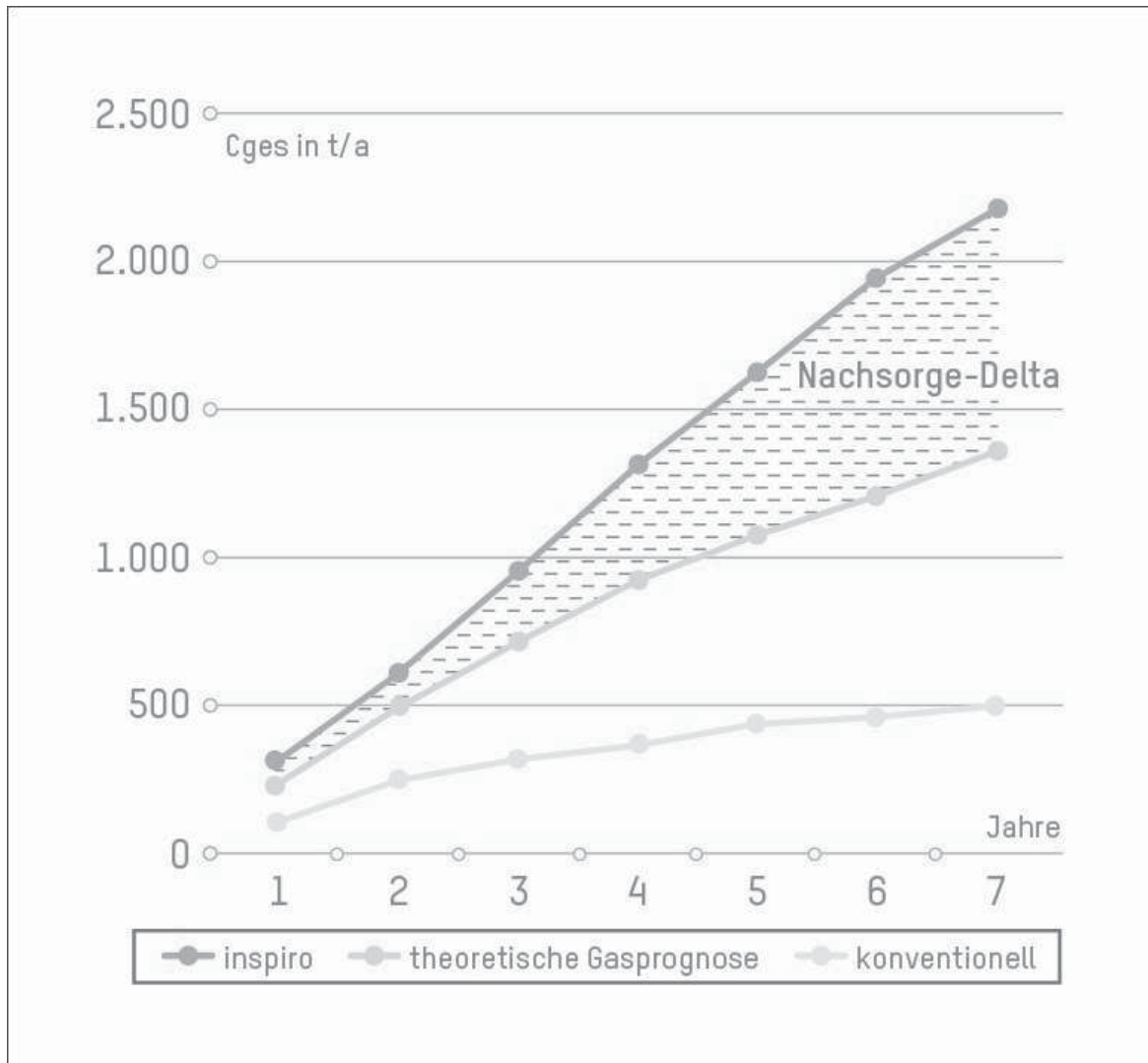


Abb. 3 Kohlenstoff-Bilanzierung - Kohlenstoff-Austrag über den Gaspfad<sup>2</sup>

Vergleich: konventionelle Entgasung - theoretische Gasprognose - Ist-Austrag (inspiro)

Gegenüber einer konventionellen Entgasung steigt der kontrollierte C-Austrag um das Vielfache. Der Austrag an organischen Kohlenstoff übersteigt selbst die Werte der theoretischen Gasprognose deutlich.

<sup>2</sup> Deponie Horb-Rexingen, LK Freudenstadt, seit Mitte 2006

- nach Fertigstellung der Oberflächenabdichtung - im inspiro Verfahren



## 5.6 DIE VORTEILE

**Es sind völlig neue Möglichkeiten einer positiven Einflussnahme auf den Gashaushalt erreichbar**

### **für die Umwelt**

- die Minimierung von unkontrollierten Gasaustritten
- eine Reduktion der Methanemissionen
- eine Prozesskontrollierte, schonende Aerobisierung
- eine positive Beeinflussung des gesamten Gas- und Wasserhaushaltes

### **für Deponiebetreiber**

- Nutzung des vorhandenen Gasfassungssystems dadurch Kosteneffizienz und geringe Betriebskosten
- kontrollierter und sicherer Anlagenbetrieb
- hohe Anlagenverfügbarkeit
- Absenkung des Gefährdungspotenzials
  - » Minimierung der Explosionsgefahren
  - » Absenkung der H<sub>2</sub>S-Konzentrationen
- Verkürzung der Deponienachsorge

## 5.7 Die Einsatzgebiete

- Siedlungsabfalldéponien in der Stilllegungs- und Nachsorgephase gemäß DepV nach Beendigung der Ablagerung organischer Abfälle 2005
- Ehemalige Mülldeponien und Altablagerungen
- Geeignet für Deponien mit qualifizierten Oberflächenabdichtungssystemen
- Ältere Deponieabschnitte und/oder gasgefährdete Bereiche bzw. auch einzelne Deponieabschnitte
- Bei Gut-/Schwachgassystemen bzw. gastechnisch trennbaren Deponieabschnitten bereits parallel zur Gasverwertung in der Betriebs-/Stilllegungsphase



## 6 NKI - Nationale Klimaschutzinitiative



Abb. 4 NKI-Logo

Die Initiative wurde 2008 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit ins Leben gerufen. Ziel ist es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80 bis 90 Prozent gegenüber 1990 zu senken.

Seit 2013 besteht die „Fördermöglichkeit zum Einsatz geeigneter Technologien zur Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“. Dadurch werden deponiegastechnische Maßnahmen zur in-situ-Stabilisierung, welche zu relevanten Treibhausgas-Emissionsminderungen führen, finanziell bezuschusst.

### Gefördert werden

- bis zu 50 % der Investitionskosten
- bei einer Förderobergrenze von 250.000 €

### Voraussetzungen

- CO<sub>2</sub>(eq)-Minderungspotenzial > 50 % gegenüber dem Referenzszenario
- Nachweis mittels Potenzialanalyse (ebenfalls förderfähig)



## Förderanträge 2013/2014 - Investive Maßnahmen - inspiro Verfahren

*Eingereichte und bewilligte Anträge - investive Maßnahmen 2013*

<b>Investive Maßnahme 2013</b>	<b>bewilligte Bundesmittel - Förderquote</b>	
Deponie Ramsklinge Landkreis Esslingen	197.421,-- €	50,00 %
Deponie Leonberg Landkreis Böblingen	249.950,-- €	44,90 %
Deponie Tuningen, Schwarzwald-Baar-Kreis, Deponie Talheim, Landkreis Tuttlingen	250.000,-- €	43,24 %
	<b>697.371,-- €</b>	<b>Gesamtsumme</b>

*Eingereichte und bewilligte Anträge - investive Maßnahmen 2014*

<b>Investive Maßnahme 2014</b>	<b>bewilligte Bundesmittel - Förderquote</b>	
Deponie Schorndorf Rems-Murr-Kreis	208.428,-- €	50,00 %
Deponie Bengelbruck Landkreis Freudenstadt	249.996,-- €	47,80 %
Deponie Hüfingen Schwarzwald-Baar-Kreis	250.000,-- €	47,29 %
Deponie Litzholz Alb-Donau-Kreis	250.000,-- €	46,88 %
	<b>958.428,-- €</b>	<b>Gesamtsumme</b>



## 7 Literatur

- |   |      |   |
|---|------|---|
| Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Berlin) | 2014 | Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative vom 15.09.2014<br>Merkblatt Erstellung von Klimaschutzteilkonzepten, Hinweise zur Antragstellung |
| Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Berlin) | 2014 | Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative vom 15.09.2014<br>Merkblatt Investive Klimaschutzmaßnahmen, Hinweise zur Antragstellung          |
| Fa. Lambda (Herten)   | 2014 | <a href="http://www.lambda.de/">http://www.lambda.de/</a>   |

### **Anschrift des Verfassers:**

Joachim Lehner  
Dipl. Ing. (FH), Dipl.-Wirt. Ing. (FH)

contec Ingenieurgesellschaft für Energie und Umwelttechnik mbH  
Raistingener Straße 4/1  
D-71083 Herrenberg  
Telefon +49 7032 23366  
Email: [info@contec-herrenberg.com](mailto:info@contec-herrenberg.com)  
Website: [www.contec-herrenberg.com](http://www.contec-herrenberg.com)







# Entwässerung von Altdeponien über Deponiegasleitungen

Florian Kölsch

Dr. Kölsch Geo- und Umwelttechnik GmbH, Braunschweig

## Inhaltsangabe

Auf der Deponie Watenbüttel (Braunschweig) wird derzeit ein Abdichtungssystem mit zusätzlichen Befeuchtungsmaßnahmen errichtet. Zur langfristigen Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit soll der Wasserstand im Deponiekörper überwacht und ggf. abgesenkt werden. Seit Juli 2014 wird in einem Abpumpversuch aus den Horizontalentgasungsleitungen untersucht, ob eine Absenkung des Wasserspiegels erreicht werden kann. Zunächst wurde die Höhenlage der Leitungen hydrostatisch eingemessen und der Wassereinstau über Druckmessungen bestimmt. Es zeigt sich, dass die Rohre bis zu 2,70 m überstaut sind. An einer dieser Einstautellen wurde eine 10 mm Kunststoffleitung verlegt, über die mittels Heberwirkung Sickerwasser abgezogen wird. Dabei genügt es, das Sickerwasser einmalig anzusaugen, der Ablauf erfolgt ohne Pumpaufwand. Aus der dünnen Leitung werden pro Tag rund 2 m<sup>3</sup> Sickerwasser abgezogen. Innerhalb von 3 Monaten sank der Wasserspiegel in der Leitung um 60 cm, in den 30 m entfernt liegenden, benachbarten Gasleitungen und -brunnen um 15-30 cm.

## Stichworte

Deponie, Wassereinstau, Oberflächenabdichtung, Befeuchtung, Höhenvermessung, Wasserstandsmessung, Sickerwasser

## 1 Veranlassung

Der Wassereinstau von Altkörpern ist eine regelmäßig auftretende Erscheinung. In unterschiedlichem Umfang sind nahezu alle alten Siedlungsabfalldeponien davon betroffen. Im Standardfall ist selbst ein mehrere Meter mächtiger Einstau unkritisch, im schlimmsten Fall drohen Sickerwasseraustritte am Hang, in seltenen Fällen sogar Standsicherheitsprobleme. Bei bestimmten Maßnahmen wie Sickerwasserrückführung, gezielte Belüftung oder der Tiefenentgasung kann sich ein Wassereinstau jedoch negativ auswirken. Eine dann erforderliche dauerhafte und effektive Absenkung des Wasserspiegels im Deponiekörper kann sehr aufwändig und kostenintensiv sein, häufig sind die Maßnahmen sogar erfolglos. Auf der Deponie Watenbüttel (Braunschweig) wird derzeit auf den Deponiefeldern 1 und 2 ein Abdichtungssystem mit zusätzlichen Befeuchtungsmaßnahmen errichtet. Zur langfristigen Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit soll der Wasserstand im Deponiekörper überwacht und – falls erforderlich und möglich – abgesenkt werden. Die Einstauverhältnisse im Feld 2 werden seit längerer Zeit beobachtet. Im Frühjahr 2014 wurde ein Dauerversuch begonnen, der zeigen sollte, ob eine Absenkung des Wasserspiegels über die in mehreren Ebenen vorhandenen horizontalen Entgasungsrohre erreicht werden kann. Die vorläufigen Ergebnisse dieses Versuches sind Gegenstand dieser Veröffentlichung.



## 2 Wasserverhältnisse

Die Wasserverhältnisse im Deponiefeld 2 werden jährlich durch Messung der Wasserstände in den vertikalen und horizontalen Gasbrunnen messtechnisch erfasst. Für die Messungen stehen 14 vertikale und 7 horizontale Gasbrunnen zur Verfügung, von denen 5 vertikale bzw. 6 horizontale Brunnen Wasser führen. Die vertikalen Brunnen haben eine Tiefe von 10-30 m, die horizontalen eine zugängliche Länge von bis zu 160 m.

Die Wasserstandsmessung wird wegen der großen Distanzen nicht mit einem Lichtlot, sondern mit einer Brunnendrucksonde durchgeführt. Bei großen Tiefen neigt das Lichtlot zu Fehlmessungen, da der elektrische Kontakt leicht z.B. durch Kondenswasser oder einzelne Wassertropfen an der Rohrwandung vorzeitig ausgelöst werden kann. Die Drucksonde ist gegen solche Einflüsse unempfindlich. Sie zeigt den Einstau erst bei vollem Kontakt zwischen Druckmembran und Wassersäule an. Zudem muss nicht exakt die Wasseroberfläche getroffen werden, da die Sonde nach dem Eintauchen den lokalen Überstau als absoluten Druck anzeigt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Wasserstandsmessungen im Herbst 2013.

Tabelle 1: Wasserstände Gasbrunnen Feld 2 – Dez 2013

Bezeichnung	Ortshöhe	Pegel 12/2013	Wasserstand [mNN]
DG 309	82,93	<b>9,38</b>	<b>73,55</b>
DG 316	94,97	<b>18,30</b>	<b>76,67</b>
DG 326	93,07	<b>17,20</b>	<b>75,87</b>
DG 327	82,84	<b>9,51</b>	<b>73,33</b>
DG 341	101,65	<b>23,88</b>	<b>77,77</b>
DG 342	92,86	<b>17,48</b>	<b>75,38</b>
DH 401			<b>75,21</b>
DH 402			<b>74,28</b>
DH 406			<b>74,39</b>
DH 410			<b>74,57</b>
DH 411			<b>73,84</b>
DH 416			<b>74,09</b>

Die Ergebnisse illustrieren, dass die gemessenen Wasserstände im Deponiekörper zwischen 73,5 und 77,8 mNN liegen. Die Deponiebasis liegt auf 67,5 mNN. Handelte es sich um einen Volleinstau, betrüge die Mächtigkeit der saturierten Zone bis zu 10 m. Ein Volleinstau wäre jedoch höchst ungewöhnlich, in aller Regel handelt es sich um „schwebende“ Wasserhorizonte, die sich oberhalb von Sperrschichten bilden.

Die Messungen auf der Deponie Watenbüttel werden im Rahmen des regulären Deponiemonitorings einmal jährlich durchgeführt. Die Auswertung erfolgt in Form von Isolinien gleichen Wasserstandes im Deponiekörper. Die Isolinienberechnung erfolgt über eine Dreiecksnetzinterpolation. Abbildung 1 zeigt die Wasserstandsgleichen für die gemessenen Sickerwasserstände in den Brunnen.

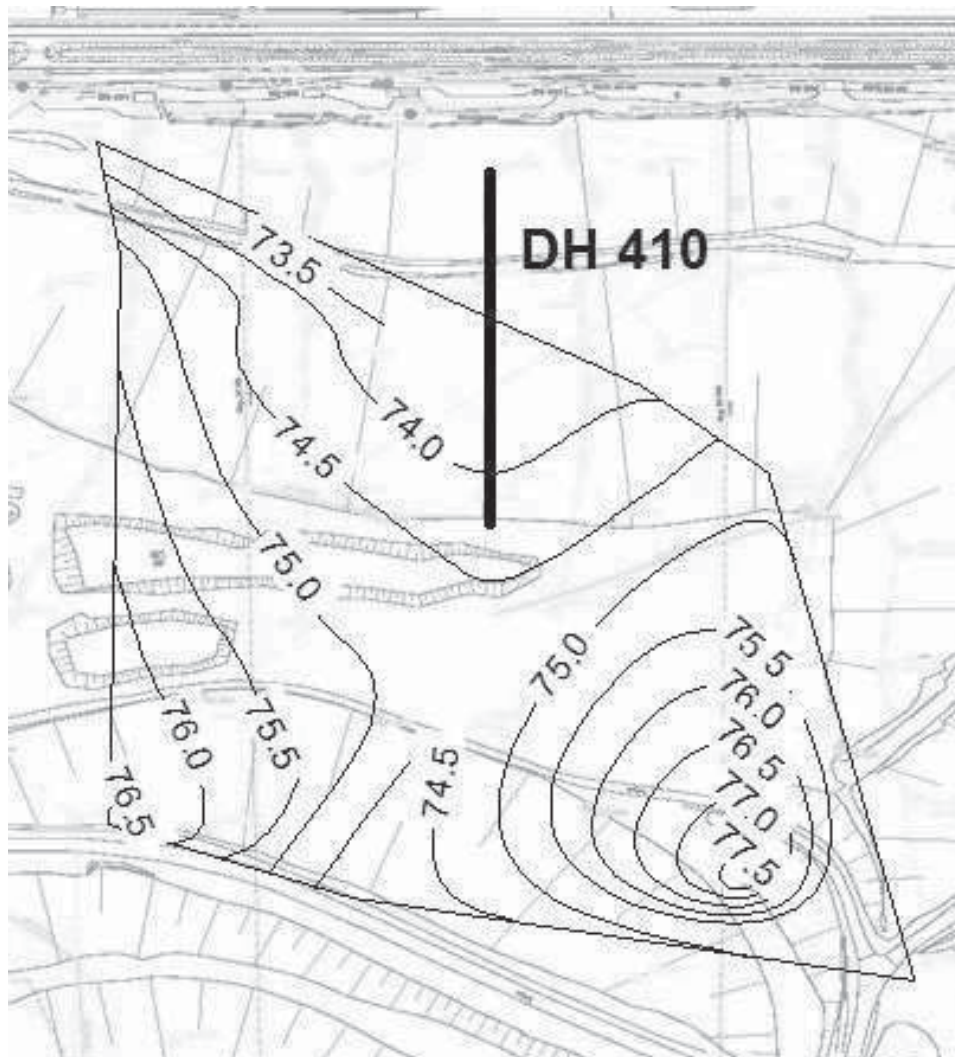


Abbildung 1: Isolinien Wasserstand Feld 2 – Dez 2013

Die Isolinien zeigen, dass der Einstau im Feld 2 in Richtung Norden abfällt, das korrespondiert mit der Entwässerungsrichtung (Neigung) der Deponiebasis. Die höchsten Wasserstände finden sich in der Südwestecke des Feldes.



### 3 Pumpversuch

#### 3.1 Konzeption und Vorbereitung

Im Gegensatz zu den Vertikalbrunnen bieten horizontale Entgasungsleitungen eine Reihe von Vorteilen, die man sich beim Abpumpen von Sickerwasser zu Nutze machen kann. Die zu überwindenden Steighöhen sind deutlich geringer, so dass Wasser abgesaugt werden kann, eine Pumpe im Einstaubereich kann entfallen. Die Lage der Rohrenden im Böschungsbereich lässt zudem die Verwendung von Hebersonnen zu, bei denen das Wasser nur einmal angesaugt werden muss und dann durch den Druckhöhenunterschied ohne weitere Besaugung von selbst herausläuft.

Um das vordere Ende der Saugleitung effektiv zu platzieren, ist es erforderlich, die Höhenlage der Leitung zu bestimmen. Die Kenntnis der Höhenlage ist ohnehin zwingend erforderlich, um den Wasserstand absolut (auf NN-Höhe) zu bestimmen, da die Drucksonde ja nur einen relativen Aufstau (Druckhöhe) über der Sonde liefert, währenddessen die Höhenlage der Sonde unbekannt ist. Die Höhenlage der Leitung wird durch hydrostatische Höhenvermessung bestimmt. Die hydrostatische Höhenvermessung ist ein weit verbreitetes Messprinzip. Die Höhe eines Punktes kann durch die Messung des der Höhendifferenz proportionalen Wasserdruckes (bei bekannter Höhenlage des Wasserspiegels) bestimmt werden (Abbildung 2). Der Aufbau der Wassersäule zwischen Referenzniveau und Messpunkt kann auf verschiedene Arten erfolgen, in der Regel wird ein Drucksensor mit angeschlossener Wassersäule in das Rohr eingebracht.

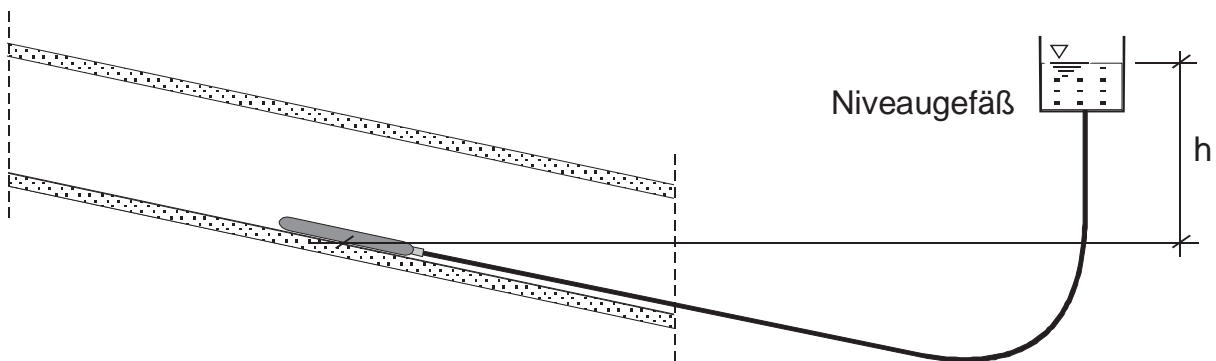


Abbildung 2: Hydrostatische Höhenvermessung - Messprinzip



Abbildung 3: Kamerafahrwagen mit aufgestecktem hydrostatischen Sensor



Abbildung 4: Einfahren der hydrostatischen Sonde (TV-Aufnahme)

Die hydrostatische Höhenvermessung kann Messgenauigkeiten von 0,1% des Höhenunterschiedes bzw. des Messbereiches des Druckaufnehmers erreichen, bei Systemen mit 10 m Messbereich somit +/- 1 cm. Die Messungen sind unabhängig voneinander, so dass lokale Fehlmessungen benachbarte Punkte nicht beeinträchtigen. Das Einbringen der Messsonde, das in Sickerwasserrohren mittels Kamerafahrwagen während der TV-Inspektion erfolgt (Abbildungen 3 und 4), wird in den Gasleitungen durch einen Glasfaserstab realisiert.

Für den Pumpversuch wurde die zentral gelegene Entgasungsleitung DH 410 gewählt (Lage siehe Abbildung 1). Die Bestimmung der Höhenlage und des Wasserstandes im Jahr 2011 hatte für den DH 410 ein günstiges Bild ergeben (Abbildung 5).



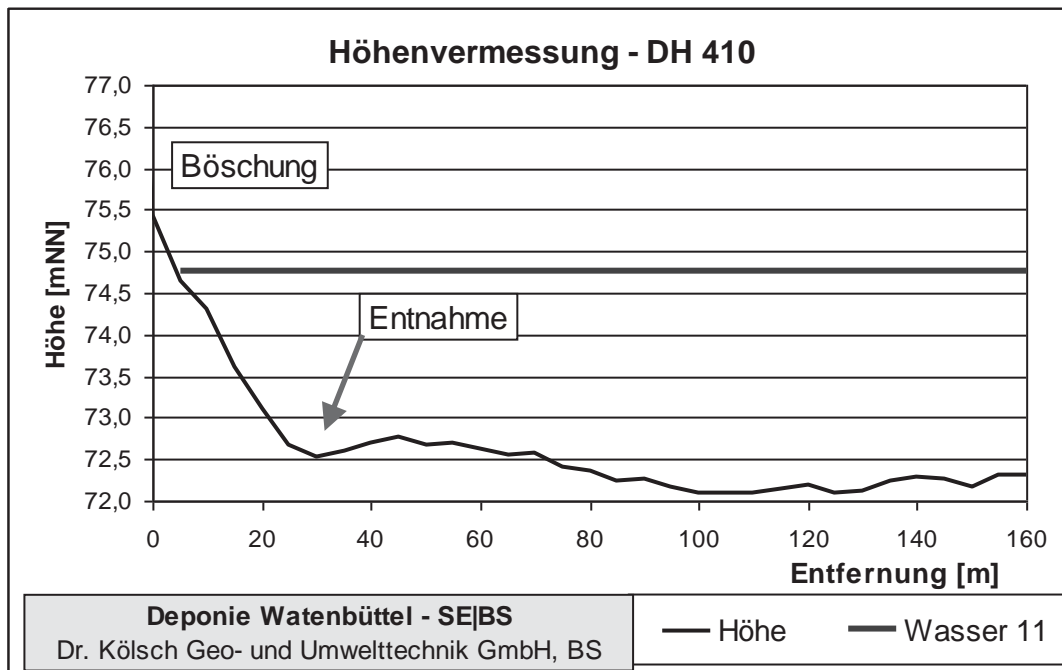


Abbildung 5: DH 410 – Wasserstand und Höhenlage

Es hatte sich gezeigt, dass die Leitung bis zu 2,70 m hoch überstaut ist, wobei das Wasser nur knapp 1 m unter dem oberen Rohrende steht. Bereits in 30 m Entfernung vom äußeren Rohrende in der Böschung liegt der Einstau bei 2,20 m. Bei geringer zu überwindender Druckhöhe war somit eine gut versorgte Entnahmestelle leicht zu erreichen.

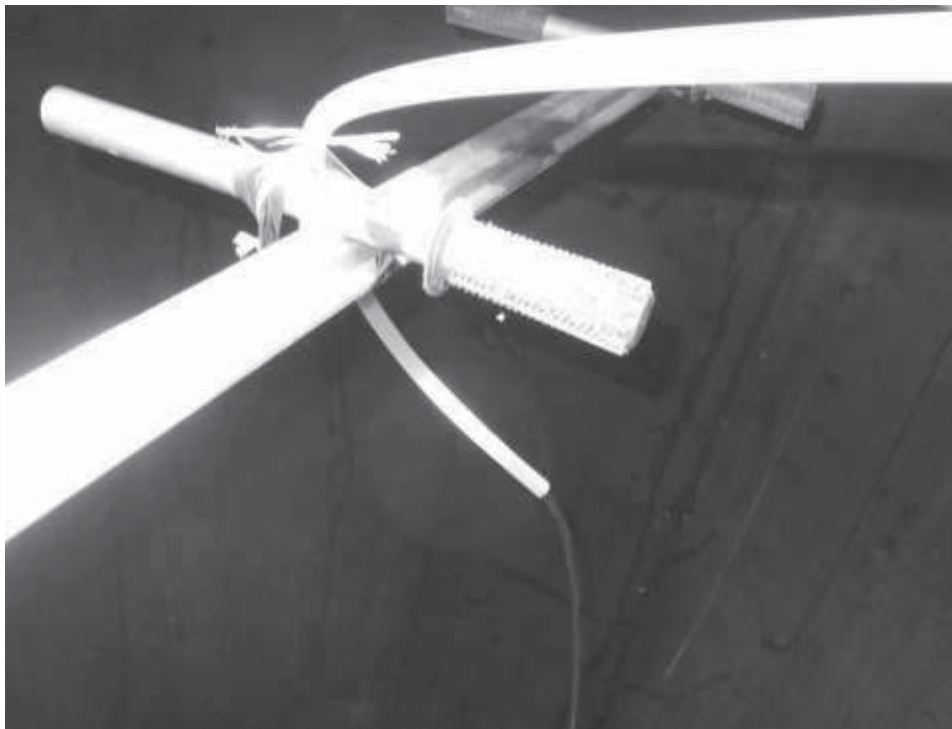
### 3.2 Durchführung

Im Juli 2014 wurde der Saugschlauch in den DH 410 eingebracht. Es wurde ein 10/8 Polyamidschlauch (Innendurchmesser 8 mm) mit einer Länge von 80 m verlegt, davon 30 m im Rohr bis zur vorgesehenen Entnahmestelle und 50 m auf der Böschung zum nächstgelegenen Sickerwasserschacht. Auf der Entnahmeseite wurde ein Filterstein angebracht, um das Ansaugen von Feststoffen zu verhindern. Die Wassersäule wurde mittels einer Schlauchpumpe angesaugt, bis sich ein freier Abfluss einstellte. Seit dem 10.7.2014 läuft der Ablauf über die Heberleitung ohne Unterbrechung. Der Abfluss beträgt rund 2 m<sup>3</sup>/Tag.





*Abbildung 6: Entnahmeschlauch am Rohrende der Entgasungsleitung*



*Abbildung 7: Ablauf im Sickerwasserschacht*



## 4 Ergebnis

Im DH 410 hatte das Abfließen einen unmittelbaren, deutlich sichtbaren Effekt (Abbildung 8). Der Wasserstand fiel – trotz zum Teil recht starker Sommerniederschläge – innerhalb von 3 Monaten (bis zum 10.10.2014) um rund 60 cm. Die Auswirkungen lassen sich auch in den beiden jeweils etwa 30 m entfernt liegenden benachbarten Gasdräns DH 406 und DH 411 beobachten. Dort fielen die Wasserstände um 30 bzw. 15 cm. Auch in dem neben der Achse des DH 410 gelegenen Vertikalbrunnen DG 327 fiel der Wasserspiegel um 35 cm.

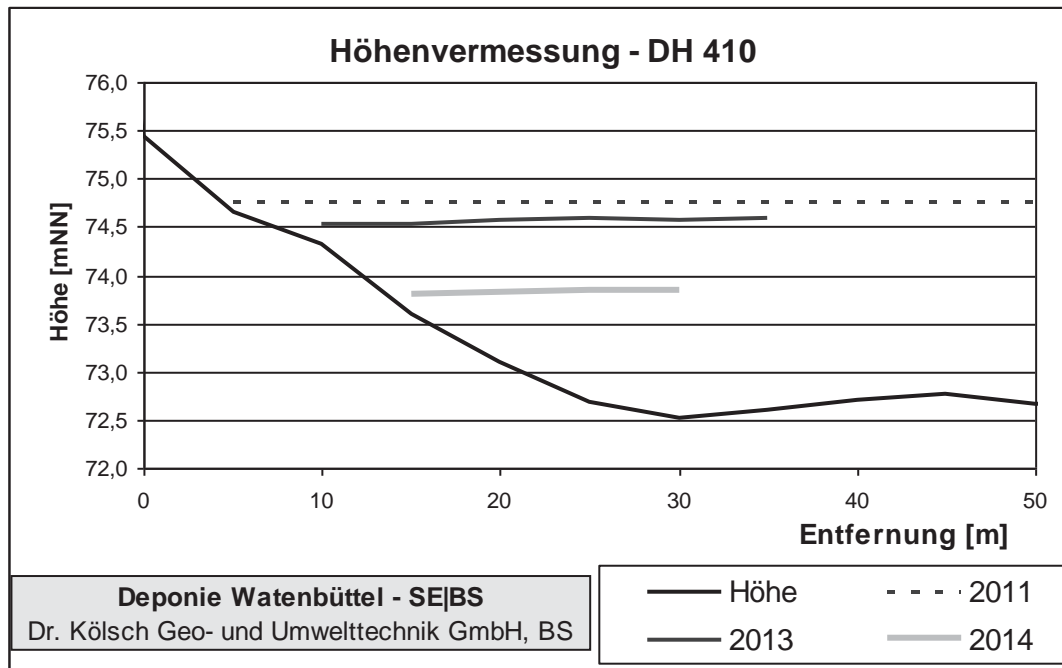


Abbildung 8: Veränderung des Wasserstandes im DH 410

## 5 Schlussfolgerungen

Mit dem bislang 3 Monate laufenden Abpump- bzw. eigentlich Ablaufversuch konnten die Wasserstände in den angezielten Bereichen des Deponiekörpers deutlich abgesenkt werden. Der Ablauf erwies sich als überraschend verlässlich. Das eingesetzte Hebersystem erfordert weder Wartung noch Energieeinsatz. Derart günstige Rahmenbedingungen wie auf der Deponie Watenbüttel finden sich leider nicht an vielen Standorten. Die horizontalen Entgasungsleitungen sind in den 90er Jahren aus unerfindlichen Gründen aus der Mode gekommen. Angesichts auch aktuell immer wieder auftretender Entwässerungs- und Einstauprobleme sollten die Deponiebetreiber erwägen, in bestimmten Höhen (etwa alle 10 m) DN 100 Dränagen einzulegen, um später einen weiteren Zugang zum Deponiekörper zu haben. Die Dränagen sollten wie die Horizontalentgasung in die Deponiemitte entwässern, um einen ungeordneten Austritt und Ablauf an der Böschung zu vermeiden.



### **Anschrift des Verfassers**

Dr.-Ing. Florian Kölsch  
Dr. Kölsch Geo- und Umwelttechnik GmbH  
Gliesmaroder Straße 100  
D-38106 Braunschweig  
Telefon +49.531.2094133  
Email: [office@dr-koelsch.de](mailto:office@dr-koelsch.de)  
Website: [www.dr-koelsch.de](http://www.dr-koelsch.de)



# Ganzheitliche Sanierung und Sicherung des Entwässerungssystems der Deponie Stockstadt

Jörg Kässinger und Jürgen Morlok

ICP mbH, Karlsruhe / Landratsamt Aschaffenburg, Abfallwirtschaft

## Inhaltsangabe

Das Sickerwassererfassungssystem im Deponieabschnitt 3 der Deponie Stockstadt wurde durch zahlreiche, z. T. unkonventionelle Maßnahmen und Techniken ganzheitlich saniert. Neben fünf Sammelschächten wurden die fünf Sickerwasserableiter, ein Vorschacht, ein unterirdischer Sickerwassertank sowie die dazwischen befindliche Verbindungsleitung erfolgreich erneuert bzw. saniert und somit langfristig gesichert.

## Stichworte

Sanierung Deponieentwässerungssystem, Schachtneubau, Spritzbetonbaugrube, Spülplanzen, Ringdrainage, PP-Auskleidung, Rohrvortrieb, GFK-Inliner-Schachtsanierung, PE-Auskleidung, Sickerwassertank, Wickelrohrverfahren;

## 1 Einleitung

### 1.1 Allgemeine Angaben zur Deponie Stockstadt

Die Kreismülldeponie Stockstadt des Landkreises Aschaffenburg ist eine klassische Hausmülldeponie (DK II), die seit Anfang der 70er Jahre bis 2005 mit insgesamt 4 Deponieabschnitten betrieben wurde. Deponieabschnitt 1 wurde bereits in den 70er Jahren verfüllt und ist rekultiviert. Abschnitt 4 wurde kurz nach Fertigstellung qualifiziert stillgelegt und kann mit einem Verfüllvolumen von 240.000 m<sup>3</sup> weiter betrieben werden, sollte dies erforderlich werden. Auf den Deponieabschnitten 2 und 3 wurden ca. 1,7 Mio. t Haus-, Sperr-, Gewerbe- und Industriemüll eingelagert, in Spitzenzeiten 180.000 t/a. Seit 2005 befinden sich diese Abschnitte in der Stilllegungsphase und sind derzeit vollständig temporär mineralisch abgedichtet. Neben der Deponiegaserfassung und der Pflege der Deponieoberfläche steht die Wartung der Sickerwassererfassung im Vordergrund der Maßnahmen, die heute auf der Deponie durchgeführt werden müssen.

Die Sickerwassersammlung im Deponieabschnitt 3 erfolgt über 5 Sammelschächte, von denen aus das Sickerwasser durch die Basisabdichtung in Freispiegelleitungen zu zwei Vorschächten und weiter in zwei unterirdische Sickerwassertanks abfließt. Aus diesen muss das Sickerwasser regelmäßig abgepumpt und abgefahren werden.

Das Entwässerungssystem der Deponie Stockstadt wird regelmäßig mittels Hochdruckspülung gereinigt und mit Kanalkamera untersucht. Bei diesen Arbeiten wurde festgestellt, dass Teilbereiche der Entwässerungsleitungen im Abschnitt 3 beschädigt sind und eine funktionsgerechte Entwässerung des Deponiekörpers langfristig nicht

gewährleistet werden konnte. Die Sammelschächte wiesen außerdem Schäden auf, die eine Prognose zur langfristigen Standsicherheit der Schachtwände nicht zuließen.

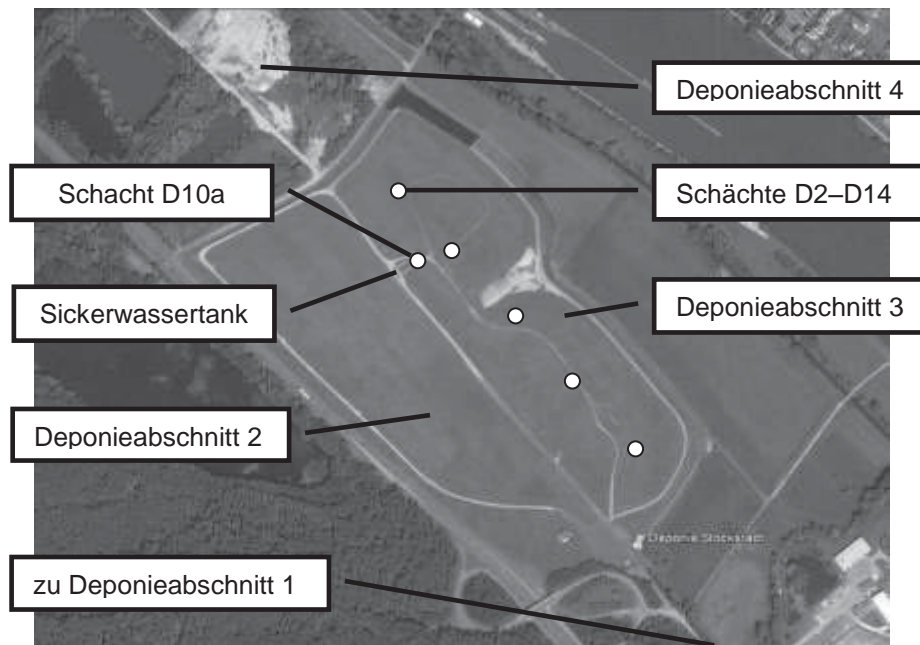


Abbildung 1: Übersicht über die Deponie Stockstadt

Im Nachfolgenden werden die Maßnahmen zur Sanierung der Sickerwassersammelschächte D2 bis D14, der jeweils zugehörigen Sickerwasserableitungen sowie des Vorschachtes D10a samt Verbindungsleitungen und unterirdischem Sickerwassertank beschrieben. Die Beschreibung der Maßnahmen folgt hierbei der Fließrichtung des Sickerwassers und nicht der Chronologie der Durchführung.

## 2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen

Die Lage der sanierten Sickerwasserleitungen und –schächte sowie des Sickerwassertanks im Deponieabschnitt 3 ist in nachfolgendem Planausschnitt dargestellt.

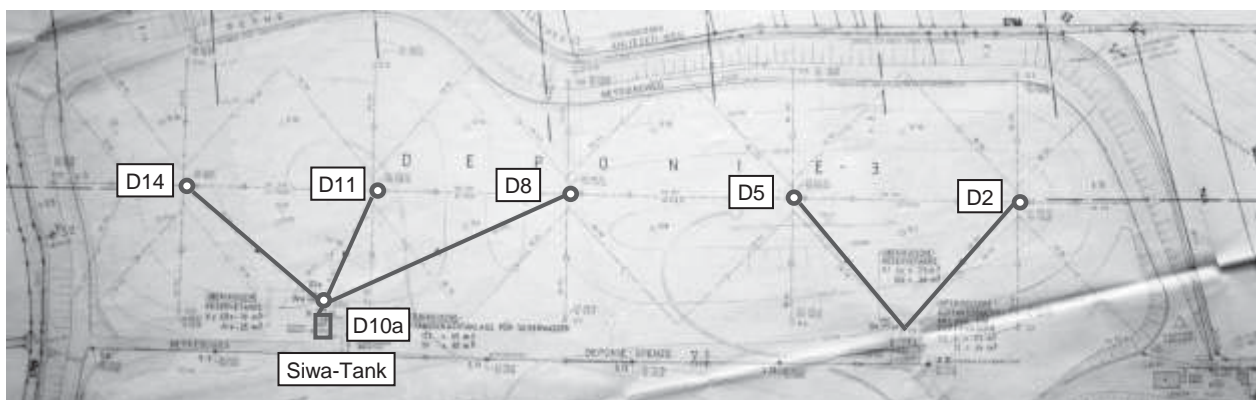


Abbildung 2: Lage der Leitungen und Schächte im Abschnitt 3 (aus Plangenehmigung 1987)





## 2.1 Sickerwassersammelschächte D2 bis D14

### 2.1.1 Ausgangssituation

Der Abschnitt 3, in dem sich die zu erneuernden Sickerwasserschächte befinden, kann in fünf Parzellen unterteilt werden. Die Deponiebasis wurde mit Quer- und Längsneigungen profiliert, sodass der Tiefpunkt der einzelnen Parzellen in der Mitte liegt. An den jeweiligen Tiefpunkten wurden die Sickerwasserschächte von der Basisabdichtung bis an die Deponieoberfläche sukzessive mit der Müllaufschüttung aufgebaut.

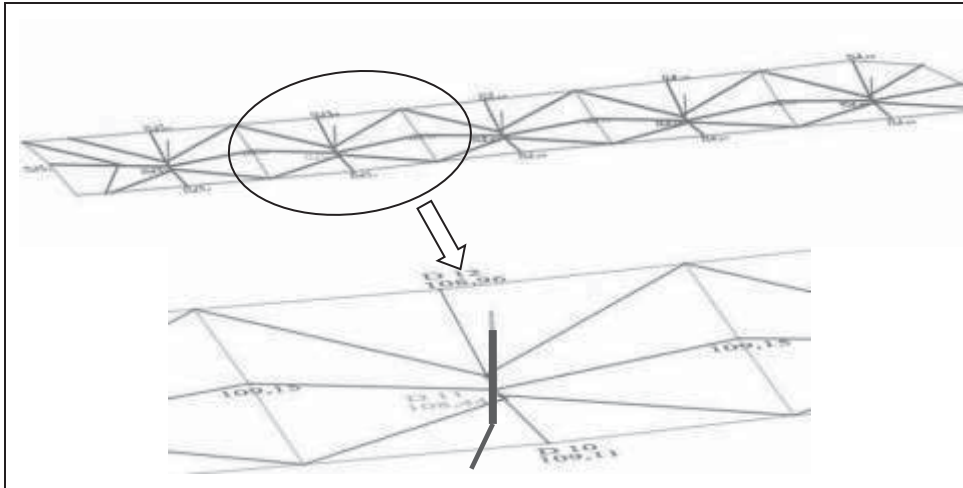


Abbildung 3: Modell der Deponiebasis im Deponieabschnitt 3

Auf der mineralischen Basisabdichtung wurde eine ca. 30 cm mächtige Schicht aus verglaster Steinkohleschlacke als Flächenfilter eingebaut. Die einzelnen Drainageleitungen wurden zusätzlich mit einer ca. 30 cm mächtigen Kiesrigole überdeckt. Zur Erfassung und Ableitung des anfallenden Sickerwassers wurden geschlitzte, kunststoffbeschichtete Asbestzement-Rohre (AZ) DN 150 und DN 200 verlegt.

Die Schächte D2, D5, D8, D11 und D14 sind zwischen 18 und 20 m tief und wurden bis zu einer Höhe von ca. 15 m über BA mit dem Mülleinbau aus Betonfertigteilen DN 1.000 eingebaut. Die unteren Schachtelemente bestanden aus Asbestzement. Im Rahmen der Aufstockung des Deponiekörpers wurden, mit Ausnahme des Schachtes D2, im oberen Bereich Betonfertigteile mit Durchmesser 2.000 mm aufgesetzt.

An den einzelnen Schachtbauwerken sind je 4 Zulaufleitungen und ein Ablauf AZ DN 200 angeschlossen. Das Sickerwasser wird über die Ableiter durch die BA zwei Vorschächten (D10a bzw. D1a) zugeleitet und fließt durch Verbindungsleitungen weiter in unterirdische Speichertanks. Dieser technische Ausbau hat den Vorteil, dass das Sickerwasser auch im Falle eines kompletten Versagens der Entwässerungsleitungen weiterhin über die Flächendrainage und die Rigolen den einzelnen Sickerwasserschächten zufließt.



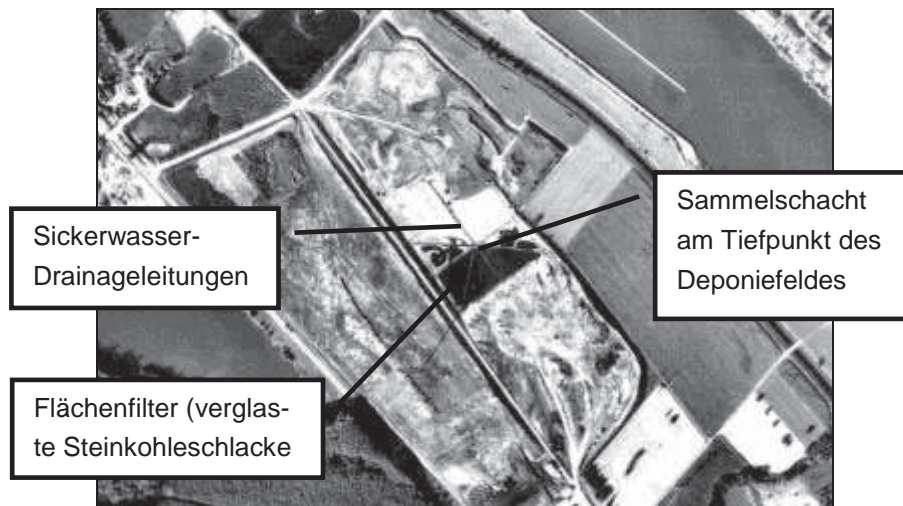


Abbildung 4: Luftbild 1983; Ausbau des 3. Feldes innerhalb des Deponieabschnitts 3

Die Basissegmente der ursprünglichen Schachtbauwerke wurden bereits in den 90er Jahren durch PE-Inliner gesichert, wodurch der Querschnitt auf DN 800 reduziert wurde. Außerdem wurden in den Anschlüssen der Zuläufe teilweise PVC-Rohre DN 80 - 150 eingebaut. Aufgrund des reduzierten Durchmessers waren in diesen Leitungen seither nur bedingt Reinigungs- und Inspektionsarbeiten möglich. Sämtliche Schachtbauwerke und Drainageleitungen im Deponieabschnitt 3 wiesen ähnliche Schadensbilder auf, die eine langfristige Funktions- und Standsicherheit beeinträchtigten. Um die funktionsgerechte Entwässerung des Deponiekörpers langfristig wiederherzustellen, sollten die Sickerwasser-Sammelschächte erneuert werden.



Abbildung 5: Ursprüngliche Situation an der Basis der Sickerwasserschächte

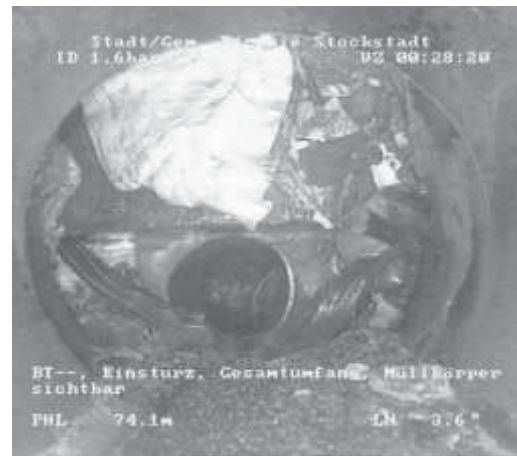


Abbildung 6: Einsturz und Reduzierung mit PVC-Rohr am Schacht D11

Im Rahmen eines ersten Pilotprojektes wurde im Jahre 2011 zunächst der zentrale Sickerwasserkontrollschacht D11 erneuert, da hier die Schäden am stärksten waren. Die bauliche Gestaltung als Drainageschacht wurde derart ausgeführt, dass dauerhaft das gesamte auf den Schacht zufließende Sickerwasser abgeleitet werden kann. Nach zweieinhalb Jahren erfolgreichem Praxisbetrieb und Sicherstellung der einwandfreien



Funktionalität des neuen Schachtbauwerkes werden seit Mai 2014 die vier weiteren Sickerwassersammelschächte des Deponieabschnittes 3 in gleicher Weise erneuert. Die Planung der Maßnahmen erfolgte durch die ICP mbH, die Ausführung durch die Fa. KMG Pipe Technologies GmbH, NL Ferrum Bau und Umwelt, aus Ursensollen. Die Fremdprüfung übernahm der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH aus Nürnberg.

### 2.1.2 Planung und Durchführung der Schachterneuerungen

Aufgrund des Vorhandenseins einer Flächendrainage wurde von einer Sanierung der Drainageleitungen mittels Berstlining abgesehen. Dies hätte aufgrund der Gesamtstrecke der zu sanierenden Leitungen von mind. 1.500 m zu erheblichen Kosten geführt. Die Planung sah daher vor, dass der Sickerwasserzutritt in die Schächte wie bisher in erster Linie über die Drainageleitungen gewährleistet wird. Darüber hinaus wurden die Schachtunterteile als Drainageschächte mit mehreren Sicherheitssystemen (s.u.) vorgesehen, um bei einem kompletten Versagen der alten Sickerwasserleitungen samt Neuanschlüssen, ein Einströmen des Sickerwassers über die Flächendrainage und zusätzliche Drainageöffnungen in die Schächte zu ermöglichen.

Die bestehenden, defekten Schächte wurden im Schutze von Spritzbetonbaugruben DN 5.500 sukzessive mit dem Abteufen der Baugruben rückgebaut. An der Deponie-sole wurden die Schachtfundamente und die Basisabdichtung erneuert. Bei dieser Gelegenheit wurde die bestehende Deponiebasisabdichtung beprobt und die Funktionsfähigkeit der Dichtung auch nach knapp 30 Jahren Betrieb belegt. Die neuen Schachtbauwerke DN 1.800 aus Stahlbeton wurden mit einer Wandstärke von 20 cm hergestellt und mit einer Auskleidung aus Polypropylen (PP) versehen. Das Material PP wurde als Schachtummantelung, für sämtliche Rohrleitungen sowie für die Hüllrohre gewählt, da es für dauerhaft höhere Temperaturen besser geeignet ist als Polyethylen (PE). Da möglicherweise zukünftig eine aerobe in-situ-Stabilisierung zur Beschleunigung des Abbaus organischer Substanz im Deponiekörper zum Einsatz kommen soll und sich dadurch längerfristig höhere Sickerwassertemperaturen einstellen können, entschied man sich für PP. Die alten AZ-Rohre im Baugrubenbereich wurden rückgebaut und durch  $\frac{2}{3}$ -gelochte Drainagerohre da 250 SDR 11 aus PP ersetzt. Die PP-Rohre wurden durch ein Übergangsstück mit den alten AZ-Rohren verbunden und mittels Ringraumdichtungen fachgerecht an die Schachtbauwerke angeschlossen. Um die neuen Rohre gegen mögliche schachtnahe Setzungen des im Rahmen der Verfüllung eingebrachten Materials zu schützen, wurden Hüllrohre da 560 SDR 7,4 aus PP über die neuen Rohrstücke geschoben. Um zu verhindern, dass Drainagekies zwischen PP-Drainage- und Hüllrohr gelangen kann und so die Schutzwirkung vor Setzungen vermindern würde, wurden Gummimanschetten an den Übergängen eingebaut.

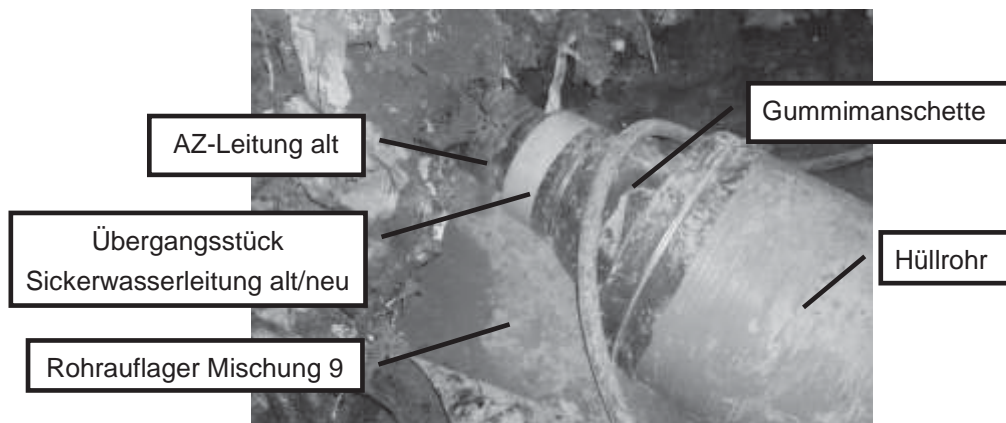


Abbildung 7: Anschluss Altleitung an Neuleitung mit Hüllrohr und Gummimanschette

Zusätzlich zu den Rohranschlüssen wurde das Schachtunterteil, wie oben beschrieben, mit mehreren Drainageöffnungen sowie Öffnungen für den Anschluss von Spüllanzen und Ringdrainagen, die als zusätzliche Entwässerungs- und Spülmöglichkeiten dienen, versehen. Die Öffnungen für die Leitungen und Drainagelöcher wurden an der Deponiebasis festgelegt, gebohrt und mit PP ausgekleidet. Insgesamt wurden an jedem Schachtunterteil Kernbohrungen für den Anschluss von 4 Zuleitungen da 250, 1 Ableitung da 250, 4 Spüllanzen da 160, 1 Ringdrainage da 160 mit 2 Anschlüssen und 9-12 Drainagelöchern DN 55 ausgeführt. Die Spüllanzen ermöglichen ein Spülen der Kiespackung um den Schacht, wodurch einem Zusetzen und Inkrustieren des Porenraums des Drainagekörpers vorgebeugt werden soll. Darüber hinaus wurden die Spüllanzen mit Abzweigen versehen und (bei den Schächten D8, D11 und D14) an die Sickerwasser-Diagonalleitungen (Abb. 2) angeschlossen, deren Einmündungen man innerhalb der Baugruben freigelegt hatte. Hierdurch wurde die Möglichkeit geschaffen, diese bisher nicht zugänglichen Leitungen spül- und z.T. befahrbar zu machen.

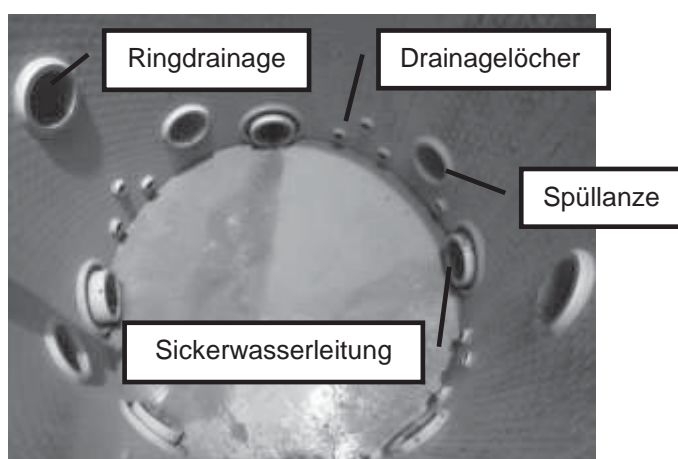


Abbildung 8: Schachtunterteil (Drainageschacht) mit Anschluss-/Drainageöffnungen



Abbildung 9: Setzen des fertigen Schachtunterteils

Besonderes Augenmerk wurde auf die Wahl des Drainagekieses gelegt, da eine Inkrustierung desselben u. U. die Funktionsfähigkeit des Drainageschachtes erheblich





einschränken könnte. Es musste ein Material gefunden werden, das möglichst karbonatarm ist und zusätzlich eine glatte Oberfläche aufweist, damit Inkrustationen beim Hochdruckspülen leichter zu entfernen sind. Zum Einsatz kam Oberrheinkies, der eine glatte Oberfläche und Karbonatanteile von 9 bis 12% aufweist. Es wurden zwei Körnungen (16/32 und 50/150) verwendet, die zuvor gewaschen wurden. Die Körnung 50/150 wurde vorab gesichtet, Bruchstücke, raue Kiesel und Kalke per Hand aussortiert. Der Grobkies wurde anschließend händisch direkt am Schachtfuß um die Drainageöffnungen aufgesetzt, damit kein feinkörniger Kies durch die Drainagelöcher in die Schächte gelangen kann. Die Gerölle wurden so gesetzt, dass eine Spülung des Kiesel mitunter auch über die Drainagelöcher aus dem Schacht heraus durchgeführt werden kann. Darunter wurde um den gesamten Schacht herum eine 3 mm starke Kunststoffdichtungsbahn (KDB) zum Schutz der mineralischen Basisabdichtung bei einer Hochdruckspülung verlegt und mit dem Schacht verschweißt.



Abbildung 10: Abgestufter Drainagekies um Schachtunterteil mit eingebautem Hüllrohr



Abbildung 11: Blick aus einer Drainageöffnung auf den Drainagekies 50/150

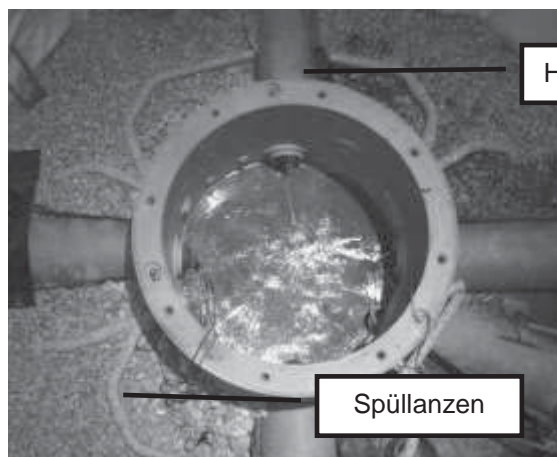


Abbildung 12: Schachtunterteil (Drainageschacht) mit Hüllrohren und Spüllanzen

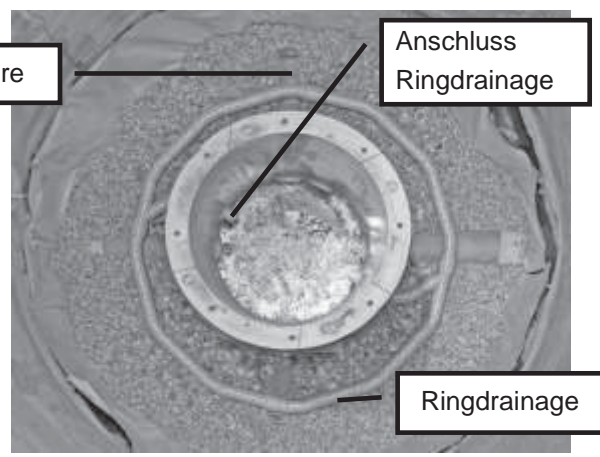


Abbildung 13: Schachtneubau mit Ringdrainage und kornabgestufter Kiesverfüllung

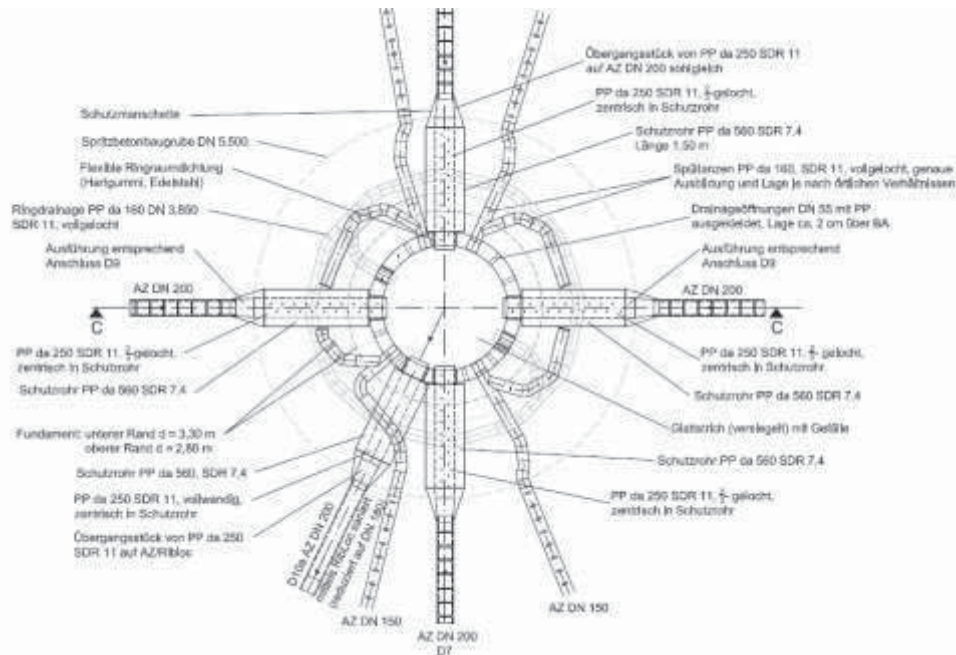


Abbildung 14: Schachtunterteil mit angeschlossenen Leitungen am Beispiel des Schachtes D8

Nach Anschluss der Leitungen und Auffüllen des Ringraumes mit Drainagekies bis auf eine Höhe von ca. 1,50 m über der Basis, wurde parallel zum Schachtaufbau der Ringraum zwischen neuem Schacht und dem Spritzbetonverbau sukzessive mit Aushubmaterial verfüllt und verdichtet. Außerdem wurde die Spritzbetonschale teilweise abgebrochen und rückgebaut. Die Fugen an den Innen- und Außenseiten der neuen Schachtbauwerke wurden mit PP-Streifen verschweißt, die Schächte in das mineralische Oberflächenabdichtungssystem eingebunden und mit PE-Deckeln verschlossen.

Auf detailliertere Ausführungen zu Arbeitsabläufen, Arbeitssicherheit und Qualitätsmanagement dieser Baumaßnahme wird verzichtet, da diese sich nicht von herkömmlichen, oft beschriebenen Maßnahmen unterscheiden.



Abbildung 15: Erneuerter Sickerwasser-Drainageschacht mit Betonprobekörpern

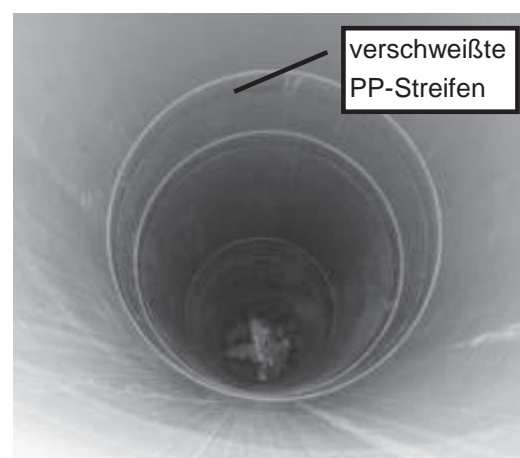


Abbildung 16: Blick in neuen Schacht mit innen angeschweißten PP-Streifen



## 2.2 Sickerwasserableitungen aus den Schächten D2 bis D14

### 2.2.1 Ausgangssituation

Der Landkreis Aschaffenburg plante bereits frühzeitig, Sickerwasser in die Deponie zu infiltrieren, um die Gasbildung im Deponiekörper zu steigern bzw. zumindest auf gleichem Niveau zu halten. Daher wurden im südlichen Bereich des Abschnittes 3 vor Aufbringen der temporären Oberflächenabdichtung bauliche Maßnahmen getroffen, um eine Infiltration durchführen zu können, ohne die Abdichtung nochmals tangieren zu müssen. Voraussetzung der Genehmigung der Sickerwasserinfiltration durch die Regierung von Unterfranken war allerdings, dass die 5 Sickerwasserableitungen von den Sammelschächten zur den Speichertanks saniert werden, da diese zwar intakt und hydraulisch wirksam, aber rissig und undicht waren. Daher suchte der Landkreis bereits 2005 nach praktikablen, wirtschaftlichen Lösungen und fand diese über die Fa. KMG Pipe Technologies GmbH aus Schieder-Schwalenberg, die seinerzeit die Reinigungs-TV-Arbeiten auf der Deponie durchführte. Deren australische Schwesterfirma Rib Loc, die wie KMG zum Sekisui-Konzern gehört, hatte ein Wickelrohrverfahren entwickelt, das bis dato nur im Kommunalbereich zum Einsatz gekommen war. Die Fa. KMG wurde daher mit der Sanierung der betroffenen Haltungen im Rib Loc-Expanda-Verfahren (heute SPR EX) beauftragt. Dies war seinerzeit das erste Mal, dass ein Wickelrohrverfahren auf einer Deponie zum Einsatz kam.

### 2.2.2 Funktionsweise des Rib Loc-Expanda-Verfahrens

Die Funktionsweise wird am anschaulichsten in einen Film dargestellt, der während der Tagung präsentiert wird. Der Artikel von KMG in *bi UmweltBau* 2/12 (2012) beschreibt die Funktionsweise folgendermaßen: „*Bei dieser Technologie ... wird aus einem PVC-Profilstreifen mit zweigleisigem Nut-Feder-Schloss mit Hilfe einer Wickelmaschine ein Rohr in die vorhandene Leitung eingewickelt. Eines der beiden Schlösser, das Primärschloss, ist bewusst gleitfähig konzipiert, während das Sekundärschloss beim Wickelvorgang verklebt wird. In das fixierte Sekundärschloss wird ein Schneiddraht mit eingewickelt. Der Liner wird nun mit Untermaß ins Rohr eingewickelt, wobei die Wickelmaschine stationär im Startschacht verbleibt. Nach Erreichen des Zielpunktes zieht man den Schneiddraht, der das Sekundärschloss in voller Länge aufschneidet und entriegelt. Wird der Liner nun im Endschacht blockiert und wickelt man zugleich von der Maschine her Profil nach, expandiert der Liner radial und liegt schließlich in ganzer Länge „close fit“ an der Wand des alten Rohrs an.*“

Neben der Dichtigkeit, die durch dieses Verfahren wieder hergestellt werden kann, werden auch die Stabilität und die statische Wirksamkeit des Altrohres deutlich verbessert und ein Zusammenbruch des Rohres verhindert. Voraussetzung ist allerdings, dass die



Leitung statisch noch intakt ist und keine wesentlichen Deformationen und Einstürze aufweist. Entscheidender Vorteil des Verfahrens ist, dass das Wickelrohr beim Einzug bei Bedarf wieder zurück, d.h. aus dem Altrohr heraus, gewickelt werden kann

### 2.2.3 Durchführung der Leitungssanierung (2005)

Das Einbringen der Wickelrohre erfolgte gegen die Fließrichtung von den beiden Vorschächten DN 1.200 aus zu den jeweiligen Sammelschächten, da diese nur noch einen Querschnitt von ca. 80 cm (s.o.) aufwiesen. Die Gesamtlänge betrug 530 m. Über die Vorschächte war ein Einsteigen mit Vollatemschutz, Schutzausrüstung und Wickelmaschine möglich. Die Profilstreifen wurden von der Rolle eingezogen, zum Rohr gewickelt und in das Altrohr vorgetrieben. Nachdem das Wickelrohr im Zielschacht angekommen war, musste ein Monteur in den Schacht abgelassen werden, um das Wickelrohr für die Expandierung zu blockieren.

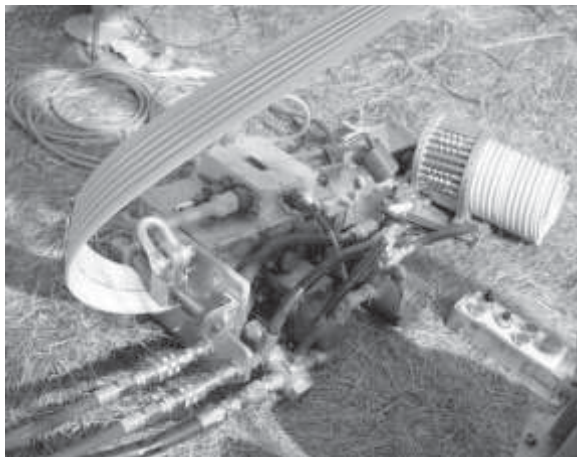


Abbildung 17: Wickelmaschine mit Profilen



Abbildung 18: Einwickeln des Profilstreifens im 17 m tiefen Vorschacht D10a

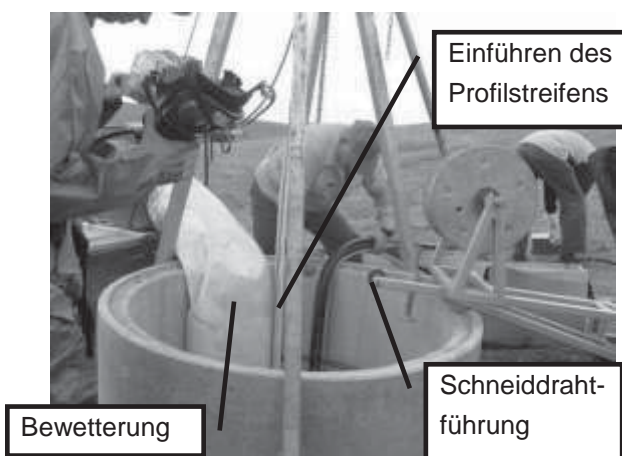


Abbildung 19: Einführen des Profilstreifens in den Schacht D10a

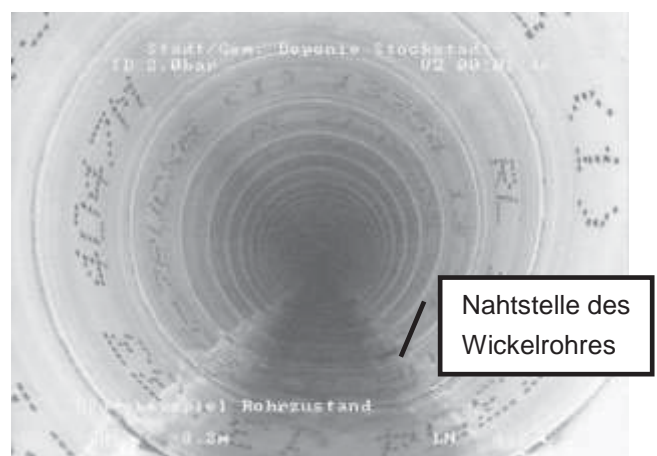


Abbildung 20: Eingewickeltes, expandiertes Wickelrohr,  $d_i \sim 180$  mm



## 2.2.4 Zustand der Leitungen nach 9 Jahren

Die sanierten Rohre weisen heute gewisse Verfärbungen durch das Sickerwasser auf. Seit einiger Zeit bilden sich verstärkt Ablagerungen in den Leitungen, die bisher jedoch von den glatten Wandungen der Rib Loc-Rohre mit vertretbarem Aufwand entfernt werden konnten. Schäden wurden bis heute keine festgestellt.

## 2.3 Vorschacht D10a, Sickerwassertank und Verbindungsleitungen

### 2.3.1 Ausgangssituation

Das Sickerwasser der drei nördlichen Parzellen wird im Vorschacht D10a (DN 1.200) gesammelt und wurde vor der Sanierung von dort über zwei ca. 3,50 m lange Verbindungsleitungen AZ DN 200 in einen unterirdischen, mittig unterteilten Sickerwassertank aus Stahlbeton in ca. 17 m Tiefe abgeleitet. In den Schacht D10a münden insgesamt drei Zuläufe aus Asbestzement, die 2005 im Ribloc-Expanda-Verfahren saniert wurden (s. Kapitel 2.2). Der Ablauf zu den Tanks erfolgte über die genannten Verbindungsleitungen, die jeweils mittels T-Stück an Entlüftungsrohre aus AZ angeschlossen sind, die wiederum in die Tankdecke münden. Der Sickerwasserspeichertank ist als rechteckiger Behälter in Ortbeton ohne zusätzliche Beschichtung ausgeführt. Die beiden Tankhälften waren vor der Sanierung durch eine mittig errichtete Betonwand hydraulisch voneinander getrennt. Die beiden Tankhälften sind über einen ca. 17 m tiefen Zustiegsschacht DN 1.500 zugänglich, die inneren Abmessungen betragen jeweils ca. 10,00 x 2,50 x 2,60 m, das jeweilige Fassungsvermögen beträgt ca. 65 m<sup>3</sup>. Die betroffenen Bauteile liegen größtenteils unterhalb der BA. Der Schacht D10a, die betroffenen Sickerwasserableitungen sowie der Sickerwassertank sind in Dichtungsmaterial bzw. eine grundwasserunschädliche Ausgleichsschicht eingebettet.

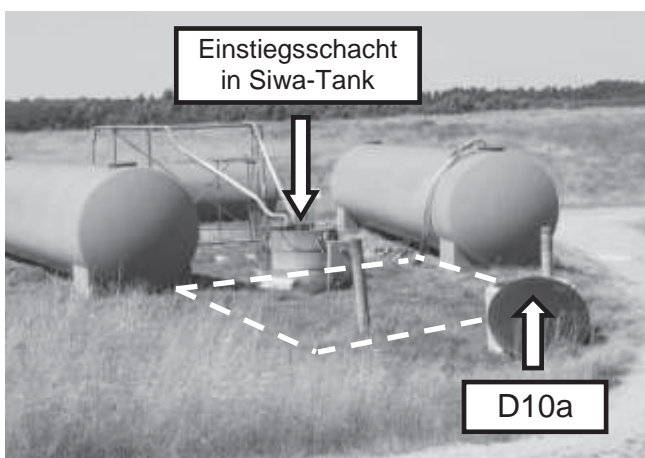


Abbildung 21: Lage Siwatank/Schächte

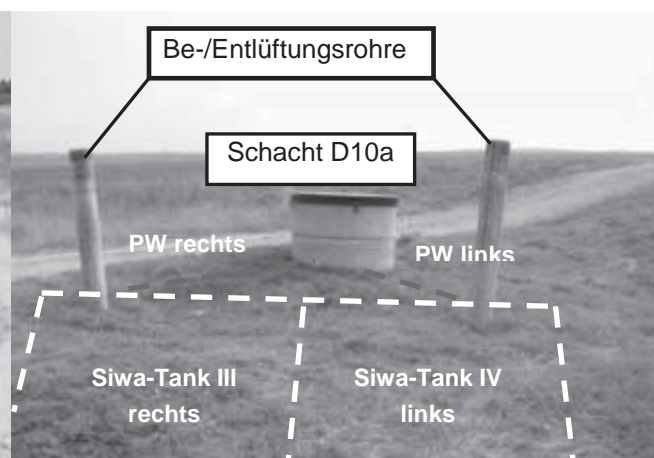


Abbildung 22: Lage Verbindungsleitungen



### 2.3.2 Zustand vor der Sanierung

Bei den jährlichen Inspektionsarbeiten wurde festgestellt, dass die Verbindungsleitungen zwischen dem Vorschacht D10a und den zwei unterirdischen Sickerwassersammeltanks beschädigt waren und eine zuverlässige Ableitung des Sickerwassers nicht mehr gegeben war. Beide Leitungen wiesen ähnliche Schadensbilder in Form von starken Versätzen bzw. Abscherungen mit Wasserzutritt auf. Des Weiteren waren zwei Leitungsanschlüsse im Schacht D10a undicht und die Betonwände der Sickerwassertanks stark inkrustiert. Die Schadensbilder zeigten eine zunehmende Verschlechterung im Verlauf der letzten Jahre, die Entwässerungsfunktion der beiden Leitungen war durch die aufgetretenen Schäden stark eingeschränkt.



Abbildung 23: Vorschacht D10a vor der Sanierung mittels GFK-Inliner



Abbildung 24: Undichte Leitungsanbindung an den Schacht D10a

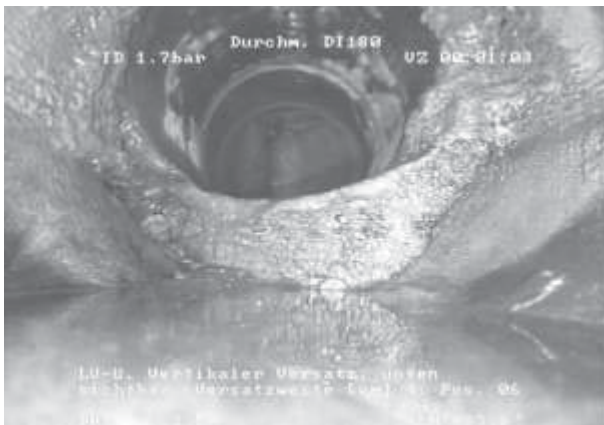


Abbildung 25: Abscherung der Verbindungsleitung mit Ablagerungen

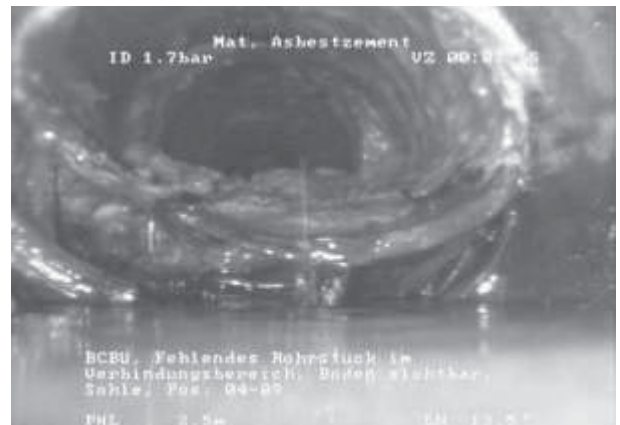


Abbildung 26: Abscherung der Verbindungsleitung mit Fremdwasserzutritt

### 2.3.3 Durchgeführte Erkundungsmaßnahmen

Im Vorfeld der Sanierung wurden zunächst umfangreiche Erkundungsarbeiten und Untersuchungen im Bereich des Schachtes D10a und der BA unternommen. Insbesondere wurden eine statische Untersuchung und Bewertung des Schachtbauwerkes D10a, eine Dichtheitsprüfung der Sickerwassertanks, Schüttungsmessungen sowie ge-





ophysikalische Messungen zur Bestimmung des Schichtenaufbaus im äußeren Schachtbereich durchgeführt. Bei der Dichtheitsprüfung der Tanks wurde ein Pegelanstieg festgestellt, obwohl zuvor sämtliche Ableitungen im Vorschacht abgesperrt wurden. Dies ließ vermuten, dass aus dem umgebenden Erdreich Fremdwasser unkontrolliert über die Schadensstellen der Verbindungsleitungen in das Sickerwassersystem eindrang. Um weitere Informationen zur Herkunft des eindringenden Fremdwassers zu erhalten, wurden die bisher gemessenen Grundwasserpegelstände im Deponiebereich zum Vergleich herangezogen und festgestellt, dass der untere Teil des Schachtes D10a, der gesamte Sickerwasserspeichertank und die beiden Verbindungsleitungen im Bereich des Grundwasserhorizontes liegen. Es war davon auszugehen, dass Grundwasser über die Schäden in Leitung und Schacht in nicht unerheblichem Ausmaß in den Speichertank gelangte und dringender Handlungsbedarf gegeben war.

### **2.3.4 Planung und Durchführung der Sanierungen (2013/14)**

In der Folge wurde nach Sanierungsmöglichkeiten und technischen Lösungen gesucht, die eine großflächige Freilegung des Schachtes und der Sickerwassertanks entbehrlich machten. Als technisch und wirtschaftlich beste Lösung wurde die Erneuerung einer Verbindungsleitung durch grabenlosen Rohrvortrieb erachtet. Des Weiteren sollten der Schacht D10a mittels Inlinersanierung und der Tank mittels PE-Auskleidung langfristig gesichert und abgedichtet werden. Die Planung der Maßnahmen erfolgte durch die ICP mbH, die Ausführung durch die Fa. KMG Pipe Technologies GmbH, NL Ferrum Bau und Umwelt, aus Ursensollen. Die Fremdprüfung übernahm der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH aus Nürnberg.

#### **2.3.4.1 Erneuerung der Verbindungsleitung**

Aufgrund des Verlaufes und des beschriebenen Anschlusses der Sickerwasserableitungen an die Entlüftungsrohre und die Tankdecke wurde von einer Sanierung der Altleitungen abgesehen. Stattdessen wurde eine neue Verbindungsleitung zwischen dem Vorschacht D10a und dem Sickerwassertank in einer neuen Leitungstrasse eingebracht und an die Tankwand angeschlossen. Aus Kosten- und Wartungsgründen wurde nur eine neue Verbindungsleitung hergestellt, diese entsprechend dimensioniert und die beiden Altleitungen verschlossen und verdämmt. Daher musste eine hydraulische Verbindung zwischen den beiden Tankhälften hergestellt werden.

Das Einbringen der neuen Verbindungsleitung zwischen Schacht D10a und Sickerwassertank erfolgte durch Einrammen eines Stahlrohres DN 300 vom Sickerwassertank zum Schacht D10a mittels Rohrramme (System Tracto-Technik) und anschließendem Verlegen eines PE-Rohres  $d_a$  250 im Schutzrohr. Um eine zielgenaue Durchführung der Bohrung durchführen zu können, wurde im Vorfeld ein genaues Aufmaß von Schacht, Leitungen und Tank erstellt und der einzuhaltende Bohrwinkel bzw die Bohrlänge errechnet. Nach Herstellung der Kernbohrungen in Tank und



Schacht wurde zunächst eine "Pilotbohrung" mittels kleiner Erdrakete, die üblicherweise bei der Herstellung von Hausanschlüssen zur Anwendung kommt, durchgeführt. Nach zielgenauer Ankunft im Zielschacht konnte der eigentliche Rohrvortrieb beginnen. Hierfür wurde im Tank, der während der Arbeiten durchgehend bewettert wurde, eine entsprechende Vorrichtung aufgebaut und die Rohrramme samt davor befestigtem Stahlrohr exakt ausgerichtet. Nach Einpressen des Schutzrohres bis zum Zielschacht wurde das Bohrgut ausgespült, das neue Produktrohr aus PE 100 da 250 darin verlegt und mittels Ringraumdichtung angeschlossen. Das Schutzrohr wurde zur weiteren statischen Absicherung in der neuen Rohrtrasse belassen und der Ringraum zwischen dem neuen Produkt- und dem Stahlrohr kraftschlüssig verdämmt.

Für die hydraulische Verbindung der beiden Tankhälften wurde im oberen Bereich der Trennwand eine Kernlochbohrung ausgeführt, die anschließend mit einer PE-Rohrhülse ausgekleidet, die später in die Beckenauskleidung eingebunden wurde. Die Lüftungsleitungen blieben zur Sicherstellung der ordnungsgemäßen Belüftung der Sickerwassertanks bestehen, sie wurden aufgrund zahlreicher Schäden zusätzlich durch Einbringen von PE-Leitungen gesichert. Der im Grundwasserhorizont befindliche untere Ringraumbereich wurde verdämmt, um Hinterläufigkeiten zu unterbinden.



Abbildung 27: Ankunft der Pilotbohrung im Zielschacht D10a



Abbildung 28: Installation und Ausrichtung der Erdrakete im Sickerwassertank



Abbildung 29: Eingerammtes Stahlrohr



Abbildung 30: Neue PE-Verbindungsleitung



### 2.3.4.2 GFK-Inliner-Sanierung des Schachtes D10a

Im Schacht D10a (DN 1.200) wurde zur langfristigen Sicherung des Bauwerks eine Inliner-Sanierung durchgeführt. Hierfür wurde ein dünnwandiger Innenschacht aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) in das bestehende Schachtbauwerk eingestellt (Schacht-in-Schacht-Verfahren). Aufgrund der räumlich sehr begrenzten Verhältnisse wurde GFK als Schachtmaterial für den Inliner gewählt. Vor dem Einbau des GFK-Schachtes mussten sämtliche Einbauten und Steigeisen aus dem vorhandenen Schachtbauwerk entfernt und Teile der Schachtsohle abgebrochen werden. Anschließend wurden der bestehende Betonschacht mittels Hochdruck gereinigt und Bruchstellen verspachtelt. Auf Grundlage der durchgeführten Bestandsaufnahme wurde eine Werkszeichnung des Inliner-Schachtes (Verlegeplan) angefertigt und eine prüffähige Statik erstellt. Des Weiteren war vom Hersteller ein Nachweis zur Sickerwasser- und Deponiegasbeständigkeit zu liefern. Der GFK-Fertigteilschacht  $d_a$  1.099 wurde mit außenbündigen Kupplungen in einer Wandstärke von 27 mm gefertigt, die Schachthöhe betrug ca. 17,50 m. Am Inlinerschacht waren 3 Zuläufe (sanierte AZ-Leitungen, s. Kap. 2.2) und ein Ablauf (neue Verbindungsleitung, s. Kap. 2.3.4.1) anzuschließen, die Sohlplatte wurde mit Auftriebssicherung und angepasstem Gerinne vorgefertigt. Beim Einbau musste zunächst das vorgefertigte Schachtunterteil ausgerichtet und im Bereich der Leitungsanschlüsse angepasst werden. Die verschiedenen Schachtsegmente wurden an den Stoßfugen mit harzgetränkten Glasfaserstreifen kraftschlüssig verbunden. In den sich ergebenden Ringspalt zwischen bestehendem Beton- und neuem GFK-Inlinerschacht wurden Abstandshalter montiert, die Leitungen durch GFK-Lamine wasserdicht und sohlgleich angeschlossen. Die erforderlichen Laminierarbeiten wurden von qualifiziertem Personal ("Laminierpass") fachgerecht ausgeführt. Abschließend wurde der Ringraum mit fließfähigem Spezialmörtel verdämmt, um die Lage des GFK-Schachtes sicher- und einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Alt- und Neuschacht herzustellen. Die Verfüllung musste aufgrund der Schachthöhe abschnittsweise erfolgen. Die undichten Stellen im Altschacht wurden zuvor abgedichtet.



Abbildung 31: Setzen des GFK-Inliners

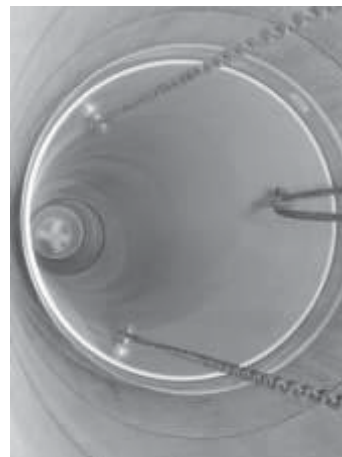


Abbildung 32: Setzen des Schachtunterteils



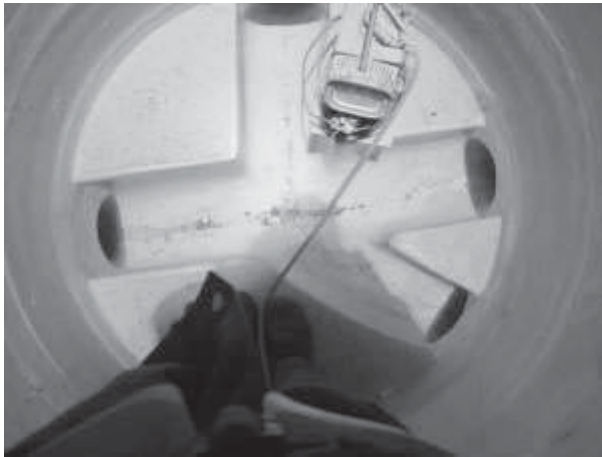


Abbildung 33: Blick auf das GFK-Gerinne



Abbildung 34: Anschluss an Betonschacht

#### 2.3.4.3 Auskleidung des unterirdischen Sickerwassertanks

Der unterirdische Sickerwassertank wurde zur langfristigen Gewährleistung der Dichtigkeit ebenfalls saniert. Hierfür wurden sämtliche Oberflächen der beiden Tankhälften (Innenwände, Boden, Decke, Trennwand, unterer Bereich des Zugangsschachtes mit Podest) mit PE-Platten ausgekleidet und die einmündenden Leitungen eingebunden.

Vor Beginn der Auskleidungsarbeiten wurde zunächst eine entsprechende Wasserhaltung eingerichtet, die Speichertanks entleert, Inkrustationen entfernt und die Oberflächen mit Hochdruck gereinigt. Anschließend wurden die beiden Tanks begutachtet, starke Beschädigungen oder Undichtigkeiten wurden hierbei nicht festgestellt.

Für die Auskleidung kamen PE-Platten mit Abstandhaltern zur Anwendung. Die Platten mussten zur Drainage von möglicherweise an der Tankwand anfallendem Wasser mit Abstandsnoppen versehen sein. Im Raster der Plattengrößen wurden PE-Montageleisten an Wand/Boden/Decke angebracht, die Platten daran befestigt und mittels Extrusionsschweißung dicht miteinander verbunden. Die Pumpensümpfe am Tiefpunkt der jeweiligen Tankhälfte wurden ebenfalls ausgekleidet, außerdem der untere Bereich des Zugangsschachtes bis über den dort anstehenden Grundwasserhorizont.

Die in das Becken mündenden Leitungen mussten fachgerecht in die neue PE-Innenbeschichtung eingebunden werden. Die neu hergestellte Verbindungsleitung vom Schacht D10a wurde mittels Ringraumdichtung am Stahlbetontank und anschließender Verschweißung mit der PE-Auskleidung angeschlossen. Die beiden in die Decke mündenden Entlüftungsrohre aus Asbestzement wurden über das eingezogene PE-Reliningrohr mit der Deckenauskleidung verschweißt. Zuvor wurde der Durchdringungsbereich von Inkrustationen befreit und jeweils ein GFK-Longliner in die Anschlussbereiche gesetzt. Diese dienten zum einen als Schalung für die Verdämmung der alten Verbindungsleitungen und zum anderen zur Abdichtung der Schadenstellen in den Entlüftungsleitungen.



Abbildung 35: Sickerwassertank vor und ...



Abbildung 36: ...nach der PE-Auskleidung



Abbildung 37: Klickplatten mit Montageleisten

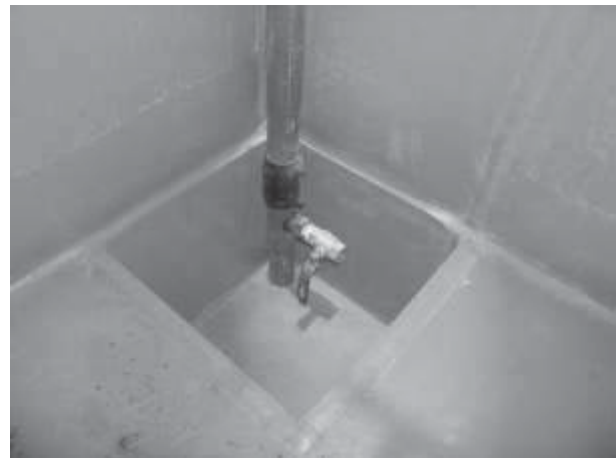


Abbildung 38: Pumpensumpf, Kontrollrohr

Um eine Dichtigkeit der PE-Auskleidung im Betrieb permanent kontrollieren zu können, wurde je ein PE-Rohr  $d_a$  63 am tiefsten Punkt (Pumpensumpf) durch die PE-Auskleidung bis auf die Tankwand geführt und mit einem PE-Kugelhahn versehen. Über diese Kontrollrohre kann die Dichtigkeit der Auskleidung kontrolliert und möglicherweise dahinter entstehendes Kondenswasser bzw. von außen eindringende Feuchtigkeit abgelassen werden. Zur Erleichterung der Wartung wurden diese Pegelrohre im Zustiegschacht nach oben geführt, sodass eine Dichtheitskontrolle mittels Lichtlot und ggf. das Abpumpen von eingedrungenem Wasser von der Deponieoberfläche ausgeführt werden kann. Alle erforderlichen Arbeiten (insbesondere die Schweißarbeiten) durften nur von qualifiziertem Personal ausgeführt werden. Die Schweißung der PE-Platten erfolgte entsprechend der DVS-Richtlinie 2227-1, ferner musste ein Ausbildungsnachweis des Deutschen Verbands für Schweißtechnik (DVS) vorgelegt werden. Die Prüfung der Schweißnähte erfolgte mittels Hochspannung gemäß DVS 2206 mit einer Prüfspannung von ca. 5000 Volt/mm Plattendicke. Alle Schweißnähte wurden hierzu mit eingelegten Prüfdrähten präpariert.

Nach Fertigstellung der Auskleidung wurde eine Dichtheitsprüfung nach DIN EN 1610 durch einen neutralen Gutachter durchgeführt, die positiv ausfiel.

2.3.4.4 Ausführungsplan der Sanierungsmaßnahmen

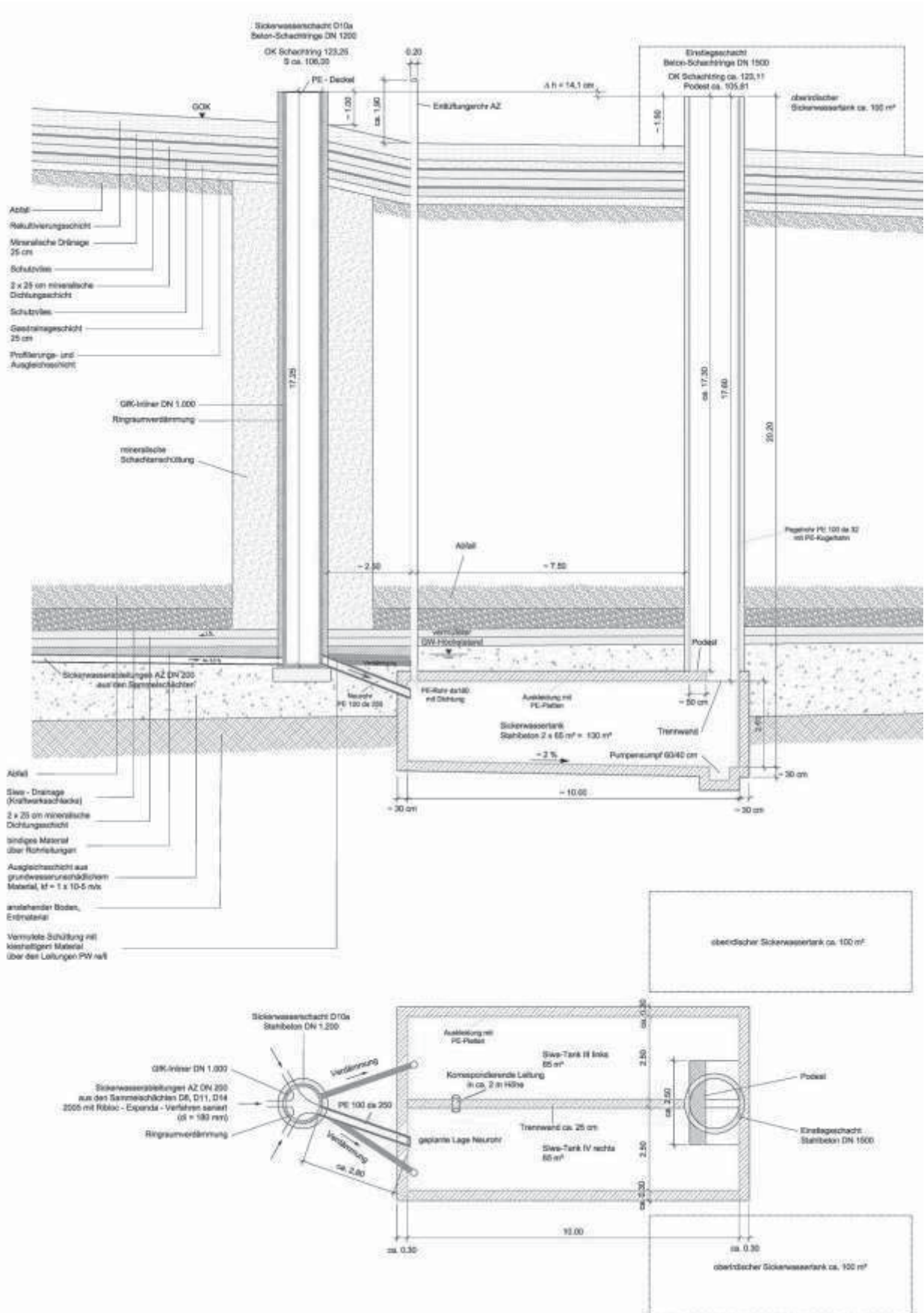


Abbildung 39: Sanierung von Sickerwassertank, Schacht D10a und Verbindungsleitung



### 3 Fazit

Mit den beschriebenen Maßnahmen konnte das Sickerwassererfassungssystem im Deponieabschnitt 3 ganzheitlich mit neuen Überlegungen, Konzeptionen und Techniken saniert werden. Neben den fünf Sammelschächten wurden die Sickerwasserableiter, der Vorschacht D10a, der Sickerwassertank und die Verbindungsleitung dazwischen erfolgreich saniert und langfristig gesichert.

Die Sanierungsmaßnahmen konnten durch eine enge Zusammenarbeit von Bauherr und Planer schon während der Planungsphase und später während der Bauphase mit der Baufirma und der Fremdüberwachung ohne große Probleme zum erfolgreichen Abschluss geführt werden, auch wenn hin und wieder Änderungen an den ursprünglichen Planungen vorgenommen werden mussten. Die gründliche Planung sowie die Durchführung durch ein fachkundiges, leistungsfähiges und erfahrenes Bauunternehmen aus dem Spezialtiefbau haben sich bezahlt gemacht.

Vielleicht kann dieser Bericht Anregungen für die Lösung ähnlicher Probleme anderenorts geben.

### 4 Literatur

KMG PT GmbH	2012	bi Umweltbau 2/12: Herausforderung für Wartung und Sanierung
Kässinger, Lobenhofer, Morlok	2012	bi Umweltbau 4/12: Ein neuer Schacht für die Deponie Stockstadt
LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“	2013	Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 8-1 „Rohre, Schächte und Bauteile in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien“

#### **Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. (FH) Jörg Kässinger  
Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda  
und Partner (ICP) mbH  
Auf der Breit 11  
76227 Karlsruhe  
Tel. 0721/94477-16  
E-Mail: kaessinger@icp-ing.de  
Website: www.icp-ing.de

Dipl.-Geologe Jürgen Morlok  
Landratsamt Aschaffenburg  
Abfallwirtschaft  
Bayernstraße 18  
63739 Aschaffenburg  
Tel. 06021/394-411  
E-Mail: juergen.morlok@Lra-ab.bayern.de  
Website: www.abfallwirtschaft-ab.de





# Das LAMBDA-RWD-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Nitri-/Denitrifikation in der Sickerwasser-aufbereitung anhand eines Praxisbeispiels in NRW

Volker Rekers, Frank Lenzen, Uwe Walter, Martin Denecke

LAMBDA Gesellschaft für Gastechnik mbH, Herten  
AWA Entsorgung GmbH, Aachen  
Universität Duisburg-Essen

## Zusammenfassung

Durch die Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden vom Verfahren der klassischen Denitrifikation/Nitrifikation auf das Deammonifikationsverfahren LAMBDA-RWD wurden erhebliche Kosteneinsparungen erzielt. Durch Einbindung der Aktivkohle-Behandlungsstufe in den Prozess der Stickstoffeliminierung, wurde ein Stickstoffabbau von mehr als 97%, bei gleichzeitiger Reduzierung der Betriebskosten, erreicht. Durch Umstellung auf das LAMBDA-RWD-Verfahren konnten für die Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf Warden bei den wesentlichen Kostenfaktoren Energie, Methanol und Überschussschlamm-Entsorgung, Einsparungen von insgesamt ca. € 1,85 pro Kubikmeter Sickerwasser (entspricht > 26%) realisiert werden. Zusätzlich konnte gegenüber dem Referenzzeitraum auf die Kühlung der Biologie verzichtet werden. Durch die ressourcenschonendere Betriebsweise der Anlage wird ein aktiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Im Hinblick auf die Betriebssicherheit wurden durch die Umstellung der Anlage auf das LAMBDA-RWD-Verfahren keine negativen Einflüsse festgestellt.

## Stichworte

Deammonifikation, RWD-Verfahren, Deponiesickerwasser, Energiekosten, Technik, Verfahrenssicherheit.

## 1 Einleitung

Im Mai 2012 wurde die LAMBDA Gesellschaft für Gastechnik mbH von der AWA Entsorgung GmbH mit der Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden auf das LAMBDA-RWD-Verfahren beauftragt. Als Vertragsziel wurde zwischen den Vertragsparteien eine Reduzierung der spezifischen Kosten für die Sickerwasserbehandlung bei gleichbleibender Betriebssicherheit der Behandlungsanlage vereinbart.

LAMBDA hatte bereits im Jahr 2003 die Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Zentraldeponie Emscherbruch erfolgreich auf das RWD-Verfahren umgestellt. Die Sickerwasserbehandlungsanlage wird seit der Umstellung unter Einhaltung der Direktleitergrenzwerte mit Jahresmengen von > 150.000 m<sup>3</sup> betrieben.





Im Jahr 2007 wurde die Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Am Breitenberg ebenfalls erfolgreich auf Deammonifikation umgestellt.

Aus den Erfahrungen der beiden genannten Projekte konnte abgeleitet werden, dass die Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlagen auf eine deammonifizierende Biologie, wie dies im LAMBDA-RWD-Verfahren praktiziert wird, heute technisch möglich ist. Bei der Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden stand daher weniger die Praxistauglichkeit des Verfahrens im Mittelpunkt der Betrachtungen, vielmehr mussten die Erwartungen im Hinblick auf die Energiebilanz der Anlage und die Einsparung an Betriebskosten erfüllt werden.

## 2 Das RWD-Verfahren

Zweistufiges Verfahren auf Basis der Deammonifikation zur kostengünstigen Behandlung von Deponiesickerwasser

Abwasserbehandlungsanlagen bergen häufig ein großes Einsparpotenzial. Neben der technischen Optimierung der Anlagen zum Beispiel durch Pumpenaustausch, Abwärmenutzung und Regelung der Lufteintragung bleiben Einsparpotentiale, die sich durch den Einsatz unkonventioneller biologischer Abbauprozesse ergeben, oft ungenutzt. Besonders bei der Behandlung stickstoffbelasteter Abwässer mit geringem BSB-Gehalt lohnt sich der Einsatz der Deammonifikation anstelle der klassischen Nitrifikation/Denitrifikation. Die für diesen Prozess erforderliche Bakterienpopulation bedient sich eines verkürzten Stoffwechselweges, bei dem keine zusätzliche organische Kohlenstoffquelle und nur wenig Sauerstoff benötigt werden. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, hat LAMBDA mit dem RWD-Verfahren einen innovativen Ansatz zur Praxisreife gebracht, welcher sich auf vielen Abwasserbehandlungsanlagen nutzen lässt. Grundlage ist dabei eine zweistufige Prozessführung, bei der sowohl suspendierte als auch immobilisierte Biomasse zum Einsatz kommt.

Bei der Umstellung des biologischen Verfahrens wird die bestehende Anlagentechnik weiter genutzt. In der Regel kann die vorhandene Mess- und Regeltechnik auch für die Steuerung der anaeroben Ammoniumoxidation als entscheidendem Teilschritt der Deammonifikation weiter verwendet werden. Um die rasche Etablierung einer anaeroben Ammoniumoxidation sicher zu stellen, sollte die bestehende Anlage über eine permanente Ammonium-Messung verfügen. Somit fallen nur geringfügige Investitionskosten an und der eingeleitete Prozess ist jederzeit reversibel.

Die Umstellung auf Deammonifikation wurde bereits auf mehreren Sickerwasserbehandlungsanlagen erfolgreich umgesetzt. Der Schwerpunkt der Leistung der LAMBDA liegt dabei in der Beratung und Unterstützung des Anlagenbetreibers während der Umstellung. Neben der intensiven ingenieurtechnischen Betreuung während der Einfahr-

phase der Anlage bietet die LAMBDA Impfschlamm zur schnelleren Etablierung des neuen Verfahrens an, so dass sich die Umstellung auf Deammonifikation schnell realisieren lässt.

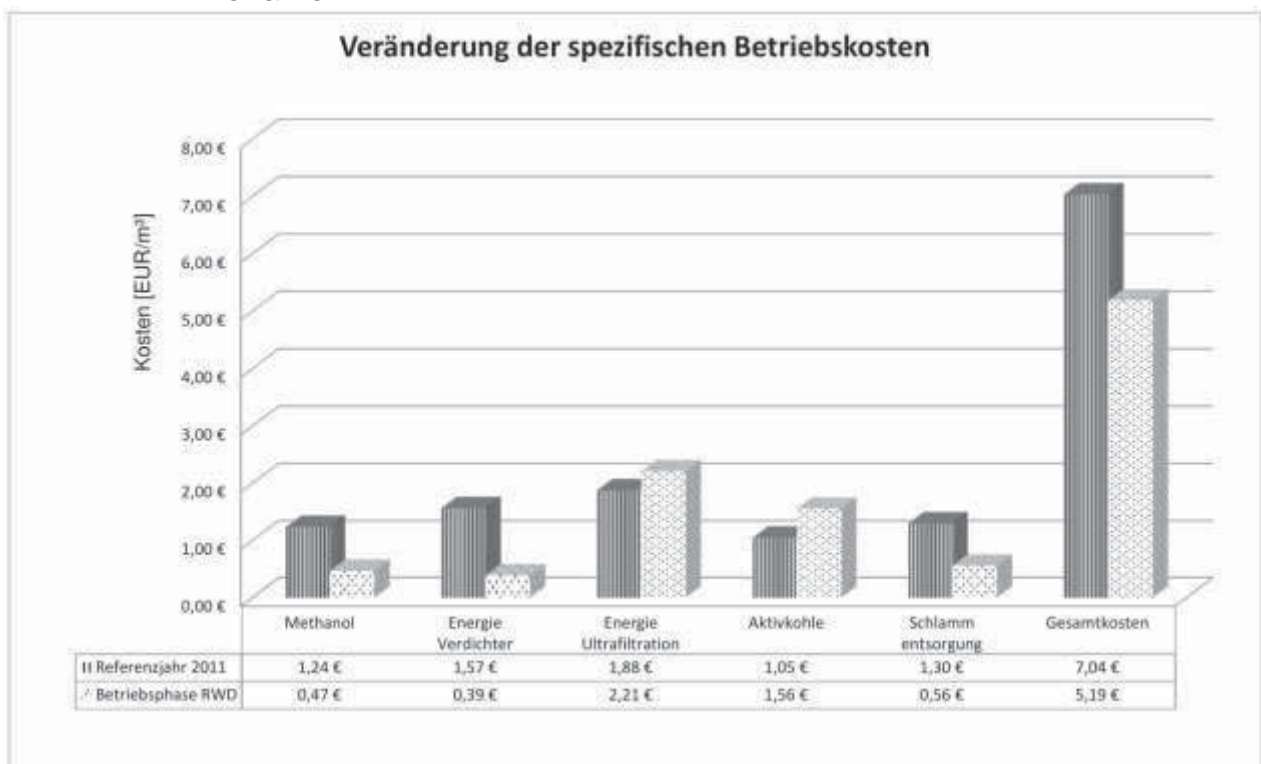
### 3 Betriebsergebnisse Deponie Alsdorf Warden

Die Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden, wurde im Mai 2012 auf das RWD-Verfahren der LAMBDA umgestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Anlage mit der üblichen Verfahrenskombination Denitrifikation /Nitrifikation/ Ultrafiltration und Aktivkohle betrieben. Die Aktivkohle-Stufe wurde an der Sickerwasserbehandlungsanlage nachträglich im Jahr 2002 als Nachfolgelösung zu einer Eindampfungs- und Trocknungsstufe installiert.

Beim Vergleich der Betriebskosten werden die Aufwendungen für Methanol, Strom (Verdichter/Ultrafiltration), Aktivkohle und die Entsorgung von Überschussschlamm betrachtet. Weitere Einsparpotentiale für Entschäumer und nicht benötigte Wartungsleistungen an Verdichteraggregaten, wurden nicht eingerechnet.

Als Referenzzeitraum für die Berechnung der spezifischen Einsparungen wurde das Betriebsjahr 2011 gewählt. Zur Berechnung der Einsparungen wurden die spezifischen Kosten der einzelnen Kostenfaktoren zwischen dem Referenzjahr (Betriebsjahr 2011) und der Betriebsphase des RWD-Verfahrens im Zeitraum 1. Januar 2013 bis 14. September 2014 gegenübergestellt.

Abb. 1: Vergleich der spezifischen Betriebskosten Referenzjahr 2011/ Betriebsphase RWD-Verfahren:





## 4 Ergebnisse im Einzelnen

### 4.1 Methanolverbrauch

Im Referenzzeitraum wurde die Sickerwasserbehandlungsanlage mit einer Methanoldosierung von 3,75 l/m<sup>3</sup> betrieben. Nach der Umstellung der Anlage auf das RWD-Verfahren wurde dieser Wert im Durchschnitt auf 0,84 l/m<sup>3</sup> gesenkt.

Auf Grund der drastischen Reduzierung der zudosierten Methanolmenge konnte die original verbaute Methanolpumpe nur noch mit sehr geringen Drehzahlen betrieben werden, was wiederholt zu störungsbedingten Ausfällen der Pumpe infolge von Überhitzungen führte. Da durch die Umstellung auf verdünntes Methanol keine entscheidende Verbesserung erzielt werden konnte, wurde die Methanolpumpe schließlich gegen eine Pumpe mit angepasster Leistung ausgetauscht.

Die Reduzierung des Methanolverbrauches führte zu Einsparungen von ca. 0,77 EUR pro Kubikmeter behandeltem Sickerwasser, bei gleichzeitiger Erhöhung des Stickstoffabbaus.

### 4.2 Stromverbrauch Belüfterverdichter

Im Zuge der Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage konnte die Leistung der Belüfterverdichter erwartungsgemäß reduziert werden. Durch die geringere Luftmenge konnten zwei von drei Belüfterverdichtern abgeschaltet werden. Die stillgelegten Belüfterverdichter stehen heute als Reserveaggregate zu Verfügung. Bedingt durch die Reduzierung der Belüftungsleistung konnte der Stromverbrauch um 7,65 kWh je Kubikmeter behandeltem Sickerwasser reduziert werden.

Infolge der Umstellung der Anlage auf das RWD-Verfahren reduzierten sich die spezifischen Stromkosten für die Belüfterverdichter je behandeltem Kubikmeter Sickerwasser um ca. 1,18 Euro. Die eingesparten Wartungskosten an den stillgelegten Belüfterverdichtern wurden nicht mit eingerechnet.

### 4.3 Stromverbrauch Ultrafiltrationspumpen

Bei der Ultrafiltrationseinheit ist durch den veränderten Flux-Wert eine geringfügig höhere Pumpenleistung erforderlich. Durch den Anstieg der Pumpenleistung erhöht sich der Stromverbrauch um 2,20 kWh je Kubikmeter behandeltem Sickerwasser.

Durch die Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage auf das RWD-Verfahren erhöhen sich die spezifischen Kosten im Bereich der Ultrafiltration um ca. 0,33 Euro pro Kubikmeter behandeltem Sickerwasser.



#### 4.4 Aktivkohle

Bei der Aktivkohle ergab sich durch die Umstellung der Sickerwasserbehandlungsanlage auf das RWD-Verfahren ein geringfügig erhöhter Verbrauch. Während der Umstellungsphase wurden unterschiedliche Aktivkohlen getestet. Hinsichtlich des Beitrages zum Stickstoffabbau konnten bei den getesteten Aktivkohlen keine Unterschiede festgestellt werden.

Infolge der Umstellung der Anlage auf das RWD-Verfahren erhöhten sich die spezifischen Kosten für Aktivkohle je behandeltem Kubikmeter Sickerwasser um ca. 0,51 Euro.

#### 4.5 Überschussschlamm Entsorgung

Wie erwartet, verringerte sich durch die Umstellung der Anlage auf das RWD-Verfahren die Produktion von Überschussschlamm erheblich. Die geringere Überschussschlammproduktion führen wir auf das geringere Wachstum heterotropher Bakterien in Folge der reduzierten Methanoldosierung und das langsame Wachstum der für die anaerobe Ammoniumoxidation verantwortlichen Planctomyceten (Generationszeit <11Tage) zurück.

Bei der Entsorgung des überschüssigen Schlamms wurde eine Einsparung von 0,74 Euro je behandeltem Kubikmeter Sickerwasser erreicht.

### 5 Betriebssicherheit

In der Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden wurden seit der Umstellung auf das RWD-Verfahren mehr als 100.000 m<sup>3</sup> Deponiesickerwasser sicher behandelt.

Während der Verfahrensumstellung ist es zu einem störungsbedingtem Ausfall der Anlage gekommen. Wir führen diese Störung auf eine Phasentrennung des technischen Methanols zurück, in deren Verlauf toxische Nebenbestandteile in konzentrierter Form in die Biologie gelangt sind und zu einer deutlichen Reduzierung der biologischen Aktivität geführt haben. Diese störungsbedingte Unterbrechung konnte durch das Nachfüllen von „frischem“ Methanol innerhalb kürzester Zeit behoben werden, da sich die Biologie binnen weniger Tage erholt hatte.

Ansonsten sind im betrachteten Betriebszeitraum nach der Umstellung keine nennenswerten Störungen aufgetreten. Trotz mehrerer Stromausfällen und schlagartiger Unterbrechungen der Anströmung der Membranen der Ultrafiltrationseinheit traten im Gegensatz zu den Erfahrungen mit der konventionellen Fahrweise keine Verblockungen der Ultrafiltrationsmodule auf.



Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass an der Sickerwasserbehandlungsanlage auf der Deponie Alsdorf-Warden durch die Umstellung auf das RWD-Verfahren, Einsparungen auf dem in vorherigen Projekten erreichten Niveau von ca. € 1,85 pro Kubikmeter behandeltem Sickerwasser realisiert werden konnten. Im Vergleich zur konventionellen Betriebsweise entspricht dies einer Reduzierung der Betriebskosten um mehr als 26 % bei unverändert hoher Anlagenverfügbarkeit.

**Ansprechpartner der Autoren:**

Volker Rekers  
LAMBDA Gesellschaft für Gastechnik mbH  
Hertener Mark 3  
45699 Herten  
Fon: +49 2366 9344 - 440  
Fax: +49 2366 9344 – 444  
E-Mail [vrekers@lambda.de](mailto:vrekers@lambda.de)  
Internet: <http://www.lambda.de/>





# Die Deponie als „Nachnutzung“ der Deponie – Grundzüge und Praxisbeispiele

Ulrich Bartl, Peggy Hiemann

Grontmij GmbH, Köln

## Inhaltsangabe

Zunächst werden kurz mögliche Gründe für die Deponieerweiterung bzw. eine Fortführung eines Ablagerungsbetriebes eines bestehenden Deponiestandortes erläutert. Anschließend werden die grundsätzlichen Ausführungsmöglichkeiten des „Deponie auf Deponie“ – Konzeptes dargestellt. Weiterhin wird auf allgemeine Grundsätze und Anforderungen eingegangen. Im Anschluss hieran werden anhand aktuell geplanter sowie ausgeführter Projektbeispiele zur Deponieerweiterung / -neubau, die in ihren Grundzügen dem Prinzip „Deponie auf Deponie“ entsprechen, einige besondere Probleme, und Lösungsansätze vorgestellt. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung.

## Stichworte

Deponie, Nachnutzung, multifunktionale Abdichtung, Deponieerweiterung

## 1 Einleitung

### 1.1 Veranlassung

Wird eine Deponie stillgelegt und geht diese in die Nachsorgephase über, muss über eine weitere Nutzung des Geländes entschieden werden. Es gibt dahingehend vielfältige Möglichkeiten. Die Flächen abgeschlossene und rekultivierte Deponien werden mittlerweile oftmals als Energieparks weitergenutzt. Eine Deponieoberfläche bietet zumeist viel Platz für die Installation von beispielsweise Windkraft- oder Solar- bzw. Photovoltaikanlagen. Eine weitere mögliche Art der Nachnutzung wäre durch Einrichtungen für die Öffentlichkeit, z.B. als Freizeit- und Erholungsort. Eine erfolgreiche Nachnutzung als Gewerbe- oder Industriestandort wurde, bei geeigneten Rahmenbedingungen, ebenfalls in verschiedenen Projekten bereits realisiert. Und schließlich gibt es auch die Möglichkeit, den Deponiestandort als Ablagerungsort für Abfälle weiter zu nutzen. Hier käme die Deponie als „Nachnutzung“ von in der Stilllegungsphase befindlichen Deponien zur Anwendung. Die möglichen Gründe, einen Deponiestandort als solchen weiter zu nutzen können variieren, einige hiervon werden im Folgenden erläutert.



## 1.2 Mögliche Gründe für Deponieerweiterungen

### 1.2.1 Erhöhung der Deponiekapazitäten

Vielerorts und regional unterschiedlich ausgeprägt zeigt sich ein Bedarf an Deponiekapazitäten, insbesondere an DK I-Deponien. Mit den veränderten Anforderungen an die technischen Einrichtungen von Deponien in den zurückliegenden Jahren mussten viele Deponien stillgelegt werden, da sie den neuen Anforderungen nicht mehr entsprachen. Von der Politik wurde zudem eine Kreislaufwirtschaft propagiert, die ohne Deponien auskommen sollte. Dieser Wunsch konnte allerdings bislang nicht realisiert werden. Auch in Zukunft werden Deponien zur Entsorgung von Abfällen unabdingbar sein und die Deponie als Schadstoffseneke wird fester Bestandteil der Abfallwirtschaft bleiben. Nun müssen Städte und Gemeinden trotz der Schließung vieler Deponien die Entsorgung von z.B. Erdaushub sowie Bauschutt auch weiterhin sicherstellen, denn fehlende regionale Entsorgungsmöglichkeiten führen zu höheren Entsorgungs- und Transportkosten, was zudem mit steigenden CO<sup>2</sup>-Emissionen einhergeht. Daher werden Möglichkeiten gesucht, regional sinnvolle Entsorgungsmöglichkeiten auch weiterhin zu ermöglichen. Eine Möglichkeit wäre hier die Deponieerweiterung mit einer Konzeption nach dem „Deponie auf Deponie“ Prinzip. (CZURDA, 2014)

### 1.2.2 Einnahmen aus Abfallanlieferungen

Die Finanzierung der Stilllegungs- und Nachsorgekosten erfolgt aus den Rückstellungen die während der Ablagerungsphase gebildet werden sollten. Nicht immer sind Rückstellungen in ausreichender Höhe vorhanden, was dann u.a. dazu führt, dass die Betreiber nach geeigneten Einnahmemöglichkeiten suchen müssen. Somit kann eine Deponieerweiterung dabei unterstützen, die finanziellen Verpflichtungen aus Stilllegung und Nachsorge zu optimieren und gebührenstabilisierend wirken.

### 1.2.3 Schwierigkeiten bei der Suche neuer Deponiestandorte

Erfahrungsgemäß ist die Suche nach neuen Deponiestandorten von deutlichen Schwierigkeiten geprägt. Interessen- und Bürgergemeinschaften stellen sich oft gegen den Bau neuer Deponien, da diese in der Bevölkerung als Bereiche mit einem sehr hohen Gefährdungspotential wahrgenommen werden. Planfeststellungsverfahren, Umweltverträglichkeitsprüfungen und ggf. weitere Genehmigungen sind erforderlich, um den Bau einer neuen Deponie realisieren zu können. Dies ist sehr zeitaufwendig und bedarf einer genauen vorausgehenden Planung. Bei der Weiternutzung eines bereits genehmigten und bestehenden Deponiegeländes, können technische Einrichtungen und Bauwerke, wie Anlieferungsbereiche, Reinigungs- und Entwässerungsanlagen i.d.R. weitergenutzt werden. Je nach standortspezifischen Voraussetzungen kann eine Weiterführung des



Ablagerungsbetriebes, auch bei einer „Deponie auf Deponie“, mit genehmigungsrechtlich geringerem Aufwand verbunden sein. Dies trifft zumeist dann zu, wenn durch die beabsichtigte Deponieerweiterung keine Verschlechterung der Umweltauswirkungen zu erwarten ist (z.B. Erhöhung des Verkehrsaufkommens).

#### **1.2.4 Sanierung und Sicherung älterer Deponieabschnitte**

Manchmal bietet auch der Bedarf der Sicherung und/oder Sanierung von Bereichen älterer Deponiestandorten die Grundlage, eine Konzeption der Deponie auf Deponie, in die Überlegungen mit einzubeziehen. In Abhängigkeit des eingebauten Abfallinventars sowie der Einbaumethode (Kompaktor, lageweise Verdichtung, Einschleppen mit der Raupe), können bei einem Deponiekörper z.T. erhebliche Setzungen auftreten. Teilweise sind auf Altdeponien Böschungsneigungen anzutreffen, die für das Aufbringen einer qualifizierten Oberflächenabdichtung nicht geeignet sind, und die u.U. auch nicht dauerhaft standsicher sind. Ältere Deponien oder Deponieabschnitte weisen möglicherweise nur eine unzureichende Oberflächenabdeckung auf, wodurch Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringen kann. Somit ergibt sich eine Sickerwasserproblematik, die bei unzureichender Sickerwasserfassung Risiken für das Grundwasser und ggf. auch die Standsicherheit nach sich ziehen kann. Eine Überdeckung dieser Teilbereiche mit einem neuen Abdichtungselement das zudem auch als Basisdichtung einer neuen Deponie dient, kann bei entsprechender Gestaltung zu einer Verbesserung der Standsicherheit führen und zudem das Gefährdungspotential, welches von der Altdeponie ausgehen kann, minimieren.

## **2 Konzeption Deponie auf Deponie**

### **2.1 Der Grundgedanke**

#### **2.1.1 Die multifunktionale Abdichtung**

Das wesentliche Element beim Prinzip „Deponie auf Deponie“ ist die Integrationen von mehreren Funktionen in ein Abdichtungssystem. In der Literatur finden sich zum Teil unterschiedliche Begrifflichkeiten für diese Abdichtung. Das LANUV Arbeitsblatt 13 verwendet den Begriff der „bifunktionalen Abdichtung“. In anderen Literaturquellen hat sich der Begriff der „mehrfach funktionalen Dichtung“ oder auch der „multifunktionalen Abdichtung“ durchgesetzt. In allen Fällen ist ein Dichtungselement gemeint, welches zwei Aufgaben erfüllen soll. Es soll zum Einen die Aufgaben einer Oberflächenabdichtung für den unterhalb liegenden Deponieabschnitt bilden, zum Anderen aber auch die Basisab-



dichtung für den neuen darüber liegenden Deponieabschnitt darstellen. Hierbei sind die Systeme entsprechend der jeweiligen Anforderungen sinnvoll miteinander zu kombinieren. So kann beispielsweise die Rekultivierungsschicht, die eigentlich fester Bestandteil einer Oberflächenabdichtung ist, hier entfallen. Auch muss die mineralische Dichtungskomponente nicht additiv für die Oberflächenabdichtung und die Basisabdichtung ausgeführt werden. Im LANUV Arbeitsblatt 13 wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass „die unterschiedlichen Funktionen der Komponenten beider Systeme ganz oder teilweise in gemeinsamen Komponenten zusammengefasst werden dürfen, wenn dies unter Wahrung der funktionalen Eigenschaften technisch möglich ist.“ (LANUV, 2012, S. 14) In Tabelle 1 sind die Anforderungen an eine Multifunktionale Abdichtung nach dem LANUV Arbeitsblatt 13 dargestellt.

*Tabelle 1 Anforderungen an eine Multifunktionale Abdichtung  
(Beispiel für die Überlagerung eines DKII-Abschnittes durch einen DK I-Abschnitt)*

Funktion für unteren Deponiekörper (DK II)	Komponente	Funktion für oberen Deponiekörper (DK I)
	Abfall DK I	Ablagerung
Rekultivierungsschicht	-	
Entwässerungsschicht Oberfläche	<b>Kiesdränage</b> 16/32 mm oder ähnlich <b>Sickerrohre</b>	Entwässerungsschicht Basis
1. Abdichtungskomponente	<b>Kunststoffdichtungsbahn</b> $d \geq 2,5 \text{ mm}$	1. (und einzige) Abdichtungskomponente
2. Abdichtungskomponente	<b>Tonmineralische Dichtungsschicht</b> $d \geq 1 \text{ m}$ bzw. $0,5 \text{ m}$ <sup>1)</sup> $k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	geotechnische Barriere
Ausgleichs-/Gasdränschicht	<b>Ausgleichsschicht</b>	Tragschicht
Ablagerung	Abfall DK II	

<sup>1)</sup> Die Anforderungen an die Mächtigkeit richten sich nach den Vorgaben des Anhangs 1 Nr. 1.2 Ziffern 3. und 4.

### 2.1.2 Ausführungsmöglichkeiten

Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie eine Deponieerweiterung durch das „Deponie auf Deponie“ Prinzip ausgeführt werden kann.

Vermutlich am Häufigsten anzutreffen ist die Anlehnung eines neuen Deponiekörpers an einen bereits bestehenden Deponieabschnitt (Deponiealtkörper). In Abhängigkeit der technischen Gegebenheiten sowie der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen sind, als Voraussetzung der Abfallablagerung in einem neuen Deponieabschnitt der sich an die Böschung eines Deponiealtkörpers anlehnt, die entsprechenden Dichtungselemente einzubauen. Hier liegt die multifunktionale Abdichtung im Hangbereich zwischen der Altdeponie und der neuen, seitlichen Erweiterung. Anschlusspunkte ergeben

sich bei dieser Ausführungsvariante im oberen Hangbereich mit der Oberflächenabdichtung der Altdeponie und im unteren Hangbereich mit der Basisabdichtung des geplanten neuen seitlichen Deponieabschnittes. (siehe Abbildung 1)

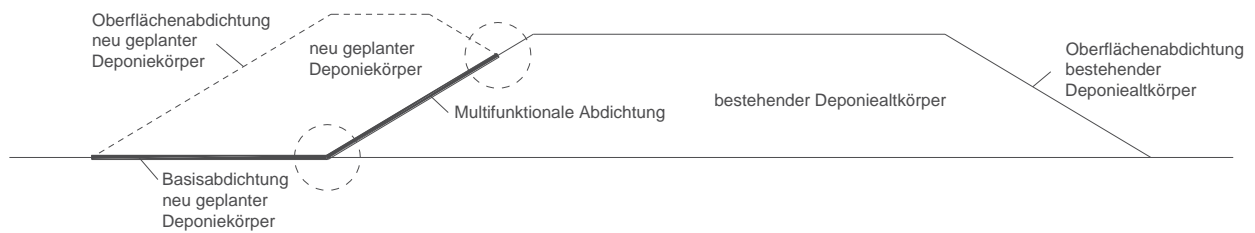


Abbildung 1 Variante 1: Deponieendverfüllung mit seitlicher Erweiterung

Eine andere Möglichkeit besteht in der Erweiterung eines bestehenden Deponiealtkörpers lediglich in der Höhe, d.h. durch die Überlagerung im bestehenden Plateaubereich. Die Multifunktionale Abdichtung liegt hier zwischen der Altdeponie und dem neuen Kegelbereich und nimmt damit die in Kap. 2.1.1 beschriebenen Aufgaben wahr. Anschlusspunkte ergeben sich hier ausschließlich mit der Oberflächenabdichtung der Altdeponie. Das Grundprinzip ist in Abbildung 2 dargestellt.

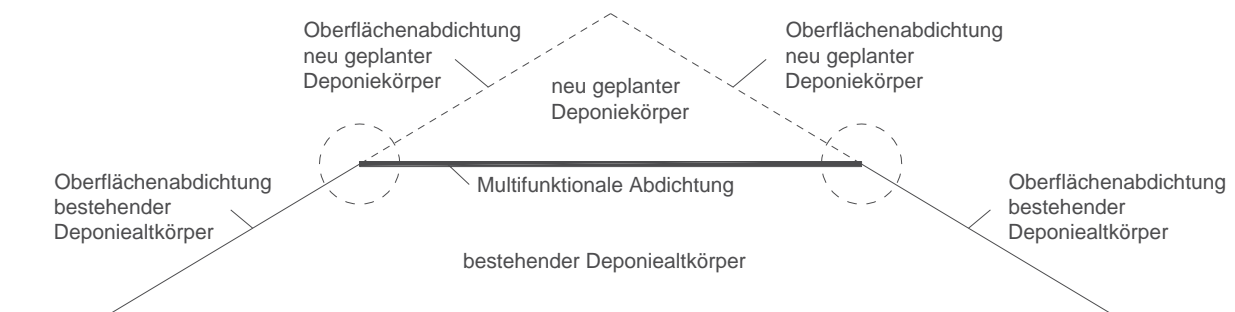


Abbildung 2 Variante 2: Deponie on-top

In der Praxis sind auch Kombinationen der beiden vorgenannten Varianten anzutreffen. Die multifunktionale Abdichtung verläuft hier über eine gesamte Hangseite sowie den oberen Kopfbereich der Deponie. Anschlusspunkte ergeben sich auch hier mit der Oberflächenabdichtung der Altdeponie und der Basisabdichtung der neuen Erweiterung. Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.



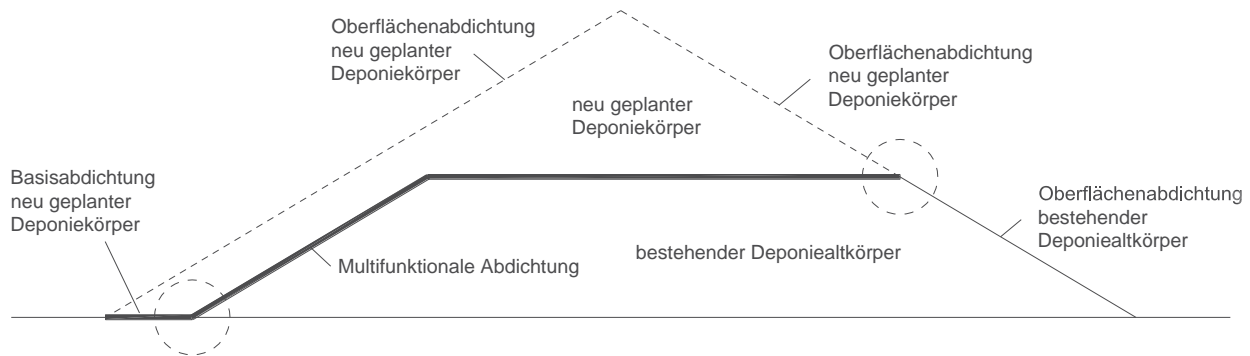


Abbildung 3 Variante 3: Kombination Deponie-on-top und Deponieendverfüllung mit seitlicher Erweiterung

In der Regel bietet diese Variante das größte zusätzliche Deponievolumen, da die Deponie sowohl in der Höhe wie auch seitlich vergrößert wird. Letztlich bestimmt jedoch die mittlere Ablagerungshöhe und damit das jeweilige Verhältnis von Ablagerungsvolumen zu zusätzlicher Dichtungsfläche (Basisdichtung, Multifunktionale Dichtung und Oberflächenabdichtung) die wirtschaftlichen Grundlagen für eine derartige Deponieerweiterung.

## 2.2 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Generell ist bei allen Varianten darauf zu achten, ob die geplanten Erweiterungen noch in der planfestgestellten Deponiefläche ausführbar sind. Hierdurch kann dann bereits planfestgestelltes aber noch nicht genutztes Deponievolumen verwendet werden. Eventuell kann es erforderlich sein, die genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen für eine Deponieerweiterung durch Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren zu schaffen.

Die genehmigungsrechtlichen Anforderungen an die Errichtung einer „Deponie auf Deponie“ richten sich zum Einen nach den aktuellen Anforderungen für die Errichtung einer neuen Deponie, zum Anderen auch nach den Anforderungen zum geordneten Abschluss und der Stilllegung des bestehenden Deponiealtkörpers. Somit ist die behördliche Zulassung nach Kreislaufwirtschaftsgesetz in Verbindung mit in der Deponieverordnung ebenso erforderlich, wie die Anpassung der Genehmigung des bestehenden Deponiealtkörpers. Explizite Hinweise, Beschreibungen oder Ausführungsmöglichkeiten zu „Deponie auf Deponie-Konzepten“ oder zur multifunktionalen Abdichtung sind in den vorgenannten Dokumenten nicht enthalten.

Laut Deponieverordnung ist eine Deponie, welche sich in der Stilllegungsphase befindet, auch weiterhin endgültig stillzulegen und einer geeigneten Nachsorge und Nachnutzung zuzuführen. Die Nachnutzung der Deponiefläche ist in der **Deponieverord-**



nung sowie dem **Kreislaufwirtschaftsgesetz** nicht ausdrücklich geregelt, sodass eine weitere Nutzung im Sinne der Abfallablagerung nicht explizit ausgeschlossen wird.

Im Zuge der planerischen Vorbereitung sind die grundsätzlichen technischen Anforderungen zu beachten, die u.a. in der **Deponieverordnung** beschrieben werden. So sind für die einzelnen Abdichtungselemente der multifunktionalen Dichtung „jeweils die höherwertigen Anforderungen aus Anhang 1, Nr. 2.2 (Basisabdichtung) bzw. Nr. 2.3 (Oberflächenabdichtung) der DepV“, heranzuziehen. Somit ist in jedem einzelnen Fall zu prüfen, welche Abdichtungskomponenten in welcher Kombination und technischen Ausprägung erforderlich sind, um alle technischen Sicherheitsanforderungen zu gewährleisten.

Im **LANUV Arbeitsblatt 13** – Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme wird das Prinzip „Deponie auf Deponie“ in Kap. 1.4 „Überlagerung stillgelegter Deponieabschnitte“ konkret aufgegriffen. Hier werden einige technische Voraussetzungen erläutert, nach deren Einhaltung das Konzept Anwendung finden kann. So dürfen z.B. keine technischen Einrichtungen oder Bauteile durch eine Überlagerung unzugänglich gemacht werden, sofern diese noch weiterhin für den ordnungsgemäßen Betrieb in der Stilllegungs- und/oder Nachsorgephase erforderlich sind. Sie müssen weiterhin erreichbar und reparierbar bleiben. Weiterhin müssen die Setzungen des unterhalb liegenden Deponiekörpers zum größten Teil abgeklungen sein, damit das neue Abdichtungssystem keine direkten Beschädigungen erhält. Auch dürfen durch die zusätzliche Auflast des neuen Deponiekörpers keinerlei technischen Bauteile, wie Dichtungssysteme oder Drainagerohre, beeinträchtigt werden.

## 2.3 Besondere Anforderungen

### 2.3.1 Setzungsproblematik

Die Durchführung von Projekten nach dem „Deponie auf Deponie“ Prinzip bringt technische Aspekte mit sich, die sorgfältig bei der Planung und Ausführung zu beachten sind. Ein Aspekt ist die Setzungsproblematik, welche durch die zusätzliche Auflast des neuen Deponieteils auf die z. T. unterschiedlichen Untergrundbereiche (z.B. Altdeponie, anstehender natürlicher Untergrund der Erweiterungsfläche) entsteht. Hierbei ist insbesondere auf die zu erwartenden Setzungsdifferenzen zu achten. Technische Einrichtung, wie Sickerwasserleitungen und Deponiegasanlagen werden u. U. mit größeren Lasten als bisher beansprucht.

Die Analyse und Auswertung von Betriebsdaten (Historische Erkundung), die Durchführung von Setzungsmessungen, zielgerichtete Erkundungen des Untergrundes, insbe-



sondere des Deponiealkörpers, stellen die Datengrundlagen dar, um eine möglichst belastbare Abschätzung der zu erwartenden Setzungen vornehmen zu können. Deponien, die aufgrund ihres Abfallinventars ein geringeres Setzungsrisiko beinhalten, z.B. Erdaushub- und Bauschuttdeponien, Schlackedeponien, etc. stellen sich diesbezüglich somit grundsätzlich als besser geeignet dar, als ehemalige Siedlungsabfalldeponien. Aber auch diese können, ggf. durch geeignete Maßnahmen, weitergenutzt werden (z.B. Vorverdichtung, Vorbelastung, konstruktive Maßnahmen in kritischen Übergangsbereichen). Prinzipiell sind aber Untersuchungen durchzuführen, um das Setzungsrisiko so gering wie möglich zu halten.

### 2.3.2 Handhabung bestehender Deponieeinrichtungen

Die bestehenden Deponieeinrichtungen im Deponiealkörper, i.d.R. die Deponiegasfassung sowie die Sickerwasserfassung, sind so anzupassen, dass sie sowohl während als auch nach der Verfüllung des neuen Deponieabschnittes ordnungsgemäß weiterbetrieben werden können. Für eine ggf. bestehende Sickerwasserfassung das Deponiealkörpers bedeutet dies, dass ggf. die Spül- und Kontrolleinrichtung so anzupassen sind, dass ihre Zugänglichkeit und Funktionsfähigkeit weiterhin gegeben ist. Dies kann i.d.R. durch örtliche Verlagerung erfolgen, wobei die max. möglichen Spüllängen als limitierender Faktor zu beachten sind. Bei den Elementen der Deponiegasfassung sind seitliche Verlagerungen und Verlängerungen der Leitungstrassen ebenso möglich, wie auch die Verlängerung von Gasbrunnen durch den überlagernden neuen Deponieabschnitt. Bei der Auslegung der Leitungstrassen ist auf die Vermeidung von setzungsbedingten Wassersäcken (Kondensat) zu achten.

## 3 Projektbeispiele

### 3.1 Deponie Kapiteltal

Die Deponie Kapiteltal wird von der ZAK, Zentrale Abfallwirtschaft Kaiserslautern als gemeinsame kommunale Anstalt der Stadt und des Landkreises Kaiserslautern, seit Mitte der 70er Jahre betrieben. Sie befindet sich nördlich von Kaiserslautern in der Gemeinde Mehlingen in einem Taleinschnitt. (siehe Abbildung 4). Der Ablagerungsbetrieb der Siedlungsabfalldeponie wurde im Jahr 2000 nach einer Verfüllung von ca. 6 Mio. m<sup>3</sup> beendet. Es folgten Maßnahmen im Zuge der Stilllegung sowie die Profilierung des Deponiekörpers, um eine Oberflächenabdichtung aufbringen zu können.



Abbildung 4 Deponie Kapiteltal

In der Stilllegungsphase wurde festgestellt, dass in der Region weiterhin ein Bedarf an Ablagerungsmöglichkeiten besteht. Nach der geplanten Fertigstellung der Profilierung im Jahr 2017, wäre die Entsorgung von mineralischen Abfällen (DK I) regional nicht mehr gewährleistet gewesen. Da der Deponiestandort über sämtliche Infrastrukturmaßnahmen, welche für einen Deponiebetrieb notwendig sind, verfügt, sowie eine gute verkehrstechnische Anbindung aufweist, begannen Überlegungen über eine mögliche Erweiterung der Deponie. Nach Prüfung aller genehmigungsrechtlichen Sachverhalte entschied sich die ZAK für eine Erweiterung nach dem Deponie auf Deponie – Prinzip.

### 3.1.1 Deponie Kapiteltal - Aufbau der Deponie und multifunktionale Abdichtung

Die geplante DK I-Erweiterung erfolgt auf dem DK II-Altkörper und schließt die benachbarten Talflanken teilweise mit ein. Der nicht bereits durch den Altkörper überdeckte Flankenbereich der DK I-Erweiterung wird mit einer Basisabdichtung nach Deponieverordnung (DepV) ausgerüstet.

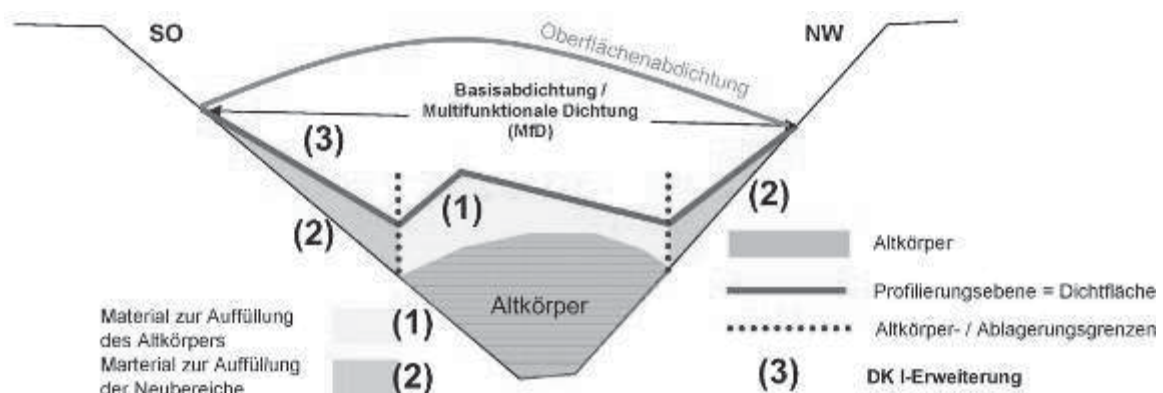


Abbildung 5 Querschnitt Deponie Kapiteltal mit DK I-Erweiterung



Diese Dichtung übernimmt zudem gleichzeitig die Funktion der Oberflächenabdichtung für den Altkörper und wird daher als „multifunktionale Abdichtung“ bezeichnet. Die Teilflächen des Altkörpers, die nicht von der DK I-Erweiterung überlagert werden, erhalten eine Oberflächenabdichtung entsprechend der Zuordnung des Altkörpers zur Deponieklasse II. (siehe Abbildung 5). In Abbildung 6 ist exemplarisch ein Anschlussbereich Oberflächenabdichtung/multifunktionale Dichtung dargestellt.

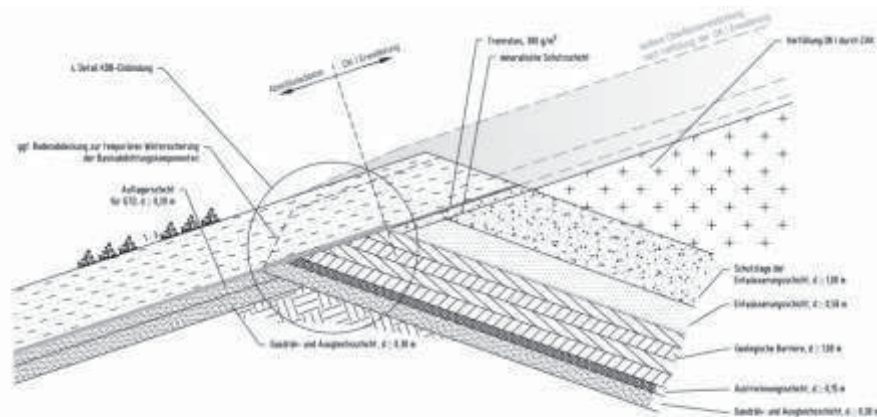


Abbildung 6 Anschlussbereich Oberflächenabdichtung/Multifunktionale Dichtung

### 3.1.2 Setzungsproblematik

Sowohl der Deponiekörper selbst, als auch die Randbereiche, wurden mittels Kernbohrungen und Rammkernsondierungen erkundet. Im Deponiekörper wurden darüber hinaus Seitendruckversuche durchgeführt. So konnten Erkenntnisse über Steifemoduln gewonnen und Setzungsprognosen erstellt werden. Für eine Setzungsabschätzung wurde zusätzlich im Jahr 2009 ein Testfeld auf der Deponieoberfläche errichtet. So konnten anhand von Messpegeln die Setzungen in verschiedenen Auffüllphasen gemessen werden. Die Messergebnisse wurden zusammen mit der TU Kaiserslautern ausgewertet. Für die kritischen Übergangsbereiche wurde ein Modellansatz formuliert und mittels Berechnungsverfahren die zu erwartenden Setzungen (Sofortsetzung, Konsolidierungssetzung, Verrottungssetzung) ermittelt. Die Setzungsmessungen wurden auch in den folgenden Jahren durchgeführt, um eine geeignete Datenbasis für die Ausführungsplanung der jeweiligen Bauabschnitte bereitstellen zu können. Die Messwerte haben die bisherigen Modellbetrachtungen im Wesentlichen bestätigt. Die Profilierung des Planums für die multifunktionale Dichtung erfolgt unter Beachtung der zu erwartenden Setzungen der Gestalt, dass nach Eintreten der Setzung die erforderlichen Mindestgefälle gegeben sind.





### 3.1.3 Dichtungsmaterial

Aufgrund der prognostizierten Setzungen wurde zudem geprüft, ob verfügbare mineralische Dichtungsmaterialien in der Lage sind, die zu erwartenden Beanspruchungen schadlos aufnehmen zu können. Hierzu wurden Biegezugversuche für mineralische Dichtungsmaterialien mit verschiedenen Materialien durchgeführt. (siehe Abbildung 7) Anhand der Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass mineralische Dichtungsmaterialien verfügbar sind, welche die projektspezifischen Qualitätsanforderungen mit hinreichender Sicherheit erfüllen.



Abbildung 7 Biegezugversuche an mineralischem Dichtungsmaterial

### 3.1.4 Gasfassungs- und Sickerwassersysteme

Zunächst wurde eine Bestandsaufnahme sowie Testabsaugungen der vorhandenen Gasfassungssysteme durchgeführt. Daraufhin folgte eine Anpassung des Systems infolgedessen Gasbrunnen stillgelegt sowie neu errichtet wurden. Gasbrunnen, die unterhalb der zu errichtenden Abdichtung liegen, werden baulich angepasst und durch eine Gasdränageschicht ergänzt. Die Gasabsaugleitungen werden in die setzungsunempfindlichen Bereiche der Talflanken verlegt. Die technischen Einrichtungen wie Sammelstation und Regeleinrichtungen werden außerhalb der Deponie platziert. Somit werden die Einrichtungen die einer Wartung oder ggf. Reparatur bedürfen aus dem Überlagerungsbereich herausgeführt.

Die Hauptsammler der Sickerwasserfassung der DK I-Erweiterung werden, aufgrund der Setzungsprognosen, ebenfalls in möglichst setzungsunempfindlichen Bereichen angeordnet. Spül- und Kontrolleinrichtungen für die Haupt- und Nebensammler der DK I-Erweiterung werden in den Randbereichen angeordnet.



### 3.2 Deponie Wiesbaden

Dass Überlagerungen von Deponieabschnitten mit unterschiedlichem Abfallinventar z.T. besondere planerische bzw. gutachterliche Herausforderungen darstellen zeigt der Überlagerungsbereich der Deponieabschnitte III und II auf der Deponie Wiesbaden.

Der seit Mitte der 1990er Jahr sukzessive errichtete Deponieabschnitt III (DA III) lehnt sich an den Deponieabschnitt II (DA II) an und ist von diesem durch eine mineralische Zwischenabdichtung hydraulisch getrennt. Somit stellt diese Konstruktion eine frühe Form der Deponie auf Deponie dar.

Für den Betrieb des DA III erfolgte seinerzeit im Zuge des Ausbaus der ersten Ablageabschnitte die Errichtung eines 700m langen Entsorgungs- und Kontrollganges, unterhalb der Basisabdichtung, um das mögliche Verfüllvolumen optimal nutzen zu können. Hierin sind die Ver- und Entsorgungsleitungen aus den jeweiligen Deponieabschnitten verlegt und somit kontrollierbar ausgeführt. Während die östliche Hälfte dieses Linienbauwerkes überwiegend mit Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen beaufschlagt wurde (bis ca. 55m Überschüttung), wird die westliche Hälfte inzwischen mit mineralischen Abfällen verfüllt, die mithin ein höheres spezifisches Gewicht aufweisen. Aufgrund dieser veränderten Lastverhältnisse war die Überprüfung der Tragfähigkeit des Bauwerkes erforderlich, um mögliche negative Folgen ausschließen, oder eventuell erforderliche planerische Anpassungen (z.B. Reduzierung der Schüttdichte im Bereich des Kontrollganges) vornehmen zu können. Letztlich konnte auch für die Änderung des Abfallinventars die Standsicherheit nachgewiesen werden.

### 3.3 Deponie Mathiasgrube

Als ein weiteres Beispiel einer Deponie auf Deponie kann in diesem Zusammenhang der Weiterbetrieb der Deponie Mathiasgrube benannt werden. Sie wurde in einer ehemaligen Tongrube errichtet und bis 2005 als DK II-Deponie vom Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (ZMS) in einem ehemaligen Tagebau betrieben. Danach erfolgte zunächst der Weiterbetrieb als DK I-Deponie. Mitte 2009 wurde der Altbereich der Deponie stillgelegt, die genehmigte Gesamtkubatur war jedoch noch nicht ausgeschöpft. Der Weiterbetrieb erfolgt seit diesem Zeitpunkt auf einer sich an den Deponiealtkörper anschließenden Fläche.

Im Anlehnungsbereich wurde eine 3,7 ha große multifunktionale Dichtung errichtet, die sowohl als Oberflächenabdichtung für den Altkörper, als auch als Basisdichtung für die DK I-Erweiterung fungiert. (siehe Abbildung 7)

Die standortspezifischen Gegebenheiten (vorhandene geologische Barriere) stellten zudem eine positive Voraussetzung für diese Art der Weiternutzung des Standortes dar.

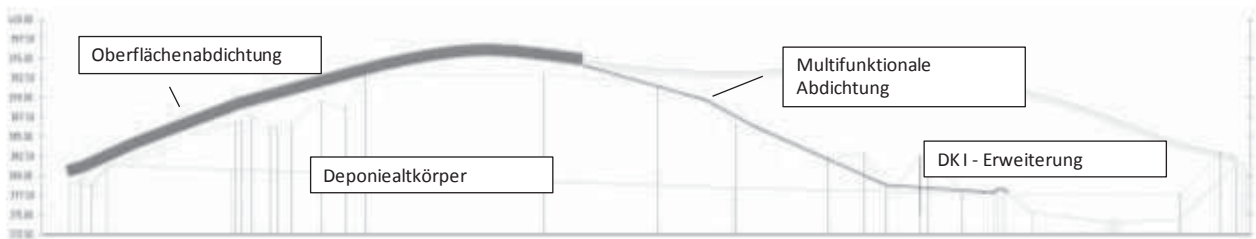


Abbildung 8 Längsschnitt Deponie Mathiasgrube

In Abbildung 8 ist ein Längsschnitt der Deponie mit der Multifunktionalen Abdichtung zwischen dem Deponiealtkörper und der DK I – Erweiterung dargestellt.

## 4 Zusammenfassung / Ausblick

Im Zusammenhang mit dem Abschluss und der Stilllegung einer Deponie stellt sich die Frage nach der anschließenden Verwendung des Areals. Auch wenn ein Deponieabschnitt abgeschlossen und stillgelegt werden soll, so stellt sich doch die Frage, ob nicht auch ein Weiterbetrieb, z.B. eines neuen Deponieabschnittes, eine sinnvolle Nachnutzung darstellen kann. Inzwischen zeigen einige Beispiele, dass es Möglichkeiten gibt, dies sinnvoll umzusetzen. Dabei sind jedoch die technischen Voraussetzungen zu prüfen und es ist abzuwägen, ob diese gegeben oder evtl. herstellbar sind. Gleichfalls sind die genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen zu prüfen und in den Abwägungsprozess mit einzubeziehen.

An Praxisbeispielen wurden mögliche projektspezifische Besonderheiten vorgestellt und die aufgetretenen Schwierigkeiten erläutert.

Es ist deutlich geworden, dass sich die Gründe für Deponieerweiterungen vielfältig darstellen. Eine Deponie auf Deponie – Erweiterung kann eine gute Möglichkeit sein, Entsorgungsengpässen entgegenzuwirken oder auch noch potentiell vorhandenes Deponievolumen zu nutzen. Die Planung eines solchen Projektes bedarf einiger sorgfältiger Voruntersuchungen. Die Ausführung darf jedoch nicht minder gewissenhaft durchgeführt werden. Bei jeder Deponie ist mit anderen Gegebenheiten zu rechnen, worauf planerisch und konstruktiv unterschiedlich reagiert werden muss. Die Beispiele zeigen dass es möglich ist, auch zunächst schwierig erscheinende Projekte umzusetzen und bei guter Planung und Ausführung eine dauerhafte Sicherheit der Deponie zu gewährleisten.

## 5 Literatur



- |   |      |   |
|---|------|---|
| Biener, E.<br>Sasse, T.           Wem-<br>hoff, T. (Autoren)                              | 2011 | Deponie auf Deponie – neue Wege bei der Stilllegung von Altdeponien genehmigungstechnische, technische und wirtschaftliche Aspekte, 27. Fachtagung „Die sichere Deponie 2011 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“          |
| Bundesministerium der Jus-<br>tiz und für Verbraucher-<br>schutz                          | 2012 | Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I. S. 212), zuletzt geändert am 22. Mai 2013 (BGBl. I. S. 1324) |
| Bundesministerium der Jus-<br>tiz und für Verbraucher-<br>schutz                          | 2009 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert am 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973)   |
| Czurda, Prof. und Partner<br>GmbH, Ingenieurgesell-<br>schaft                             | 2014 | Knappe Kapazitäten: Drohen Entsorgungs-Engpässe auf deutschen Deponien? veröffentlicht auf <a href="http://recyclingportal.eu/Archive/7657">http://recyclingportal.eu/Archive/7657</a> , abgerufen am 10.10.2014                                |
| Krüger, B.; Kobel, C.;<br>Jacobson, N.; Wemhoff, T.;<br>Sänger, F. (Autoren)              | 2013 | Die Multifunktionale Abdichtung (MFA) der Deponie Ihlenberg Aufgabenstellung –Genehmigung – Ausführung, Karlsruher Deponietage  |
| Landesamt für Natur, Um-<br>welt und Verbraucherschutz<br>Nordrhein-Westfalen<br>(Hrsg.); | 2012 | Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme – Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung LA-NUV Arbeitsblatt 13   |

### **Anschrift der Verfasser**

Dipl.-Ing. Ulrich Bartl, Dipl.-Ing. Peggy Hiemann  
 Grontmij GmbH  
 Graeffstraße 5  
 D-50823 Köln  
 Telefon +49 221 57 402 24  
 Email [ulrich.bartl@grontmij.de](mailto:ulrich.bartl@grontmij.de), [peggy.hiemann@grontmij.de](mailto:peggy.hiemann@grontmij.de)  
 Website: [www.grontmij.de](http://www.grontmij.de)



# :metabolon – Vom Reststoff zum Wertstoff

**Monika Lichtinghagen-Wirths**

Bergischer Abfallwirtschaftsverband, Engelskirchen

## Inhaltsangabe

### Die Idee

Das Entsorgungszentrum Leppe, im oberbergischen Lindlar gelegen, ist seit Beginn der achtziger Jahre die Zentraldeponie für den Oberbergischen und Rheinisch-Bergischen Kreis. Die zunehmende Verfüllung des rund 45 ha großen Areals ist vom Bergischen Abfallwirtschaftsverband (BAV) gemeinsam mit den beiden Kreisen sowie den beteiligten Kommunen zum Anlass genommen worden, dem Standort mit dem Regionale 2010 Projekt „:metabolon“ ein völlig neues Gesicht zu verleihen. Unter dem Motto „Stoffumwandlung“ (= Metabolismus) ist Bestehendes auf dem Gelände neu in Wert gesetzt und inszeniert worden.

### Das Konzept

Das Projekt verfolgt fünf inhaltliche Schwerpunkte. Neben einem Lern- und Erfahrungsort für Schüler, einem nachhaltigen Gewerbegebiet und einem Standort für Freizeit und Erholungsaktivitäten, hat sich die Zentraldeponie im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes zu einem Kompetenzzentrum für Umwelttechnik und regenerative Energien entwickelt. Mit dem Bergischen Energie-Kompetenzzentrum beherbergt sie außerdem einen Informations- und Beratungsort für Erneuerbare Energien sowie energetisches Bauen und Sanieren.

Vor dem Hintergrund der allgemeinen Problematik knapper werdender fossiler Ressourcen, ist es das Ziel des Forschungsvorhabens, neue Strategien für den Umgang mit den zur Verfügung stehenden stofflichen Ressourcen aufzuzeigen. Folglich muss eine vollkommen neue Strategie des Umgangs mit diesen Ressourcen gefunden werden. Deren nachhaltige Nutzung bedarf der Entwicklung eines effizienten Stoffstrommanagements, das dazu beiträgt, die gesellschaftlichen Bedürfnisse auf der Basis langfristig nutzbarer Ressourcen zu decken.

In diesem Kontext entwickelt sich :metabolon zu einem international anerkannten Wissenszentrum für den Stoffwechsel zwischen Gesellschaft und Natur. Die besondere Aufgabe des Projekts besteht in der Bereitstellung eines großräumigen Technikums und modernen Laborumfeldes für eine internationale Forschungsgemeinschaft.

Dabei sollen die Schlüsseltechnologien des Stoffwechsels zwischen Gesellschaft und Natur und grundlegende Methoden zur regionalen Organisation und Steuerung regionaler Ressourcen wissenschaftlich untersucht und aufbereitet werden.

### Der Standort

Der Standort Leppe bietet vor diesem Hintergrund die Basis für nachhaltige und zukunftsorientierte Forschung. Die Voraussetzungen, die das Projekt am Standort Leppe auszeichnen, sind:





- eine Infrastruktur in der Form eines Technikums mit modernsten Pilotanlagen und Laborausstattung, die eine Übertragung der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis ermöglichen und
- ein breites internationales Netzwerk an Forschungspartnern, die gemeinsam an innovativen technischen und strukturellen Lösungen arbeiten.

#### Die Partner

Aktuelle Partner des Projekts sind renommierte Hochschulen, F&E-Einrichtungen aus dem In- und Ausland und Unternehmen, die gemeinsam ein Wissenszentrum zur Erschließung ungenutzter Energiequellen aufbauen.

Dazu zählen neben natürlichen Ressourcen wie dem Holz auch Endprodukte aus anthropogenen Wertschöpfungsketten (Abfälle). Erforscht und optimiert werden die Bereitstellung, Aufbereitung und Umwandlung von Ressourcen sowie die Verwertung und Weiterverarbeitung von Zwischen- und Endprodukten dieser Prozesse.

#### Stichworte

- Stoffumwandlung
- Innovationsstandort
- Ressourcenmanagement
- Erneuerbare Energien
- Kompetenzzentrum für Umwelttechnik
- Stoffstrommanagement
- Kreislaufwirtschaft
- Lern- und Erfahrungsort
- Nachhaltige und zukunftsorientierte Forschung
- Anthropogene Wertschöpfungskette



# **:metabolon – Von der Deponie zum Innovationsstandort für Ressourcenmanagement**

## **1 Einleitung**

Der Bergische Abfallwirtschaftsverband (BAV) ist ein kommunaler Zweckverband, Betreiber des Entsorgungszentrums Leppe in Lindlar und zusammen mit dem Oberbergischen und dem Rheinisch-Bergischen Kreis, Träger des Projekts :metabolon. Die Gründung des Verbandes erfolgte 1976, die Inbetriebnahme des Deponiestandortes im Jahr 1982. Das Verbandgebiet des BAV umfasst 21 Städte und Gemeinden, in denen insgesamt ca. 560.000 Menschen leben. Die Hauptaufgabe des BAV besteht in der Abfallentsorgung innerhalb seines Verbandsgebietes. Zu seinen Aufgaben gehört in diesem Zuge auch die Erstellung und Fortschreibung des Abfallwirtschaftskonzeptes, die Beratung der Öffentlichkeit im Hinblick auf Abfallvermeidung und –verwertung, sowie die Nachsorge und Rekultivierung des verbandseigenen Deponiestandortes. Im Rahmen seiner Tätigkeit leistet der BAV einen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen indem er Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen erarbeitet und umsetzt.

Ursprünglich wurde die Zentraldeponie Leppe für zwei Kommunen gegründet. Während des Probetriebs entwickelte sich die Zentraldeponie zu einem Entsorgungszentrum mit speziellen Anlagen in den Bereichen Stoffumwandlung und Recycling. Die zunehmende Verfüllung des rund 45 ha großen Areals ist vom Bergischen Abfallwirtschaftsverband (BAV) gemeinsam mit den beiden Kreisen sowie den beteiligten Kommunen zum Anlass genommen worden, dem Standort mit dem Regionale 2010 Projekt „:metabolon“ ein völlig neues Gesicht zu verleihen. Unter dem Motto „Stoffumwandlung“ (= Metabolismus) ist Bestehendes auf dem Gelände neu in Wert gesetzt und inszeniert worden. Seit der großen Eröffnung im September 2011, ist das Gelände täglich für die Öffentlichkeit frei zugänglich. Im vergangenen Jahr 2013 zählte der Standort rund 25.000 nationale wie internationale Besucher.

## **2 Projektstruktur**

Das Entsorgungszentrum Leppe zählt zu den modernsten Entsorgungsstandorten Europas und ist Referenzort eines internationalen Fachpublikums. Ziel des Projektes :metabolon ist die Neuausrichtung des bisherigen Entsorgungszentrums zu einem Kompetenz-, Lern- und Innovationsort für Stoffumwandlung, Ressourcenmanagement und Umwelttechnologien. Das Projekt hat fünf inhaltliche Schwerpunkte: Außerschuli-



scher Lernort, Forschung, Bergisches Energiekompetenzzentrum, nachhaltiges Gewerbegebiet und Freizeit, Kultur und Erholung.

## 2.1 Außerschulischer Lernort

Das gesamte Gelände des Entsorgungszentrums Leppe ist im Rahmen des Projektes :metabolon zu einer authentischen Lehr- und Lernlandschaft entwickelt worden, die allen Altersgruppen ihren lernspezifischen Erfahrungsraum zur Sensibilisierung für die Themen Umwelt, Ressourcen und Energieformen der Zukunft bietet. Unter der Ägide „Lebenslanges Lernen“ werden von der Kindertagesstätte (Haus der kleinen Forscher) über die Sekundarstufe I+II, die Studierenden sowie die Interessenten von Aus- und Weiterbildung angesprochen. Sowohl durch aktives und spielerisches Lernen als auch durch informative Kommunikationssysteme können die Besucher ihr Wissen zu standortverwandten Themen wie Recycling, regenerative Energien etc. erweitern.

Schulklassen und anderen Kinder- und Jugendgruppen steht das „Fliegende Klassenzimmer“ in luftiger Höhe inmitten des Deponiestandortes, mit phantastischem Ausblick über das Bergische Land und den aktiven Unternehmensstandort zur Verfügung. Der „Kompostgarten“, die „Recyclingachse“ sowie das „Grüne Klassenzimmer“ komplettieren diesen außerschulischen Lernort. Die Schüler der Sekundarstufe II werden im Bereich Übergang Schule/Beruf in Kooperation mit den regionalen MINT-Netzwerken (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) für technische Ausbildungs- und Studienmöglichkeiten im Bereich Umwelt und Ressourcenmanagement sensibilisiert.

Zur beruflichen und akademischen Qualifizierung bietet der außerhochschulische Lernort neben Schulungs- und Seminarräumen ein großräumiges Technikum und ein modernes Laborumfeld zur praxisnahen Entwicklung und Optimierung innovativer Energie-, Ressourcen- und Umwelttechnologien. In den thematischen Erfahrungsraum der Lerngruppen einbezogen sind ebenso die aktiven Entsorgungsanlagen, wobei der authentische Technik-Standort :metabolon kleinen Forschern und Schülern Primärerfahrungen vermittelt und als Ergänzung des schulischen Unterrichts dient. Der BAV verfügt aktuell über 10 offizielle Kooperationsschulen, bei denen das Projekt :metabolon fester Bestandteil des Lehrplans ist. Darüber hinaus kooperiert der Verband mit 170 Kindertagesstätten im Rahmen des Projektes „Haus der kleinen Forscher“. Des Weiteren wird im Rahmen des Lernortes ein Studienangebot für Senioren angeboten. Beim Energiecoach 50+ werden in Kooperation mit der Generationen Akademie Rheinland Multiplikatoren für die Themen rund um Energie und Klimaschutz zertifiziert ausgebildet.



## 2.2 Forschungsprojekt

### 2.2.1 Projektziel

Im Rahmen des Projekts :metabolon wird auf der Deponie Leppe ein internationales und interdisziplinäres Lehr- und Forschungszentrum mit den Themenschwerpunkten Stoffumwandlung, Ressourcenmanagement und Umwelttechnologien aufgebaut. Erforscht und optimiert werden die Bereitstellung, die Aufbereitung und die Umwandlung von bislang nicht genutzten Ressourcen sowie die Verwertung und Weiterverarbeitung von Zwischen- und Endprodukten der betrachteten Umwandlungsprozesse. Das Projekt verfolgt das übergeordnete Ziel des Aufbaus einer interdisziplinär besetzten, außerhochschulischen Lern- und Forschungsstelle für nachhaltige Ressourceneffizienz, Stoffumwandlung und Umwelttechnologien, in der innovative technische und strukturelle Lösungen für die Verwertung von Reststoffen erarbeitet werden sollen und mit deren Hilfe eine Schonung der natürlichen Ressourcen erfolgen kann. Mit Hilfe der Installation und des Betriebs von Pilotanlagen soll eine Übertragung der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis ermöglicht werden. Eine weitere Aufgabe von :metabolon besteht in der Qualifizierung von Nachwuchsforschern sowie von praktisch arbeitenden Menschen im Hinblick auf Techniken und Methoden der nachhaltigen Bewirtschaftung bislang nicht genutzter Ressourcen und der umweltverträglichen Wiedereingliederung der von der Gesellschaft produzierten Reststoffe. Mit seinen Potenzialen (Infrastruktur in Form modernster Pilotanlagen und Labore sowie einem breiten internationalen Netzwerk an Partnern) bietet der Standort ideale Voraussetzungen und Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung, Wissenstransfer, anwendungsbezogene Lehre mit möglichen neuen Studienschwerpunkten sowie für fachspezifische Weiterbildungsangebote. Diese sollen im Rahmen des Projektes :metabolon aktiv genutzt und weiter ausgebaut werden. Entsprechend dem Forschungskonzept sollen innovative technische und strukturelle Lösungen zur Verwertung von Reststoffen erarbeitet werden, die dazu verhelfen, die natürlichen Ressourcen zu schonen.



## 2.2.2 Projektinhalt

Im Rahmen des Projektes sollen Wertschöpfungsketten aufgebaut werden, die ein weitgehend optimales Ressourcenmanagement erzeugen. Diese Ketten müssen sich flexibel den lokalen und regionalen Anforderungen anpassen. Sie werden gekennzeichnet durch folgende Kernfelder:



**Abbildung 1 Wertschöpfungskette**

Das Gesamtkonzept des Vorhabens, welches kurz mit dem Motto „Waste to Value“ wiedergegeben werden kann, sieht vor, die unterschiedlichsten regionalen Quellen für das Speisen der Verwertungskette zu nutzen. Dazu werden Holz und Holzabfälle aus der Forstwirtschaft, Reststoffe aus der Abfallwirtschaft sowie Energiepflanzen aus der Landwirtschaft benutzt. Aus der örtlichen Kläranlage kann darüber hinaus entwässerter oder anaerober vergorener Klärschlamm eingesetzt werden. Diese Stoffe werden in der Aufbereitung gezielt gemischt um einen optimal aufbereiteten Rohstoff für die weitere rohstoffliche oder energetische Verwertung zu erhalten. Speziell an dieser Stelle ist die interdisziplinäre Verbindung von technischem und wissenschaftlichem Know-How erforderlich, denn hier sollen neue technische Wege beschritten werden, die nach einer Erprobungsphase vor Ort auch im Echtbetrieb umzusetzen sind.



Das Gesamtkonzept des Projektes kann wie folgt dargestellt werden:

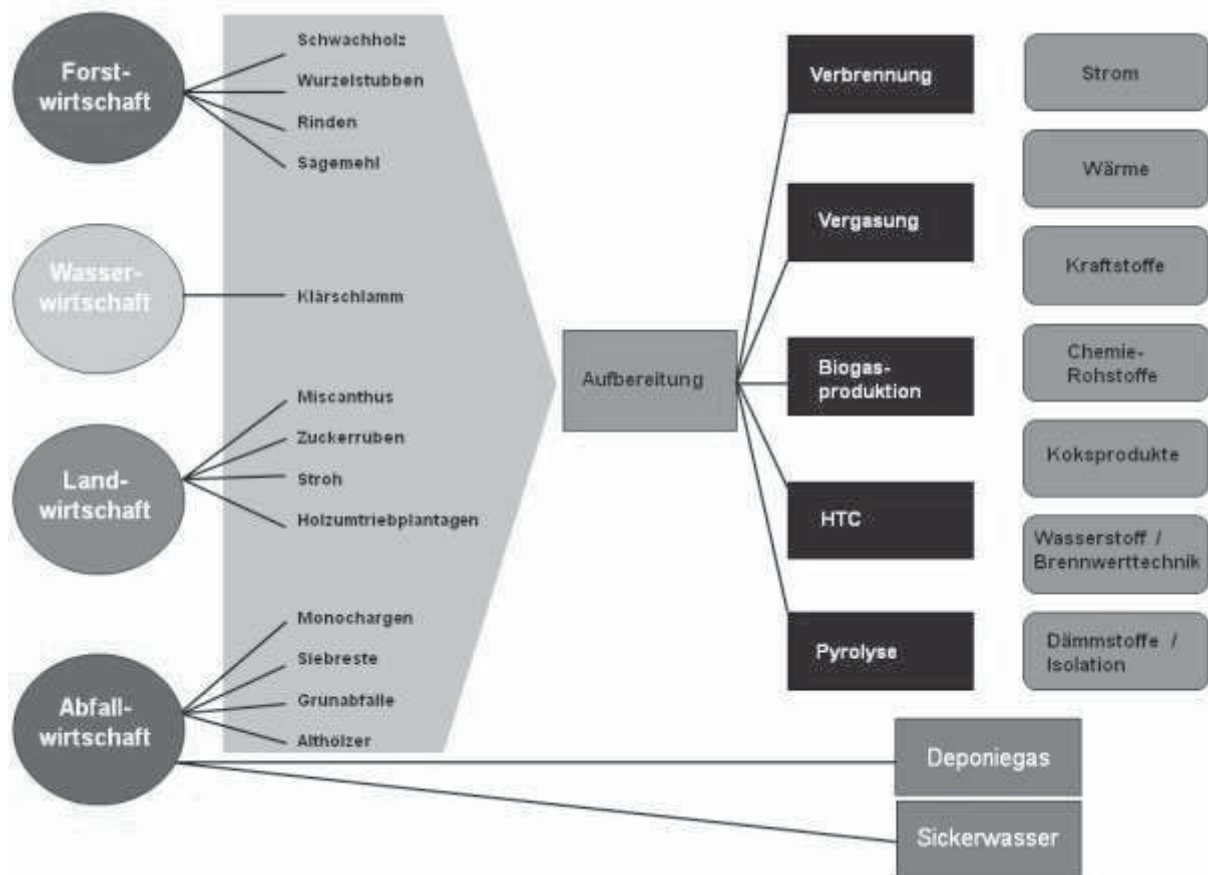


Abbildung 2 Forschungskonzept

Ziele der einzelnen Arbeitsbereiche:

#### HTC/Pyrolyse:

Eine wichtige Aufgabe wird es sein, wässrige Biomassen und Klärschlamm aufzubereiten und in einer HTC/Pyrolyse-Anlage zu verarbeiten. Dabei müssen geeignete MSR- und Aufbereitungstechniken erprobt werden.

#### Biogas

MiniBGA - Für die Technikumsanlage sollen verschiedene Konzepte zur Regelung der Substratzufuhr sowohl für landwirtschaftliche Substrate als auch biologische Reststoffe entwickelt und miteinander verglichen werden. Das Ergebnis soll eine Machbarkeitsstudie zur optimalen Regelung der Substratzufuhr von Biogasanlagen sein. Die Notwendigkeit, dass erneuerbare Energien in Zukunft ebenfalls Regelenergie anbieten müssen, macht eine Regelung der Substratzufuhr für Biogasanlagen dringend erforderlich.



VKL - Es soll ein detailliertes Simulationsmodell der VK-Leppe erstellt werden. Dieses soll zum Test unterschiedlicher Betriebsstrategien genutzt werden als auch zur Überwachung der kritischen Umstellung der saisonal bedingten Substratzufuhr. Gerade letzteres führte in der Vergangenheit häufig zu Prozessschwankungen und damit Performanceverlusten, so dass durch die Begleitung des Prozesses durch ein Modell eine sichere Substratumstellung erreicht werden soll.

#### Aufbereitung:

Erforschung der Auswirkungen unterschiedlicher Zusatzstoffe auf die Pelletqualität sowie die Pelletierung von Biokohle zur Verbesserung der Transport- und Fördermöglichkeiten. Außerdem werden landwirtschaftlicher Produkte oder Nebenprodukte als Co-Substrat untersucht und sowie die bessere Ausnutzung der bereits verfügbaren Substrate. Es ist eine Prozessoptimierung durch Untersuchung und Identifizierung der Mikrobiologie in Substraten und im Biogasfermenter vorgesehen. Hinzu kommen die Entwicklung geeigneter Prozesse zur Bestimmung des Biogaspotentials, die Standardisierung der Methode zur Biogasbestimmung für künftige Biogasversuche und die Biogasproduktion aus im Sickerwasser kultivierter Mikroalgen.

#### Deponieforschung

Untersuchungen zu Charakteristik und Verhalten der biologischen Reinigungsstufen der Sickerwasserreinigungsanlage, zum Zweck der Optimierung von Leistung und Anlagentechnik. Dazu soll das am Standort angewandte Verfahren in einer Forschungsanlage nachgebildet werden (scale-down), um den Prozess sowohl anhand von Summenparametern, als auch durch Spezialanalytik zu untersuchen. CO<sub>2</sub> Minderung durch reduzierten Fackelbetrieb und Einbindung in den Feststoff Rostasche sowie die optimierte Alterung von aufbereiteten Rostaschen mit stofflicher Qualifizierung für einen lokalen Einsatz als Deponiebaustoff. Reduzierung der Nachsorgekosten für Deponien und erste praktische Erfahrung zur Integration von CO<sub>2</sub> Abreicherungsstufen in Deponiegasanlagen unter Einsatz von MV Rostaschen.

#### Alleinstellungsmerkmal

:metabolon ermöglicht die Erforschung anwendungsnaher innovativer Stoffumwandlungsprozesse, mit denen auf unterschiedlichste Weise Reststoffe zu Rohstoffen und Energie umgewandelt werden. Dies können z.B. die anaerobe Vergärung oder eine teil-aerobe Kompostierung oder auch neuartige pyrolytische Prozesse und Verfahren sein. Allen diesen Verfahren gehen unterschiedlichste Misch-, Trenn- und Aufbereitungsstufen voraus, z.B. die Reinigung, Durchmischung, Pelettierung, oder unterschiedlichste Trocknungs- und Mahlprozesse. Üblicherweise werden solche Prozesse zunächst im



Labormaßstab durchgeführt, um sie dann schrittweise in größere Anlagen zu überführen. Der volumenbezogene Größenfaktor für dieses sogenannte Upscaling liegt häufig nur bei 5 oder 10, so dass man z.B. von einem 1 m<sup>3</sup>-Trockner im nächsten Schritt nur auf einen 10 m<sup>3</sup>-Trockner umstellt und diesen Prozess erprobt, bevor man weitere Vergrößerungen unternimmt. Zwar würde ein höherer Faktor eine deutliche Verringerung von Kosten und Zeit verursachen, allerdings steigen die technischen Risiken exponentiell zum Upscaling-Faktor. Die Einbeziehung der technischen Großanlagen z.B. der anaeroben Fermenter oder der Sickerwasseraufbereitungsanlage in die Forschungsarbeit ermöglicht die Kalibrierung von Simulationen an Geräten unterschiedlicher Größenklassen. Damit erhöht sich die Praxisrelevanz der erzielten Forschungsergebnisse entscheidend: Regionale Akteure aus Forst-, Landwirtschaft- und Wasserwirtschaft tragen ihren Teil zum systemischen Lösungsansatz der optimalen Reststoffaufbereitung und –nutzung bei. Industrie und Gewerbe sind unmittelbar an den Problemstellungen aber auch an den praxisorientierten Lösungsansätzen beteiligt. Internationale Studentencamps, Zukunftsforen und die Kooperation mit weiteren Forschungspartnern vervollständigen die breite Wissens- und Technologieplattform der Forschungsgemeinschaft :metabolon.

### 2.3 Bergisches Energiekompetenzzentrum

Mit dem Bergischen Energiekompetenzzentrum (BEKZ) ist eine zentrale Informations- und Beratungsplattform geschaffen worden, auf welcher sich Hersteller, Handwerk und Verbraucher begegnen können. In der rund 700 qm großen Ausstellungshalle findet der Endverbraucher eine breit gefächerte Auswahl an Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, die den neuesten Stand der Technik aufzeigen, vor allem im Hinblick auf größtmögliche Energieeffizienz. Diesbezüglich unterstützt das Bergische Energiekompetenzzentrum den Endverbraucher aktiv bei der Entwicklung neuer Lösungen und Konzepte für das „Haus der Zukunft“. Die Themenbereiche der betreuten Dauerausstellung reichen von der Biomasse- und Holzenergie über Solar und Geothermie (Erdwärme) bis zur Energieeinsparung (Energieeffizienz), zur energetischen Gebäudesanierung und zum Bauen mit Holz. Jeder interessierte Besucher des Energiekompetenzzentrums erhält eine kostenlose und herstellerunabhängige Information und Beratung durch Fachpersonal. Anhand der Exponate und der Informationsmaterialien können die Besucher die verschiedenen Technologien „erfassen und begreifen“. Ein Teil der Anlagen kann im realen Betrieb besichtigt werden. Das regionale Energieberaternetzwerk steht mit kostenfreien Impuls-Energie-Beratungen zur Verfügung, die regionalen Kreditinstitute haben eigene Förderprogramme für die Nutzer der Angebote im BEKZ aufgelegt und die Kreishandwerkerschaft, die Architektenkammer NRW sowie die Landwirtschaftskammer NRW führen hier regelmäßig Informationsveranstaltungen durch und runden damit das Informationsangebot ab. Die Stärke des BEKZ ist der Zusammenschluss



wichtiger Akteure aus den Kompetenzbereichen Energie, Energieeffizienz und Klimaschutz, wie der interkommunalen Arbeitskreis der Klimaschutzmanager und Energiebeauftragten zeigt. Die kommunalen Bemühungen im Bereich Umwelt und Ressourcen werden gebündelt, Doppelungen vermieden und Lücken geschlossen. 49 Kommunen arbeiten in diesem aktiven Netzwerk zusammen. Das BEKZ ist der Sitz eines der fünf NRW-BioEnergiemanager, der das Bergische Biomassereststoffkataster erarbeitet und veröffentlicht hat und vernetzende Funktion im Bereich regionale Nutzung erneuerbarer Energien im Auftrag des Landes NRW durchführt. Ebenfalls ist das BEKZ Sitz des Holzclustermanagers Bergisches Land, der die Ressource Holz der gesamten Region verwaltet. Mit einem breit aufgestellten Aus- und Weiterbildungsangebot für alle Alters- und Interessensgruppen entstand die „Bergische Energie-Akademie“ – interessiertes Fachpublikum wird ebenso informiert, wie die breite Öffentlichkeit.

2011 wurde der Trägerverein Bergisches Energiekompetenzzentrum e.V. gegründet. Sein Zweck ist es, die Bevölkerung über das Thema erneuerbare Energien unter besonderer Berücksichtigung des Umwelt- und Klimaschutzes und des Energiespargedankens (Steigerung der Energieeffizienz) neutral und umfassend zu informieren sowie Wissenschaft und Forschung in Bezug auf die erneuerbaren Energien zu fördern. Mitglieder sind neben Kommunen und kommunalen Verbänden auch die Kammern (Landwirtschaft, Industrie und Handwerk), regionale Sparkassen und Volksbanken sowie regional ansässige Unternehmen und Hochschulen. Die Reichweite :metabolons ist durch die vertretenen Gebietskörperschaften mittlerweile auf 49 Städte und Gemeinden, 3.166 qm und fast 2 Millionen Einwohner gestiegen.

### 2.3.1 Holzcluster Bergisches Land

Das BEKZ ist Sitz des Holzclustermanagers Bergisches Land, der die Ressource Holz im energetischen und baulichen Sinn ins Bewusstsein der gesamten Region rückt. In den ersten zwei Jahren des Bestehens von „Bergisch Holz“ wurde durch das Holzcluster Bergisches Land in erster Linie die energetische Nutzung von Waldholz vorangetrieben. Diese Nutzung ist gerade durch das Heizen mit Holz als mittlerweile gut zu betrachten. Die Arbeiten des Holzclusters Bergisches Land waren von Ende November 2012 bis Ende Juni 2013 im Wesentlichen informative und vernetzende in der Forstwirtschaft und bei den Waldbesitzern. Die nächste Phase der inhaltlichen Aufgaben des Holzclusters Bergisches Land legt nunmehr den Schwerpunkt auf die stoffliche Nutzung von Holz beispielsweise im Holzhausbau. Seit Anfang 2013 finden auch die regionalen Holzbaubetriebe auf :metabolon ihre zentrale Plattform. Bislang waren diese in keine Organisationsform, wie z.B. die Handwerks-Innungen eingebettet. Für sie wurde ein Holzkubus auf dem :metabolon-Gelände errichtet, der die Nachhaltigkeit von Holz im Bereich Bauen zeigen soll. In diesem Kubus, der im Herbst 2014 eröffnet wird, werden



die regionalen Holzbauer ihre Arbeiten präsentieren. Ebenfalls für den Herbst ist der Aufbau eines außerschulischen Lernortes zum Thema Holz vorgesehen.

### 2.3.2 Bioenergiemanagement Bergisches Land

Das BEKZ ist außerdem Sitz eines der fünf NRW-BioEnergiemanager, der das Bergische Biomassereststoffkataster veröffentlicht hat und vernetzende Funktion im Bereich regionale Nutzung erneuerbarer Energien im Auftrag des Landes NRW durchführt.

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Bioenergiemanagements (BEM) ist aufgrund der guten Vernetzung und vorhandenen Kompetenzen am Standort :metabolon die Klammerfunktion der kommunalen Klimaschutz- und Energiemanagement-Bemühungen. Im Rahmen der nahezu flächendeckend angedachten und zum Teil bereits fertiggestellten Klimaschutzkonzepte werden zunehmend Personen mit den Aufgaben, die aus diesen Konzepten resultieren, identifiziert oder als sogenannte Klimaschutzmanager in den Kreisen und Kommunen beantragt und eingestellt. Der BEM bündelt und stimmt alle diesbezüglichen Aktivitäten auf einander ab, so dass ein regional abgestimmtes Vorgehen im Bereich Klima und Energie entsteht.

## 2.4 Nachhaltiges Gewerbegebiet

Das 3,9 ha große Gewerbegebiet, welches im Jahr 2007 vom Umweltministerium des Landes NRW als assoziierter Partnerstandort des Modellprojekts „Nachhaltige Gewerbeflächenentwicklung“ ausgezeichnet wurde, ist der Ansiedlung von Unternehmen aus den Bereichen Abfallwirtschaft, Stoffumwandlung und Umwelttechnologie vorbehalten. Zurzeit ist dort ein Biomasselager für Hackschnitzel und Kompost sowie für alle im Rahmen des Forschungsprojektes benötigten Inputstoffe platziert. Gleichzeitig erfolgt hier die Aufbereitung der Stoffe für die jeweiligen Prozesse.

## 2.5 Freizeit und Erholung

Damit die Neuausrichtung und der Imagewandel der Leppe-Deponie möglichst in allen Bevölkerungsschichten der Region verankert werden, wird das Konzept durch Angebote für Trendsportarten, Kulturveranstaltungen und sonstige Freizeitangebote abgerundet. Vor dem Hintergrund der spezifischen Standortgegebenheiten, wie der Hangneigung und der Weitläufigkeit des Areals, ist vor allem die Ausübung von Sportarten begünstigt, deren Ausübung an anderen Standorten mitunter schwer realisierbar ist. Folglich werden auf dem Standort, gemeinsam mit regional ansässigen Vereinen oder Interessensgruppen, Angebote für Mountainbiken, Gleitschirmfliegen und Crossgolf realisiert. Vor diesem Hintergrund erfolgte in 2013 die Eröffnung des großflächigen Mountainbikeparcours, bestehend aus einem Pumptrack und einer Cross-Country Strecke. Ebenfalls im Sommer 2013 fand das erste Konzert einer Konzertreihe für klassische





Musik und Jazz statt. Für viel Begeisterung bei Kindern und jung gebliebenen Erwachsenen sorgt die mit 110 m längste Doppellutsche Deutschlands, die aus einer luftigen Höhe von ca. 350 m ü. NN. ins Tal führt und dabei eine hervorragende Aussicht bietet. Die Diversität der Angebote führt ein Publikum an den Standort, welches unter Umständen grundsätzlich kein hohes direktes Interesse an den am Standort vermittelten Themen hat. Einmal vor Ort werden alle Besucher zu den Themen Ressourcenschonung und –effizienz informiert und für die dringend notwendige, gemeinsame Arbeit an der Lösung der Zukunftsfragen sensibilisiert.

### 3 Räumliche Gestaltung

Resultierend aus der städtebaulich geprägten Historie des Strukturprogramms der Regionale, war die räumliche Neugestaltung der Projekte eine Voraussetzung für die Programmteilnahme. Vor diesem Hintergrund bestand die Intention, einer Spiegelung der inhaltlichen Neuausrichtung der Deponie in der räumlichen Gestaltung des Standortes. Unter dem Motto „Veränderung (Sukzession) und Kreislauf“ sollten die verschiedenen Elemente den Stoffkreislauf (Metabolismus), die Wandelbarkeit der Landschaft und das Außergewöhnliche des Standortes Leppe symbolisieren. Die inhaltliche Auseinandersetzung mit innovativen Themen im Rahmen von :metabolon sollte in der Gestaltung des Geländes sichtbar werden: Sowohl im Hinblick auf die Gebäude- und Landschaftsarchitektur als auch in der Stoffumwandlung und –kombination und im innovativen und atypischen Gebrauch ausgewählter (Rest-) Stoffe, sollte der Standort ein innovatives Bild vermitteln. Neben der gestalterischen Funktion sollte die Umstrukturierung neue Räume und innovative Elemente schaffen, die eine standortspezifische Nutzung im Sinne der Projektstruktur :metabolon (s.o.) ermöglichen. Die enge Verzahnung gestalterischer Aspekte mit den auf dem Standort fokussierten inhaltlichen Themen und der funktionalen Raumnutzung, betonen das stimmige und harmonische Gesamtkonzept. Absicht der Projektbeteiligten war es, die Leppe zu einer „Adresse“ werden zu lassen, die sowohl durch ihr inhaltliches Angebot als auch durch ihre städtebauliche und landschaftsräumliche Gestaltung überzeugt. Sowohl die inhaltliche Ausrichtung als auch die räumliche Gestaltung des Standortes durch :metabolon sollen zu einem positiven Image der Leppe beitragen.

#### 3.1 Städtebaulicher / landschaftsräumlicher Siegerentwurf

Der Siegerentwurf des im Jahr 2007 ausgelobten städtebaulichen und landschaftsräumlichen Wettbewerbs sah eine völlige Neugestaltung des Standortes anhand innovativer landschaftsplanerischer und architektonischer Elemente vor. Die folgenden Elemente bilden den Kern des Siegerentwurfs:



*Kegel:* Im Gegensatz zu den gängigen Deponienachsorgeverfahren realisiert :metabolon eine exponierte Darstellung des Müllkörpers in Form eines Kegels. Neben seiner Form erzeugt dieser durch seine Gestaltung Aufmerksamkeit, indem die Kegeloberfläche mit einer schwarzen Kunststoffdichtungsbahn abgedeckt wird. Aufgrund der Setzungsvorgänge, die noch über Jahrzehnte anhalten werden, lässt sich die endgültige Höhe und Form des Kegels schwer bestimmen. Diesen Prozess zu begleiten und mitzuverfolgen ist Teil der Konzepts, das hinter der räumlichen Gestaltung steht. Die exponierte Darstellung der Rostaschen steht für einen offenen, innovativen und sich ständig weiterentwickelnden Umgang mit dem Thema Abfall. Der Kegel fungiert als Landmarke und Symbol des Standortes; er ist von weitem sichtbar, bietet aber auch eine weitläufige Aussicht über die Deponie und ihr Umland. Durch seine außergewöhnliche Form bietet der Kegel optimale Voraussetzungen für Sport- und Freizeitaktivitäten, wie MTB oder Gleitschirmfliegen.

*Sukzessionsband:* Das Sukzessionsband schlängelt sich vom Fuß der Deponie bis zur Kegelspitze. Im Rahmen der Gesamtgestaltung übernimmt es die Funktion einer wichtigen Wegeverbindung, die es ermöglicht, den Standort bequem zu erwandern. Darüber hinaus dient es der Anschauung von Verwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Recyclingprodukte, die als Oberflächengestaltung in das Band eingebaut werden. Die Bepflanzung symbolisiert die Rückeroberung der Landschaft durch die Natur, indem Initialpflanzungen vorgenommen wurden, die dann weitestgehend sich selbst überlassen worden sind. Die unterschiedlichen Wachstumsreaktionen veranschaulichen das Anpassungsverhalten der Pflanzen an die vorherrschenden Lebens- bzw. Bodenbedingungen.

*Recyclingschiene:* Die so genannte Recyclingschiene ist als eine Blick-, Weg- und Lernachse geplant und erstreckt sich zwischen dem Eingangsbereich der Deponie und der Kegelspitze. Auf einer Länge von 400 Metern überbrückt die Rampe etwa 100 Höhenmeter. Sie ermöglicht den ungehinderten Blick auf den Kegel und das Sukzessionsband. Ihre Gestaltung bringt den durch den Menschen beeinflussten Wandel verschiedener Abfallstoffe zum Ausdruck. Die Gestaltung der Achse wurde mit einer Vielzahl von Mülltonnen vorgenommen. Einzelne von ihnen sind mit Abfallprodukten in unterschiedlichen Zersetzungs- und Verwertungsstadien befüllt und vermitteln den Besuchern so die verschiedenen Stadien des Prozesses.

*Natürlicher Kreislauf:* Dieser Kreislauf stellt eine Analogie zum Materialkreislauf dar, der in anderen Bereichen des Areals thematisiert wird. Alle „Produkte“ des natürlichen Kreislaufs zeichnen sich durch eine vollständige Wiederverwertbarkeit aus. Symbolisiert wird der Kreislauf durch die Anpflanzung von Bäumen in verschiedenen Größen bzw. Entwicklungsstadien und die Anlage von Totholz- und Humusflächen.



*Eingangsbereich:* Der Eingangsbereich bildet den zentralen Anlauf-, Orientierungs- und Bürostandort des Geländes, dessen Zentrum das Bergische Energiekompetenzzentrum darstellt. Bei den für den Bau verwendenden Materialien soll der Leitgedanke der Stoffumwandlung zur Anwendung kommen und „sichtbar“ werden. Wesentliches Element des Gebäudes ist ein unterteilbarer multifunktional nutzbarer Raum. Er dient der Durchführung von Tagungen und Seminaren, soll gleichzeitig aber auch Ausgangs- bzw. Ankunftsort für Führungen und Schulklassen sein. Daneben befindet sich die Dauerausstellung des Bergischen Energiekompetenzzentrums. Als zentraler Orientierungspunkt für Besucher, Sportler und Seminarteilnehmer werden im Eingangsbereich allgemeine Standortinformationen, etwa die Lage der MTB-Strecken, präsentiert. Darüber hinaus bietet dieser Bereich genügend Sitzmöglichkeiten, die zum Verweilen einladen und einen weitläufigen Blick über das Bergische Land ermöglichen. Es gliedert sich ein Bistro mit Kinderspielplatz an.

*Membran:* Die Deponie ist aufgrund verschiedener technischer und rechtlicher Notwendigkeiten umzäunt. Für die Öffnung des Standortes im Sinne einer höheren Transparenz, wurde dieser Zaun nicht als Trennung des Geländes von der Umgebung, sondern in definierten Teilbereichen als „Membran“ inszeniert. Grundsätzliches Ziel der im Außenbereich realisierten Maßnahmen ist es, :metabolon nicht als einen isolierten Projektstandort zu entwickeln, sondern eine Vernetzung mit der Umgebung herzustellen - :metabolon soll einen Bestandteil der umliegenden Landschaft darstellen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Anbindung des Standortes an das bestehende Wander- und Radwegenetz des Umlandes vorgenommen.

Das Ergebnis der baulichen Maßnahmen hat ein völlig neues Gestaltungsbild des Areals zur Folge, welches kaum mehr Gemeinsamkeiten mit dem früheren Standort aufweist. Wenngleich der neutrale Betrachter an jeder Stelle des Standortes nach wie vor merkt, dass er sich auf einer Deponie befindet, ist das gesamträumliche Erscheinungsbild derart abstrakt, dass es befremdlich und gleichzeitig anziehend interessant wirkt. Dieses von der herkömmlichen Erscheinung einer Deponie losgelöste Bild, führt Akteure und Besucher dazu, von Vorurteilen befreit und mit einer neutral und gleichzeitig positiv sensiblen Grundhaltung mit dem Standort und den dort verorteten Themen umzugehen und neue Themenfelder für sich zu identifizieren.

:metabolon

c/o Bergischer Abfallwirtschaftverband

Frau Monika Lichtinghagen-Wirths

Braunswerth 1-3

51766 Engelskirchen

6. Praxistagung Deponie 2014

[www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)



# Elektro- und Elektronikgeräterecycling auf einem Deponiegelände

André Pohl

Hellmann Process Management GmbH & Co. KG, Osnabrück

## Inhaltsangabe

Der Osnabrücker Umweltdienstleister Hellmann Process Management GmbH & Co. KG (HPM) ist bereits seit 20 Jahren Dienstleister des Zweckverbandes Abfallwirtschaft Celle für die Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten aus privaten Haushalten. Bereits lange vor Inkrafttreten des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) welches das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten regelt, werden Altgeräte einem zertifizierten Recyclingprozess – auf Basis einer manuellen Demontage – zugeführt. Hierbei übernehmen Menschen mit Behinderung aus der gemeinnützigen Einrichtung „Lebenshilfe Celle“ als fester Bestandteil dieser Kooperation wesentliche Aufgaben.

Um neue und zukünftige Herausforderungen an Recyclingquoten zu erfüllen, den logistischen Aufwand zu reduzieren und zukünftig auch Flachbildschirme mit quecksilberhaltiger Hintergrundbeleuchtung vor Ort zu recyceln, entschloss sich der Zweckverband Abfallwirtschaft Celle in Kooperation mit Hellmann Process Management in ein neues Rückbauzentrum auf dem städtischen Deponiegelände zu investieren. Teil der Planung ist dabei, ein altes Betriebsgebäude auf dem Deponiegelände zurückzubauen. Das bislang einmalige Projekt schafft Arbeits- sowie therapeutische Plätze für Menschen mit Beeinträchtigung und fördert diese in ihrer Gesamtpersönlichkeit. Zudem erhält das bereits vorhandene Deponiegelände eine nachhaltige Zusatznutzung.

Die Fertigstellung des Rückbauzentrums und die Inbetriebnahme der Anlage für das Recycling von Flachbildschirmen sowie Monitoren der zukünftigen Sammelgruppe 3 (ElektroG) sind für das Quartal 02/2015 geplant.

## Stichworte

Elektro- und Elektronikgeräterecycling, manuelle Demontage von Elektro- und Elektronikaltgeräten, Bildschirmrecycling, ElektroG, Recyclingquoten, Erstbehandlung, Inklusion am Arbeitsplatz, quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung

## 1 Projektpartner

### 1.1 Hellmann Process Management

Hellmann Process Management (HPM) gehört seit der Gründung 1988 zu der familiengeführten Unternehmensgruppe Hellmann Worldwide Logistics mit Sitz in Osnabrück.

6. Praxistagung Deponie 2014

[www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)



HPM berät fachlich zu gesetzlichen Verpflichtungen aus dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG/WEEE), dem Batteriegesetz (BattG) und der Verordnung über die Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS). Auch die Umsetzung der Verpflichtungen wird von HPM abgebildet.

Das fachgerechte Recycling von Elektroaltgeräten sowie die Datenträgervernichtung gehören ebenfalls zu den Dienstleistungen des zertifizierten Entsorgungsfachbetriebs. Darüber hinaus optimiert HPM Entsorgungskosten und Wertstoff Erlöse durch individuelle Stoffstromkonzepte. Dabei werden Abfallströme analysiert und optimiert.

## **1.2 Zweckverband Abfallwirtschaft Celle**

Der Zweckverband Abfallwirtschaft Celle ist als öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger für die Entsorgung von Abfällen in Stadt und Landkreis Celle zuständig. Als untere Abfallbehörde bietet der Zweckverband Abfallwirtschaft Celle einen umfangreichen Entsorgungsservice. Unter anderem können Bürger an Annahmestellen ihre Elektroaltgeräte zurückgeben.

## **1.3 Lebenshilfe Celle gGmbH**

1961 als "Lebenshilfe für geistig Behinderte" gegründet, hat der von Eltern und Förderern getragene gemeinnützige Verein sich aus kleinsten Anfängen zum Träger eines Systems differenzierter Eingliederungsmaßnahmen für Stadt und Landkreis Celle entwickelt. 1988 übernahm die "Lebenshilfe für Behinderte Celle gGmbH" als Tochter des Vereins die operative Abwicklung für alle bis dahin entstandenen Einrichtungsteile.

Heute ist die "Lebenshilfe Celle gGmbH" eine Komplexeinrichtung für beeinträchtigte Menschen aller Altersstufen mit ca. 950 Plätzen. Betreut werden diese von ca. 300 qualifizierten Mitarbeitern.



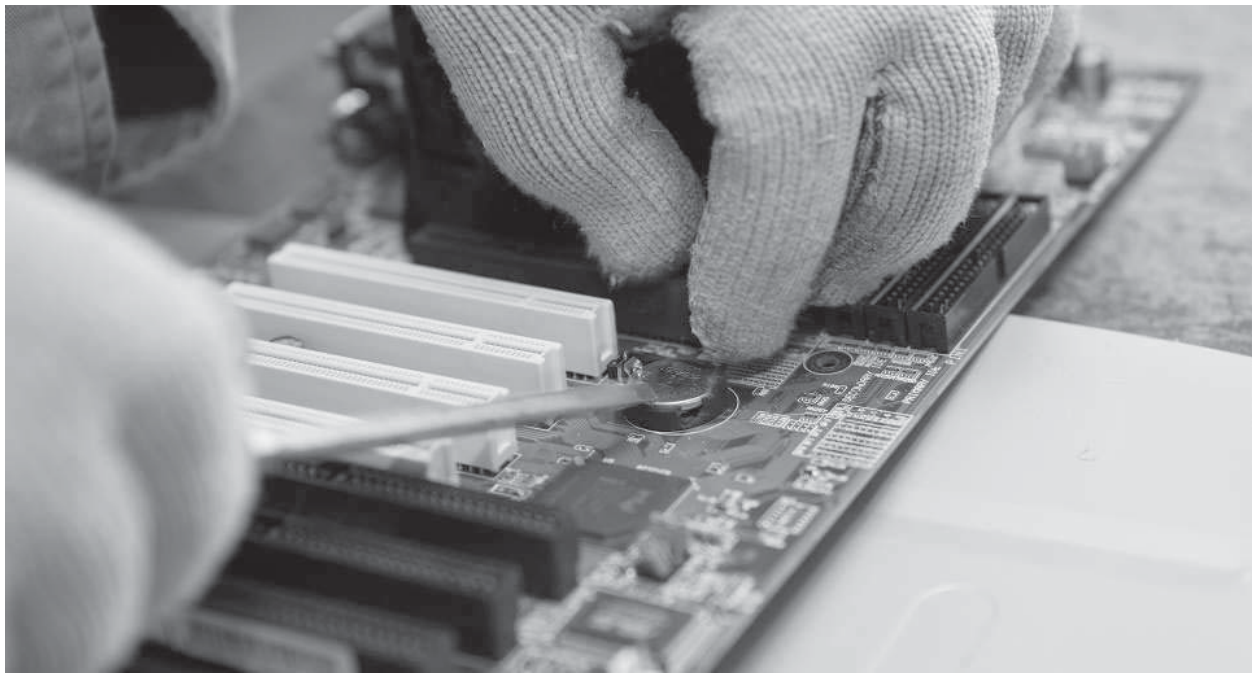


Abbildung 1: Manuelle Zerlegung von Elektro- und Elektronikaltgeräten

## 2 Nachnutzung von Deponien: Elektro- und Elektronikgeräterecycling auf einem Deponiegelände

### 2.1 Historie

Seit 20 Jahren arbeitet Hellmann Process Management GmbH & Co.KG (HPM) mit dem Zweckverband Abfallwirtschaft Celle im Bereich der fachgerechten Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten zusammen. 1994 ging HPM als zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb zunächst eine Kooperation mit der Stadt Celle ein. Diese Kooperation weitete sich auf den Landkreis Celle aus. Am 16. Januar 2000 gründeten Stadt und Landkreis Celle den Zweckverband Abfallwirtschaft Celle. Das Besondere an diesem Projekt ist von Beginn an, dass HPM Mitarbeiter mit Behinderung der Lebenshilfe Celle in den Recyclingprozess der Elektroaltgeräte integrierte.

Mit Beginn des Projektes war es das primäre Ziel, die Deponie von toxischen Abfällen aus dem Elektronikschrott zu entlasten. Desweiteren sollten wertvolle Sekundärrohstoffe zurückgewonnen werden.

Mit Inkrafttreten des ElektroG (Elektro- und Elektronikgerätegesetz) im Jahr 2005 wurde die Kooperation vor dem Hintergrund der Verlagerung der Produktverantwortung auf die Elektro- und Elektronikgerätehersteller auf die Probe gestellt. Dadurch, dass die Möglichkeit der Optierung für Kommunen (Eigenvermarktung von Kommunen) eingeführt



worden ist, erhielt die Kooperation eine neue Perspektive. So wurden zunächst die Sammelgruppen 1 und 5 (Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente) und später die Sammelgruppe 3 (Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik) durch den Zweckverband Abfallwirtschaft Celle optiert. Aufgrund des angestiegenen Mengenvolumens wurde das damalige Rückbauzentrum auf dem Gelände der Lebenshilfe Celle nach Bergen verlegt.

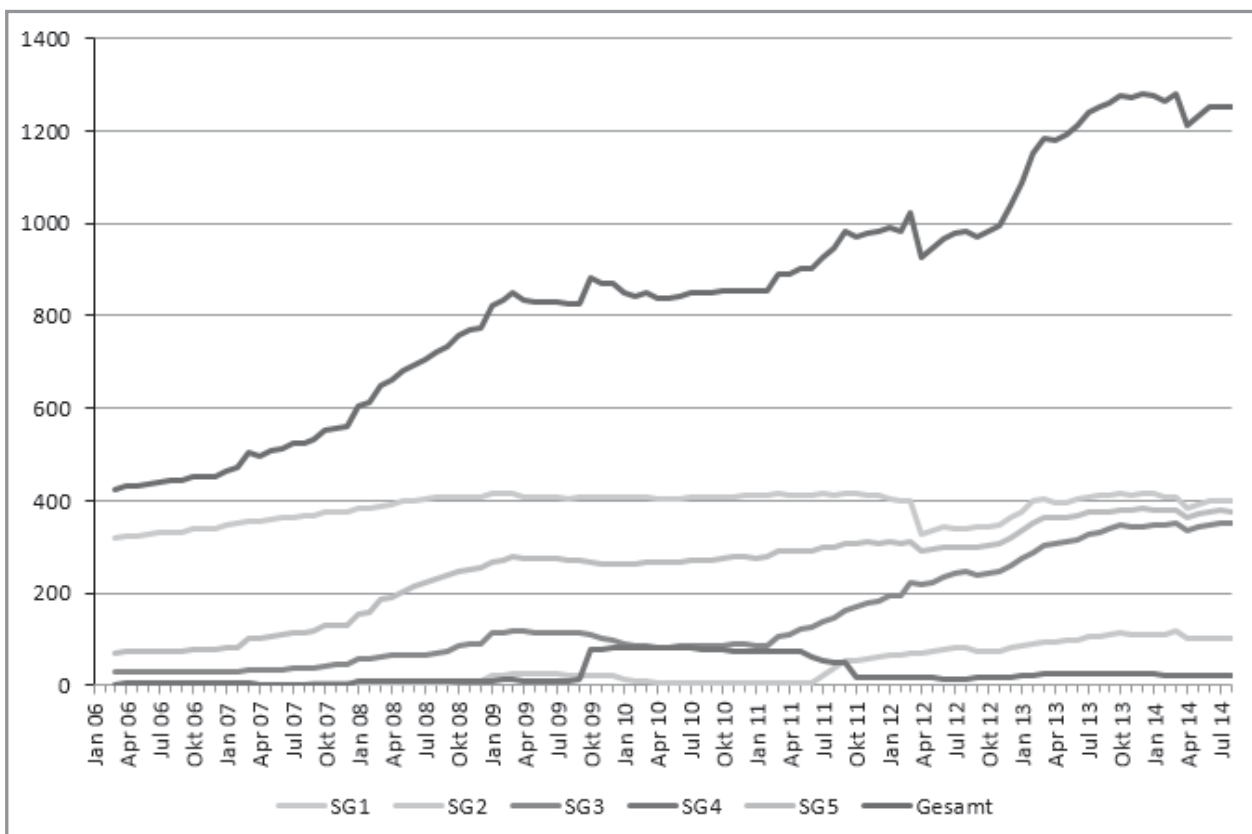


Abbildung 2 Anzahl optierte örE je Sammelgruppe

Quelle: [www.stiftung-ear.de](http://www.stiftung-ear.de)

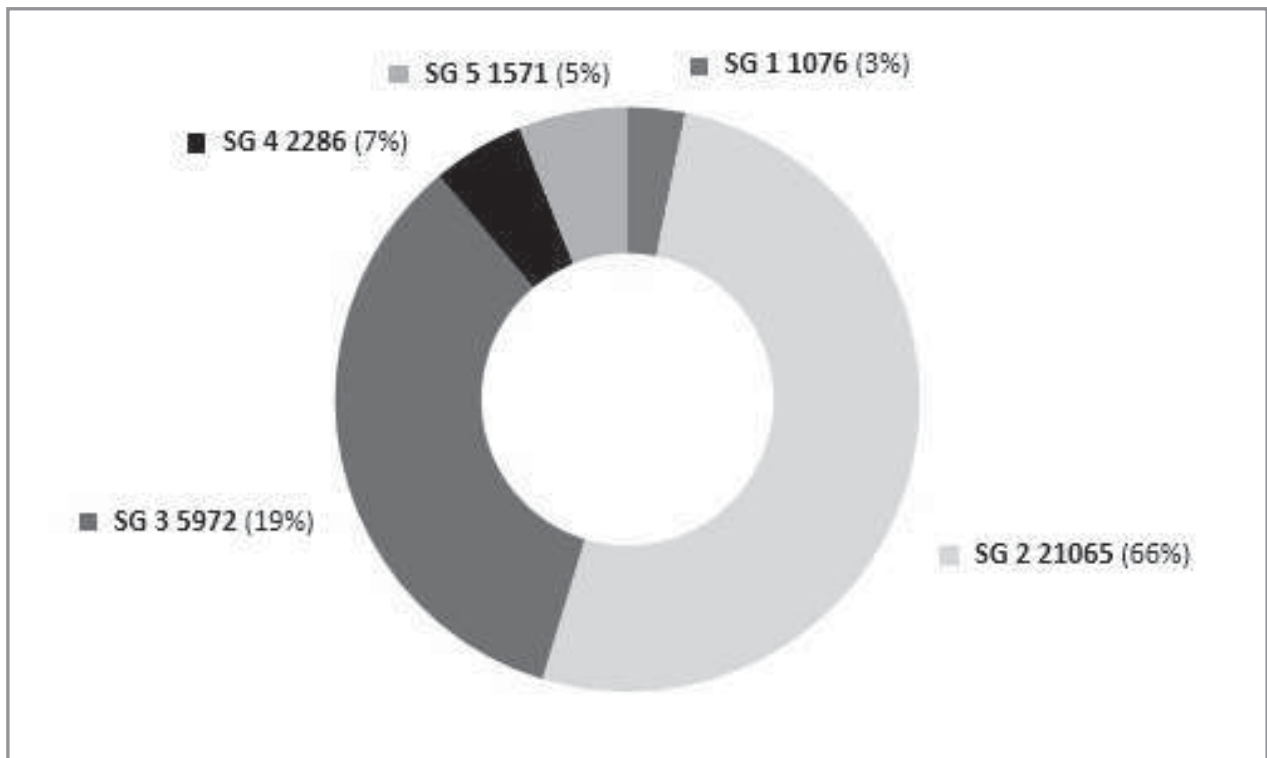


Abbildung 3 Abholungen je Sammelgruppe (SG) in 2014 (Stand: 31.08.2014)

Quelle: [www.stiftung-ear.de](http://www.stiftung-ear.de)

## 2.2 Projektziel

Aus heutiger Sicht und mit Blick auf die Novellierung des ElektroG (Inkrafttreten voraussichtlich 2015) weist der Standort in Bergen einige Nachteile auf. Aufgrund der dezentralen Lage sind umfangreichere logistische Prozesse nötig, was gleichzeitig höhere Kosten bedeutet. Die Nähe zum Bürger ist an dem Standort ebenfalls nicht gegeben.

Ziel des Projektes ist es, Prozesse zu optimieren, Kosten zu senken, neue qualitative Anforderungen an Recyclingquoten zu erfüllen sowie die Erweiterung der Tätigkeiten auf das komplexe Thema Flachbildschirmzerlegung. Der zentrale neue Standort in Celle ermöglicht nicht nur den Celler Bürgern eine haushaltsnahe Abgabe ihrer Elektro- und Elektronikaltgeräte. Auch Gewerbetreibende, die auf dem Deponiegelände Abfälle zu entsorgen haben, können Ihre Elektroaltgeräte dem Entsorgungsprozess zuführen. Darüber hinaus werden neue Arbeitsplätze für Menschen mit und ohne Beeinträchtigung geschaffen. Ein Großteil dieser Arbeitsplätze wird von Menschen mit Beeinträchtigungen besetzt – Inklusion am Arbeitsplatz wird damit gelebt.

Durch die manuelle Demontage und den Einsatz hochwertiger Anlagentechnik für das Recycling von Flachbildschirmen und Monitoren werden höchste Verwertungsquoten für die Sammelgruppen 3 und 5 erzielt. Darüber hinaus reduziert sich der LKW- und PKW-



Verkehr auf der stark frequentierten Verbindung zwischen Celle und Bergen. Dies führt nicht nur zu einer Entlastung der Anwohner, sondern auch zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## 2.3 Umsetzung

Bereits 2011 fanden erste Gespräche der Projektpartner zur Initiierung und Umsetzung statt. Gemeinsam wurde ein geeigneter Standort ausgewählt. Um neue Flächen zu schonen, werden veraltete Bestandsimmobilien auf einem Deponiegelände rückgebaut und Platz für neue Gebäude geschaffen.

Durch die Entstehung von Außenarbeitsplätzen werden in Celle circa 35 Arbeitsplätze für Menschen mit Beeinträchtigung geschaffen. Angeleitet werden diese durch erfahrene Mitarbeiter des Entsorgungsbetriebs Hellmann Process Management.

Für die fachgerechte Zerlegung und den Einsatz einer Recyclinganlage für LCD-Flachbildschirme muss für den Standort eine BImSch-Genehmigung gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz vorliegen. Genehmigungsbedürftig sind Anlagen, „die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebes in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen“ (§ 4 Abs. 1 BImSchG).

## 3 Flachbildschirm-Recycling als Teilprojekt des Rückbauzentrums

### 3.1 Stand der Technik / IST-Zustand

Neben der Rücknahme vieler elektrischer und elektronischer Geräte spielt die Rücknahme von Bildschirmgeräten eine wesentliche Rolle innerhalb der durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) geregelten Stoffströme. Die hohe Stückzahl stellt einen bedeutenden Anteil innerhalb der Mengenströme in der Recyclingwirtschaft dar. Hinzu kommt der Umstand, dass die technische Weiterentwicklung in den vergangenen 10 - 15 Jahren dafür gesorgt hat, dass mittlerweile technisch gänzlich andere Geräte in den Markt gebracht werden. Im Zeitraum 2006 bis 2012 waren dies pro Jahr jeweils zwischen 130.000 und 180.000 Tonnen.

Die klassischen Kathodenstrahlröhrenbildschirme sind dabei nahezu vollständig durch Flachbildschirme mit Flüssigkristallanzeigen (LCD) und Plasmabildschirme (PDP) ersetzt worden. Bei den gesammelten Mengen spielen die neuartigen Flachbildschirme mit einem Anteil von 3 - 4 % bislang noch eine eher untergeordnete Rolle. Es ist aber



zu erwarten, dass der Anteil in den kommenden Jahren stark ansteigen und somit die Gesamttonnage der zu recycelnden Geräte deutlich größer sein wird.

Die Sammlung von Bildschirmgeräten, also auch der Flachbildschirme, erfolgt zu einem großen Teil an den Sammelstellen der öffentlich-rechtlichen Entsorger (örE). Die Geräte werden häufig durch kommunale Mitarbeiter oder direkt durch den Bürger in die Container geworfen. Dies führt zu Beschädigungen der Geräte und widerspricht den rechtlichen Anforderungen gem. ElektroG. Hinzu kommt die Gefährdung von Mensch und Umwelt sobald Geräte mit quecksilberhaltiger Hintergrundbeleuchtung beschädigt und dabei Schadstoffe freigesetzt werden.

Für das Recycling der Flachbildschirme gibt es derzeit zwei Verfahren:

- Vollständige manuelle Zerlegung
  - Demontage der äußeren Teile an normalen Arbeitsplätzen
  - Manuelle Entfernung der Displays und der Hintergrundbeleuchtung an speziellen Demontageplätzen (vollständig verkleidet, abgesaugte Arbeitsfläche, Filterung der abgesaugten Luft), eventuell freiwerdende quecksilberhaltige Substanzen gelangen somit nicht in die Umwelt
  - Demontage der sonstigen Bauteile wiederum an normalen Arbeitsplätzen
- Komplette Aufbereitung des Gerätes durch Schreddern
  - Die Geräte werden komplett in eine Anlage eingebracht und durch mechanische Einwirkung in kleine Einzelteile zerlegt
  - Die aus der Hintergrundbeleuchtung austretenden, quecksilberhaltigen Stäube werden abgesaugt und in Filtern aufgefangen
  - Die mit den Stäuben kontaminierten Materialien werden anschließend erhitzt und das dabei verdampfende Quecksilber ebenfalls aufgefangen und gefiltert

Das erste Verfahren stellt das mit dem höchsten manuellen Arbeitsaufwand dar. Gleichzeitig ist hierbei das Risiko der Kontamination von Menschen mit Quecksilber am größten. Die Endprodukte sind aber so gestaltet, dass sie theoretisch sogar wiederverwendet, auf jeden Fall aber problemlos recycelt werden können.

Die vollständige Zerstörung durch Schreddern ist am wenigsten arbeitsintensiv, erfordert aber aufwendige Anlagentechnik. Problematisch ist definitiv, dass bei diesem Verfahren auf jeden Fall die Materialien kontaminiert werden und somit anschließend immer gereinigt werden müssen.





Derzeit gibt es nur wenige Anlagen in Betrieb, die in der Lage sind, die Flachbildschirme fachgerecht zu zerlegen. Dies erfordert teilweise weite Transportwege mit den entsprechend hohen Kosten und CO<sup>2</sup>-Ausstößen. Die in den kommenden Jahren zu erwartenden Mengen an zurückgegebenen Bildschirmgeräten mit LCD-Technologie können mit den vorhandenen Anlagenkapazitäten mit Sicherheit nicht bewältigt werden.

Die Notwendigkeit für das geplante Vorhaben ergibt sich also daraus, dass weitere Anlagenkapazitäten für die Zerlegung von Flachbildschirmen zu schaffen sind. Sinnvoller Weise sollten dabei Verfahren verwendet werden, die wirtschaftlicher als die bisherigen sind und weniger Gefahren für die Umwelt und die in der Zerlegung arbeitenden Menschen mit sich bringen. Daher wird eine Anlagentechnik benötigt, die die Vorteile der verschiedenen bereits vorhandenen Systeme in sich vereinigt. Dabei sollen insbesondere die Wirtschaftlichkeit des Prozesses und die Wiederverwertungsquoten erhöht werden. Die Kontamination von Mensch und Umwelt mit Schadstoffen soll nach Möglichkeit verhindert bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen ist es sinnvoll, die Transportstrecken zu verkürzen, indem in der Region eigene Anlagenkapazitäten geschaffen werden.

Der Nutzen ergibt sich daraus unmittelbar:

- Verfügbarkeit eines neuartigen Verfahrens zur wirtschaftlich optimierten Wiederverwendung und Wiederverwertung von Bildschirmgeräten bzw. ihrer Teilkomponenten und Materialien
- Schonung natürlicher Ressourcen (vor allem fossiler Brennstoffe und Metalle)
- Vermeidung/Verringerung der Kontamination von Mensch und Umwelt durch Schadstoffe, insbesondere Quecksilber
- Verbesserung der CO<sup>2</sup>-Bilanz der Produkte

### **3.2 Ziele für die geplante Recyclingtechnik**

Die Ziele des Projekts bestehen darin, den Prozess der Gewinnung von hochwertigen Sekundärrohstoffen aus Bildschirmgeräten mit LCD-Technologie in seiner Gesamtheit deutlich zu verbessern. Bei der Entwicklung der Anlage werden bereits existierende Teilkomponenten berücksichtigt. Neu entwickelte Komponenten werden mit in die Anlage integriert. Letztendlich dient der Betrieb einer solchen Anlage der Schonung von Ressourcen und dem Aufbau nachhaltiger Recyclingprozesse.

Gleichzeitig soll auch das Ziel verfolgt werden, der sozialen Verantwortung der Gesellschaft gegenüber Menschen mit Behinderungen gerecht zu werden, indem die techni-



schen und organisatorischen Möglichkeiten zur Vereinfachung von Arbeitsprozessen genutzt werden.

### 3.3 Umwelt und Nachhaltigkeit

Neben den wirtschaftlichen Aspekten des Flachbildschirmrecyclings ist das zweite wesentliche Ziel, die negativen Auswirkungen des hohen Verbrauchs an elektrischen und elektronischen Geräten auf die Umwelt deutlich zu reduzieren. Diese Effekte bedeuten im Einzelnen:

- Verringerung des Gesamt-CO<sup>2</sup>-Ausstoßes durch Verkürzung von Transportwegen
- Geringere Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt (Verringerung von Kontamination durch bei Zerstörung von Hintergrundbeleuchtung austretendes Quecksilber)
- Erhöhung der Verwertungsquote der eingesetzten Materialien und der damit verbundenen Schonung von Ressourcen (Primärrohstoffverbrauch)
- Verringerung der zu entsorgenden Reststoffe und somit Abfälle und der damit ebenso verbundenen Reduktion der CO<sup>2</sup>-Emission

### 3.4 Optimierung innerhalb des ElektroG

Das Rückbauzentrum in Celle unter Einbindung der privaten Recyclingwirtschaft sowie einer gemeinnützigen Einrichtung dokumentiert beispielhaft, wie eine kommunale Optimierung auch zu einem Imagegewinn führen kann. Dieses Thema wird aktuell immer wichtiger, da die aktuelle Entwicklung der Optimierungen innerhalb des ElektroG nicht nur von Herstellerverbänden der Elektro- und Elektronikbranche kritisch betrachtet wird.

#### **Anschrift des Verfassers**

André Pohl, Geschäftsleitung  
Hellmann Process Management GmbH & Co. KG  
Albert-Einstein-Straße 2  
D-49076 Osnabrück  
Telefon +49 541 40898-0  
Email: [umweltmanager@de.hellmann.net](mailto:umweltmanager@de.hellmann.net)  
Website: [www.umweltmanager.net](http://www.umweltmanager.net)



# Der Energieberg Georgswerder

## Die Nachnutzung einer Deponie durch Energieerzeugung, Infotainment und als Freizeitfläche

Deik Esser

Stadtreinigung Hamburg



Abbildung 1 Blick vom Energieberg auf Hamburg (Bild SRH Hamburg)

### Inhaltsangabe

Vor etwa drei Jahren wurde die Deponie Georgswerder zum Energieberg. Ein Ort, der bis dahin für sorglosen Umgang mit der Natur stand, wurde zu einem Symbol des Wandels und einer positiven Zukunftsvision. 4.000 Haushalte können inzwischen von hier aus mit Strom versorgt werden. Doch es wird nicht nur erneuerbare Energie produziert. Die künstliche Erhebung des Deponiekörpers bietet einen einmaligen Blick über die Stadt Hamburg. Durch seine Öffnung für Besucherinnen und Besucher ist so ein facettenreicher Erlebnisort entstanden, der auf unterschiedlichste Weise angenommen und erlebt wird. Wichtigstes Ziel des Betreibers des zum Gelände gehörenden Informations-



zentrums, der Stadtreinigung Hamburg, ist hierbei, die Besucher für das Thema Abfall und das eigene Verhalten zu sensibilisieren. Aber auch zu zeigen, dass dieser Ort positiv genutzt werden kann. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die direkte Ansprache der Problematik, die zum Leitfaden des Umgangs mit der Situation vor Ort wurde.

### Stichworte

Deponie, Hamburg–Georgswerder, Nachnutzung, Infotainment, Erneuerbare Energie, Stadtreinigung Hamburg, IBA Hamburg 2013, Event

## 1 Die Geschichte der Deponie Georgswerder



Abbildung 2 Die Deponie während des Betriebes (Bild BSU Hamburg)

### 1.1 Entstehung

Nachdem schon in den 1930er Jahren angefangen wurde, in den Kleigruben in Hamburg - Georgswerder Müll zu entsorgen, wurde Ende des zweiten Weltkriegs die Ablagerung intensiviert und professionalisiert. Dem Trümmer- und Bauschutt sowie Haus- und Sperrmüll der Anfangszeit folgten von 1967 bis 1974 auch 200.000t chemische Sondermüllabfälle. Zwischenzeitlich war aus der Verfüllung der Gruben ein Berg geworden der, weit sichtbar für die Umgebung, aus dem Marschland ragte. Insgesamt 14 Millionen m<sup>3</sup> Müll wurden hier abgelagert. Die Belastungen für die umliegende Wohnbe-



völkerung in Form von Lärm, Schmutz, Gestank und Auswehungen bis hinein in die Schlafräume der Häuser, ließen die Lebensqualität im Stadtteil Georgswerder stetig sinken. 1979 erfolgte die Schließung der Deponie. Doch die Freude über diese Entwicklung währte nicht lange. Der geplante Bau einer Parkanlage auf dem Deponiegelände verzögerte sich durch die Entdeckung von Deponiegas. Nachdem 1983 das hochgiftige Dioxin in der Sickerflüssigkeit entdeckt worden war, musste eine umfassende und langfristige Lösung gefunden werden. Die Pläne für ein Naherholungsgebiet, u.a. war auch ein Skilift im Gespräch, wurden gänzlich verworfen.

## 1.2 Die Sanierung

Die Suche nach möglichen Sanierungsmaßnahmen gestaltete sich kompliziert und schwierig. Die verunsicherte Wohnbevölkerung des Stadtteils formierte sich zum „Arbeitskreis Georgswerder“, der sich umweltpolitisch für Transparenz und für eine für das Umfeld des Geländes verträgliche Lösung einsetzte. Nachdem sich internationale und interdisziplinäre Experten im Auftrag der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg intensiv mit dem Problem auseinandergesetzt hatten, wurde die Sicherung der Deponie und somit die Einkapselung des Berges beschlossen. Eine Pionierarbeit mit damals ungewissem Ausgang. Da eine Abtragung nach damaligen technischen Möglichkeiten keine Option war, wurde der größte Teil des Geländes mit einer Kombinationsdichtung abgedeckt. Dieser „Regenschirm“ sorgt dafür, dass kein Wasser in den Berg eindringt und die Schadstoffe im Deponiekörper mobilisieren kann. Der im Deponiekörper schon vorhandene Stauwasserspiegel, der sich aus vor der Sanierung eingedrungenem Regenwasser und entwässertem Müll gebildet hatte, wird langsam abgebaut. Am Rande des Berges wird die Sickerflüssigkeit, die vorher ungehindert an den Hängen des Deponiekörpers austreten konnte, durch Brunnen aufgefangen.

Die unter dem Deponiekörper vorhandene Kleischicht hält Öl und somit auch Dioxin vom Eindringen in den ersten Grundwasserleiter ab. Doch Benzol und chlorierte Kohlenwasserstoffe passieren, gelöst im Stauwasser, den durch Kleiabbau und Bombenrichter beschädigten Kleikörper. Das kontaminierte Grundwasser wird am Rand der Deponie von Brunnen unterirdisch aufgenommen und eine vor der Sanierung entstandene Schmutzwasserfahne wird gleichzeitig saniert. Das Deponiegas wird durch ein Drainagesystem aufgenommen, behandelt und das verwendbare Methangas an die benachbarte Kupferhütte geliefert.

Zusammenfassend muss also betont werden, dass die Schadstoffe, die sich noch auf dem Gelände befinden, so gesichert sind, dass sie der Umwelt und Bevölkerung keinen Schaden zufügen können.





Abbildung 3 Gasschacht während der Sanierung (Bild BSU Hamburg)

Ein europaweit wahrgenommenes Referenzprojekt war entstanden. „Der Fall Georgswerder“ führte letztendlich zu einem Wendepunkt in der Entsorgungspraxis. Der begrünte Hügel, eigentlich ein technisches Bauwerk, bietet heute dem unwissenden Betrachter einen fast idyllischen Anblick. Es bedarf aber weiterhin eines konsequenten und ausführlichen Monitorings was Setzungen, Stauwasser, Sickerflüssigkeit, Deponiegas, Pflanzen- und Tierwelt angeht. Um das Bewusstsein für das Gelände wach zu halten befindet sich heute im Informationszentrum Energieberg Georgswerder eine ausführliche Dokumentation über die ehemalige Deponie und ihre Sicherung.

## 2 Der Energieberg

### 2.1 Anfänge

Mehr als 20 Jahre lag das Gelände im Bewusstsein der breiten Bevölkerung im Dornröschenschlaf. Unzugänglich und abgeschieden. Doch bei der umgebenden Bevölkerung in Georgswerder wuchs über die Jahre der Wunsch einer Öffnung des Geländes. Man wusste um die Qualitäten des Ortes, vor allem den wunderbaren, durch die topographische Lage im Elburstromtal unverstellten Blick auf die Stadt Hamburg. Die Öffnung hatte aber auch symbolische Bedeutung, da durch diese der Bevölkerung das über Jahre verlorene Gelände wieder zurückgegeben wird. Auch bei der das Gelände verwaltenden Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt öffnete man sich langsam für die Idee.

Dynamik kam in den Prozess durch die Internationale Bauausstellung Hamburg (IBA Hamburg 2013). Ziel war die schrittweise Öffnung des Geländes ab 2011, kombiniert mit der Ausnutzung des Potentials zur Energiegewinnung.



Abbildung 4 Blick auf die Windkraftanlage von Süden (Bild SRH Hamburg)

## 2.2 Energie

Neben dem Deponiegas wurde auf dem Gelände schon Windkraft genutzt. 1992 war die erste Anlage auf der Deponie aufgestellt worden, drei weitere Anlagen folgten. Mehr Leistung ermöglichte das Repowering von drei der vier vorhandenen Windkraftanlagen, der Bau einer Photovoltaikanlage und die Nutzung der Wärme des Grundwassers in der Wasseraufbereitung durch eine Wärmepumpe für das Informationszentrum. Insgesamt werden auf dem Energieberg 12.200.000 kWh/a Strom Wind- und Sonnenenergie gewonnen. Diese Menge reicht rechnerisch für etwa 4.000 Haushalte.

## 2.3 Die Öffnung für Besucher

Der Energieberg ist nun jährlich von April bis Oktober innerhalb fester Öffnungszeiten zugänglich. Vergleicht man die Form des Geländes mit einem Spiegelei, wurde das Eiweiß für Besucher zugänglich gemacht, das Eiweiß bleibt zum Schutz von technischen Anlagen und zwischenzeitlich entstandenen Vogelrückzugsgebieten dem Besucher verschlossen. Ein Zaun, der mit der Zeit durch Bewuchs verdeckt werden wird, trennt die Geländehälften voneinander. Auf dem zugänglichen Geländeteil gilt es für die Besucher sich an „Bergregeln“ zu halten, die in Infobroschüren und durch Schilder am Eingang kommuniziert werden. So ist beispielsweise Aufgrund des durch die Wasserdrainage bedingten schnellen Wasserabflusses und der damit verbundenen Trockenheit der Pflanzen Rauchen generell verboten. Schächte oder technische Anlagen dürfen nicht



betreten werden. Das landschaftsplanerische Konzept sah zur Besucherlenkung eine Treppenanlage und einen barrierefreien Weg vor, der zur Bergkuppe führt. Um die Bergkuppe selber führt der vom HÄFNER /JIMINEZ Landschaftsarchitekten entworfene Horizontweg. Ein 900 Meter langer Stelzenweg aus Stahl, der nachts für zwei Stunden von LED-Lichtern beleuchtet und sogar von den Hamburger Landungsbrücken aus sichtbar ist. Zwar dürfen auch die Rasenflächen betreten werden, aber die Besucher nutzen fast ausschließlich die vorgegebenen Wege. Umgesetzt wurden die Planungen von der IBA Hamburg 2013 gemeinsam mit der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, unterstützt durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklungen. Es ist somit, kombiniert mit den Windkraftanlagen, eine symbolträchtige Landmarke entstanden. Ein weithin sichtbares Zeichen für den Wandel im Stadtteil Georgswerder und die Nutzung erneuerbarer Energien. Der Besuch des Energiebergs wird somit auch aufgrund seiner Gestaltung zu einem Erlebnis.

## 2.4 Das Informationszentrum

Im Informationszentrum des Geländes werden die Geschichte und der Wandel der Deponie durch die Multimedia-Show „Der gebändigte Drache – Von Alten Lasten zu Neuen Energien“ emotional den Besuchern nahegebracht. Der Film, der im Sinne des Infotainments auf drei sich bewegenden Leinwänden, mit Lichteffekten, gezeigt wird, stimmt die Besucher auf die Thematik ein. Hierbei stellt die Projektionstechnik eine Weltneuheit dar. Ein sensibel und humorvoll gestalteter Kinderfilm rundet das Besucherangebot ab. Tiefere Informationen können von den Besuchern an fünf Computerterminals abgerufen werden. Regelmäßig stattfindende Führungen geben Besucherinnen und Besuchern die Möglichkeit, sich über Hintergründe zu informieren.

Der zum Informationszentrum gehörende Seminarraum wird für Sonderausstellungen und Veranstaltungen genutzt. Die Ausstellungen haben meist einen Bezug zum Thema Müll. 2013 wurde u.a. eine „Upcycling“ - Ausstellung des Fachbereichs Textildesign der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg gezeigt, 2014 die Bilderserie Tonnografie der Stadtreinigung Hamburg, schwarz/weiß Bilder, die von Reinigern in Hamburg mit einem zur Lochkamera umgebauten Müllbehälter gemacht worden sind, sowie sehr erfolgreich die Ausstellung „Global Players“ vom Kampagnenbündnis „Gemeinsam für Afrika“, die selbstgemachtes Spielzeug aus Müll afrikanischer Kinder zeigt.



Abbildung 5 Skyline-Run 2014 (Bild SRH Hamburg)

## 2.5 Veranstaltungen

Es wurde die Erfahrung gemacht, dass Deponiebetrieb- und technik mit Veranstaltungen vereinbar sind. Hierbei muss bei jeder Veranstaltung die Vereinbarkeit geprüft werden. So sind zum Beispiel Eingriffe in den Boden aufgrund der Abdeckungsschichten nicht erlaubt. Genutzt wurde das Gelände bis heute u.a. für Radsport-, Skateboard- und Lafevents einer Segnung im Rahmen einer Hochzeit, Fotoshootings, Filmaufnahmen, Freiluftkino und als Veranstaltungsort der „Jungen Hamburger Klimakonferenz“ mit 1.500 Teilnehmern. Des Weiteren ist der Energieberg regelmäßig Teil der „Langen Nacht der Museen“ und vom Tag der Architektur. Bis Ende August 2014 besuchten ca. 80.000 Menschen den Energieberg Georgswerder.

## 3 Neuausrichtung und Ausblicke

Nachdem die IBA Hamburg 2013 sich aus der Betreiberschaft des Informationszentrums Anfang 2014 zurückgezogen hatte, um sich auf ihre neue Aufgabe als Projektentwicklungsgesellschaft zu konzentrieren, engagiert sich mit der Stadtreinigung Hamburg AöR ein neuer Betreiber, der thematisch perfekt zum Ort passt. Mit dem „Mahnmal“ der Deponie kann gut vermittelt werden, wie sorglos in der Vergangenheit mit Abfällen umgegangen wurde. Die Ausstellung im Informationszentrum wird um die Themen moderne Abfallwirtschaft und Recyclingmethoden ergänzt.



Abbildung 6 Beleuchteter Horizontweg bei der Langen Nacht der Museen 2014 (Bild SRH Hamburg)

Fragen der Besucher zum Angebot der Stadtreinigung können nun kompetent vor Ort beantwortet werden. Zusätzlich zum vorhandenen Film wird eine weitere Multimedia-show über die Stadtreinigung informieren. Unterrichtseinheiten für Schüler und Kundenveranstaltungen vermitteln heute schon die nötigen Verhaltensweisen und Möglichkeiten der modernen Abfallwirtschaft. Oberstes Gebot ist hier, dass Abfall zukünftig von der Bevölkerung als wichtige Ressource wahrgenommen werden soll.

## 4 Literatur

- |                                       |      |   |
|---------------------------------------|------|---|
| Esser, D./Weisleder, S./<br>Jacob, K. | 2013 | Hügel der neuen Horizonte – Energieberg Georgswerder. White Paper IBA Hamburg GmbH.   |
| Haupt, T. (Hrsg.)                     | 2010 | Fachtagung: 25 Jahre Sanierung der Deponie Georgswerder – Umgang mit baulichen gesicherten Altlasten – Erkenntnisse und Perspektiven. Tagungsband zur Fachtagung vom 10. Und 11. Juni 210 |
|                                       | 2012 | Technische Universität Hamburg – Harburg (2012): Auf der Kippe – Von der Altlastensanierung zu den Green Technologies. In TUHH SPEKTRUM S. 44 bis 47.                                     |



**Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Geogr. Deik Esser

Informationszentrum Energieberg Georgswerder

Stadtreinigung Hamburg

Fiskalische Straße 2

D-21109 Hamburg

Telefon +49 40 25 76 1081

Email: [d.esser@srhh.de](mailto:d.esser@srhh.de)

Website: [www.stadtreinigung-hh.de/energieberg](http://www.stadtreinigung-hh.de/energieberg)



# PV - Regenerative Energie auf Deponiekörpern – Erfahrungen und Praxisbeispiele

**Axel Beese, Manfred Karl, Jürgen Schmid**

Ingenieurgesellschaft AquaSoli, München

## Inhaltsangabe

In Deutschland werden seit Inkrafttreten des Gesetzes über den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG) im Jahr 2000 vermehrt Photovoltaikanlagen (PVA) errichtet. Neben Dächern und Freiflächen sind auch vorübergehend oder dauerhaft nicht mehr in Betrieb befindliche Deponien oder Deponieabschnitte als Standorte für PVA geeignet. Trotz Unterstützung von staatlichen Stellen (u.a. LfU; LfA der Länder) gibt es immer noch Unsicherheiten und Vorbehalte seitens der Deponiebetreiber. In den letzten Jahren wurden aber auch hier Konzepte und Techniken in der Photovoltaik entwickelt, die den speziellen Anforderungen und Bedürfnissen der Deponienachfolge Rechnung tragen. Die zeigen die anschließend aufgezählten praktischen Beispiele. Im Vordergrund der nachfolgenden Ausführungen stehen technische Aspekte bei der Realisierung.

Mit Blick auf die weitere nachhaltige Sicherstellung der Energieversorgung wird zukünftig die Photovoltaik als eine umwelt- und Ressourcen schonende Art der dezentralen Stromerzeugung eine entscheidende Rolle spielen.

Durch die begrenzten wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten für sonstige Aufgaben einerseits sowie der oft sehr guten Ausgangsbedingungen für PV Nutzung andererseits werden Deponien hier weiter in den Focus rücken.

## Stichworte:

Deponie-PV-Anlage Flachgründung, Schraubfundament, Probelastungen, Gründungsoptimierung, Qualitätsmanagement Bau, Prozesse Montageablauf



Abbildung 1 Deponie Hofgeismar [U9]

## 1 Einleitung

In Deutschland werden seit Inkrafttreten des Gesetzes über den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG) im Jahr 2000 vermehrt Photovoltaikanlagen (PVA) errichtet. Neben Dächern und Freiflächen sind auch vorübergehend oder dauerhaft nicht mehr in Betrieb befindliche Deponien oder Deponieabschnitte als Standorte für PVA geeignet. Trotz Unterstützung von staatlichen Stellen (u.a. LfU; LfA der Länder) gibt es immer noch Unsicherheiten und Vorbehalte seitens der Deponiebetreiber. In den letzten Jahren wurden aber auch hier Konzepte und Techniken in der Photovoltaik entwickelt, die den speziellen Anforderungen und Bedürfnissen der Deponienachsorge Rechnung tragen. Im Vordergrund der nachfolgenden Ausführungen stehen technische Aspekte bei der Realisierung.



## 2 PV auf Deponie – Pro und Contra

Die abfallrechtlichen Anforderungen an die Erstellung von PV Anlagen auf Deponiekörpern sind gegeben durch die Deponieverordnung sowie durch die „Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards“ BQS der LAGA Ad-hoc –AG Deponietechnik sowie ergänzende Dokumente (1).

Besonders zu berücksichtigen sind dabei:

- Keine Beschädigung des Oberflächenabdichtungssystems, inkl. der Rekultivierungsschicht
- Gewährleistung der Funktionalität des Entwässerungs- und Entgasungssystems
- Sicherstellung der Zugänglichkeit und Funktionalität der Überwachungseinrichtungen

Konsequenzen aus diesen Anforderungen

### **Was spricht für die Installation von PV auf stillgelegten Deponiekörpern?**

- Kein zusätzlicher Landverbrauch (Flächenrecycling)
- Andere Nutzungen werden nicht beeinträchtigt
- Notwendige Infrastruktur ist vorhanden (Umzäunung, Stromanschluss, Verkehrs-Anbindung)
- Geringer Personalaufwand und schnelle Reaktionszeiten; auf Deponie vorhandenes Betriebspersonal kann die PV-Anlage mit überwachen. Ggf. Synergien für die Überwachung in Folge anderer vorhandener Einrichtungen
- Nach erfolgreicher Oberflächenabdichtung rückläufige Gasverstromung erfährt Ausgleich durch PV-Strom-Produktion hins. produzierter Strommenge wie auch monetärem Ertrag
- i.d.R. Günstige Topographie im Bereich der Südböschung, Plateau und ggfs. auch West- / Ostböschung
- I.d.R. kaum Verschattung durch Bäume
- Fördermöglichkeit nach dem EEG / lokale Fördermittel
- Positive praktische Erfahrungen



### **Welche zusätzliche Aufwendungen und Risiken sind zu berücksichtigen?**

- Aufwendigere Planungs- und Genehmigungsverfahren
- Spezielle Gründungsvarianten zur Sicherstellung der Funktionalität des Deponiekörpers
- Höhere Kosten und Aufwendungen für Qualitätssicherung
- Höhere Anforderungen bei Bau/Montage
- „Störobjekte“ – Gaslanzen; Brunnen

## **3 Gründung von PV Anlagen auf Deponien**

Randbedingungen:

- Einwirkungen: Wind- / Schneelasten, Eigengewicht
- Bodeneigenschaften Rekultivierungsschicht
  - o Schwankungen in den Schichtstärken der Deponieabdichtung – Berücksichtigung bei Wahl der Gründung (Projektierbare Pfahllänge und korrespondierender Pfahlwiderstand/ Grundbruch und Gleiten von Flachgründungen und auf vorgegebenen Gleitfugen der i.d.R. geschichteten Abdichtungssysteme )
- Dichtung und Drainage
  - o Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Abdichtung a) mechanisch b) Wechselwirkung mit der PV-Anlage durch Veränderung des Wasserhaushaltes in der Rekultivierungsschicht (Infolge von Modulverschattung Verminderung von Verdunstung und Interzeptionsspeicherung; Veränderung der Vegetation; lokale Konzentration der N-Abflüsse, Veränderung der Dränspende (Abbildung 2)
  - o Dränkonzept/ Konstruktive Maßnahmen zur schadlosen Abführung des Oberflächenwassers (In Abhängigkeit von Böschungsneigung, Vegetation und Bodenbeschaffenheit: Modulabtropfkanten, Vorrichtungen zum Fassen, Dränieren und Ableiten von Wasser)



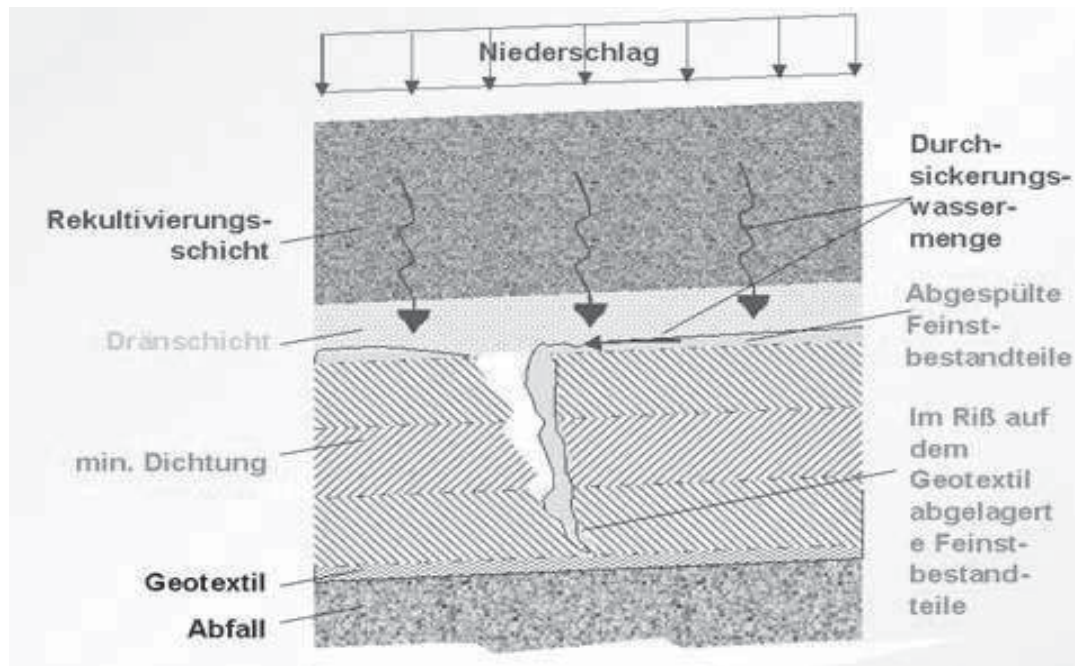


Abbildung 2 Bedeutung des Wasserhaushaltes für mineralische Abdichtungssysteme und insbesondere für selbstheilende Abdichtungen [U1]

### 3.1. Flachgründungen Unterkonstruktion

Einsatz bei begrenzten Gründungstiefen (< 50 cm)

#### Vorteile:

- Individuelles Design der Gründung gemäß statischen Einwirkungen
- flexibel gestaltbar, gemäß , lokaler Verfügbarkeit

#### Nachteile

- Hohe Kosten
- Zeitaufwand
- Witterungsabhängigkeit



### 3.1.1 Ortbeton



Abbildung 3 Beispiel für Kombination aus Fertigteil –Betonring und Ortbetonfüllung [U3]

### 3.1.2 Fertigbetonelemente

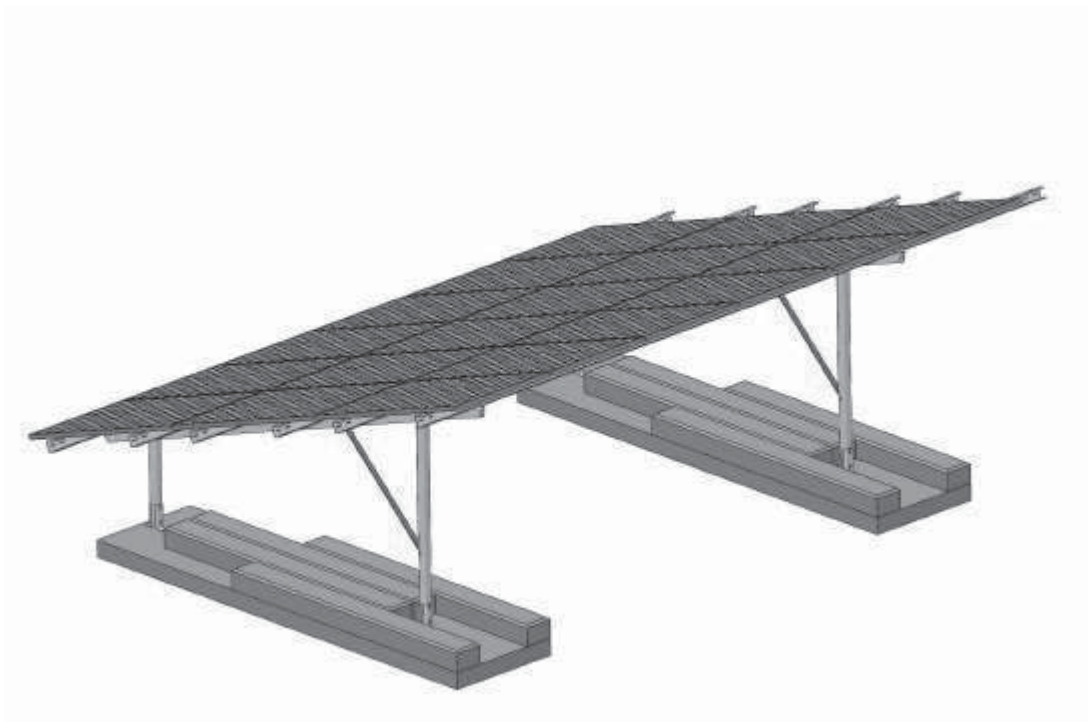


Abbildung 4 Beispiel für Gründung mit Fertigbetonelementen [U4]

**Vorteile:**

- Geringerer Aufwand auf der Baustelle
- Belastbarkeit in kritischen Bereichen gut adaptierbar

**Nachteile**

- Logistikaufwand
- i.d.R. höhere Kosten
- Ggfs. Aufwand zur Vorbereitung des Fundament-Untergrundes

**3.1.3 Bahnschwellen**

Abbildung 5 Beispiel für Gründung mit gebrauchten Bahnschwellen

**Vorteile:**

- kostengünstig
- Prinzip Kreislaufwirtschaft ( QS Maßnahmen!)

**Nachteile**

- Logistik
- Achsmaßverkürzungen
- Ggfs. Aufwand für QS Sicherung



### 3.2. Gründung Unterkonstruktion mit eingeschraubten Fundamenten (Helicals)



Abbildung 6 Verschiedene einschraubbare Fundamente  
Das linke Fundament besitzt eine Tonne im Kopfbereich, welche zu höheren horizontalen Widerständen führt.

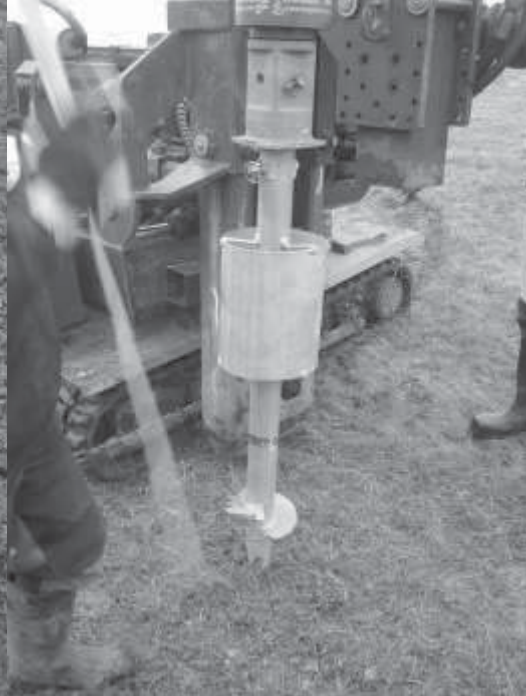


Abbildung 7 Eindrehvorgang eines „Tonnenfundaments“

- Ab Einbindetiefen von mind. 50cm ist – je nach Boden und Lasten - der Einsatz von eindrehbaren Fundamenten (Helicals) erwägbar
- Entsprechende geotechnische Untersuchungen (Probelastungen) und Berechnungen sind zwingend notwendig





### 3.3. Gründung Gebäude



Abbildung 8 Transformator und Wechselrichter auf Deponiekörper

#### VORTEILE AUF EINEN BLICK

- ▶ Reduzierung der Tragschichtdicke um bis zu 50%
- ▶ Vergleichmäßigung von Setzungen
- ▶ Verbesserter Lastabtrag
- ▶ Zeit- und Kostenersparnis durch schnelle und einfache Verlegung
- ▶ Schnelle Erhöhung der Belastbarkeit von wenig tragfähigem Untergrund
- ▶ Hohe chemische Beständigkeit
- ▶ Kombinierbar mit kalk- und zementverbesserten Böden sowie Recycling-Materialien
- ▶ Hohe Robustheit gegenüber Einbaubeschädigungen
- ▶ Schonung von Ressourcen durch Einsparung/ Reduzierung von Bodenaustausch

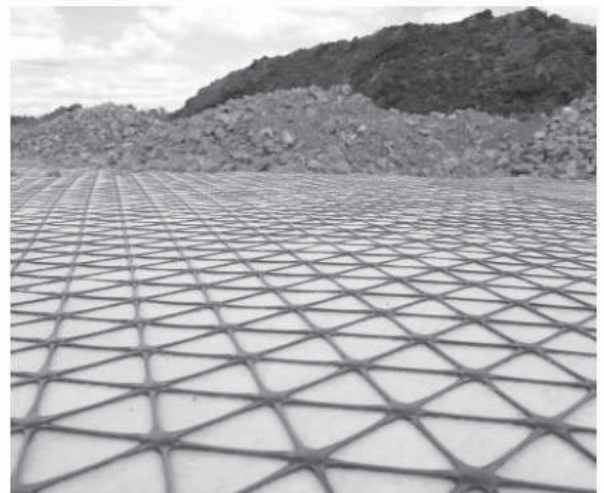


Abbildung 9 Lastverteilende Maßnahmen zur Reduzierung des Bodendruckes mithilfe von Geogittern [U5]





## 4. Besonderheiten beim Bau

### 4.1. Qualitätsmanagementplan (QMB)

Erstellung eines externen Qualitätsmanagement Planes mit folgenden Schwerpunkten:

1. Ausgangssituation und Zielsetzung
  - o Gegenstand und Zweck der Qualitätssicherung
  - o Verantwortlichkeiten; Basisdokumente
2. Systemaufbau
  - o Gründung und Aufbau der Unterkonstruktion für die PV Module
  - o Aufbau der Oberflächenabdichtungssysteme
3. Qualitätsanforderungen; Maßnahmen zur Qualitätssicherung und -lenkung bzgl. Interaktion mit:
  - o Oberflächenabdichtung
  - o Entwässerungssystem
  - o Entgasungssystem
  - o Wegenetze
  - o Baustoffe aus Wiederverwendung
4. Dokumentation und Abnahme

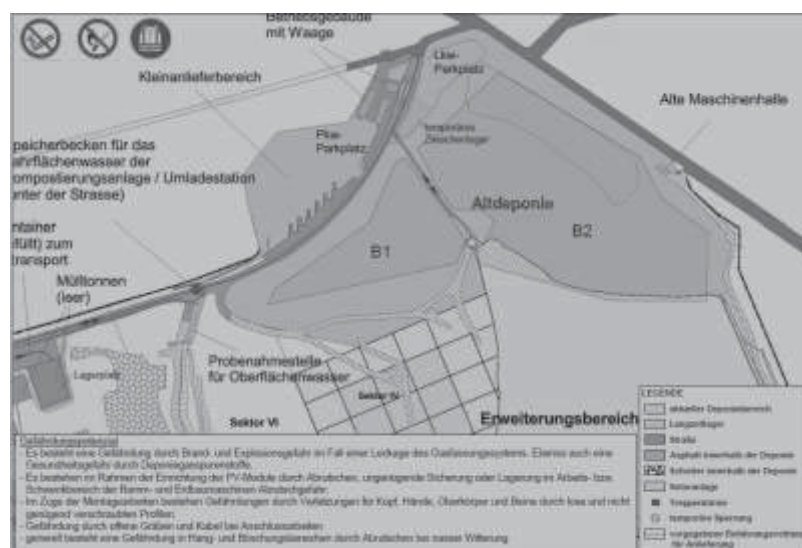


Abbildung 10

Beispieldokument für Schulung und Unterweisung des Personals im Rahmen des Health- & Saftesplanes [U6]



## 4.2. Arbeitsgeräte für Montage auf Deponieflächen



2 Raupenlader Bobcat T770

Gewicht	< 6,00 to
Hublast	< 2,20 to
Raddruck auf der Oberfläche	< 25 kN/m <sup>2</sup>
Raddruck auf der Gründungsebene – 40 cm	< 10 kN/m <sup>2</sup>

Anmerkung: Die Fläche kann uneingeschränkt mit dem T770 befahren werden.



1 Kompaktbagger Wacker Neuson 2003

Gewicht	< 2,00 to
Raddruck auf der Oberfläche	< 27 kN/m <sup>2</sup>
Raddruck auf der Gründungsebene – 50 cm	<<< 10 kN/m <sup>2</sup>

Anmerkung: Die Fläche kann uneingeschränkt mit dem WN 2003 befahren werden.

Abbildung 11 Beispiele für deponiegerechte Baugeräte mit niedrigem Schwerpunkt zum Arbeiten auf Böschungen und mit geringer Flächenpressung zum Schutz von Abdichtungs- und Entgasungselementen [U7/U8]



### 4.3. Nachweis eingesetzter Materialien

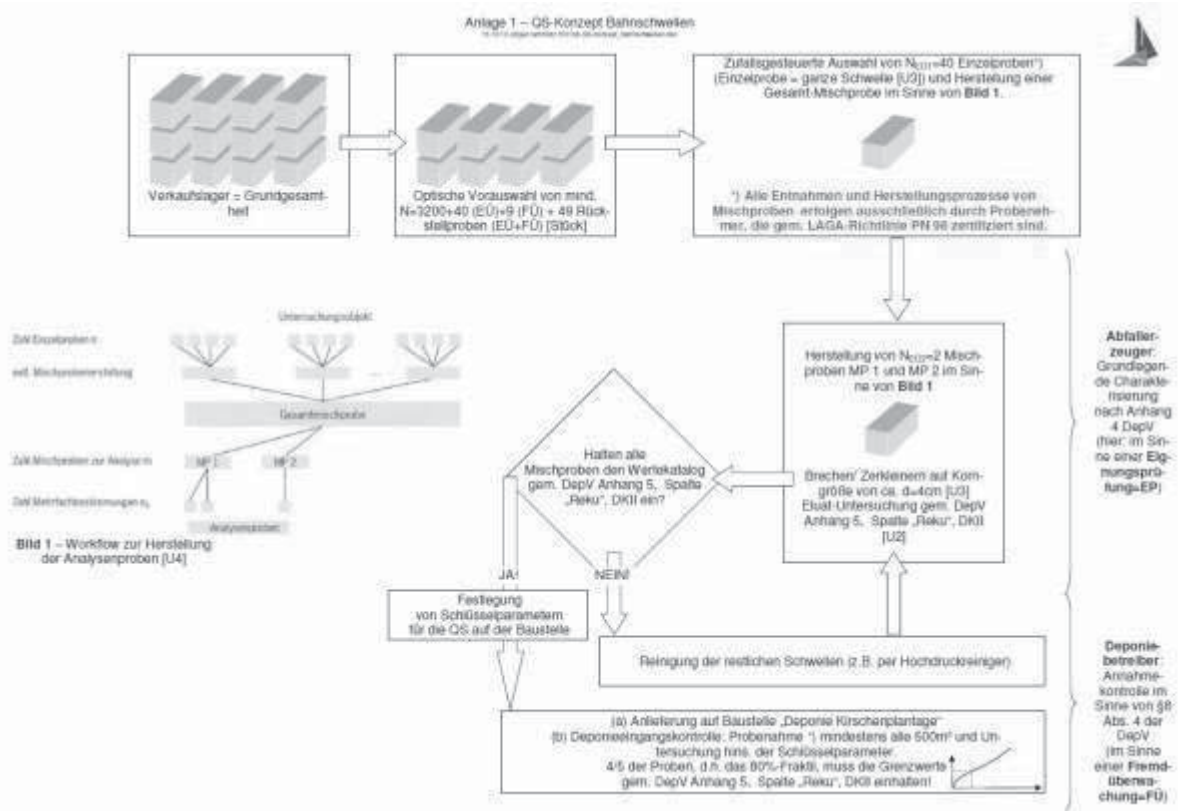


Abbildung 12 Beispiel für ein Flussschema im Rahmen eines baubegleitenden QS-Planes mit Verwertung von Bahnschwellen [U2]

Für Materialien, die im Deponiekörper verbaut werden, sind unter Berücksichtigung der jeweiligen Deponieklasse entsprechende Qualitätssicherungs-Maßnahmen festzulegen (Abbildung 11).

### 4.4. Kabelführung

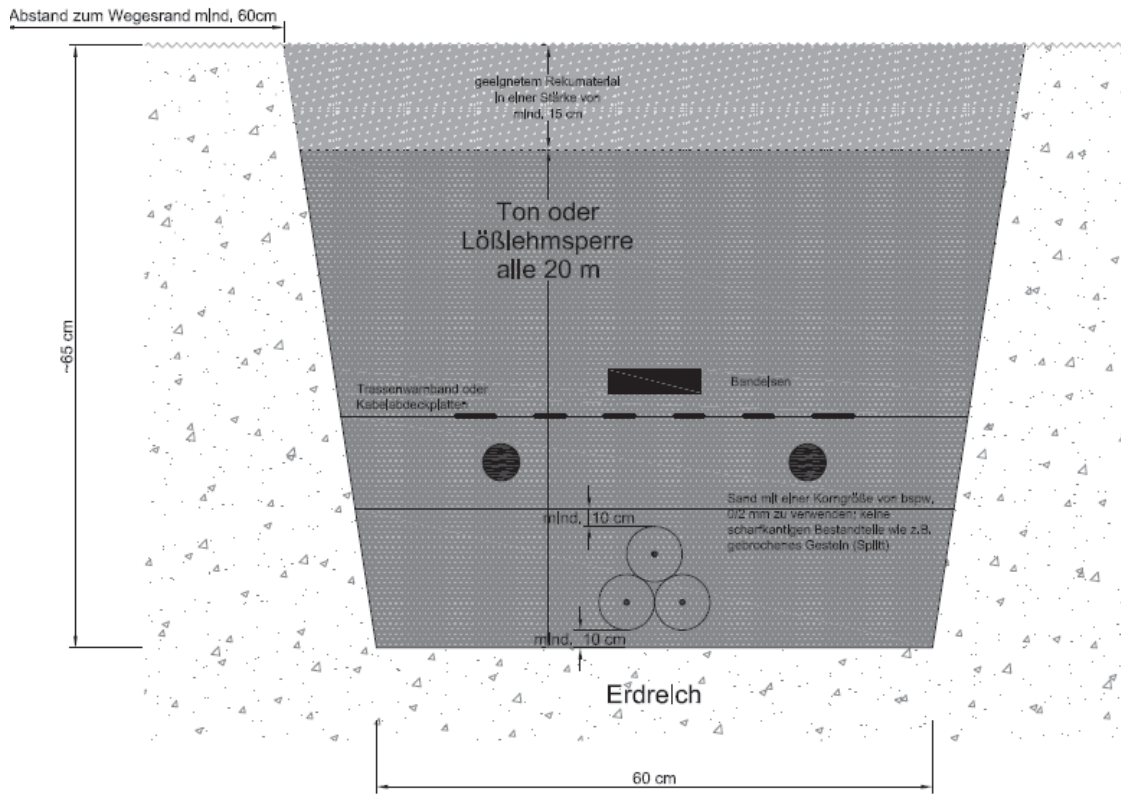


Abbildung 13 Planung und Realisierung von Kabelgräben: Einbau von Sperren aus bindigen Material („Ton Sperren“) um die dränierende Wirkung von nichtbindigen Kabelgraben-Füllungen und die erodierende Wirkung des abfließenden Wassers zu vermeiden





## 4.5. Rekultivierung



Abbildung 14 Rekultivierung von Kabelgräben nach Abschluss der PV Installation

Nach Fertigstellung der PV Anlage ist die Rekultivierungsschicht in Abstimmung mit Deponiebetreiber und Überwachungsbehörde wieder herzustellen.

## 5. Fallbeispiele

### 5.1 Projekt Feilheck (Deutschland/ Schleswig Holstein)

#### Ausgangssituation:

- o Ausschreibung Flachgründung am Deponiehang mittels Betonfundamenten,

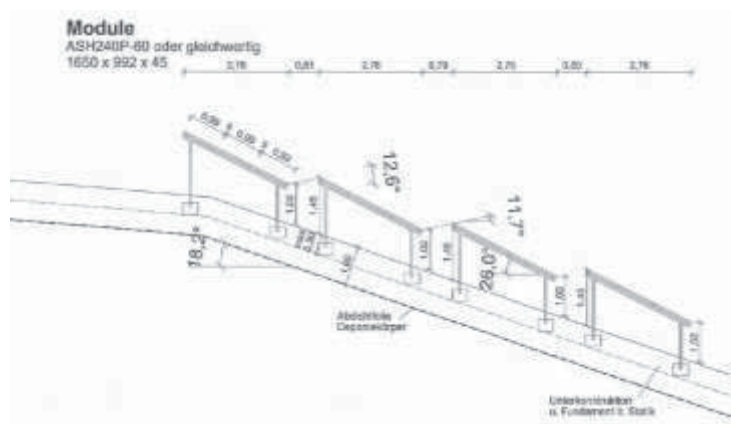


Abbildung 15 Geplante Gründung der PV-Anlage auf Deponieböschung





- o Max. Einbindung 50 cm, um die mineralische Abdichtung der Deponie nicht zu beschädigen

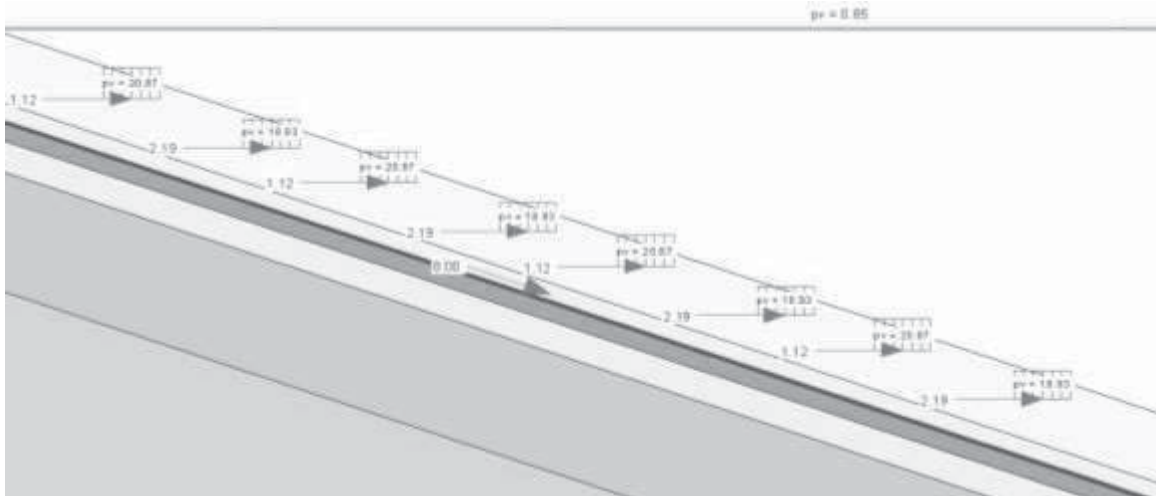


Abbildung 16 Modellbildung der Deponieböschung mitsamt der Einwirkungen in der Standsicherheitsberechnung

**Problem:**

Bereits ohne Einwirkung von Auflasten aus der PV-Anlage zeigte sich der Böschungsaufbau als gerade noch standsicher gem. EC7. Mit den zusätzlichen Einwirkungen aus der PV-Anlage konnte die Böschung mit den Betonfundamenten rechnerisch gem. EC7 zunächst nicht mehr nachgewiesen werden.

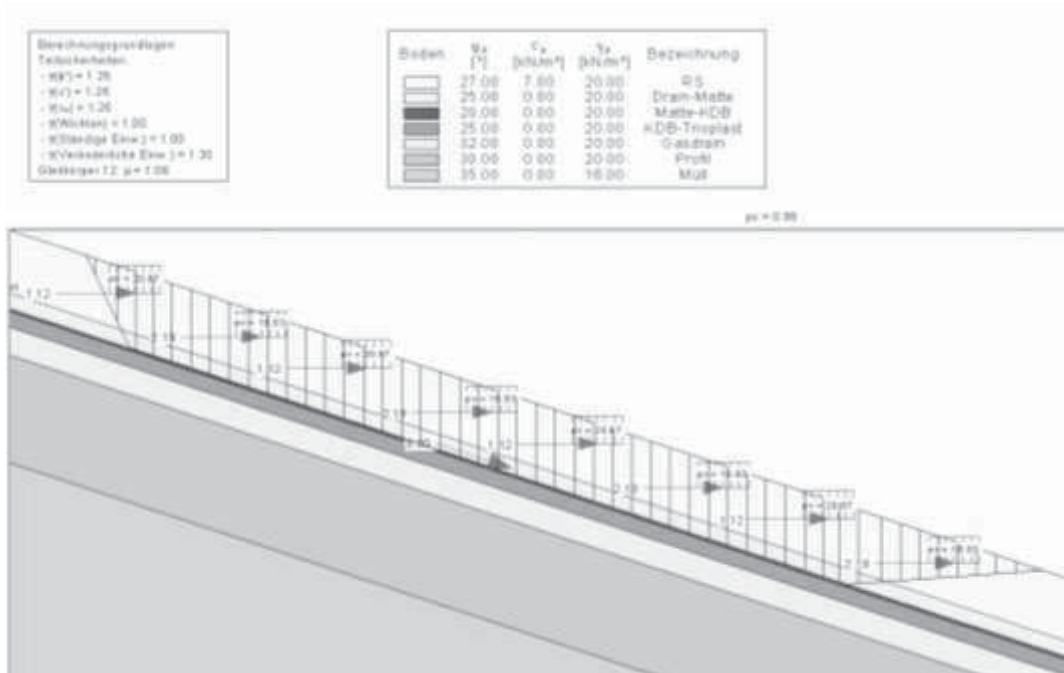


Abbildung 17 Berechnung der Standfestigkeit der Betonfundamente



→ Ausnutzungsgrad 1.06

→ Untersuchung einer alternativen, leichten Gründungsvariante (Im Boden eingegrabener Stahlkonstruktion/ „Stahlwurzeln“)



Abbildung 18 Berechnung der Standfestigkeit der „Stahlwurzel“

→ Die Standsicherheit des Deponiehangs gem. EC7 konnte mit dieser Variante nachgewiesen werden

Nicht nur „Stahlwurzeln“ oder Betonfundamente sind auf Deponien als Gründung möglich. Bereits bei geringen Einbindetiefen von 60-80 cm können auch die nachfolgend dargestellten Varianten interessant werden.

## 5.2. Deponie Wriezen

- Eine Gründung mit Klein-Rammpfählen erwies sich ab einer Einbindetiefe von ca. 80 cm als denkbare technische Option (Abbildung 1)



*Abbildung 19 Test eines Omega Profils (ca. 20x20 cm) mit Druckstempel und einer Einbindetiefe von 80 cm!*



*Abbildung 20 Vorbereitung einer Klein-Rammpfahl-Gründung an einem 15° geneigten Hang*

## 6 Zusammenfassung

Mit Blick auf die weitere nachhaltige Sicherstellung der Energieversorgung wird zukünftig die Photovoltaik als eine umwelt- und Ressourcen schonende Art der dezentralen Stromerzeugung eine entscheidende Rolle spielen.



Durch die begrenzten wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten für sonstige Aufgaben einerseits sowie der oft sehr guten Ausgangsbedingungen für PV Nutzung andererseits werden Deponien hier weiter in den Focus rücken.

Praktische Beispiele zeigen, dass zwischenzeitlich Techniken und Technologien für die PV Installation auf Deponien erarbeitet wurden, die den Anforderungen bzgl. Schutz des Oberflächenabdichtungsystems wie auch den besonderen Anforderungen der Deponienachsorge Rechnung tragen und sich wirtschaftlich darstellen lassen.

## 7 Literatur

U1	Jürgen Schmid	2003	BayForrest-Forschungsvorhaben F 166 „Wirtschaftlichkeitsvergleich von Oberflächenabdichtungen“, München
U2	AquaSoli	2013/2014	QS-Plan für eine Deponie in Hessen unter Einsatz von gebrauchten Bahnschwellen als Gründungselement (unveröffentlicht)
U3	Fa. Schletter	2014	<a href="http://www.schletter.de">www.schletter.de</a> , Gewerbegebiet an der B15, Alustraße 1, 83527 Kirchdorf / Haag i. OB
U4	Fa. Zimmermann	2014	<a href="http://pv-stahlbau.de/index.php?lang=de">http://pv-stahlbau.de/index.php?lang=de</a> Zimmermann PV-Stahlbau GmbH & Co. KG, ZIMMERMANN PV-Stahlbau GmbH & Co. KG, Petrusstrasse 1, 88436 Oberessendorf, Deutschland
U5	Tensar	2012	Firmenprospekt „Broschüre_Tragschichtstabilisierung-1.pdf“ bzgl. Tragschichtstabilisierung - Tensar International GmbH
U6	SIG Hessen	2013	<a href="http://www.sig-hessen.com">www.sig-hessen.com</a>
U7	Bobcat Bensheim GmbH	2014	Firmenprospekt
U8	Wacker Neuson	2014	Firmenprospekt
U9	Abfallentsorgung Kreis Kassel	2014	<a href="http://www.abfall-kreis-kassel.de">www.abfall-kreis-kassel.de</a>



**Anschrift der Verfasser(innen)**

Dipl.Ing. Jürgen Schmid  
AquaSoli GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Axel Beese

Dipl.-Ing. Manfred Karl

Ingenieurgesellschaft für Geotechnik, Regenerative Energie und Deponietechnik

Birkenleiten 41

D-81543 München

Telefon +49 89 62233768-0

Fax +49 89 62233768-18

Email [info@aquasoli.de](mailto:info@aquasoli.de)

Website: [www.aquasoli.de](http://www.aquasoli.de)







