

Wie können Setzungen an Deponien sicher gemessen werden?

Von Kurt Lhotzky

Ingenieurgesellschaft Lhotzky +Partner mbH

Pillmannstraße 29a, 38112 Braunschweig

www.lhotzky-partner.de ; E-mail: lhotzky@lhotzky-partner.de

Inhalt

1. Einleitung
2. Verformungen
3. Messverfahren
4. Beispiele für Setzungsmessungen an Deponien
und weiterführende Auswertung der ermittelten Daten
 Überwachung einer Zwischenabdichtung
 Überwachung einer Oberflächenabdichtung
5. Ausblick
6. Literatur

1. Einleitung

Mit der Entwicklung der Deponietechnik von der „Müllkippe“ in einer alten Kiesgrube bis zu einem anspruchsvollen Großbauwerk haben sich auch die Anforderungen an die notwendige messtechnische Überwachung gesteigert. Die modernen Deponiebauwerke mit ihren teilweise sehr komplexen und mit dem jeweiligen Stand der Technik gewachsene Aufbau sowie den inzwischen großen Ablagerungsmengen erfordern den Einsatz qualifizierter und angepasster Baumesstechnik. Das besondere an diesen großen Deponien ist, dass sie einen großen und schwer steuerbaren „Bioreaktor“ darstellen. Nur mit einem umfassenden und aussagekräftigen Messprogramm können die umwelt- und klimarelevanten Risiken, die mit solchen Großbauwerken verbunden sind, sicher über sehr lange Zeiträume von der Betriebs- über die Stilllegungs- und der Nachsorgephase kontrolliert und überwacht werden.

2. Verformungen an Deponien

Das wesentliche Merkmal eines Deponiebauwerks ist, dass seine geometrischen Strukturen und wichtigen Bauelemente über viele Jahrzehnte ständigen und teilweise erheblichen Verformungen [6] ausgesetzt sind. Zum einen ändern sich während der Betriebszeit häufig die Auflasten und zum anderen kommt es durch die ablaufenden biologischen Reaktionen und Abbauvorgänge im Abfall zu Setzungen und Sackungen im Deponiekörper, die über sehr lange Zeiträume anhalten.

Eine wichtige Kenngröße für den Bau und den Betrieb einer Deponie ist die Setzung an der Basisabdichtung. Zur Überprüfung der Standsicherheit müssen die baugrundtechnischen Prognosen für die Verformung des Untergrunds durch die Auflast des abgelagerten Abfalls über die Betriebszeit der Deponie und darüber hinaus durch Messungen überprüft werden.

Für die Bewertung der Funktionsfähigkeit der Basisabdichtung einer Deponie ist neben dem zeitlichen Setzungsverlauf besonders die Kenngröße der Gleichmäßigkeit der vertikalen Verformungen relevant. Dies gilt ebenfalls für die Ent-

wässerungsleitungen. Bei ungleichmäßigem Setzungsverhalten kann das Fließgefälle in den Rohren zu klein werden und es können Unterbögen auftreten, in denen sich das Sickerwasser staut. In solchen Rohrbereichen können sich dann durch Sedimentation sowie durch biologische oder chemische Prozesse Inkrustationen und festen Ablagerungen als Fließhindernisse bilden. Im extremen Fall können engräumige Setzungsdifferenzen zu Rohrschäden (Rißbildung, Bruch, Versatz) und beim Abdichtungssystem zum Versagen (Reißen der Dichtungsfolie, Risse und Spalten in der Tondichtung) führen.

Im Abfall und an der Deponieoberfläche treten neben der auflastbedingten Setzung zusätzliche vertikale Verformungen (Sackungen) auf, die durch Stoffumwandlung und biologische Abbauvorgänge entstehen. Diese zeitlich sehr lange anhaltenden Prozesse können insgesamt zu Verformungen führen, die bis zu 10% der anfänglichen Ablagerungsmächtigkeit betragen. Hinzu kommt, dass durch die Ablagerung unterschiedlicher Reststoffe in teilweise kleinräumigen Betriebsflächen es zeitlich und örtlich zu sehr differenzierten biologischen Abläufen beim Abbau der organischen Anteile im Abfall kommt. Dadurch treten unweigerlich auf teilweise kurzen Entfernungen massive ungleichmäßige Setzungen des Abfalls auf, die bei der Endabdichtung und Abdeckung zu gravierenden Problemen führen können.

Hiervon sind besonders die technischen Einrichtungen in oder auf der Deponie betroffen:

- Entgasungsleitungen
- Zwischenabdichtungen und die zugehörigen Entwässerungssysteme
- Oberflächenabdichtungen und die zugehörigen technischen Leitungssysteme
- Bermen und Böschungen

Zur sicheren Erfassung von ungleichmäßigen vertikalen Verformungen an Deponien wird eine an die jeweiligen Randbedingungen angepasste Messtechnik gebraucht, an die eine Reihe besonderer Anforderungen gestellt werden:

- Erfassung von stark ungleichmäßigen und kleinräumigen Setzungen
- Enges Messraster mit hoher Messauflösung

- Flexible und angepasste Anordnung des Messsystems
- Robust und beständig gegen chemische und biologische Einflüsse
- Langzeitstabil auch bei starken Verformungen
- kostengünstig

3. Messverfahren

Zur messtechnischen Ermittlung solcher vertikaler Verformungen bei Deponien werden unterschiedliche Messsysteme eingesetzt. Schon vor mehr als 25 Jahren wurde von Lhotzky [1-3] ein mobiles hydrostatisches Messverfahren entwickelt, um die Höhenlage der Rohrsohlen von Entwässerungsleitungen an Deponien zu erfassen. Mit der damaligen Technik konnten bereits Dränageleitungen von mehr als 100 m Länge mit einer Auflösung von 1 mm WS mit einem kleinen Entfernungsraster vermessen werden.

Die immer größeren Anforderungen an die Messtechnik seitens der Deponietechnik führten zur Entwicklung des **hydrostatischen Linienmessverfahrens** (System Lhotzky) [4]. Dieses Messsystem ist speziell für die oben genannten besonderen Anforderungen konzipiert worden und eröffnet gleichzeitig auch viele neue Einsatzmöglichkeiten besonders für die Nachsorgephase.

Das Messprinzip der hydrostatischen Linienvermessung wurde entwickelt, um alle Arten von ober- und unterirdischen Profilen und ihre durch Umgebungseinflüsse bedingten zeitlichen Variationen der Höhenlage zu untersuchen. Durch wiederholte Vermessung erhält man hoch aufgelöste (typisch X: 25 cm, Y: 1 mm) Höhenprofile, zwischen denen die Differenzen in Form von Setzungskurven berechnet werden. Aufgrund der hohen örtlichen Auflösung und des stark belastbaren Messsystemschlauchs, eignet sich das Verfahren für eine große Bandbreite an Messaufgaben im Bereich der Setzungsüberwachung:

- sehr genaue Messung von geringen Setzungen
- Erfassung von stark ungleichmäßigen und kleinräumigen Setzungen
- Setzungsmessung bei Baumaßnahmen mit sehr starken Setzungen

Die hydrostatische Linienvermessung basiert auf der diskontinuierlichen Messung des hydrostatischen Drucks zwischen vordefinierten, äquidistanten Punkten (z.B. 25 cm) in einem entlang des Profils installierten Messschlauchs und einem Referenzniveau. Die einzelnen Komponenten des speziell entwickelten Setzungsmessrohres sind zum Schutz vor hohen mechanischen Belastungen in LDPE vergossen (s Abb.3-1 u.3-3). Das Linienmesssystem besteht aus mehreren innen liegende Messschläuchen und wird je nach Anwendung mit einem zentrisch geführten Signalkabel ergänzt. Das Standard-Setzungsmessrohr wird zurzeit in Längen bis zu 500 m bei einem Durchmesser von 20 mm gefertigt.

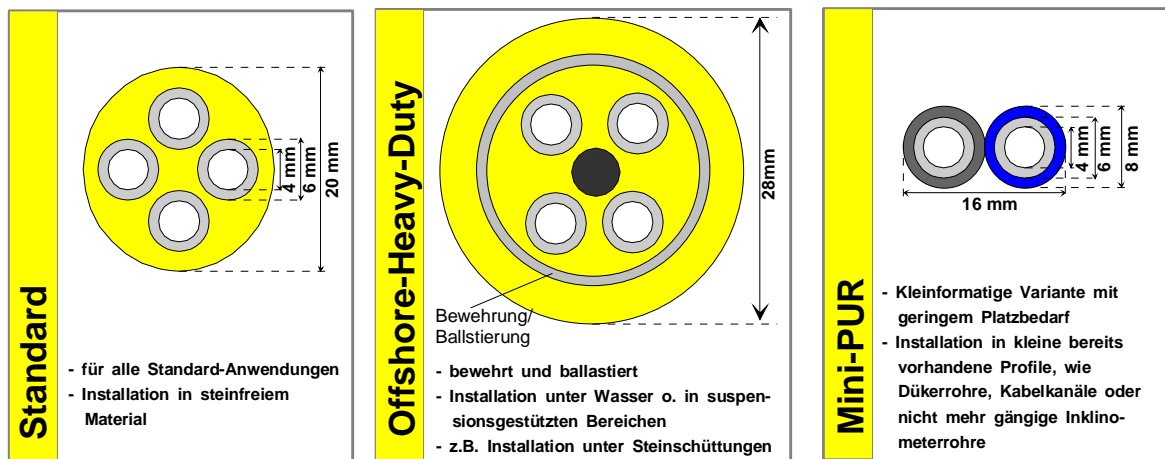


Abb. 3-1: Messsystemschlauchtypen



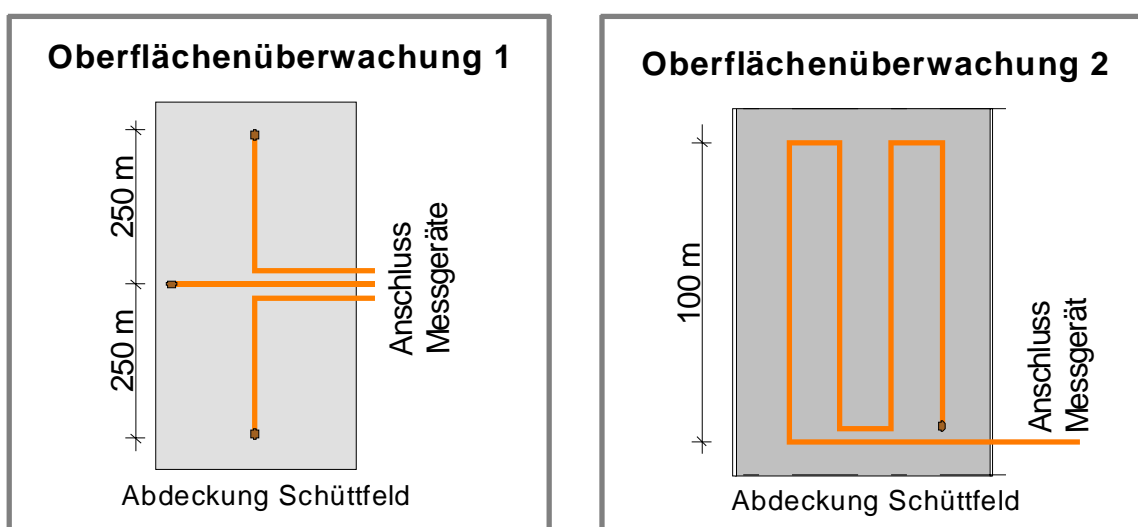
Abb. 3-2: Messsystemkoffer



Abb.3-3: Standard-Systemschlauch

In der Abbildung 3-4 wird das Messprinzip der hydrostatischen Linienvermessung verdeutlicht. Für die Vermessung der Höhenlage eines, der speziellen Anwendung entsprechend, verlegten Systemschlauchs wird von einem Messkoffer (s. Abb.3-2) aus eine dosierte Menge entgasten Wassers in eines der Messschläuche gepumpt. Dann wird an dem Drucksensor der momentane hydrostatische Messwert erfasst und in einem Daten-Logger gespeichert. Danach wird wieder mit einem weiteren Pumpvorgang die Wassersäule bis zur nächsten Position im Messschlauch verlängert und der zugehörige hydrostatische Druck gemessen. Auf diese Weise wird sukzessive entlang der gesamten Messschlauchlänge die Höhenlage linienförmig vermessen.

Gleichzeitig wird in einem parallel zum Messschlauch verlaufenden HDPE-Schutzrohr mit Temperatursonden an repräsentativen Stellen der Temperaturverlauf entlang des Messprofils erfasst. Mit Hilfe dieser Messdaten werden die Temperatureinflüsse auf die hydrostatischen Werte rechenstechnisch kompensiert und die gewünschte hohe Messgenauigkeit bei den Höhendaten erreicht.



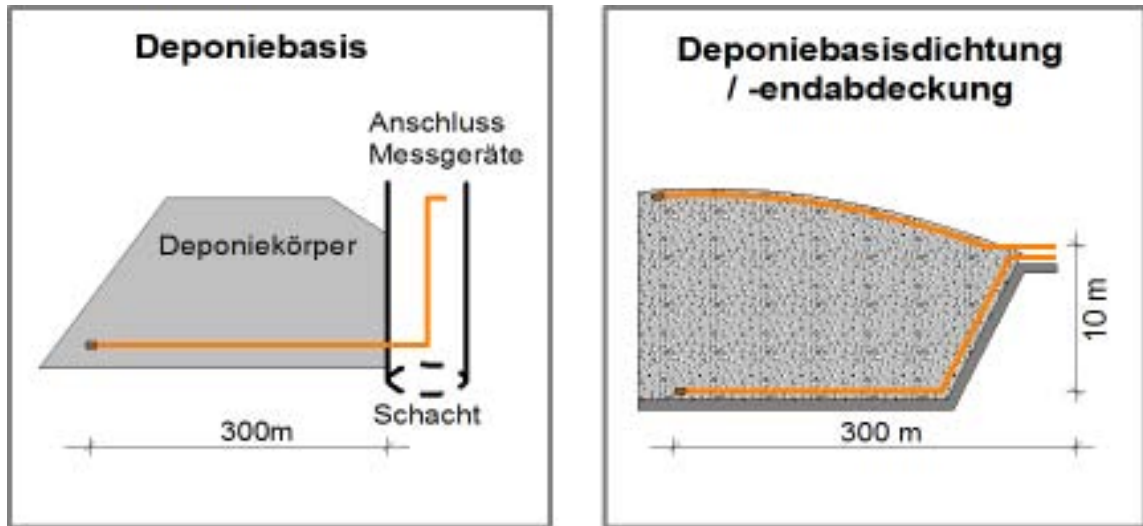
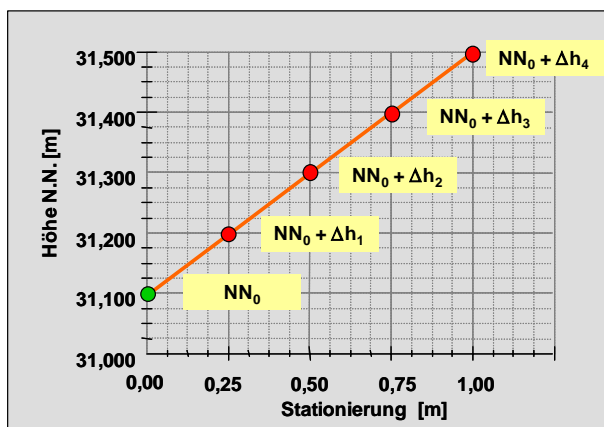


Abb. 3-5: Beispiele für Verlege- und Anbindungsvarianten des Messsystemschlauchs im Deponiebereich



Messprinzip

Messen des hydrostatischen Drucks in einem inkrementell gefüllten Messschlauch

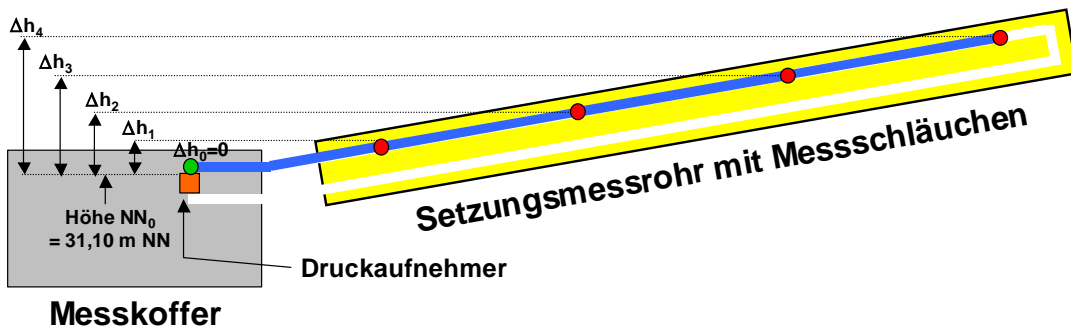


Abb. 3-4: schematische Darstellung des Messprinzips

Zum einen folgen die flexiblen Messschläuche leicht allen auch kleinräumigen Verformungen des Untergrundes und ermöglichen so eine sehr sensible Erfassung aller Setzungsvorgänge.

Zum anderen kann man durch die flexible Eigenschaft das Schlauchsystem entlang fast jedem gewünschten Messprofils verlegt werden (s. Abb.: 3-5).

4. Beispiele für Setzungsmessungen an Deponien und weiterführende Auswertung der ermittelten Daten

4.1 Überwachung einer Zwischenabdichtung

Noch in den 60er-Jahren wurde zur Ablagerung von Hausmüll auf ausgekieste Gruben in den Landkreisen zurückgegriffen. Erst mit der Weiterentwicklung der Entsorgungstechnik und dem Wissen um Ausbreitung von Schadstoffen wurden diese Ablagerungen zu kontrollierten Deponiestandorten weiterentwickelt.

In dem gezeigten Beispiel wurde der bereits abgelagerte Hausmüll mechanisch tiefenverdichtet, um spätere Sackungen und Setzungen zu reduzieren. Auf diese vorbehandelte Fläche wurde eine HDPE-Zwischenabdichtung nach TASI aufgebracht und danach eine nach dem Stand der Technik geordnete Deponie betrieben.

Eine Auflage der genehmigenden Behörden ist die regelmäßige Überprüfung der Höhenlage der Zwischenabdichtung. Ziel der Messungen ist die Überwachung der Gleichförmigkeit der Setzung sowie der Ausschluss von zu starker Dehnung der Folie.

Häufig werden für solche Anwendungen klassische Setzungspegel eingesetzt. Sie liefern allerdings nur Informationen über großräumig auftretende Verformungen. Für die Dichtungsfolie gefährliche Belastungen sind dagegen nur kleinräumige ungleichmäßige Setzungen oder Sackungen, die von solchen Pegelmesssystemen nicht zu erfassen sind.

Für den Einsatz in einem in Betrieb befindlichen Schüttfeld eignen sich Setzungspegel überhaupt nicht, da sie den Deponiebetrieb stark behindern und sich mit fortschreitendem Abfalleinbau schräg stellen. Das eingesetzte hydrostatische Linienmessverfahren wird dagegen in Form eines flexiblen, auflaststabilen Systemschlauchs direkt auf der Folie verlegt und kann problemlos überdeckt werden (s. Abb. rechts). Es zeichnet sich durch eine hohe örtliche Auflösung bei gleichzeitig hoher Messgenauigkeit bei der Höhenlagenermittlung aus. Dadurch ist es möglich, auch kleinräumig auftretende Setzungen und Verformungen zu erkennen. Aufgrund der von Messtermin zu Messtermin gewonnenen Daten können dann in diesem engen örtlichen Raster Setzungen und Dehnungen berechnet werden.

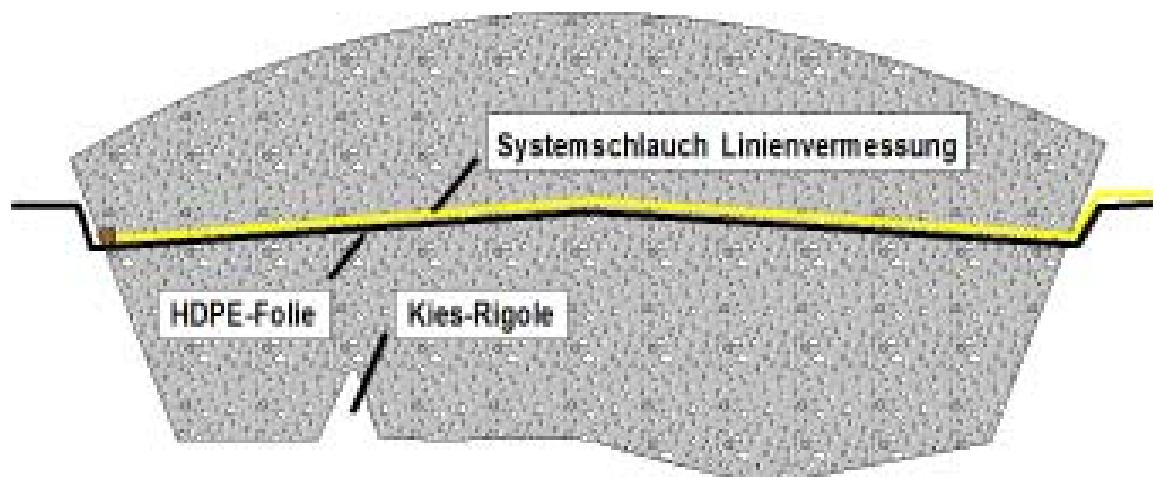


Abb. 4.1-1 Schnitt durch den Deponiekörper mit Lage des Messsystemschlau-ches auf der Zwischenabdichtung und den besonderen Untergrundverhältnissen

Der Setzungsverlauf in Abbildung 4.1-2 zeigt, wie sich die in Abb. 4.1-1 schematisch dargestellte alte Kiesgrubensohle im Konsolidierungsverhalten widerspiegelt. Dabei zeichnet sich deutlich die stehen gebliebene Kiesrigole ab. Hier sind dann auch die Maximalwerte der Dehnung zu beobachten (Abb. 4.1-3). Die teilweise auftretenden negativen Werte (Stauchung) resultieren aus der Tatsache, dass die Zwischenabdichtung dachförmig mit einer Steigung zur Schüttfeldmitte hin eingebaut wurde. Eintretende Setzungen führen somit zunächst zu einer Stauchung der Folie.

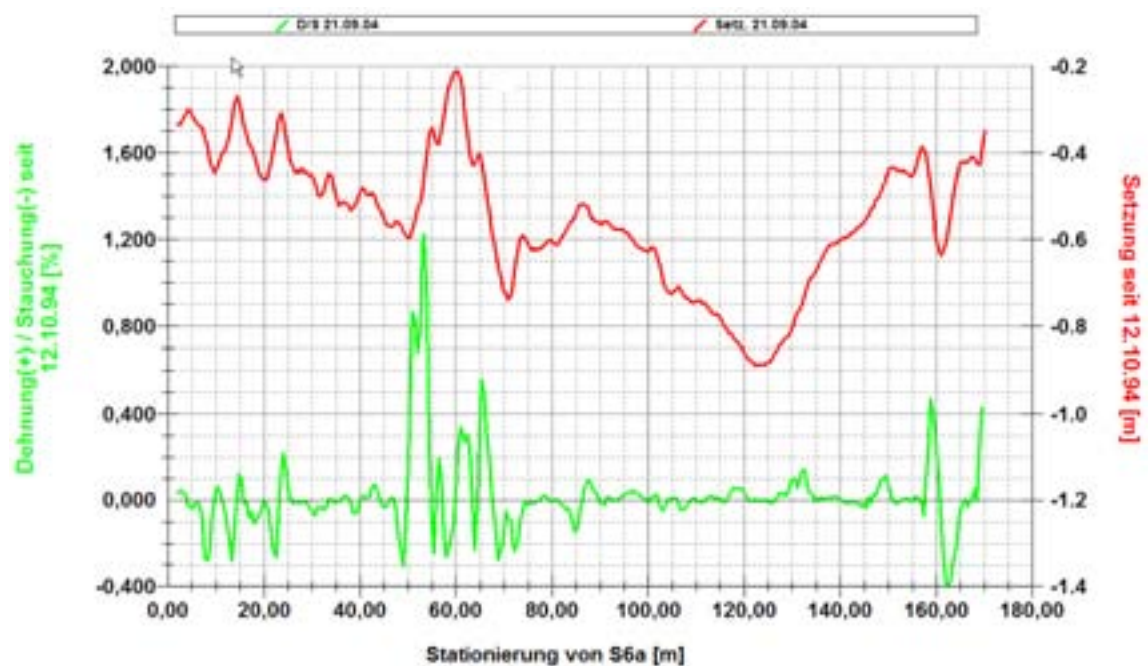


Abb. 4.1-2: Dehnung/Stauchung (grün, linke Achse) und Gesamtsetzung seit der Nullmessung (rot, rechte Achse)

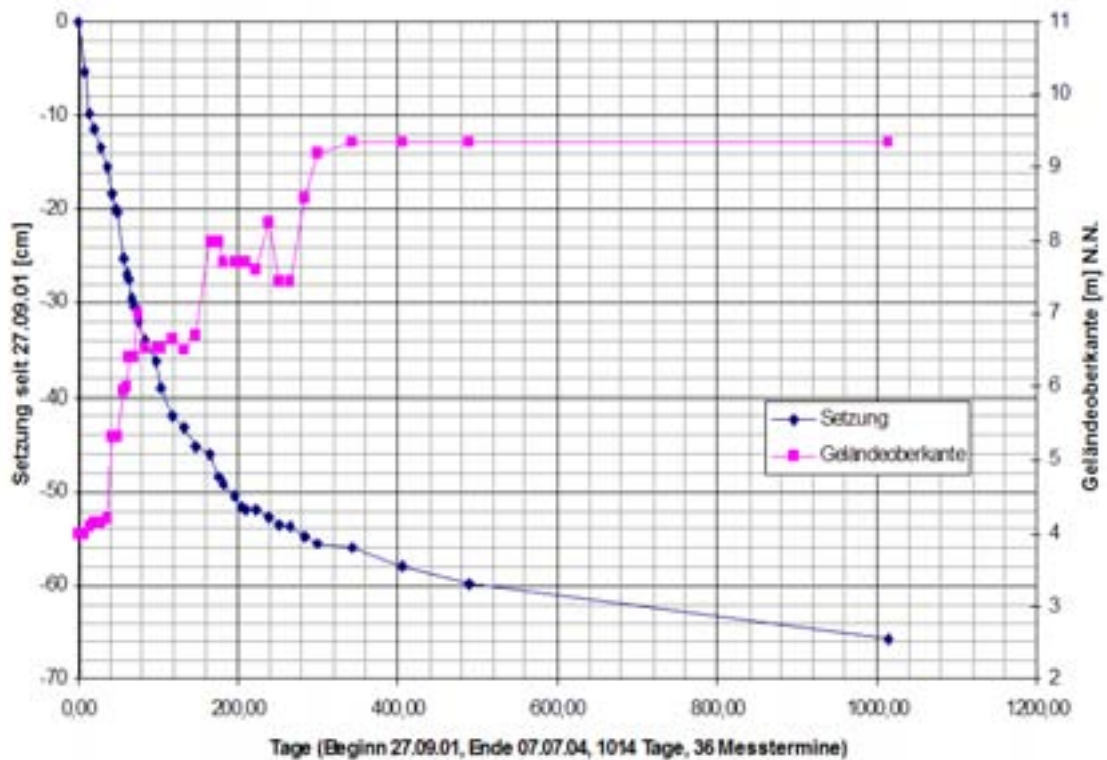


Abb. 4.1-3: Zeit-Setzungskurve mit zeitlicher Entwicklung der Geländeoberkante

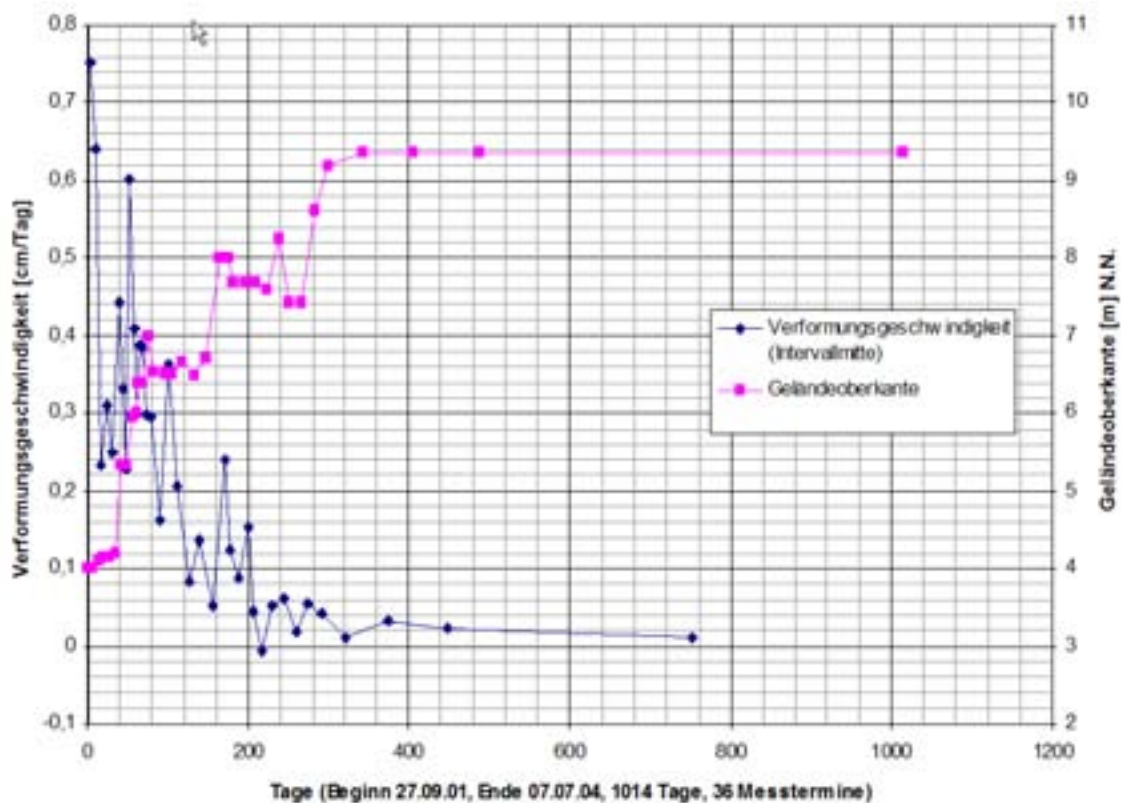


Abb. 4.1-4: Verformungsgeschwindigkeiten mit zeitlicher Entwicklung der Geländeoberkante durch Aufschüttung

Die Abbildungen 4.1-3 bis 4.15 beziehen sich nicht auf das oben erwähnte Beispiel. Die hier dargestellten Daten zeigen den Setzungsverlauf an der Aufstandsfläche eines Erddamms während und nach der Schüttphase. Das Bauwerk wurde auf einer Fläche mit aktiver Baugrundverbesserung errichtet.

Nur mit Hilfe einer Datenbank können die großen Mengen an Messinformationen projektorientiert verwaltet und berechnet werden. Damit stehen alle auf einer Deponie über lange Zeiträume erfassten Daten schnell für weiterführende Berechnungen und Darstellungen zur Verfügung

Aus der Abfolge von berechneten Einzelsetzungen lassen sich nun verschiedene Zeit-Setzungsdiagramme (Abb. 4.1-3) sowie Zeit-Verformungsgeschwindigkeitsdiagramme (Abb. 4.1-4) berechnen und darstellen.

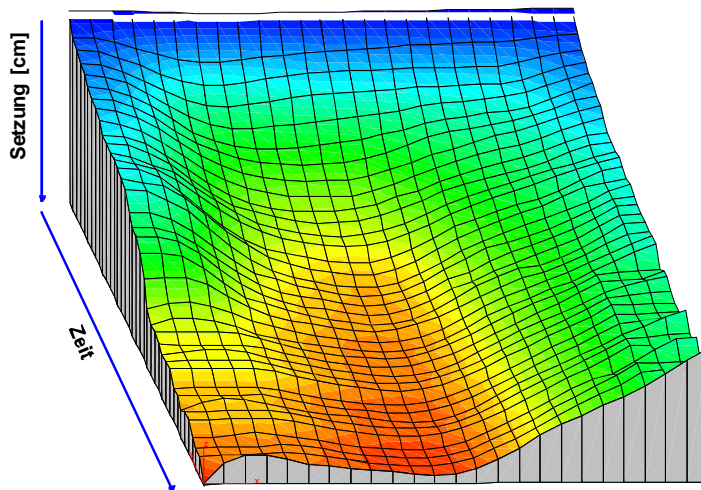


Abb. 4.1-5: Die große Anzahl von Messpunkten erlaubt eine 3D-Darstellung des Zeit-/Setzungsverhaltens

Aufgrund der hohen örtlichen Auflösung der Linienvermessung (z.B. alle 25 cm ein Messwert) kann entlang der Messstrecke eine große Anzahl von Beobachtungspunkten definiert werden. Erweitert man die grafische Darstellung der Zeit-Setzungskurven um die 3. Dimension der Station des Beobachtungspunktes auf der Messlinie, erhält man eine sehr anschauliche Darstellung des Setzungsverlaufs an einem gesamten Messprofil über die Zeit.

Durch die parallele Anordnung von mehreren Messprofilen auf einer Fläche lassen sich auch 3D-Darstellungen der Oberflächensetzungen berechnen.

4.2 Überwachung einer Oberflächenabdichtung

Für Altdeponien ohne eine Basisabdichtung ist eine Oberflächenabdichtung nach TAsi zwingend erforderlich. Bei dem dargestellten Beispiel handelt es sich um eine solche Altdeponie, die in einer ehemaligen Grube für Kies- und Sandgewinnung angelegt wurde. In der Abbildung 4.2-1 ist die Anordnung der Setzungsmesslinien auf der Oberfläche von dachförmig ausgebildeten Abdichtungen und Abdeckungen der einzelnen Bauabschnitte dargestellt. Ziel dieses Überwachungssystems ist das rechtzeitige Erkennen von kleinräumigen, ungleichmäßigen Setzungen und damit von unzulässigen Verformungen des HDPE-Abdichtungssystems. Dafür wurden die Messschläuche in langen Linien, der Geometrie der einzelnen Felder folgend, so angeordnet, dass mit 9 Profilen und einer Länge von insgesamt mehr als 3000 Metern, die Abdeckung der ganzen Deponie überwacht werden kann.

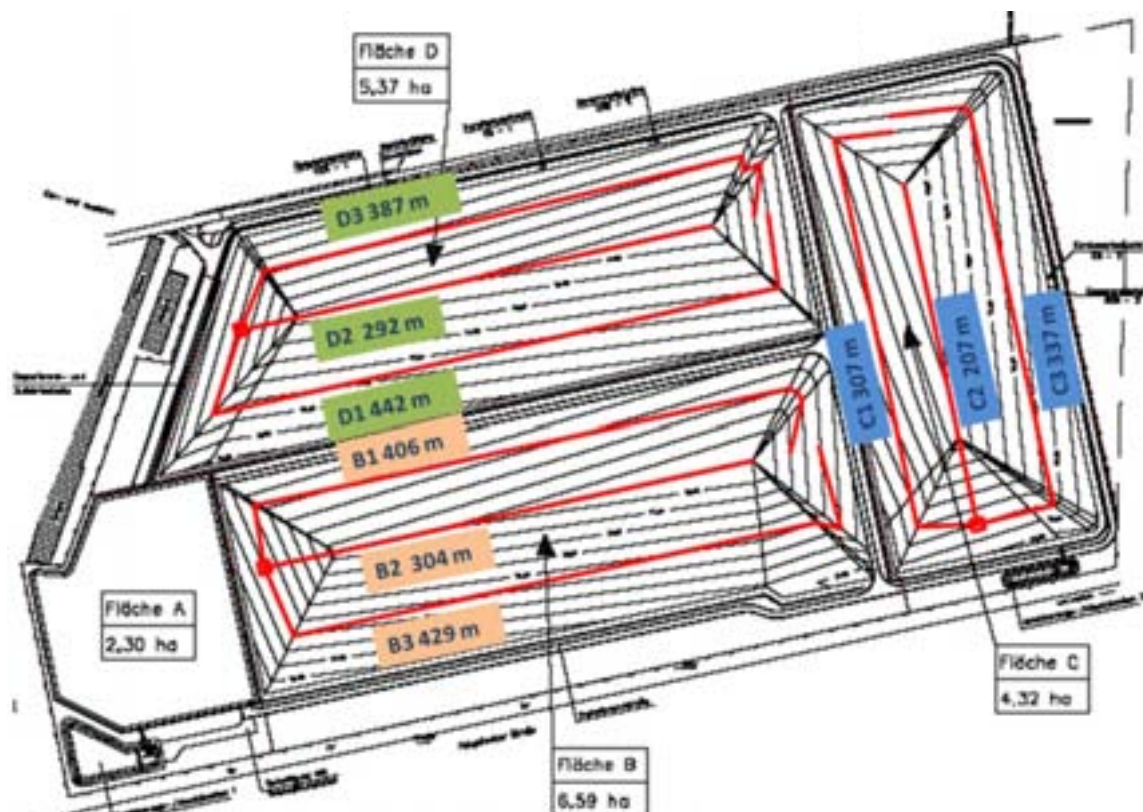


Abb. 4.2-1: Anordnung der Setzungsmesslinien auf der Oberfläche von dachförmig ausgebildeten Abdichtungen und Abdeckungen einzelner Bauabschnitte

Die Verlegung der einzelnen Systemschläuche erfolgte auf der bereits begrünten Oberfläche einer bis zu 2 Meter mächtigen Überdeckung der Dichtungsbahnen. Dazu wurde mit einer kleinen Grabenfräse ein 10 cm breiter und ca. 30 bis 40 cm tiefer Verlegungsgraben hergestellt (s. Abb. 4.2-2). In diesen Graben wurde anschließend der Standard-Systemschlauch und parallel dazu in ausgewählten Teilbereichen ein HDPE-Schurtzrohr für die Temperaturmessung auf einfache Weise eingelegt. Nach dem punktförmigen festlegen der Schläuche mit Boden, wurde der Trassenverlauf geodätisch erfasst. Das weitere Verfüllen der Gräben und das Verdichten des Bodens erfolgte danach in einfacher Handarbeit. Dadurch entstanden keine Flurschäden an der bereits fertigen Oberflächenabdeckung. Die spätere Restverdichtung übernahm eine weidende Schafherde.



Abb. 4.2-2: Herstellen des Verlegegrabens mit einer Grabenfräse



Abb. 4.2-3: Verlegung des Messsystemschlauchs



Abb. 4.2-4: Messschacht mit Messgeräten für die Linienvermessung

Im Anschluss an diese Arbeiten erfolgte eine doppelte Nullmessung als Basis für alle weiteren Wiederholungsmessungen, die in einem jährlichen Rhythmus erfolgen. Die Abbildung 4.2-4 zeigt einen Betonschacht ($D = 2000 \text{ mm}$ $H = 1000 \text{ mm}$) mit einer verschließbaren Holzabdeckung. Auf jedem Bauabschnitt laufen in einem solchen Schacht jeweils drei Messlinien zusammen. Auf Grund der gewählten Schachtgröße können mit drei Messgerätegruppen die Messlinien gleichzeitig vermessen werden. Die sukzessive Erfassung der Höhendaten erfolgt automatisch und mit einer Geschwindigkeit von ca. 4 Minuten pro Meter. Nach dem Einrichten von 9 Messgerätegruppen werden so in 30 Stunden mehr als 12500 Punkte mit einer Messauflösung von 1 mm relativ zu einer Bezugshöhe auf den Flächen erfasst. Das bedeutet eine automatische Präzisionsvermessung von mehr als 7 Punkten pro Minute. Für die Arbeiten vor Ort, das Einrichten und wieder Abbauen der Messgeräte, sowie das Anbinden der Daten an eine Referenzhöhe, benötigt das Messteam, bestehend aus Ingenieur und Techniker, zwei Tage. Am ersten Tag werden alle Messgeräte aufgebaut sowie gestartet und am zweiten Tag dann wieder abgebaut.

Damit wird an diesem Standort eine kostengünstige und sichere Überwachung für die Nachsorgephase realisiert.

5. Ausblick

Die Beispiele zeigen, welche neuen Möglichkeiten das *hydrostatische Linienmessverfahren* [4] der modernen Deponietechnik eröffnet. Neben der einfachen und baustellenfreundlichen Instrumentierbarkeit der Linienmessschläuche ist auch die Anpassungsfähigkeit an vorgegebene Randbedingungen bei der Verlegung hervor zu heben.

Durch die große Messpunktdichte in Verbindung mit einer hohen Messauflösung bei gleichzeitiger nur geringer Messunsicherheit durch eine begleitende messtechnische und rechentechnische Kompensation der Temperatureinflüsse können weiterführende Berechnungen [7] mit der Datenbasis erfolgen. So lassen sich z. B. die Verformungsgeschwindigkeit sowie Stauchung und Dehnung für lange beliebig verlaufende Profile berechnen. Durch die geeignete Verlegung von mehreren Messlinien auf einer Fläche können an Hand der Messdaten Höhenlinienpläne berechnet werden. Mit den Ergebnissen von Folgemessungen lassen sich dann flächenhaft die Bereiche mit unterschiedlichem Setzungsverlauf erkennen und es können z. B. Deponiebereiche mit erhöhtem biologischen Abbau sehr genau ermittelt werden.

Besonders in der Nachsorgephase sollte die Oberflächenabdichtung einer Deponie im engen Messpunktraster und flächig auf ungleichmäßiges Setzungsverhalten überwacht werden. Mit der **hydrostatischen Linienvermessung** steht dafür ein kostengünstiges, hochgenaues Verfahren zur Verfügung.

Nutzt man gleichzeitig den Effekt, dass die Gase aus der umgebenden Bodenluft langsam in das Messschlauchsystem diffundieren und tauscht man in größeren Zeitabständen das gesamte Luftvolumen des zweiten Schlauchpaares im Linienvermessungssystem aus, kann man das gefaste Gas auf die typischen Deponiegase untersuchen. Wenn im Abdichtungssystem der Deponie es zu Undichtigkeiten gekommen ist, wird sich in solchen Bereichen Deponiegas in der Bodenluft anreichern und damit auch in das Schlauchsystem hinein diffundieren.

Damit hat man mit dem zurzeit in der Weiterentwicklung befindlichen Kombisystem aus hydrostatischer Linienvermessung und linienförmigen Gassammelsystem ein effizientes und aussagekräftiges Überwachungs- und Kontrollverfahren für die Nachsorgephase einer Deponie.

6. Literatur

- [1] Lhotzky, K. (1976) Vermessung der Höhenlage von verlegten Dränrohren, Z. f. Kulturtechnik, 17, S.160 – 167
- [2] Lhotzky, K. (1978) Vorrichtung zur Prüfung der Lage von im Boden verlegten Rohren, (DE 2810687 C2)
- [3] Lhotzky, K. (1978) A measuring device in order to check the location of pipes layed in soils, 10 th Congress ICID 1978, Athen, Question 34.1, R.21
- [4] Lhotzky, K. (1994) Vorrichtung zur Prüfung der Höhenlage eines unzugänglich verlegten Rohres, (DE4408601 C2)
- [5] Lhotzky, K. (1994) Hydrostatische Höhenvermessung, In: ZAF Verformungsmessung an der Deponiebasis, Fachtagung Braunschweig
- [6] Lhotzky, K. (1997) Verformung von Deponiekörpern Müll u. Abfall , H.7, 29. Jg. S.415 – 425
- [7] Lhotzky, K., Friedl, G. (2003) Hydrostatische Messverfahren eröffnen neue Möglichkeiten in der Geotechnik, Fachtagung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 2003