

Terrestrisches Laser-Scanning als Vermessungsverfahren für die Bestandsdokumentation stillgelegter Deponien

Vortrag auf der 6. Leipziger Deponiefachtagung zum Thema
„Stilllegung, Sicherung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien“
Leipzig, den 2./3. März 2010
von
Moritz Ostenrieder

1 Einleitung

Vermessungstechnische Aufgaben in der Deponienachsorge gibt es vor allem in der Bestandsaufnahme / Beweissicherung vor den Stilllegungsarbeiten, während der Setzungsphase nach der vorläufigen Abdeckung eines Objekts sowie bei der Beweissicherung / Bestandsaufnahme nach der endgültigen Abdeckung einer Deponie. Dazu sind vor allem preiswerte, aber dennoch hinreichend genaue und vor allem flächendeckende Vermessungsverfahren erforderlich.

In den letzten Jahren hat sich terrestrisches Laser-Scanning als leistungsfähiges Vermessungsverfahren zur Erzeugung engmaschiger digitaler Geländemodelle entwickelt. Ziel des Vortrags ist es, das Verfahren vorzustellen und die Eignung des Verfahrens für die Deponienachsorge, sowohl aus technisch analytischen Sichtweise als auch aus wirtschaftlichen Sichtweise zu beleuchten.

2 Rahmenbedingungen

2.1 Regelwerk

Rechtliche Grundlage für den Betrieb, die Nachsorge und die Stilllegung von Deponien bildet die Deponieverordnung, respektive die im April 2009 erlassene Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts. Gem. Anhang 5 der Verordnung (Information, Dokumentation, Kontrollen und Betrieb) ist während des Betriebs jährlich die Struktur und Zusammensetzung einer Deponie zu ermitteln und zu dokumentieren, insbesondere die Volumina und die Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle sowie die Dauer der Ablagerung und die Deponierestkapazitäten. Während der Nachsorgephase sind Setzungsmessungen und Stabilitätsuntersuchungen im jährlichen Rhythmus erforderlich [1]. Ein wesentlicher Grund dafür ist das Ende der Setzungen im Deponiekörper festzustellen, um die endgültige Deponieabdichtung aufbringen zu können. Damit soll eine starke mechanische Beanspruchung der Deponieabdichtung durch Setzungsvorgänge vermieden werden.

2.2 Gängige Verfahren zur Verformungsüberwachung

Übliche Verfahren zur Erfassung von vertikalen Bewegungen im Deponiekörper sind entweder die Vermessung mittels elektrooptischer Messung (Total Station) und heute auch die Vermessung mittels GPS / GNSS. Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie nur

punktbezogene oder linienhafte Resultate liefern. Flächenhafte Verfahren sind die Photogrammetrie und das airborne bzw. terrestrische Laserscanning. Photogrammetrie und airborne Laserscanning dürften aus wirtschaftlichen Gründen nicht von Interesse sein, außer es handelt sich um sehr große Objekte oder es lassen sich regelmäßig mehrere Messobjekte zusammenfassen. Das terrestrische Laserscanning ist ein Verfahren bei dem eine Oberfläche vollständig erfasst wird, was im speziellen bei uneinheitlichen Setzungen im Deponiekörper von Vorteil ist, da Inhomogenitätsstellen in der Deponie nicht von vornherein bekannt sind und sie durch Messprofile eventuell nur unzureichend erfasst werden [2].

Horizontalbewegungen in z.B. Deponiekörpern mit steilen Böschungen werden u.a. durch Inklinometermessungen ermittelt.

3 Terrestrisches Laserscanning

3.1 Messprinzip

Das terrestrische Laserscanning arbeitet mit einem Messsystem, das analog zu elektrooptischen Instrumenten vor Ort zum Einsatz kommt. Der Laserscanner, der im Gelände aufgestellt wird, ist eine Kombination aus Entfernung- und Richtungsmesseinheit. Mittels eines kontrolliert abgelenkten Laserstrahls wird das Geländeprofil linienweise in einem sehr engen Punktraster abgetastet.

Zur Entfernungsmessung wird ein Signal ausgesandt (Start der Zeitnahme). Der emittierte Strahl trifft auf die Oberfläche des Zielobjektes, wo er diffus reflektiert wird. Ein Teil des reflektierten Signals wird vom im Instrument befindlichen Detektor registriert (Stopp der Zeitnahme). Mit Hilfe der Laufzeit des Signals erfolgt im internen Microcomputer des

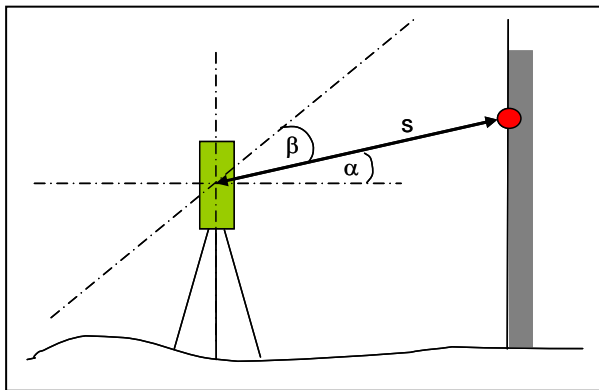


Abb. 1: Schema Entfernung / Richtungsmessung

Scanners die Berechnung der Entfernung zwischen Sensor und Zielpunkt.

Die Ermittlung der einzelnen horizontalen und vertikalen Zielpunktrichtungen erfolgt durch die Erfassung der jeweiligen Ablenkung des Strahls. Der Strahl wird entweder über die Bewegung der gesamten Scannereinheit durch Schrittmotoren oder mit Hilfe rotierender Spiegel abgelenkt. Aus der Aufzeichnung der vertikalen und horizontalen Winkel von

Emissions- und Empfangssignal und der Laufzeit werden die Richtungs- und

Neigungswinkel zur Bestimmung der polaren Punktkoordinaten errechnet. Damit handelt es sich beim Laserscanning um eine stark beschleunigte Polarpunktaufnahme mit sehr vielen Zielpunkten.

3.2 Sensoren

Man teilt die terrestrischen Laserscanner in Abhängigkeit von ihrem Verfahren zur Entfernungsmessung in 2 Gruppen ein:

- Phasendifferenzscanner
- „Time of Flight“- Scanner bzw. Laufzeitscanner.

Das Phasendifferenzverfahren ist auch als Continuous Wave Methode (CW) bekannt. Die Entfernung zwischen Scanner und Zielpunkt wird aus der Phasenverschiebung eines kontinuierlichen sinusförmigen Laserstrahls bestimmt. Diese wird durch die Reflexion des Strahls am Zielobjekt hervorgerufen. Sie ist direkt proportional zur Entfernung zwischen Sensor und Objekt. Die Genauigkeit solcher Systeme ist höher als die von Laufzeitsystemen. Der Nachteil dieser Methode liegt im begrenzten maximalen Entfernungsbereich von etwa 80m. Wesentlicher Grund dafür ist die in Abhängigkeit von der Wellenlänge auftretende Mehrdeutigkeit von Signalen.

Das Laufzeitverfahren ist die praktikablere Methode, mit der Distanzen bis zu mehreren Kilometern erfasst werden können. Es wird hier ein gepulster kurzwelliger Laserstrahl als Signalüberträger genutzt. Meist kommen Halbleiterdioden mit Wellenlängen im grünen oder infraroten Bereich zum Einsatz. Zur Messung wird zunächst ein Signal ausgesandt, wobei eine Zeitnahme gestartet wird. Der emittierte Strahl trifft anschließend auf die Oberfläche des Zielobjektes, wo er diffus reflektiert wird. Ein Teil des reflektierten Signals wird vom Detektor registriert, wodurch die Zeitnahme gestoppt wird. Auf diese Weise wird die Zeit gemessen, die zum Zurücklegen des doppelten Abstandes zwischen Scanner und Zielpunkt benötigt wird. Die Berechnung der wahren Entfernung zwischen Sensor und Zielpunkt erfolgt im internen Microcomputer des Scanners.

Der Entfernungsbereich eines Laserscanners hängt von der Leistung des Laserstrahls, der angewandten Messmethode und der Reflektivität des Zielobjektes ab.

3.3 Orientierung

Zur vollständigen Erfassung (Vermeidung von Abschattungen) muss das Zielobjekt in der Regel von mehreren Standpunkten aus gescannt werden. In diesem Falle besteht der erste Schritt der Datenverarbeitung in der Orientierung der Aufnahmen in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem.



Abb. 2: Scanneraufbau mit Teleskop und GPS

Die Orientierung kann in verschiedener Weise erfolgen. Entweder existieren mindestens 3 eindeutige Referenzpunkte (Passpunkte) pro Scan, die als solche durch besondere Signalisierung mit vermessen werden. Andernfalls können die Scans über die Koordinaten der Aufnahmestandpunkte und eine Referenzrichtung orientiert werden. Eine dritte Möglichkeit ist die Orientierung über die Software vorzunehmen, d.h. z.B. zwei sich überlappende Scans werden über Translation und Rotation lokal visuell annähernd orientiert und anschließend mittels eines

Optimierungsalgorithmus exakt aufeinander geschoben. Über mindestens 3 Referenzpunkte kann anschließend das ganze Modell georeferenziert werden.

Bereits vor Ort ist anhand der visualisierten Punktwolke eine erste Kontrolle des Messergebnisses möglich. Anschließend werden die Daten in einer speziellen Software ausgewertet.

3.4 Datenauswertung und Analyse

Nach der Orientierung der Aufnahmen wird mittels einer Vielzahl von automatischen und halbautomatischen Filterfunktionen der Datenbestand auf die jeweils gewünschte Information

reduziert. Bei der Erzeugung eines digitalen Geländemodells heißt das, dass im wesentlichen Vegetation, Gebäude und bewegliche Gegenstände entfernt werden müssen. Die Bodenpunkte werden anschließend zu einem Geländemodell vermascht.

Einige Scanner bieten neben der Aufnahme geometrischer Daten die Möglichkeit, weitere Objektinformationen aufzuzeichnen. Ein wichtiger Parameter ist die Intensität des empfangenen Signals. Ihr Wert hängt von der Entfernung und von der Reflektivität der Oberfläche eines Materials ab. Diese Abhängigkeiten machen den Intensitätswert zu einem guten Hilfsmittel für eine erweiterte Interpretation der geometrischen Daten. So lässt sich beispielsweise die Grenze zwischen zwei Gesteinshorizonten identifizieren, da die verschiedenen Gesteine oftmals sehr unterschiedliche Reflektionseigenschaften aufweisen.

In einigen Geräten ist heute entweder eine Kamera eingebaut oder extern montiert. Die aufgenommenen Bilder werden genutzt um die Punktwolken fotorealistische einzufärben, zum anderen aber auch um die Bilder später auf ein aus den Punktwolken generiertes Geländemodell zu projizieren (fotorealistische 3D-Darstellungen).

Aus den Geländemodellen lassen sich dann leicht auch Abschnittsweise Auf- und Abtragsvolumina bzw. Restvolumina ermitteln. Ebenso ist es kein Problem zum Beispiel vertikale Setzungserscheinungen >10cm über den Vergleich von aufeinander folgenden Jahresmodellen zu identifizieren.

4 Beispiel

Der praktische Fall sei im Folgenden an Hand des Beispiels einer Deponie in Baden-Württemberg erläutert. Die Deponie wird seit dem Jahr 2003 jährlich im Dezember von iMO mittels terrestrischem Laserscanning vermessen.

4.1 Vorgehensweise

Das Ingenieurbüro Ostenrieder betreibt einen I-SiTE 4400 Scanner mit I-SITE Studio Auswertungssoftware. Das beschriebene Vorgehen ist auf diesen Scanner ausgerichtet und sieht je nach Gerät etwas unterschiedlich aus, insbesondere in Bezug auf die vorgesehene Orientierungsmethode.

Die Deponie hat in etwa eine Fläche von 30 ha. Da es sich um einen relativ flachen Hügel handelt und keine exponierten Aufstellungsmöglichkeiten vorhanden sind, sind für die Aufnahme regelmäßig zwischen 13 und 17 Scans notwendig. In der Regel werden die Messungen von 2 Personen durchgeführt. Einer bedient den Scanner und das GPS, das direkt auf dem Scanner betrieben wird und der andere wählt die Standpunkte aus und baut Stative vor. Bei einer durchschnittlichen Mess- und Rüstzeit pro Scan von 20 Minuten, beträgt die Aufnahmezeit etwa 5.5 Stunden. Nach der Aufnahme werden die Koordinaten der Aufstellungen aus dem GPS ausgelesen und auf den Laptop mit der Auswertungssoftware übertragen, ebenso die Scans, die aus dem Steuerungsrechner ausgelesen werden. Es kann dann sofort überprüft werden, ob die geplante Fläche ausreichend abgedeckt ist.

Die weitere Auswertung findet im Büro statt, wobei für die reine Verarbeitung, Analyse und Dokumentation der Scandaten ebenfalls etwa 1,5 Manntage angesetzt werden. Die Verarbeitungsschritte sind wie Oben beschrieben. Als Ergebnis wird abgeliefert:

- Auftragsvolumen
- Restvolumen
- Lageplan mit Höhenlinien und Bruchkanten
- Soll-/Istvergleich Deponieendstand

4.2 Kosten

Die Anschaffungsinvestition für einen Laserscanner liegt incl. Auswertungssoftware bei ca. 100.000 € – 120.000 €. Hardwarewartung und Softwarewartung und –update verursacht jährliche Lasten zwischen 5.000 € und 10.000 €. Daher wird es sich für einen Deponiebetreiber kaum lohnen sich eine Ausrüstung anzuschaffen. Typischerweise werden Dienstleistungsunternehmen beauftragt. Die folgende Tabelle zeigt in etwa die Preise, die ein Dienstleister typischerweise verlangen könnte.

Beschreibung	Menge	Einheit	Preis/Einheit	Gesamt €
Scanner + GPS Einsatz	1	Tag	950 €	950 €
Personal Feldeinsatz	12	h	50 €/h	600 €
Personal Auswertung	12	h	50 €/h	600 €
Personal Planerstellung	8	h	50 €/h	400 €
Anreisepauschale z.B. bei 300km Anreisedistanz				600 €
Summe				3.150 €

Für oben genanntes Praxisbeispiel ist dieser Preis sehr hoch gegriffen, da die Deponie jeweils im Rahmen einer ganzen Kampagne gemessen wird und sich die Fixkosten d.h. die Gerätekosten und die Reisekosten dadurch erheblich reduzieren, d.h. ein wesentliches Einsparpotential liegt in der Zusammenfassung mehrerer Messobjekte.

4.3 Zusammenfassung

Die Gesetzeslage verlangt eine regelmäßige vermessungstechnische Überwachung von Deponien im Betrieb und während der Nachsorge bis hin zur Stilllegung, was sich über einige Dekaden erstrecken kann. Terrestrisches Laserscanning ist ein flächendeckendes Vermessungsverfahren mittels dessen sich sowohl Auftrags- und Restvolumina als auch vertikale Setzungen in einem Deponiekörper gut vermessen und dokumentieren lassen. Vorteil ist vor allem die flächendeckende Erfassung, gegenüber der punktuellen bzw. profilweisen Erfassung von herkömmlichen Verfahren. Das Verfahren ist leistungsfähig, wobei sich Kostenoptimierungen sich am ehesten durch Organisation von Messkampagnen erzielen lassen.

Für den Deponiebetreiber ist die vermessungstechnische Überwachung und Dokumentation im Wesentlichen ein Kostenfaktor, der so gering wie möglich ausfallen sollte im speziellen in der Nachsorgephase, wo die Deponie ein reiner Kostenverursacher ist. Aus Sicht der Behörden ist diese Überwachung aus Beweissicherungsgründen und für die Beschlussfassung zur endgültigen Stilllegung von hoher Bedeutung. Am meisten Kosten lassen sich jedoch sparen, wenn der Beschluss zur endgültigen Stilllegung einer Deponie so schnell wie möglich erfolgen kann, was letztlich nur passiert wenn Messergebnisse repräsentativ sind und dauerhaft unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Die vollflächige Vermessung durch terrestrisches Laserscanning, kann in diesem Sinne zumindest viel zur Repräsentativität der vermessungstechnischen Überwachung beitragen.

Literatur

- [1] Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, 4/ 2009, Bundesgesetzblatt Nr. 22
- [2] Föller, Gertloff, Flächenhafte Ermittlung der Verformung einer Deponieoberfläche, Müll und Abfall 5/1998, S. 286