

Untersuchungsmethoden zur Vorerkundung,  
Prüfung alternativer Gründungssysteme und Hinweise zum  
Qualitätsmanagement für die Errichtung von Fotovoltaikanlagen  
auf Deponieflächen

Vortragsskript

Statusseminar  
im Rahmen des FuE-Verbundprojekts

Ableitung, Erstellung und experimentelle Prüfung  
von Richtlinien für die Errichtung von  
Fotovoltaikanlagen auf Deponien und Bergbauhalden

am 07.06.2013

Dipl.-Ing- (FH) Andreas Krellmann, Dipl.-Geol. Axel Pörschke

beide

CWH Ingenieurgesellschaft mbH  
Moritzburger Weg 67  
01109 Dresden



## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einführung	4
2.	Vorerkundung	4
2.1	Sachstandsaufnahme im Rahmen der Vorerkundung	4
2.2	Erkundung der Rekultivierungsschichtmächtigkeit	5
2.3	Gründungssysteme	7
2.4	Versuche zur Vorauswahl punktförmiger Gründungssystem	11
3.	Hinweise zum Qualitätsmanagement	13
3.1	Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden am Oberflächenabdichtungssystem	13
3.2	Maßnahmen zur Prüfung von Schäden am Oberflächenabdichtungssystem	14
3.2.1	Baubegleitende und nachsorgende Setzungsmessungen	14
3.2.2	Baubegleitende und nachsorgende Mehangasmessungen	14
3.2.3	Baubegleitende und nachsorgende Leckagedetektion	15
4.	Schlussfolgerungen / Fazit	16
5.	Quellenverzeichnis	17

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Bild 1:</b>	Geophysikalische Erkundung der Teufenlage einer KDB auf einer abgeschlossenen Hausmülldeponie; Links: Handschürfe zur Kalibrierung der geophysikalischen Ergebnisse; Mitte: Benutztes Georadarmesssystem; Rechts: 2D-geoelektrische Messung, Messprofil mit einem Elektrodenabstand von 50 cm	5
<b>Bild 2:</b>	Geophysikalischer Vertikalschnitt der berechneten Widerstandverteilung (Profilschnitt); Die schwarze Linie markiert die Tiefenlage der Kunststoffdichtungsbahn KDB).	6
<b>Bild 3:</b>	Karte mit Tiefenlage der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aus der berechneten Widerstandsverteilung bzw. festgestellten Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht	6
<b>Bild 4:</b>	Auf die Oberfläche aufgesetzte Streifenfundamente; Ausgleichssicht wurde aus Mineralgemisch hergestellt (Fotovoltaikfreiflächenanlage in Zeitz 2011 errichtet)	8
<b>Bild 5:</b>	Schädigung der erosionsstabilen Vegetationsdecke und des Rekultivierungsbodens einer Deponie durch schwere Baumaschinen bei ungünstiger Witterungslage	8
<b>Bild 6:</b>	Einbau verschiedener Drehfundamente (Mustergründung) auf der Südböschung (Böschungsnäigung 1:2,5) der Altdeponie Gröbern in Niederau	9
<b>Bild 7:</b>	Herstellung eines Betonpfahls (Mustergründung) auf einer	

	Deponieböschung (Böschungsneigung 1:2,5)	10
<b>Bild 8:</b>	Links: Testfeld 1 mit den 3 eingebrachten Drehfundamenten; Mitte: angetroffene Bohrwiderstände; Rechts: Testfeld 2 mit eingebauten Betonankern	11
<b>Bild 9:</b>	Links: Versuchsaufbau axialer Zugversuch am Fundament BF1/2b; Rechts: Versuchsaufbau Schräg-Druck-Versuch am Fundament BF1/1a	12
<b>Bild 10:</b>	Herstellung der Fundamentlöcher mit einem Handbohrgerät und installiertem Maschinenanschlag	13
<b>Bild 11:</b>	Links: Am Fundamentständer befestigte Messgasleitung; Rechts: In den Betonanker eingebaute Messgasleitung	14
<b>Bild 12:</b>	Freigelegte Leckage in der Kunststoffdichtungsbahn, Einbohren des Drehfundaments mit Messsonde in das Probefeld	15
<b>Bild 13:</b>	Links und Mitte: Erstprüfung vor dem Betonieren mit einer mobilen Elektrode am Grund des Bohrlochs; Rechts: Messung nach dem Betonieren mit einer mobilen Stabsonde durch das Prüfrohr	16
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>		
<b>Tabelle 1:</b>	Gründungsvarianten und deren Vor- und Nachteile	10
<b>Tabelle 2:</b>	Geometrie und Anzahl der geplanten Mustergründungen	11
<b>Tabelle 3:</b>	Ergebnisübersicht der durchgeführten axialen Zugversuche	12
<b>Tabelle 4:</b>	Ergebnisübersicht der durchgeführten Schräg-Druck-Versuche	13

## 1. Einführung

In einem durch die EU (EFRE-Programm) und den Freistaat Sachsen geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird die Langzeitstabilität der Deponieabdeckung unter Einfluss einer Fotovoltaikanlage untersucht. Die Zielstellung besteht in der Ableitung, Erstellung und experimentellen Prüfung von Richtlinien für die Errichtung und den Betrieb von Fotovoltaikanlagen auf Deponien und Bergbauhalden.

Im Verbundprojekt werden mit Hilfe der auf der geschlossenen Hausmülldeponie Bautzen-Nadelwitz errichteten Forschungsanlage unterschiedliche Aspekte interdisziplinär untersucht. Dazu gehören die experimentelle Prüfung verschiedener Gründungsvarianten und geeigneter Erosionsschutzmaßnahmen sowie die Prüfung einer nachhaltigen Veränderung des Bodenwasserhaushalts im Rekultivierungsboden.

Auf der Grundlage der seit 2011 gewonnenen Forschungsergebnisse werden im hier vorliegenden Vortragsskript anwendbare Untersuchungsmethoden zur Vorerkundung und Hinweise zur Umsetzung verschiedener Prüf- und Kontrollmaßnahmen, mit der Zielstellung irreversible Schäden der Dichtungskomponenten Drainschicht und Kunststoffdichtungsbahn zu vermeiden, dargelegt.

## 2. Vorerkundung

### 2.1 Sachstandsaufnahme im Rahmen der Vorerkundung

Grundlegende Voraussetzung für die planerische Umsetzung von Fotovoltaikanlagen auf Deponieflächen bildet eine detaillierte Bestandsaufnahme verfügbarer Angaben zum allgemeinen Zustand der Deponie sowie zum Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems. Dazu gehören:

- Ermittlung des aktuellen Deponiezustandes (Qualitätsnachweise und Funktionsfähigkeit des Dichtungssystems, Auswertung der Überwachungs- und Nachsorgemaßnahmen, Setzungs- und Gasemissionsmessungen), Sichtung sämtlicher Jahresberichte;
- Prüfung vorhandener Standsicherheitsnachweise der hergestellten Böschungssysteme als Grundlage für ein Standsicherheitsgutachten der Deponieböschung mit Fotovoltaikanlage;
- Sichtung der Bestandsunterlagen zur Rekultivierungsschichtmächtigkeit, Leitungsverläufen, anderen Einbauten und Plausibilitätsprüfung der zur Verfügung stehenden Daten.

Folgende Ergebnisse der Sachstandsaufnahme sind grundlegende Voraussetzungen zur Bauausführung sind:

- An den Setzungspegeln werden keine maßgeblichen Lageänderungen mehr registriert. Daraus schlussfolgernd kann der Zustand der Deponieoberfläche bzw. des gesamten Deponieböschungssystems als stabil bezeichnet werden. Analog werden auch keine mechanischen Veränderungen (Erdabrisse, Spalten, Geländemulden...) an der Oberfläche registriert, die auf Schäden am Oberflächenabdichtungssystem hindeuten würden.

- Mit den jährlich im Rahmen der Nachsorge durchzuführenden FID-Messungen an der Oberfläche bzw. in Schächten, Kanälen werden keine erhöhten Methankonzentrationen festgestellt.

## 2.2 Erkundung der Rekultivierungsschichtmächtigkeit

In Anbetracht der potenziellen Gefahr einer irreversiblen Schädigung der Dichtungskomponenten Drainschicht und Kunststoffdichtungsbahn (KDB) durch unzureichende Kenntnisse über die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht und dem Bedürfnis, die zur Verfügung stehende Gründungstiefe auszuschöpfen, empfiehlt es sich, die genaue Teufenlage der Dichtungskomponenten vor Beginn der Gründungs- und Erdarbeiten mit geeigneten Erkundungsmaßnahmen zu lokalisieren.

Da abgesehen von der Herstellung geeigneter Aufschlüsse (Schachtung) kein praktikables bzw. etabliertes Erkundungsverfahren zur Verfügung stand, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durch die GGL Geophysik und Geotechnik GmbH auf der Altdeponie Gröbern in Niederau geophysikalische Testmessungen mittels Georadar und Widerstandsmessung durchgeführt /1/. Mit diesen methodischen Versuchen sollte geprüft werden, ob mit dem eingesetzten Verfahren eine flächendeckende Bestimmung der Tiefe der KDB bzw. der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht möglich ist.

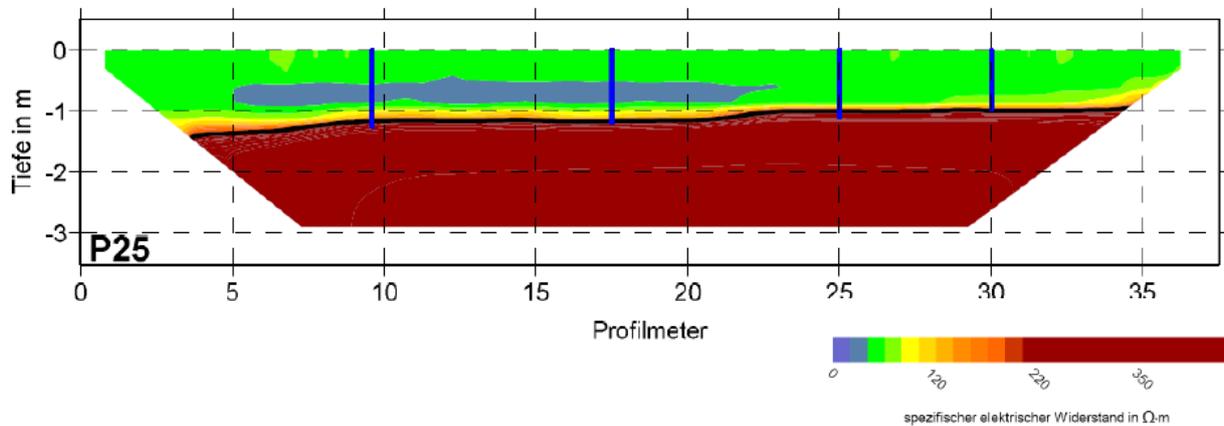
Die gesuchte KDB unterscheidet sich in ihrem spezifischen elektrischen Widerstand deutlich vom Rekultivierungsboden (bindige und nichtbindige Lockergesteine). Die als Isolator wirkende KDB zeichnet sich somit durch eine deutliche Zunahme der zu erfassenden Widerstände ab. Dabei lassen sich sowohl geringere als auch deutliche Variationen in der Teufenlage der KDB kartieren. In /1/ wurde eingeschätzt, dass bei Anwendung der Geoelektrik sich eine tatsächliche Hochlage der KDB bzw. Abnahme der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht im Ergebnis der Messungen abbilden wird. Prinzipiell kann daher das Verfahren als geeignet eingeschätzt werden, diese möglicherweise durch Einbringen der Gründungselemente gefährdeten Hochlagen zu detektieren.



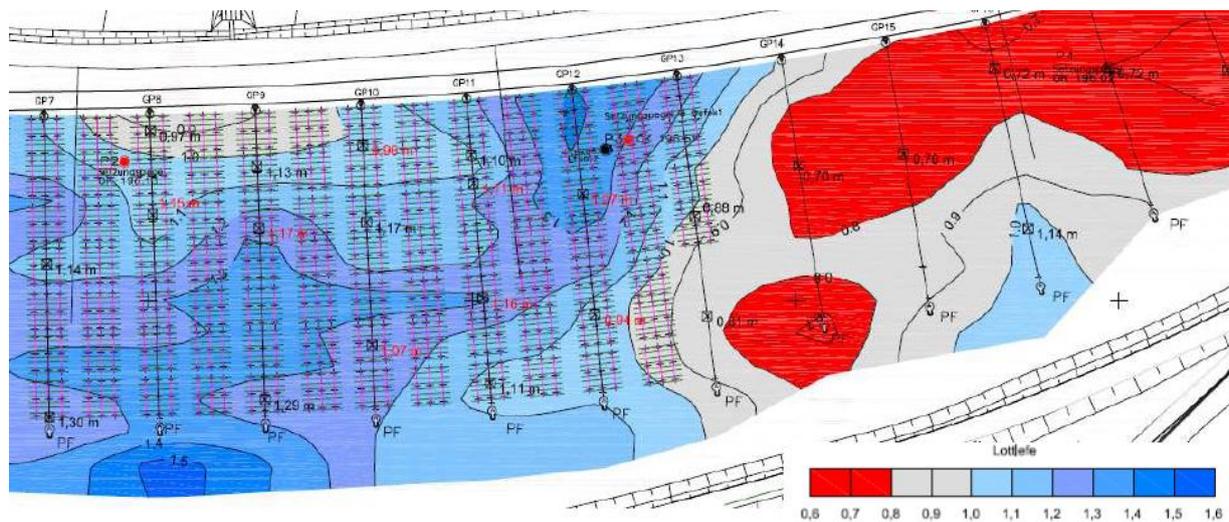
**Bild 1:** Geophysikalische Erkundung der Teufenlage einer KDB auf einer abgeschlossenen Hausmülldeponie; Links: Handschürfe zur Kalibrierung der geophysikalischen Ergebnisse; Mitte: Benutztes Georadarmesssystem; Rechts: 2D-geoelektrische Messung, Messprofil mit einem Elektrodenabstand von 50 cm

Die Ergebnisse der gleichzeitig durchgeführten Messungen mit Georadar erwiesen sich ohne

Aussagen zur Deckschicht bei den gegebenen Verhältnissen (wechselnde Zusammensetzung der Rekultivierungsschicht) als nicht zweifelsfrei auswertbar.



**Bild 2:** Geophysikalischer Vertikalschnitt der berechneten Widerstandsverteilung (Profilschnitt); Die schwarze Linie markiert die Tiefenlage der Kunststoffdichtungsbahn KDB).



**Bild 3:** Karte mit Tiefenlage der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aus der berechneten Widerstandsverteilung bzw. festgestellten Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht

Bei den Untersuchungen auf einer etwa 3,5 ha großen Fläche einer gesicherten Hausmülldeponie kamen die sich bereits im Vorversuch als geeignet erwiesenen 2D-geoelektrische Messungen auf 30 Profilen mit insgesamt 1.305 m Länge zum Einsatz. Gleichzeitig wurden zur Kalibrierung der geoelektrischen Ergebnisse insgesamt 58 Aufgrabungen zum direkten Nachweis der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht durchgeführt. Die Standardabweichung der geoelektrischen Ergebnisse zu den mittels Schurf festgestellten Mächtigkeiten der Rekul-

tivierungsschicht betrug lediglich  $\pm 0,04$  m. Nur bei etwa 10 % der Aufschlüsse lag die Abweichung über 0,10 cm aber nicht höher als 17 cm. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte eine Karte mit den Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht erstellt werden. Neben den Informationen zur Tiefenlage der KDB liefern die Untersuchungen auch Informationen über die Materialzusammensetzung der Rekultivierungsschicht bzw. über deren Wassergehalt.

Die geoelektrischen Messungen erfüllen die gesetzte Zielstellung, die Teufenlage der KDB und somit indirekt die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht im gesamten Baufeld flächendeckend auszuweisen und Gründungstiefen der Einzelfundamente auf ein Optimum an Baulastabtrag unter Berücksichtigung der Schadensvermeidung am Dichtsystem zu dimensionieren.

### 2.3 Gründungssysteme

Gründungssysteme für Fotovoltaikfreiflächenanlagen auf Deponien müssen so in der Rekultivierungsschicht gegründet sein, dass das komplexe Oberflächendichtungssystem nicht beschädigt oder in seiner Wirksamkeit eingeschränkt wird. Des Weiteren müssen sie das schadhafte Abtragen der Bauwerklasten ermöglichen und wirtschaftlich ausgeführt sein. Durch Umwandlungsprozesse im Deponiekörper verursachte Setzungsbeträge müssen die Gründungssysteme schadlos aufnehmen können. Von besonderer Bedeutung bei der Planung sind die Stand- und Lagesicherheit der Tragekonstruktion im Gründungshorizont sowie die Standsicherheit der Böschungen selbst.

Für die Gründung der Fotovoltaikmodule kommen grundsätzlich punktförmige Gründungen (Erdfähle, Rammprofile und Drehfundamente) sowie Flachgründungen (Streifenfundamente aus Beton, Einzelfundamente aus Beton und Einzelaufstellung mittels Wannenkonstruktion) in Frage.

Die Vorteile der Gründung über Rammprofile, Erdfähle und Drehfundamente / Schraubfundamente bestehen in einer geringen Bodenversiegelung sowie in niedrigen Kosten. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass diese Varianten, insbesondere Rammprofile und Erdfähle, tief in die Rekultivierungsschicht eingebunden werden müssen, um die Standsicherheit der Anlage über die Mantelreibung zu gewährleisten und somit Dichtungskomponenten der Deponien beschädigen können. Die Mächtigkeit des zur Verfügung stehenden Gründungshorizonts, im Regelfall die Rekultivierungsschicht, muss dabei weitestgehend ausgeschöpft werden.

Flachgründungen, wie Streifen- und Einzelfundamente, erlauben einen oberflächennahen Einbau. In diesem Fall werden mehrere Modultischreihen über beispielsweise Betonstreifenfundamente miteinander verbunden. Aus dem oberflächennahen Einbau resultiert eine geringere Gefahr einer Beschädigung der zu schützenden Drain- und Dichtungskomponenten an der Basis der Rekultivierungsschicht. Nachteilig wirkt sich jedoch eine relativ hohe Bodenversiegelung und das mögliche Erschweren von Mäh- und Pflegearbeiten aus.

Insbesondere im Böschungsbereich ist der punktförmigen Gründung gegenüber dem Streifenfundament (Betonriegel, etc.) der Vorrang zu geben. Ausschlaggebend ist die nur mit hohen materiellen und technischen Aufwendungen herzustellende Standsicherheit für nur gering in den Rekultivierungsboden eingebundene Flachgründungen sowie der erhebliche Eingriff in den Rekultivierungsboden im Rahmen der Bauausführung durch große Baumaschinen und deren erforderliche Bewegungshäufigkeit.

Erfahrungen aus der Überwachung und Begleitung der Bautätigkeit zur Errichtung der Fotovoltaikanlage auf der Deponie Bautzen-Nadelwitz haben gezeigt, dass eine Flachgründung mit den dort verwendeten Betonriegeln auf steilen Böschungen unmöglich ist.



**Bild 4:** Auf die Oberfläche aufgesetzte Streifenfundamente; Ausgleichssicht wurde aus Mineralgemisch hergestellt (Fotovoltaikfreiflächenanlage in Zeitz 2011 errichtet)

Der auf Deponien aufgebrachte Rekultivierungsboden ist aufgrund seiner gemäß DepV erforderlichen Qualität und insbesondere seiner erheblichen Wasserempfindlichkeit nicht für eine Lastaufnahme durch schwere Baumaschinen geeignet.



**Bild 5:** Schädigung der erosionsstabilen Vegetationsdecke und des Rekultivierungsbodens einer Deponie durch schwere Baumaschinen bei ungünstiger Witterungslage

Der bei Gründungen mit Betonriegeln erforderliche Einsatz von schweren Baumaschinen führt mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer vollständigen Zerstörung der erosionsstabilen

Vegetationsdecke und dem oberen Bereich des Rekultivierungsbodens.

Auf Böschung des Deponiekörpers können zu errichtende Fotovoltaikanlagen mit Drehfundamenten oder Bohrbetonpfählen (punktförmigen Gründungen) umgesetzt werden. Den speziellen Baugrundverhältnissen (zulässige Gründungstiefe, Bodenbeschaffenheit) angepasste Drehfundamente werden mit einer Kleinbohrmaschine in den Boden eingebracht. Bei diesem Verfahren wird der Boden ausschließlich verdrängt und die Bauwerkslast überwiegend über die Fläche der Wendel abgetragen.



**Bild 6:** Einbau verschiedener Drehfundamente (Mustergründung) auf der Südböschung (Böschungneigung 1:2,5) der Altdeponie Gröbern in Niederau

Dagegen müssen je nach statischen Erfordernissen für die Betonpfähle Löcher mit einem Durchmesser von 200 bis 300 mm vorgebohrt werden. Der Rekultivierungsboden wird hier gewonnen und somit nicht verdrängt. Der Tischständer wird im Bohrloch mit einer handelsüblichen Betonsuspension drucklos verfüllt. Die Verfüllung bleibt daher auf das hergestellte Bohrloch beschränkt. Ein Abtrag der Bauwerkslasten erfolgt hier auch über die Mantelreibung.

Diese punktförmigen Gründungen benötigen zur Gewährleistung der Standsicherheit der Modultische eine entsprechende Einbindetiefe in die Rekultivierungsschicht. Durch unterschiedliche Wendelgrößen und Wandstärken der Drehfundamente sowie unterschiedliche Bohrlochdurchmesser der Betonpfähle kann die notwendige Einbindetiefe in Abhängigkeit von der geforderten Zuglast entsprechend angepasst werden.

Zum Setzen der Drehfundamente oder Pfähle kann beispielsweise eine Hangbohrraupe mit einer geringen Auflast und Gummiketten oder eine benzingetriebene Handbohrmaschine zum Einsatz kommen.



**Bild 7:** Herstellung eines Betonpfahls (Mustergründung) auf einer Deponieböschung (Böschungneigung 1:2,5)

In der folgenden Tabelle werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Gründungsvarianten gegenüber gestellt.

**Tabelle 1:** Gründungsvarianten und deren Vor- und Nachteile

Fundamentart	Vorteil	Nachteil
Betonfundament (Fertigteile als Schwerlastfundament)	keine Belastungsversuche erforderlich; geringe Eingriffstiefe in die Rekultivierungsschicht; keine Vorerkundung der Reku-Mächtigkeit erforderlich.	erheblicher Eingriff während der Bauausführung in die Oberfläche → temporärer Verlust der erosionsstabile Vegetationsdecke.
Rammfundament (Sigma-Pfosten)	geringer Eingriff in die Oberfläche; erosionsstabile Vegetationsdecke bleibt erhalten; geringer Bauaufwand und kostengünstig.	geringer Auszugswiderstand → große Gründungstiefen erforderlich.
Drehfundamente	geringer Eingriff in die Oberfläche; erosionsstabile Vegetationsdecke bleibt erhalten; geringer Bauaufwand.	nicht geeignet bei hohem Steinanteil im Rekuboden; Lastabtrag erfolgt ausschließlich über Fläche der Wendel → erhöhte Flächenlast auf Gleitfuge (Rekuboden – Drainmatte).
Betonanker	geringer Eingriff in die Oberfläche; erosionsstabile Vegetationsdecke bleibt erhalten; Lastabtrag erfolgt auch über Mantelreibung → nur geringe Erhöhung der Flächenlast auf Gleitfuge.	gegenüber Dreh- und Rammfundament Bodenentnahme erforderlich; ggf. höherer Rückbauaufwand.

## 2.4 Versuche zur Vorauswahl punktförmiger Gründungssystem

Die wirtschaftliche Erstellung von punktförmigen Gründungen erfordert modellhafte Ausziehversuche an den Gründungskörpern. Diesbezüglich wurden in einem Testfeld entsprechende Versuche mit verschiedenen Mustergründungen durchgeführt.

Verwendet wurden Drehfundamente und verschiedenen Betonanker. Die folgende Tabelle erlaubt einen Überblick.

**Tabelle 2:** Geometrie und Anzahl der geplanten Mustergründungen

Fundamenttyp	Bezeichnung	Wendel-/Bohrdurchmesser	Eindringtieftiefe gelotet	Anzahl
Drehfundament	BF1/3a, b	200 mm	70 cm	2
Drehfundament	BF1/3c	250 mm	50 cm	1
Betonpfahl	BF1/2a-c	250 mm	80 cm	3
Betonpfahl	BF1/1a-c	300 mm	70 cm	3
Betonpfahl	BF2/2a-c	300 mm	80 cm	3
Betonpfahl	BF2/1a-c	300 mm	60 cm	3

Aufgrund hoher Bohrwiderstände und großer Steine ließen sich alle 3 Drehfundamente nicht lotrecht und nicht bis zur geplanten Endtiefe von 80 cm eindrehen. Für den Einbau der Drehfundamente erwies sich der angetroffene Rekultivierungsboden als nicht geeignet, so dass keine weiteren Drehfundamente eingebracht und die restlichen Mustergründungen aus Betonpfählen mit verschiedenen Abmaßen hergestellt wurden.



**Bild 8:** Links: Testfeld 1 mit den 3 eingebrachten Drehfundamenten; Mitte: angetroffene Bohrwiderstände; Rechts: Testfeld 2 mit eingebauten Betonankern

14 Tage nach Herstellung der Mustergründungen wurden von Mitarbeitern der BTU Cottbus (Lehrstuhl für Bodenmechanik) an den eingebauten Mustergründungen insgesamt 4 axiale Zug- und 5 Schräg-Druck-Versuche ausgeführt.

Die Belastungseinrichtung der axialen Zugversuche war für eine Prüflast von maximal 20 kN ausgelegt, somit weit über den Vorgaben der statischen Bemessung der Einzelfundamente. Die Widerlager wurden mindestens 1 m vom Prüffundament im unbeeinflussten Baugrundbe-

reich eingerichtet. Die Prüfkräfte wurden mit einer kalibrierten Hohlkolbenpresse in Schritten von 2 kN erhöht. Die Aufzeichnung der axialen Verschiebung erfolgte jeweils nach dem Abklingen der jeweiligen Verformung mit einem Nivellier bzw. mechanischen Messuhr.

Eine Zusammenstellung der erreichten Auszieh Widerstände an den 4 geprüften Fundamenten ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 3:** Ergebnisübersicht der durchgeführten axialen Zugversuche

Bezeichnung	Bohrdurchmesser	Gründungstiefe gelotet	Maximale Prüflast	Maximale Verformung
BF1/1b	300 mm	70 cm	17 kN	20 mm
BF1/2b	250 mm	80 cm	12 kN	20 mm
BF2/1c	300 mm	60 cm	20 kN	26 mm
BF2/2b	300 mm	80 cm	20 kN	10 mm

An BF2/1c wurden 7 mm und an BF2/2b wurde nur 1 mm bleibende Verformung gemessen. Die maximale Zuglast von 20 kN führte bei beiden Fundamenten nicht zum Versagen, was auf die Mantelreibung zurückgeführt werden kann.

An BF1/1b und 1/2b wurde ein Versagen bei 17 bzw. 12 kN festgestellt.

Die an insgesamt 5 Musterfundamenten durchgeführten Schräg-Druck-Versuche erfolgten in einer Höhe von 80 cm. Die Prüflast von mindestens 8 kN wurde ebenfalls mit einer kalibrierten Hohlkolbenpresse in Schritten von 2 kN angelegt. Als Widerlager fungierte eine in die Böschung eingebaute Holzbohlenkonstruktion (siehe auch folgendes Bild). Die Aufzeichnung der horizontalen Verschiebung erfolgte ebenfalls mit einem Nivellier bzw. mechanischen Messuhr.



**Bild 9:** Links: Versuchsaufbau axialer Zugversuch am Fundament BF1/2b; Rechts: Versuchsaufbau Schräg-Druck-Versuch am Fundament BF1/1a

Die Ergebnisse der 5 durchgeführten Schräg-Druck-Versuche sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Bei einem angenommenen Verformungskriterium von 20 mm lagen die Prüflas-

ten zwischen etwa 4 (BF1/1a) und 7 kN (BF2/2a).

**Tabelle 4:** Ergebnisübersicht der durchgeführten Schräg-Druck-Versuche

Bezeichnung	Bohrdurchmesser	Gründungstiefe gelotet	Maximale Prüf- last	Maximale Ver- formung
BF1/1a	300 mm	70 cm	8 kN	63 mm
BF1/1c	300 mm	70 cm	8 kN	36 mm
BF1/2a	250 mm	80 cm	8 kN	12 mm
BF2/1b	300 mm	60 cm	8 kN	50 mm
BF2/2a	300 mm	80 cm	8 kN	25 mm

### 3. Hinweise zum Qualitätsmanagement

#### 3.1 Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden am Oberflächenabdichtungssystem

Zur Gewährleistung einer hohen Qualität, Vollständigkeit der Ausführung der Baumaßnahme und insbesondere zur strikten Unterbindung von Arbeitsprozessen, die eine Beschädigung der Dichtungskomponenten herbeiführen könnten, empfiehlt sich wie bei anderen Deponiebaumaßnahmen eine fachkundige und mit den speziellen Standortverhältnissen vertraute Bauaufsicht einzusetzen.

Zu ihrer Aufgabe gehören eine regelmäßige Anwesenheit bei allen Gründungs- und Erdarbeiten, eine lückenlose Dokumentation des Baugeschehens sowie eine Begutachtung und Dokumentation sämtlicher Aufschlüsse in die Rekultivierungsschicht.

Das bei der Herstellung punktförmiger Fundamente zu verwendende Bohrgerät sollte zur Vermeidung einer möglichen Schädigung der Drainmatte bzw. KDB während der Bohrarbeiten mit einem Maschinenanschlag, der ein Überschreiten der festgelegten Bohrtiefe bereits konstruktiv ausschließt, ausgestattet sein.



**Bild 10:** Herstellung der Fundamentlöcher mit einem Handbohrgerät und installiertem Maschinenanschlag

## 3.2 Maßnahmen zur Prüfung von Schäden am Oberflächenabdichtungssystem

### 3.2.1 Baubegleitende und nachsorgende Setzungsmessungen

Üblicherweise finden im Rahmen der Nachsorge jährliche Vermessungen der auf Deponieflächen befindliche Setzungspegel sowie eine regelmäßige Begehung der Deponieoberfläche durch den Deponiebetreiber statt. Erhebliche Setzungsbeträge oder Abrisse an der Geländeoberfläche können auf ein Versagen der Stand- bzw. Gleitsicherheit verbunden mit einer Schädigung des Dichtungssystems hinweisen.

Zur Kontrolle bzw. Dokumentation der standsicheren Verhältnisse der Böschung sind während der Bauausführung in kürzeren Intervallen Setzungsmessungen an den vorhandenen Setzungspegeln sowie einigen mit Messmarken versehenen Modultischen bzw. ständige Begehungen der Deponieoberfläche im Baubereich der Fotovoltaikanlage zu empfehlen.

Nach Abschluss der Baumaßnahme ist ein fortlaufendes Messregime der Setzungsmessungen unter Einbeziehung der vorhandenen Setzungspegel sowie den angebrachten Messmarken an den Modultischen festzulegen.

### 3.2.2 Baubegleitende und nachsorgende Methangasmessungen

Im Rahmen der obligatorischen Nachsorge von Deponien finden Messungen zur Feststellung möglicher Methangasaustritte an der Oberfläche, die auf eine Undichtigkeit im Sicherungssystem hinweisen könnten, turnusmäßig statt.

Erhöhte Methangasmessungen nach dem Abschluss der Baumaßnahme könnten Hinweise auf Schäden am Dichtungssystem liefern.

Baubegleitend lassen sich Methangas-Messungen durchführen. Hier könnten erhöhte Methangaskonzentrationen im Bohrloch oder Kabelgraben einen konkreten Hinweis auf eine Schädigung des Dichtungssystems geben.

Weiterhin kann ein Deponiegasmonitoring über eine zusätzlich in das Fundament (Drehfundament, Betonpfahl) integrierte Messgasleitung während und nach Abschluss der Baumaßnahme im Rahmen der Nachsorgemaßnahmen umgesetzt werden. Diese Messgasleitung kann eine Methangasdetektion im Rahmen der turnusmäßigen Nachsorgemaßnahmen an den Fundamentspitzen ermöglichen.



**Bild 11:** Links: Am Fundamentständer befestigte Messgasleitung; Rechts: In den Betonanker eingebaute Messgasleitung

### 3.2.3 Baubegleitende und nachsorgende Leckagedetektion

Zur Überwachung und Prüfung möglicher Beschädigungen der KDB während der Installation sowie der Betriebsphase der Fotovoltaikanlage sollte ein auf die konkrete Anordnung abgestimmtes Messverfahren entwickelt und praxistauglich erprobt werden. Hierzu war die Einsetzbarkeit der Dichtungskontrollmessung entsprechend der Messung „von oben“ bei nachträglich eingebauten Dichtungskontrollsystemen zu prüfen

Der Test erfolgte auf einem errichteten Probefeld mit einer Fläche von ca. 20 x 6 m. Der Schichtaufbau des Probefeldes wurde analog dem üblichen Dichtungssystem (Rekultivierungsboden, Schutzvlies / Drainmatte, KDB, mineralische Dichtung) angelegt.

Bei dem Versuch sollten Strom und Spannung im Nahfeld des einzubringenden Fundaments überwacht werden, so dass beim Durchdringen der KDB ein Stromfluss bzw. ein charakteristischer Spannungsabfall detektiert werden kann.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde innerhalb der Probefeldfläche eine temporäre Gegenelektrode am oberen Rand des Probefeldes eingebaut. Der installierte Messerder lag ca. 20 m unterhalb des Probefeldes.

Die Messsonde wurde im Vorfeld in ein Drehfundament eingebaut und mit Hilfe der Hangbohrmaschine in den Rekultivierungsboden eingebracht. Unmittelbar während des Durchdringens der KDB wurde eine eindeutige Signalveränderung festgestellt. Dieser gemessene Nachweis wurde nochmals in einem zweiten Versuch bestätigt.

Im Anschluss wurde die Leckage aufgegraben und dokumentiert.

Mit diesen Versuchen wurde belegt, dass der Fundamenteinbau mit dem Dichtungskontrollsystem der Firma PROGEO Monitoring GmbH zur sofortigen Feststellung am Dichtungssystem verursachter Schäden eingesetzt und bei Erfordernis in eine routinemäßige Anwendung überführt werden kann.



**Bild 12:** Freigelegte Leckage in der Kunststoffdichtungsbahn, Einbohren des Drehfundaments mit Messsonde in das Probefeld

Bei der Herstellung der Betonanker kann die Erstprüfung hierbei vor dem Betonieren des Fundaments mit einer mobilen Elektrode am Grund des Bohrlochs erfolgen. Für Messungen

nach dem Betonieren kann eine mobile Stabelektrode durch die bereits im Abschnitt 3.2.2 beschriebene Messgasleitung wiederum an den Fuß des Bohrlochs gebracht werden.



**Bild 13:** Links und Mitte: Erstprüfung vor dem Betonieren mit einer mobilen Elektrode am Grund des Bohrlochs; Rechts: Messung nach dem Betonieren mit einer mobilen Stabsonde durch das Prüfrohr

Eine routinemäßige Überwachung im Rahmen der Nachsorge ist mit dem hier beschriebenen Messsystem nicht verhältnismäßig. Diese Messungen sollten erst zur Anwendung kommen, wenn Methangas-Messungen, Setzungsmessungen, Kartierungsergebnisse der Deponieoberfläche, visuell wahrnehmbare Lageveränderungen der Modultische oder Verformungen der in das Fundament eingebauten Messgasleitungen Anhaltspunkte für eine mögliche Leckage geben.

#### 4. Schlussfolgerungen / Fazit

Sachstandsanalysen im Ergebnis vorliegender Ergebnisberichte und Planunterlagen bedürfen zwingend einer Plausibilitätsprüfung, insbesondere wenn es um die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht geht.

Voruntersuchungen der Mächtigkeit des Rekultivierungsbodens ermöglichen eine optimale Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Baugrundtiefe. Geoelektrische Widerstandsmessungen in Verbindung mit Grabungsaufschlüssen sind eine geeignete Methode zur flächendeckenden Kartierung der Teufenlage der Kunststoffdichtungsbahn.

Punktförmige Gründungsvarianten sind insbesondere auf sensiblen Deponieflächen geeignete Alternativen. Sie sind kostengünstig, in steilen Deponieböschungen anwendbar und gewährleisten den Bestand einer erosionsstabilen Vegetationsdecke.

Zug- und Druckversuche belegen, dass trotz geringer Gründungstiefen ausreichende horizontale und vertikale Tragsicherheit insbesondere mit Betonpfählen erreicht werden kann.

Die Gründungstiefe punktförmiger Gründungen wird bestimmt von dem belastbaren Kennt-

nisstand zur Mächtigkeit des Gründungshorizontes.

Die abzutragende Last sowie die Fundamentgeometrie bestimmen den realisierbaren Abstand zwischen Fundamentsohle und Drainmatte / KDB.

Eine Beeinträchtigung der Langzeitstabilität des Deponieböschungssystems kann ausgeschlossen werden, wenn statische Berechnungen auch mit Berücksichtigung zusätzlicher Auflasten ausreichende Stand- und Gleitsicherheit bei Einhaltung einer nicht zu überschreitenden Maximallastvorgabe bescheinigen.

Um Schädigungen des Oberflächenabdichtungssystems während der Bauausführung zu unterbinden sowie die Funktionstüchtigkeit nach Abschluss der Baumaßnahme und während des zukünftigen Betriebs der Fotovoltaikanlage garantieren zu können, sind zusammenfassend folgende vorbereitende, baubegleitende und nachsorgende Untersuchungen, Kontrollmessungen und Überwachungsmaßnahmen zu empfehlen:

- (a) Nacherkundung der Teufenlage der KDB bzw. Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht unter Berücksichtigung der flächendeckenden Standortuntersuchungen;
- (b) Baubegleitende Überwachung und Dokumentation der Gründungs- und Erdbauarbeiten durch eine fachkundige Bauüberwachung;
- (c) Technische Einrichtungen zur Sicherstellung der festgelegten Gründungstiefe mittels speziellen Maschinenanschlüssen, um Überschreitungen der maximal zulässigen Bohrtiefe bereits konstruktiv ausschließen zu können;
- (d) Baubegleitende Methangas-Messungen während der Gründungs- und Erdbauarbeiten neben den ohnehin im Rahmen der Nachsorgemaßnahmen durchzuführenden Gasmessungen an der Oberfläche sowie ein Deponiegasmonitoring über eine zusätzlich in das Fundament integrierte Messgasleitung;
- (e) Regelmäßige Setzungsmessungen bzw. Begehungen der Deponieoberfläche im Baubereich der Fotovoltaikanlage zur Kontrolle bzw. Dokumentation der stand sicheren Verhältnisse der Böschung;
- (f) Baubegleitende und Langzeitüberwachung auf Leckagen an der KDB mit einem Dichtungskontrollsystem.

Mit den Maßnahmen (a) bis (f) kann sichergestellt werden, dass im Rahmen der Bauausführung keine Schäden an der Dichtung entstehen oder solche umgehend detektiert und behoben werden können. Die Maßnahmen (d) bis (f) stellen zusätzlich auch noch nach Fertigstellung der Anlage ein geeignetes Instrument zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Dichtungselemente dar.

## 5. Quellenverzeichnis

- /1/ GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH: Ergebnisbericht Geophysikalische Erkundung der Tiefenlage einer Kunststoffdichtungsbahn am Beispiel der Deponie Gröbern bei Meißen, Leipzig, 19.04.2012
- /2/ BTU, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik: Prüfbericht zur Probelastung an Gründungselementen, Cottbus, 13.11.2012

