

# Anforderungen an Geokunststoffe und Entwurf in der Umweltgeotechnik – Bewehrungselemente für Deponiebau und Altlastensanierung

Dipl.-Ing. Ole Syllwasschy

## 1. Einleitung

Geokunststoffe in Form von Geweben oder Geogittern werden in der Geotechnik inzwischen in vielen Anwendungsgebieten eingesetzt. Hier seien nur beispielhaft die Kunststoffbewehrte Erde KBE, Dämme auf weichem Untergrund, Gründungen über pfahlähnlichen Traggliedern und Tragschichtbewehrungen genannt. Ein guter Überblick über alle Standardbereiche kann der EBGEO [1] entnommen werden. Im Bereich der Umweltgeotechnik, wozu u. a. Deponien und Altlasten zu zählen sind, können folgende wesentliche Anwendungen aufgeführt werden:

- a. Antigleitbewehrung in Abdichtungssystemen in steilen Böschungen
- b. Stützkonstruktionen nach dem Prinzip der KBE
- c. Verbesserung der Tragfähigkeit des Planums
- d. Überbrückung von Erdeinbrüchen
- e. Abdeckung von Schlammteichen

Die technischen Nachweise können hierbei entsprechend EBGEO [1], den GDA-Empfehlungen [2] und ggf. ergänzenden Bedingungen in Zulassungen der BAM [3] im Bereich des Deponiebaus geführt werden.

Für die Antigleitbewehrung sind die Grundlagen der GDA-Empfehlung E2-7 [4] und EBGEO Kapitel 8 zu entnehmen. Stützkonstruktionen werden in EBGEO Kapitel 7 beschrieben. Für die Bauweisen nach a und b ist für Bauwerke im Zuständigkeitsbereich der Deponieverordnung eine dauerhafte Funktionstüchtigkeit > 100 Jahre der Geokunststoffkomponenten nachzuweisen. Hierfür wurden durch die Arbeitsgruppe IV.32 der BAM „Kunststoffe in der Umwelt- und Geotechnik“ entsprechende Zulassungskriterien entwickelt und bis heute für zwei unterschiedliche Geogittergruppen eine Zulassung erteilt.

Die Überbrückung von Erdrutschen ist nach EBGEO Kapitel 11 zu berechnen. Für diese drei genannten Anwendungen gilt das Teilsicherheitskonzept nach DIN 1054:2012-12 [5] bzw. Eurocode 7 [6]. Die unter c und e genannten Bauweisen basieren im Wesentlichen auf empirischen Erfahrungswerten (Tragschichten) bzw. Rechenverfahren, welche eine Beschreibung des Problems erlauben (Schlammteichabdeckungen) aber noch keine zufriedenstellende wissenschaftliche Grundlage haben. Hier sind Erfahrung von Herstellern der Geokunststoffe, Planern und Baufirmen von besonderer Bedeutung, um Projekte erfolgreich abschließen zu können. Die unter den Punkten c bis e genannten Bauweisen unterliegen im Deponiebau nicht den Anforderungen der BAM-Zulassung [3], weil sie dort nicht geregelt werden. Im Folgenden werden zu einigen der o. g. Anwendungen weitergehende Betrachtungen vorgestellt.

## **2. Antigleitbewehrung**

Abdichtungssysteme, sowohl mit mineralischen als auch geosynthetischen Komponenten, können im Regelfall auf Böschungen bis Neigungen von 1:3 problemlos verlegt werden. Bei steileren Böschungen muss das mögliche Versagensbild des hangparallelen Gleitens untersucht werden und ggf. eine Antigleitbewehrung dimensioniert werden. Die Bemessung der erforderlichen Zugfestigkeit und die Ausführungsmöglichkeiten der Verankerung an der Böschungskrone wurde bereits in mehreren Veröffentlichungen beschrieben [7, 8, 9, 10] und kann entsprechend [1] und [2] durchgeführt werden. Das Hauptaugenmerk des Aufsatzes liegt auf Anwendungen außerhalb des Deponiebaus.

## **3. Überbrückung von Erdrutschen und Begrenzung von Verformungen**

Die Überbrückung von Erdfällen ist in der Regel ein Problem, welches im Verlauf von Verkehrswebaumaßnahmen auftritt. Hervorgerufen durch Altbergbau oder natürliche Hohlräumbildung im Untergrund, wie Karstgebiete, gilt es hier unmittelbare Gefahr für Leib und Leben abzuwenden. Dies geschieht z. B. durch den Einsatz von höchstzugfesten Geogittern, die als Überbrückungskonstruktion unter dem Unterbau des Verkehrsweges eingebaut werden. Je nach Anforderung kann die Bemessung derart ausgelegt werden, dass die Sicherung nur einen temporären Charakter mit anschließender Sanierung hat (Teilsicherung) oder die Standsicherheit bzw. Nutzung über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet ist (Vollsicherung). Kapitel 11 der EBGEO [1] beschreibt hierzu ausführlich die Vorgehensweise für Bemessung und Entwurf.

Im Bereich von Deponien und Altlasten ist unter Umständen, bedingt durch eingeschränkte Zugänglichkeit und sehr geringes Verkehrsaufkommen, die unmittelbare Gefährdung von Menschenleben nicht so ausgeprägt wie im Verkehrswegebau. Nichtsdestotrotz gilt auch hier das Prinzip der Gefahrenabwehr nicht nur für Lebewesen sondern auch für die Umwelt. Eine Erdfallsicherung kann jedoch auch den Zweck erfüllen, dass Abdichtungssysteme keinen unzulässig großen Verformungen ausgesetzt werden und somit trotz Absenkungen oder Erdbrüchen ihre Funktion aufrecht erhalten können.

Die Bemessung eines in seiner möglichen Setzung bzw. damit einhergehender Dehnung beschränkten Abdichtungssystems kann nach dem Prinzip der Erdfallsicherung durchgeführt werden. Hierzu wird in einem ersten Schritt festgelegt, welche Geometrie einer möglichen Setzungsmulde oder eines Einbruchkörpers in Form des Durchmessers anzusetzen ist. Als zweite Kenngröße muss die maximal zulässige Verformung des Abdichtungssystems bestimmt werden. Insbesondere mineralische Dichtungen neigen generell bei Dehnungen von mehr als 3 bis 6 % zu Rißbildung, einhergehend mit entsprechend sprunghaft steigender Wasserdurchlässigkeit.

### **3.1 Fallbeispiel Multifunktionale Abdichtung der Deponie Ihlenberg**

Die Deponie Ihlenberg befindet sich im Nordwesten des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern im Landkreis Nordwestmecklenburg. Sie ist gekennzeichnet durch mehrere ältere Bauabschnitte, die sich in der Stilllegungsphase befinden und die zusammengefasst als Deponieabschnitt DA 1 bezeichnet werden. Der aktive Verfüllbereich DA 7 schließt sich südlich des DA 1 an und lehnt sich auch tlw. an ihn an. Eine weitergehende Beschreibung kann Krüger et al. [11] entnommen werden. Somit werden an das Abdichtungssystem, welches sowohl im aktiven Bereich als auch über den Altbereich einzubauen ist, mehrere Anforderungen an seine Funktion gestellt.

- Die bauliche Trennung des in der Stilllegungsphase befindlichen Deponieabschnittes (DA 1) von dem aktuellen Verfüllbereich (DA 7)
- Die Herstellung der endgültigen Oberflächenabdichtung (OFA) für Teilflächen des in der Stilllegungsphase befindlichen DA 1
- Sowie die Ergänzung der Basisdichtung für einen Teilbereich des aktiven DA 7

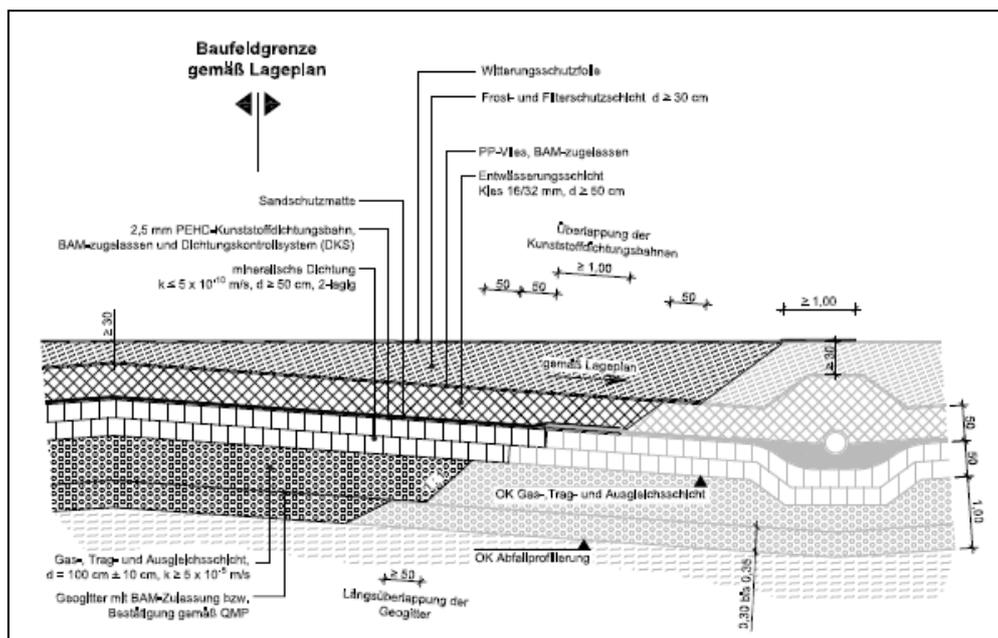


**Abb. 3.1:** Blick von dem Stilllegungsbereich auf den aktiven Verfüllbereich

Dem Aufbau der Multi-Funktionalen-Abdichtung (MFA) wurden die jeweils höherwertigen Anforderungen aus Anhang 1 der Deponieverordnung (DepV [12]) für Basis- und Oberflächen-abdichtungen von Deponien der DK III zugrunde gelegt.

Die MFA besteht somit im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- 100 cm Gas-, Trag- und Ausgleichsschicht (GTA)
- Geogitter Fortrac-T innerhalb der GTA
- 50 cm Mineralische Dichtung
- 2,5 mm PEHD-Kunststoffdichtungsbahn inkl. Dichtungskontrollsystem
- Schutzschicht
- 30 / 50 cm mineralische Entwässerungsschicht



**Abb. 3.2:** Aufbau der Multi-Funktionalen-Abdichtung MFA

Der Einsatz einer Geogitterbewehrung ergab sich aus der Anforderung, dass die MFA ausreichend in der Lage sein muss, ungleichmäßige Setzungen auszugleichen und gleichzeitig Dehnungen in der mineralischen Dichtungsschicht auf ein maximal zulässiges Maß dauerhaft begrenzt bleiben. Die Gefahr von Setzungen besteht insbesondere in Bereichen, die durch den Altdeponiekörper unterlagert sind. Zu diesem Zweck wurde die Gas-, Trag- und Ausgleichsschicht (GTA) mit einer Stärke von 100 cm ausgebildet und ein kornabgestuftes, nicht bindiges und gut verdichtbares Material ausgewählt. Die GTA gleicht bereits Unebenheiten des Planums aus und bewirkt eine hohe Tragfähigkeit für die Funktion als Auflager und Widerlager für die verdichtet einzubauende mineralische Dichtung. Zur Unterstützung der GTA wird das Geogitter innerhalb der GTA im unteren Drittel angeordnet.

Die Bemessung erfolgte nach DIN 1054 [5] und EBGEO [1] (Kap. 11) als Erdfall. Die wesentlichen Parameter für die Berechnung waren:

- Erdfalldurchmesser 1,5 m
- Längs- und Querdehnung des Geogitters < 3 %
- Überschütthöhe 33,8 m
- pH-Wert von > 9

Als kritisches Verformungskriterium wurde eine maximal zulässige Dehnung der mineralischen Dichtung von 3 % angesetzt, bevor größere Undichtigkeiten entstehen. Gemäß [1] wurde der Nachweis nach dem RAFAEL-Verfahren für einaxiale Überbrückung eines erdfallgefährdeten Bereiches geführt. Unter Ansatz einer Gewölbetragswirkung mit einer Höhe  $H_M$  des 1,5-fachen Durchmessers wurden die Bemessungswerte der vertikalen Auflastspannungen (Gl. 3) infolge Eigenlasten (Gl. 1) und veränderlichen Lasten (Gl. 2) bestimmt.

$$\sigma_{vGk} = \frac{D \cdot \left( \gamma - 4 \cdot \frac{c_k}{D} \right)}{2 \cdot K_{ak} \cdot \tan \varphi_k} \cdot \left( 1 - e^{-K_{ak} \cdot \tan \varphi_k \cdot 4 \cdot \frac{H}{D}} \right) \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\sigma_{vQk} = q_k \cdot e^{(-K_{ak}) \cdot \tan \varphi_k \cdot 4 \cdot \frac{H}{D}} \quad (\text{Gl.2})$$

$$\sigma_{vd} = \sigma_{vGk} \cdot \gamma_G + \sigma_{vQk} \cdot \gamma_Q \quad (\text{Gl.3})$$

Der Bemessungswert der Beanspruchung ergibt sich nach Gleichung 4 zu:

$$E_d = \sigma_{vd} \cdot 0,5 \cdot D \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{6 \cdot \epsilon_{max}}} \quad (\text{Gl.4})$$

Der Bemessungswert der Zugfestigkeit ist entsprechend durch dividieren mit den bekannten Abminderungsfaktoren  $A_1$ - $A_5$  und  $\gamma_B$  zu bestimmen und muss größer als der Bemessungswert der Beanspruchung sein. Dieses Verfahren beschreibt die festigkeitsbezogene Ermittlung der Kurzzeitzugfestigkeit (Gl. 5), also die Absicherung gegen Bruchzustände im GZ 1.

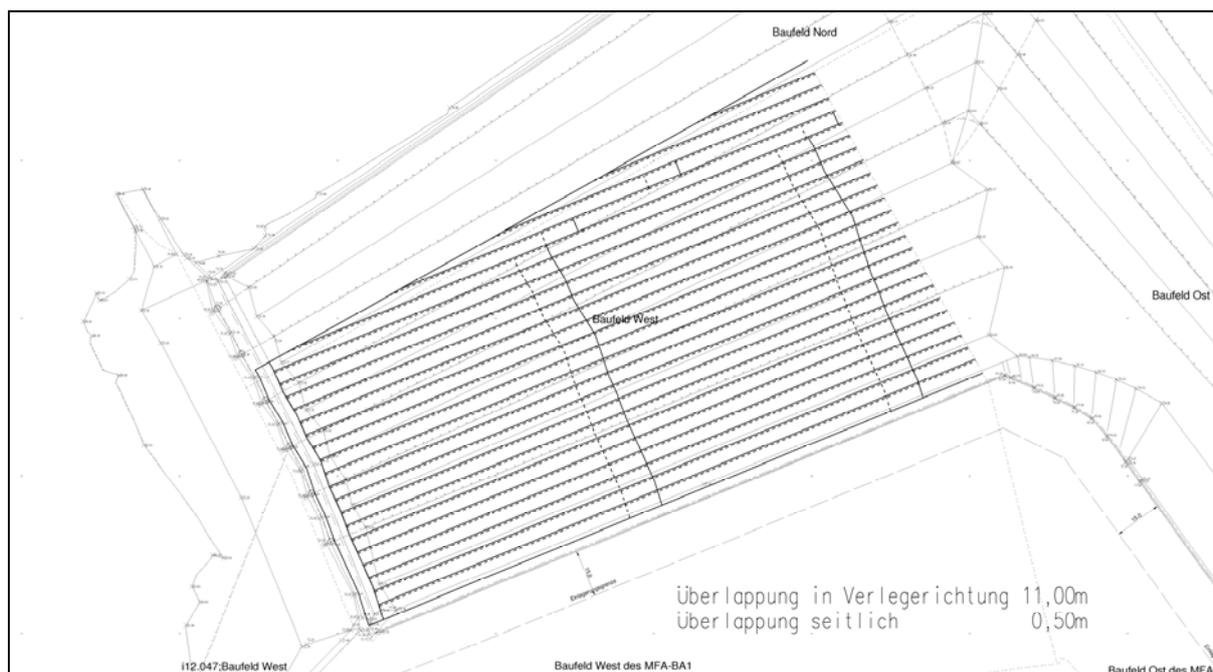
$$R_{Bd} = \frac{F_{Bko}}{\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \cdot \gamma_5 \cdot \gamma_B} \quad (\text{Gl. 5})$$

In einem weiteren Schritt ist auch der kriechdehnungsbezogene Nachweis gefordert, bei dem der, der angesetzten Dehnung entsprechende langfristig zulässige Ausnutzungsgrad berücksichtigt werden muss (Gl. 6). Dieser kann z. B. aus den Isochronenkurven des eingesetzten Produktes ermittelt werden (s. a. [1], Kap. 2, Bild 2.5). Dies ermöglicht den Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit GZ 2.

$$R_{Dd} = \frac{F_{Bko} \cdot \beta}{\gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \cdot \gamma_5 \cdot \gamma_B} \quad (\text{Gl. 6})$$

Hierbei ist der kleinere Wert der sich ergebenden Bemessungswerte der Widerstände maßgebend. Für das hier vorgestellte Projekt wurde die BAM-zugelassene Geogittertype Fortrac R 600/50-30 T als ausreichend ermittelt. Maßgebend in diesem Fall war der Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit GZ 2. Die Bemessung ist rechnerisch also so ausgelegt, dass die sich aus den Randbedingungen ergebende Belastung über einen Bemessungszeitraum von 100 Jahren nur eine Dehnung im Geogitter von  $\varepsilon < 3\%$  zur Folge haben wird. Unter Berücksichtigung der lastausgleichenden und setzungsreduzierenden Wirkung der zwischen Geogitter und mineralischen Dichtung liegenden GTA-Schicht kann davon ausgegangen werden, dass sich die Dehnungen noch unterhalb 3% einstellen werden.

Anschließend wurden die projektspezifisch erforderlichen Verankerungslängen und Überlappungslängen ermittelt und durch die ausführende Baufirma entsprechend ausführbare Verlegepläne (Abb. 3.3) erstellt. Die Geogitter wurden entsprechend den Verlegeplänen auf Maß produziert und verringern somit den Verschnitt auf ein Minimum.

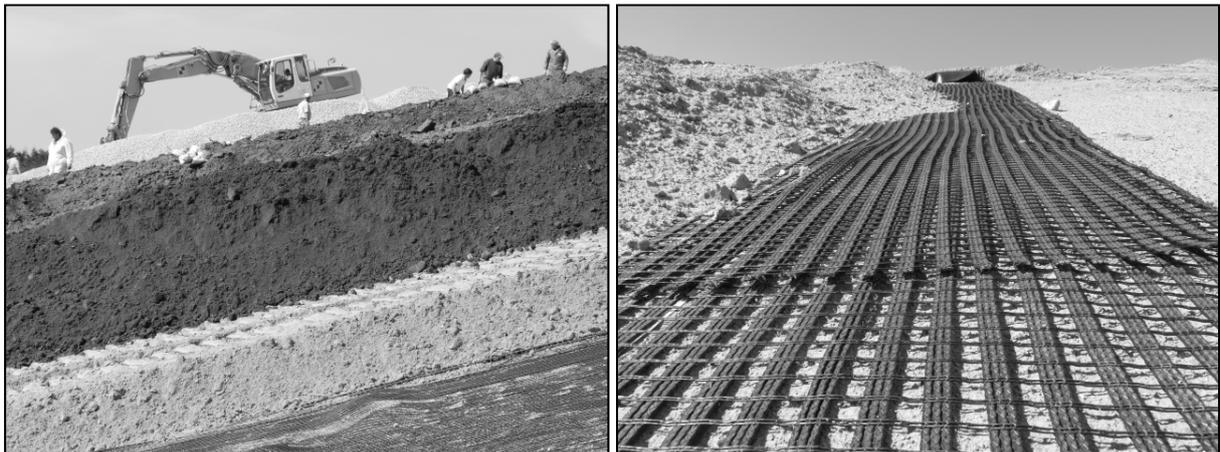


**Abb. 3.3:** Teilverlegeplan im 2. Bauabschnitt (Beispiel)

In der im Mai 2012 begonnenen Baumaßnahme wurde im ersten Bauabschnitt eine Fläche von 3,5 ha mit der MFA abgedichtet. Im zweiten Bauabschnitt, der in die drei Bereiche West, Ost und Nord unterteilt ist und von 2013 bis voraussichtlich 2015 dauert, sind weitere 7 ha MFA einzubauen. Ein späterer dritter Bauabschnitt MFA-BA3 weist weitere 3 ha auf.



**Abb. 3.4:** Einbauphasen der MFA im Böschungsbereich mit Neigung 1:3



**Abb. 3.5:** Schichtenaufbau

**Abb. 3.6:** Überlappung des Geogitters

#### 4. Abdeckung von Schlammteichen

Der Aufbau der Überdeckung bzw. Abdichtung richtet sich im Normalfall nach den Vorgaben des Auftraggebers bzw. der zuständigen Genehmigungsbehörden und der geplanten Folgenutzung. Er kann im einfachsten Fall aus einem Geokunststoff und Füllboden oder aber auch aus mehreren Lagen Geotextilien mit einer hochwertigen Überdeckung und qualifizierter Oberflächenabdichtung bestehen. Die unterschiedlichen Bauweisen zur Überdeckung eines Schlammteiches werden in [13,14] genauer erläutert. Die Geokunststoffbewehrung stabilisiert den weichen Untergrund und ermöglicht den Aufbau der Abdeckungsschichten. Der Schlamm bleibt in seiner ursprünglichen Form erhalten. Er braucht nicht zusätzlich aufwendig chemisch stabilisiert oder anders vorbehandelt zu

werden. Die Fläche wird begehbar und Baufahrzeuge können die Fläche vorsichtig befahren und abdecken ohne einzusinken. Die Abdeckung von Schlammteichen erfordert somit eine der Situation angepasste Bemessung der erforderlichen Zugfestigkeit sowie eine auf die jeweilige Situation abgestimmte Bauweise. In diesem Kapitel wird der Schwerpunkt auf die Überdeckung von sehr weichen Schlämmen gelegt, weil diese tlw. nicht mehr im Vor-Kopf-Betrieb überdeckt werden können.

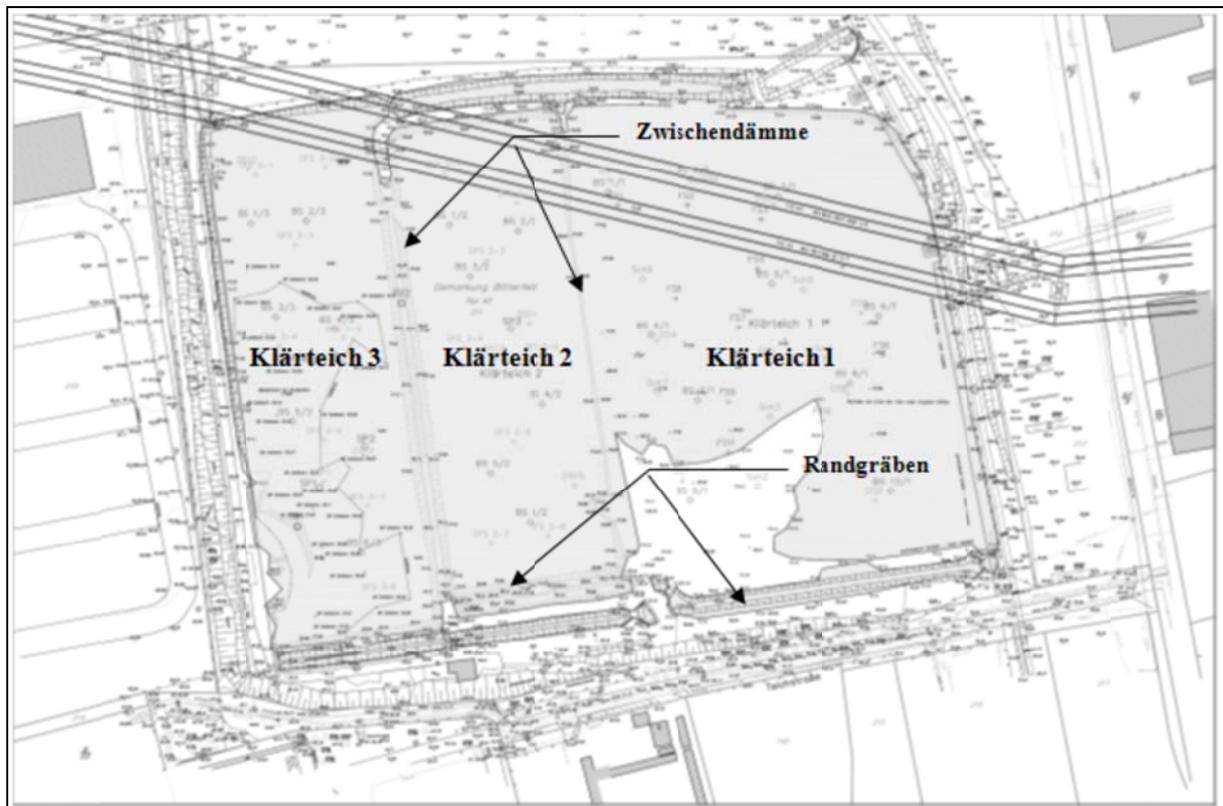
Um den Verlegeaufwand zu reduzieren und das Projekt zu beschleunigen, bietet es sich an, die einzelnen Geokunststoffbahnen zu großflächigen Panels zusammen zu fassen. Dies ermöglicht den einlagigen Einbau in einem Arbeitsgang in Größenordnungen von 10.000 m<sup>2</sup> bis 20.000 m<sup>2</sup> anstatt 500 – 1.000 m<sup>2</sup> bei Einbau von Einzelbahnen, der zusätzlich meist zweilagig erfolgt. Für Großpanels haben sich Gewebe oder Kombiprodukte bewährt, weil sie sich besser vernähen lassen, als ein Geogitter allein. Der höhere Preis für die Konfektionierung ab Werk und vor Ort wird über die wesentlich verkürzte Verlegezeit mehr als kompensiert. So wird ein Großpanel in der Regel problemlos an einem Tag verlegt. Die Vor-Ort-Konfektionierung braucht je nach Größe ca. 2 bis 4 Tage.

Die Großpanels werden teils im Werk, teils auf der Baustelle gefertigt. Ursache hierfür ist nicht so sehr die Fertigungsmöglichkeit im Werk, sondern die Verladung und die Handhabbarkeit des Panels auf der Baustelle. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Bewehrung verladen, abgeladen und ohne große Beanspruchung ausgelegt und vorbereitet werden muss, um die Einbaubeschädigung möglichst gering zu halten. Ab Werk hat es sich je nach Bahnlänge und Material als sinnvoll erwiesen nicht mehr als zwei bis fünf Bahnen von ca. 5 m Breite zu vernähen und dann gefaltet und aufgerollt zu verladen. Je nach Material ergeben sich hierbei schon Rollengewichte bis zu 1,5 t. Auf der Baustelle müssen die Rollen so abgewickelt und die Bahnen aufeinander verlegt werden, dass sie mit den richtigen Seiten aneinander genäht werden können. Nur so ist gewährleistet, dass das Panel in der richtigen Position liegt und entsprechend der Geometrie des Beckens auch verlegt werden kann.

#### **4.1 Fallbeispiel Klärteiche Bitterfeld**

Der Klärteich Süd in Bitterfeld-Wolfen besteht aus drei kleineren Teilbereichen mit Flächen von 1,3 bis 2,7 ha (Abb. 4.1). Die Gesamtfläche beträgt ca. 7 ha. Die Klärteiche sind durch Zwischendämme getrennt, haben jedoch hydraulisch miteinander korrespondiert. Die Teiche wurden in den Jahren 1940 bis 1967 angelegt und mit Flüssigabfällen der Bitterfelder

Chemieindustrie gefüllt. Weitergehende Informationen zur Umweltbelastung und Entstehungsgeschichte können Hübner et al. [15] entnommen werden.



**Abb. 4.1:** Sanierungsfläche 2010 [15]

Die mechanischen Eigenschaften der vorgefundenen Schlämme liegen im Erfahrungsbereich anderer, bereits durchgeführter Projekte. Die undränierten Scherfestigkeiten in den Klärteichen 2 und 3 liegen in Größenordnungen von  $c_u = 0,5$  bis  $7,8 \text{ kN/m}^2$  (KT 2) und  $c_u = 0,1$  bis  $4,9 \text{ kN/m}^2$  (KT 3). Bedingungen, die eine direkte Begehung oder Befahrung unmöglich machen. Zusätzlich ist hier ein Schadstoffinventar zu beobachten, was nahezu das Abfallspektrum der chemischen Industrie umfasst. Zu nennen sind hier nur LHKW, MKW, Schwermetalle (Cr, Hg etc.), Derivate von Schädlingsbekämpfungsmitteln DDX, Chlorbenzene, HCH, Dioxine, Furane in unterschiedlichen Konzentrationen je Becken.

Entsprechend ergibt sich ein Sanierungsziel, welches auch Einfluss auf die Bauweise hat. Wichtig ist die Unterbindung von Emissionen über den Luftpfad und den Direktkontakt zum Schlamm. Sowohl während und nach der Sanierung darf es zu keiner zusätzlichen Belastung der Umwelt durch Schadstoffe kommen (z. B. Verwehungen, Grundwasser-Verunreinigung, Einsinken von Lebewesen, Schadstoffaufnahme über Nahrung durch Tiere).

## 4.2 Sanierungskonzept mithilfe eines Geotextilen Großpanels

Aufgrund der mechanischen Eigenschaften des Schlammes, der chemischen Belastung, der in weiten Teilen anstehenden Wasserlamelle, dem Ziel die Schadstoffemissionen so gering wie möglich zu halten und zusätzlich ein hohes Arbeitsschutzniveau während der Sanierung zu haben, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem eine geotextile Trenn- und Bewehrungslage auf der Schlammoberfläche die Überdeckung mit einer mineralischen Abdeckung ermöglichen soll.

Die Huesker Synthetic GmbH machte der planenden Bietergemeinschaft den Vorschlag, die Becken 2 und 3 nicht mehrlagig mit einzelnen Vlies und Geogitterbahnen abzudecken, sondern alternativ Großpanel zu nutzen, welche vor Ort konfektioniert die vollständige Abdeckung eines Beckens mit dem Geotextil in einem Arbeitsgang ermöglichen.

Die Vorteile dieser Bauweise können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kurze Konfektionszeiten und keine langwierige Verlegung von einzelnen Bahnen
- Das Einziehen des Geotextils findet innerhalb einer halben Stunde statt
- Kein Kontakt von Arbeitern zur Oberfläche der Klärteiche
- Die vollflächige Abdeckung verhindert Emissionen während der Bauphase
- Wasserlamelle wird als Auftriebskörper genutzt, verhindert ebenfalls Emissionen
- Keine Problematik mit klaffenden Überlappungsbereichen wie bei Einzelbahnen

Der Großpanellösung kommt weiterhin die einfache rechteckige Geometrie der Teiche sehr entgegen. So können die einzelnen Geotextillagen in einer Länge hergestellt und brauchen vor Ort nur in der richtigen Reihenfolge und seitenrichtig zueinander vernäht werden.

Als Anforderungen können folgende Punkte definiert werden:

- Trennung der mineralischen Abdeckung von den unterliegenden Schlämmen
- ausreichende Tragfähigkeit auch unter Gerätelast während des Einbaus der mineralischen Bodenschichten
- Verhinderung des Austritts von Schlämmen an die Oberfläche zur Minimierung von Emissionen über den Luftpfad während der Sanierung
- Aufnahme der beim Einziehen auf das Geokomposit eingetragenen Lasten, inkl. Festigkeitsreserve gegen Widerstandserhöhungen infolge vorhandener Aufladungen und vorhandenen Restbewuchs

### 4.3 Bemessung des Geotextilen Großpanels

Die Bemessung des Geotextils erfolgte durch die Anwendungstechnik der Huesker Synthetic GmbH als Modellberechnung mit dem Programm Stability von GGU, Braunschweig, nach DIN 4084:2009 [16] mit dem Partialsicherheitskonzept nach dem Verfahren von Bishop. Die undrained Scherfestigkeit wurde gemäß Bodengutachten über die Tiefe verteilt angesetzt. Weiterhin wurden die unterschiedlichen Schüttphasen in Kombination mit der Auflast durch einen Langarmbagger kombiniert. Hierbei wurde ein dreilagiger Einbau mit 0,5 m Lagenstärke in mehreren Schüttphasen simuliert. Die untere Schüttlage hat gegenüber der nächsten Bodenlage einen Mindestvorlauf von ca. 2 m. Es wurde sowohl ein Schüttfortschritt als auch eine Vorwärtsbewegung von 1 m untersucht, um Lastwechsel ausreichend berücksichtigen zu können. Der eingesetzte Langarmbagger wurde mit einem Gewicht von 30 t unter Ansatz einer Lastverteilung über eine Mindeststärke der vorgebauten Tragschicht von 1,5 m und einer daraus resultierenden Verkehrslast von 9,8 kN/m<sup>2</sup> auf Bewehrungsebene über eine Länge von 5,73 m berücksichtigt.

Die Berechnungen wurden nur im Lastfall 2 ausgeführt, da die Bewehrungen nur temporäre Trageigenschaften aufweisen müssen. Die statischen Berechnungen wurden sowohl mit auf der sicheren Seite liegenden unveränderten undrained Scherfestigkeiten ausgeführt als auch mit Scherparametern, die sich durch den Baufortschritt und der größer werdenden Auflast durch Konsolidierungsprozesse verbessern. Bei der Berechnung kann das Konsolidierungsverhalten des Schlammes und die damit einhergehende Verbesserung der undrained Scherfestigkeit  $\Delta c_u$  phasenweise je Schüttphase mit dem Ansatz nach Bjerrum et al. [17] berücksichtigt werden:

$$\Delta c_u = 0.2 \dots 0.25 \times \Delta \sigma_v \times U$$

$\Delta c_u$ : Zunahme der Scherfestigkeit des undrained Bodens infolge der Auflast [kN/m<sup>2</sup>]

$\Delta \sigma_v$ : Spannungszunahme durch Auflast [kN/m<sup>2</sup>]

U: Konsolidierungsgrad [%]

Unter Berücksichtigung einer mittleren undrained Scherfestigkeit von  $c_u=2$  kN/m<sup>2</sup> über 2 m Tiefe, bevor etwas festere Schichten angetroffen werden, ergaben die Berechnungen ohne Verbesserung der Scherfestigkeit für alle Phasen mit einer erforderlichen Bemessungsfestigkeit des Geokomposits von  $F_d=27,1$  kN/m Auslastungsgrade kleiner  $\mu=1,0$ .

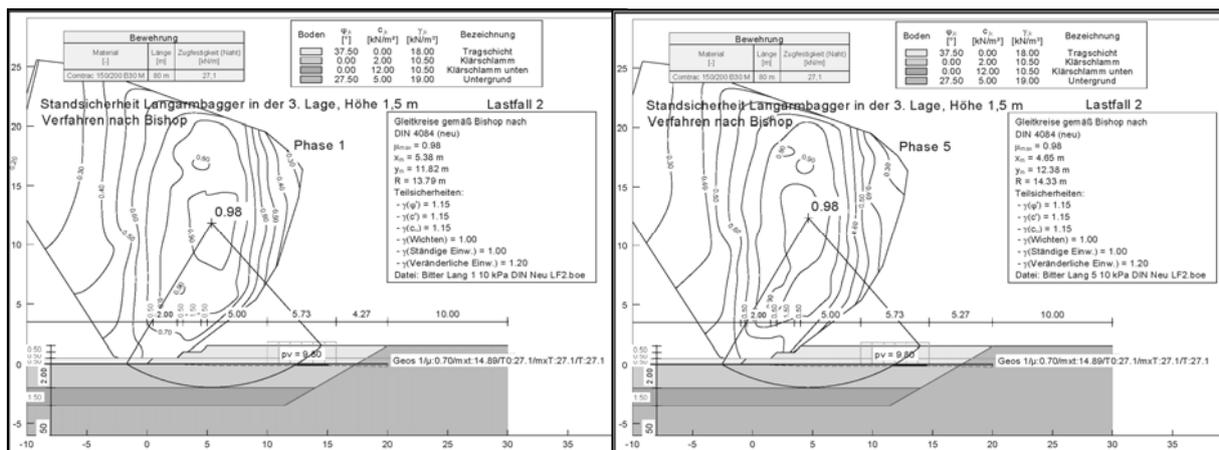


Abb. 4.2 a, b: Bemessung nach DIN 4084 [16] für das Geokomposit (Auszug)

Als Geokunststoffbewehrung wurde ein Geokomposit vom Typ Comtrac® 150/200 B30 M mit einer Kurzzeitzugfestigkeit in Längsrichtung von  $F_{\text{KL}}=150 \text{ kN/m}$  und in Querrichtung  $F_{\text{KQ}}=200 \text{ kN/m}$  bei einer geringen Bruchdehnung unter 6 % gewählt, welches sich in ähnlicher Form auch in früheren Projekten bewährt hat. Die lastaufnehmende Gitterstruktur besteht aus Polyvinylalkohol (PVA), das bei den erheblich belasteten Schlämmen auch im pH-Bereich von  $\text{pH}=12-13$  langfristig stabil ist. Als Trenn- und filternde Komponente ist zusätzlich ein PP-Vlies mit einem Flächengewicht von  $300 \text{ g/m}^2$  eingenäht. Der Überschuss an Zugfestigkeit in Querrichtung wird benötigt, um eine ausreichend hohe Nahtstabilität und somit auch Nahtzugfestigkeit zu erreichen. Unter Berücksichtigung aller Abminderungsfaktoren nach EBGeo [1] kann die geprüfte Nahtfestigkeit für einen Zeitraum von maximal 1 Jahr mit  $F_{\text{B}} = 27,1 \text{ kN/m}$  angesetzt werden. Die erforderliche Bemessungsfestigkeit gem. Vorstatik beträgt  $F_{\text{d}} = 24,9 \text{ kN/m}$ . Der Nachweis der Randeinspannung erfolgte mit Algorithmen die mit dem Programm Mathcad geschrieben wurden. Die Nachweise wurden für Gleiten und Bruch der Böschungskrone analog Kapitel 8 der EBGeo [1] geführt. Beide Nachweise wurden mit der sich aus den örtlichen Gegebenheiten vorgegebenen Geometrie eingehalten. Der Nachweis des Herausziehens, bei dem Reibung an Ober- und Unterseite berücksichtigt wird, konnte entfallen, weil schon der kritischere Gleitnachweis erfüllt wurde.

#### 4.4 Konfektionierung des Geokomposits

Das Geokomposit wurde entsprechend dem Verlegeplan produziert und nummeriert. Die hier vorhandene rechteckige Beckengeometrie erlaubte es, dass alle Bahnen mit der gleichen Länge hergestellt werden. Die Bahn, an welcher die Zugtraversen mit den Schwimmhilfen zu befestigen waren, erhielt ab Werk einen Hohlraum ( $\varnothing$  200 mm), in welchen die Traversen eingeschoben werden konnten. Vor Ort stand ein ca. 20 m breiter Bereich für die Vernähung zur Verfügung. Je nach Arbeitsweise ist i. d. R. eine stabile Arbeitsbreite von ca. 7 m bis 10 m erforderlich.

Die nummerierten Rollen wurden vor Ort seitenrichtig aufeinander verlegt. Dies ist besonders zu berücksichtigen, weil das Geokomposit eine Vlies- und eine Gitterseite aufweist, das fertige Panel jedoch über die Vliesseite gezogen werden sollte. Mit jeder neuen Bahn wechselte entsprechend auch die Seite, auf der vernäht wurde, sodass mit der obenliegenden Zugbahn mit Hohlraum, die zum Schluss vernäht wird, ein zickzackförmig aufeinander gefaltetes Großpanel erstellt wurde. Der Nähvorgang selbst erfolgt mit Industriehandnähmaschinen. Zwei Näher erzeugen hintereinander laufend dabei zwei Priesternähte. Bei einem Gewicht des Materials von 950 g/m<sup>2</sup> müssen Helfer die übereinander gelegten Bahnen anheben und den Nähern zuführen, was mit bis zu 4 Helfern geschieht. Für das Panel für Becken 2 wurden inkl. der üblichen Vorbereitungs- und Einübungsphase ca. 3 Tage für die Konfektion benötigt.



**Abb. 4.3 a, b:** Vernähen der Geokompositbahnen: Links zu Fuß, rechts auf der Nähbühne

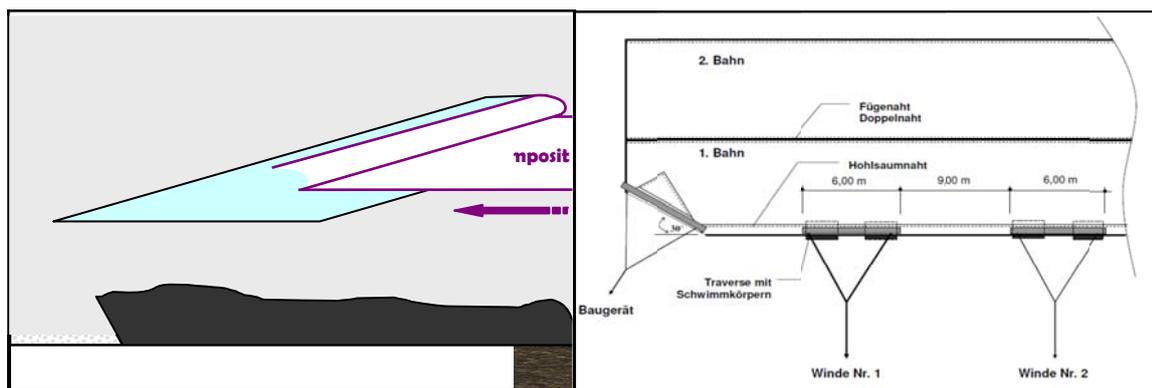
Aus den Erfahrungen der Konfektion des ersten Panels und dem generellen Bestreben, diese anstrengende Arbeit zu erleichtern und rationaler gestalten zu können, wurde eine Arbeitsbühne entwickelt. Das Vernähen erfolgt nicht mehr laufend sondern stehend per Traktor geführter Nähbühne. Diese Arbeitsweise ist wesentlich kräftesparender und weniger personalintensiv ausführbar. Die Nähbühne ist mit Klemmrollen ausgestattet, welche die Kompositbahnen führen. Das Anheben ist nur zu Anfang der Bahn erforderlich, danach muß lediglich die Zuführung der übereinanderliegenden Bahnen kontrolliert werden. Ebenso entfällt das kräftezehrende Halten der Bahnen. Die Fahrgeschwindigkeit des Traktors wird der Nähgeschwindigkeit der Nähmaschinen angepaßt. Somit konnte das Panel für Becken 3 mit einer Größe von ca. 18.000 m<sup>2</sup> mit 4 Mann in zwei Tagen hergestellt werden.

#### **4.5 Bauausführung**

Bei dem Einsatz von Großpaneln gibt es zwei bestimmende Faktoren für die erfolgreiche Verlegung. Zum einen müssen die Nähte ausreichend Zugfest sein, zum anderen müssen die eingesetzten Winden oder Geräte ausreichend Zugkraft aufbringen können.

Aufgrund der beschänkten Platzverhältnisse und der breiten Zugfront von bis zu 220 m schied der Einsatz von rollendem Gerät aus. Auf der dem Konfektionsplatz gegenüberliegenden Ufer befindet sich ein betonierter Randweg, der gut geeignet war, um stationäre Winden durch Dübel verankern zu können. Um die Zugfront stramm zu halten und ein eventuelles Einschnüren der Bahn zu verhindern, wurden zwei Bagger eingesetzt, die an den jeweiligen Rändern entsprechend mitfahren konnten und das Panel gehalten haben.

Die erforderliche Zugkraft sämtlicher Winden wurde über einen einfachen Ansatz aus Eigengewicht und Reibung sowohl mit als auch ohne Auftrieb bestimmt. Der gesamte Scherwiderstand des Panels von Becken 2 beträgt bei einer Fläche von ca. 16.000 m<sup>2</sup>, einem Gewicht von ca. 15 t und einem Reibungswinkel ungefähr  $T_2=100$  kN. Für Becken 3 ergibt sich ein Widerstand von ca.  $T_3= 115$  kN. Für Becken 2 wurden 13 Winden mit jeweils 10 kN Zugkraft sowie zwei Baugeräte vorgesehen. Für eine bessere Lasteinleitung in das Panel werden die Windenseile an 6 m breiten Traversen befestigt, die mitsamt Schwimmkörpern am Hohlraum der Zugfront befestigt werden.



**Abb.4.4:** Anschluss der Seilwinden und Baugeräte an den Hohlsaum des Großpanels [15]

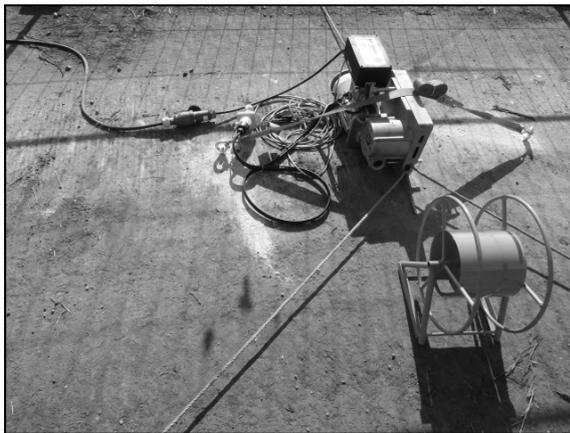
Der Einzug in Becken 2 zeigte, dass die eingesetzte Zahl an Winden und Gerät nicht ausreichend war. Das Panel konnte nur zu ca. 95 % eingezogen werden. Die restliche Strecke wurde mit einem Bagger, der jedes Windenseil nachzog, überbrückt. Die vorhandene Gesamtzugkraft von ca. 150 kN war nicht ausreichend groß, gegenüber der rechnerischen Scherkraft von ca. 100 kN. Ursache hierfür ist ein tlw. etwas zögerliches Bedienen der Winden und daraus resultierenden Stillständen, in denen sich das Panel verstärkt mit Wasser vollsaugt bzw. auch mehr Kontakt zum Untergrund findet. Weiterhin ist wahrscheinlich auch der Widerstand aus (geschnittenem) Bewuchs und vorhandenen Bodenflächen größer als angenommen. Dies führte zu einer Verzögerung des Verlegens, welches nach ca. 3,5 Stunden abgeschlossen werden konnte.



**Abb. 4.5 a, b:** Vorbereitetes Panel und Abdeckung Becken 2 mit ca. 16.000 m<sup>2</sup> Geokomposit

Aus den Erfahrungen von Becken 2 wurden Verbesserungen eingeführt. Die Gesamtzugkraft wurde erhöht. Mit insgesamt 17 Winden und zwei Baggern konnte eine Zugkraft von ca. 230 kN aktiviert werden, was ungefähr dem 2-fachen des rechnerischen Widerstandes entsprach. Weiterhin wurden Tragseile gespannt, welche den Reibungswiderstand des Panels verringerten.

Die Verbesserungsmaßnahmen zeigten bei der Verlegung des Panels am Becken 3 vollen Erfolg. Bei einer Breite von 220 m und einer Länge von 80 m konnte Becken 3 innerhalb von nur 7 Minuten abgedeckt werden.



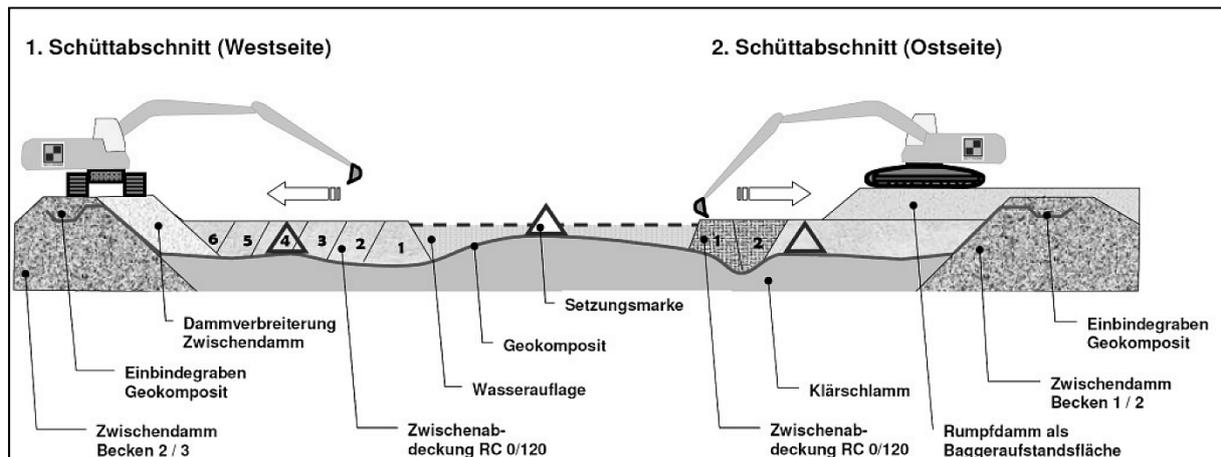
**Abb. 4.6:** Verankerte Seilwinde



**Abb. 4.7:** Verfüllung mit Langarmbagger

Die abschließende Verfüllung mit Tragschichtmaterial erfolgt, wie bereits beschrieben vom Rand aus mit Langarmbaggern. Das Ausführungsprinzip des Einbaus kombiniert den Vor-Kopf-Einbau mit einer auf den Bagger rückschreitenden Verfüllung, um so den Effekt der Schlammblasenbildung vor der Schüttung zu verringern.

Somit erfolgt der Bodeneinbau von innen nach außen, während der Arbeitsvorschrift von außen nach innen verläuft.



**Abb. 4.8:** Arbeitsprinzip des Einbaus der Zwischenabdeckung [15]

Das vorgeschlagene Sanierungskonzept erwies sich auch für bisher nicht gekannte Größen der Geokunststoffpanels als sehr erfolgreich. Die Praxistauglichkeit für vergleichbare Projekte konnte unter Beweis gestellt werden. Das Bauverfahren ermöglicht es auf wirtschaftliche Weise Anforderungen an die Standsicherheit, Emissionsschutz und Arbeitsschutz zu vereinen. Die Ausführung erwies sich für alle Beteiligten als lehrhaft und führte zu wesentlichen Verbesserungen, die in weiteren Projekten genutzt werden können.

## Schlussfolgerungen

Geokunststoffbewehrungen im Bereich der Umwelttechnik haben sich für viele Anwendungsbereiche etabliert. Die Bemessungsverfahren sind teilweise in der EBGEO [1] geregelt, teilweise basiert die Bemessung jedoch auf empirischen Erfahrungswerten bzw. können mit Analogien aus der Bodenmechanik ausreichend beschrieben werden. Ergänzend sind Erfahrungen von Planern, Geokunststoffherstellern, ausführenden Baufirmen und Fremdüberwachern für solche „nicht geregelten“ Bauwerke von hohem Wert für den Erfolg der Ausführung. Insgesamt betrachtet bieten Geokunststoffe im gesamten Umweltbereich funktionale, genehmigungsfähige und wirtschaftlich günstige Lösungen für technische Problemstellungen.

## Literatur

- [1] DGGT AK 5.2 (2010): Arbeitskreis 5.2 „Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen – EBGEO“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- [2] GDA (1997) Empfehlungen des Arbeitskreises zur „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ GDA der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). Berlin, Germany, Ernst & Sohn.
- [3] [Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM (2013): Zulassungsschein 08/BAM IV.3/12/10 für Bewehrungsgitter aus Kunststoff für Deponieoberflächenabdichtungen, Produkte Fortrac® R 150/30-30 T, Fortrac® R 200/50-30 T, Fortrac® R 400/80-30 T, Fortrac® R 600/50-30 T der Huesker Synthetic GmbH, Berlin 2013
- [4] GDA E2-7 (2008): „Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen“, Empfehlungen des Arbeitskreises zur „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ GDA der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Bautechnik 9/2008
- [5] DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweis im Erd- und Grundbau, Beuth Verlag, Berlin 2010
- [6] DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, Beuth Verlag, Berlin 2009
- [7] Steffen, H., Sobolewski, J. (1993): Standsicherheitsberechnungen im Deponiebau, 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, Geotechnik, Sonderheft 1993
- [8] Alexiew, D. (1994) Bemessung geotextiler Bewehrungselemente für Abdichtungssysteme auf geneigten Flächen. 10. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 1994
- [9] Syllwasschy, O., Sobolewski, J., Brokemper, D., Alexiew, N. (2005): Beispiele für effiziente Oberflächenabdichtungen anhand der Deponien Koppelwald, Dillinger Hütte und Redlham: Aufbau, Statik, Verlegepläne, Bauausführung; Symposium Umweltgeotechnik TU Freiberg
- [10] Syllwasschy, O., Sobolewski, J. (2008): Sonderlösungen für die Verankerung von Dichtungssystemen auf Böschungen, SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2008
- [11] Krüger, B., Kobel, C., Jacobsen, N., Wemhoff, T., Sänger, F. (2013): Die multifunktionale Abdichtung (MFA) der Deponie Ihlenberg – Aufgabenstellung, Genehmigung, Ausführung, Tagungsband: Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, ICP Eigenverlag, Karlsruhe, 2013

- [12] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), 27.04.2009 BGBl, zul. Geändert durch Artikel 7, 02.05.2013 BGBl
- [13] Syllwasschy, O., Brokemper, D. (2007): Verfahrenstechniken für Schlammteichabdeckungen mit projektspezifisch gefertigten Geokunststoffen, SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2007
- [14] Syllwasschy, O., Alexiew, D. (2012): Stabilisierung von extrem weichem Baugrund zwecks Überbauung von Schlammteichen, 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik TU Wien, 2012
- [15] Hübner, J., Lindner, S., Syllwasschy, O., Schaffranka, E., Koch, L. (2013): Sanierung der „Klärteiche Süd“ in Bitterfeld – Erfahrungen bei der Sicherung einer Schlammablagerung; 9. Leipziger Deponiefachtagung, Leipzig, 2013
- [16] DIN 4084:2009-01: Baugrund – Geländebruchberechnungen, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [17] BIERRUM, L., BERRE, T.(1973): „Shear strength of normally consolidated clays“, 8. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973