

Verformungsuntersuchungen der Deponie Rautenweg mittels 3D-FE-Modellierung

Key-Words: Deponie, Dichtwandsystem, 3D-FEM

Peter-Andreas von Wolffersdorff, Thilo Sembdner

BAUGRUND WIEN Ingenieurgesellschaft mbH, Österreich

Karl Reiselhuber

Magistratsabteilung (MA) 48, Stadt Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Deponie Rautenweg, die von der Stadt Wien betrieben wird und Österreichs größte Deponie ist, wird zum Schutz des Grundwassers mit dem sogenannten Wiener-Dichtwandkammersystem seitlich umschlossen. Es ist vorgesehen, die Deponie auch in den nächsten Jahren weiter zu betreiben und damit auf 45 m über Gelände aufzuhöhen.

Die damit verbundenen zu erwartenden Verformungen des Dichtwandkammersystems können nur mit einer 3D-Modellierung der gesamten Deponie und einer dementsprechenden Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode prognostiziert werden. Es wird die dafür erforderliche 3-stufige Vorgehensweise erläutert. Berechnungsablauf sowie weitere maßgebliche Angaben zur Modellierung, wie z. B. verwendete Stoffmodelle werden ebenfalls beschrieben.

Schließlich werden die maßgeblichen Ergebnisse, wie z. B. die Verformungen und Verschiebungen des Dichtwandkammersystems bei erreichter Endhöhe und die dazugehörigen Setzungen der Deponie dargestellt.

1 EINLEITUNG

Die Gemeinde Wien ist Betreiber in der im 22. Bezirk gelegenen Deponie Rautenweg. Sie wird von einem Dichtwandkammersystem zum Schutz des Grundwassers vertikal umschlossen. Die äußere Kontur der Deponie wird durch Randdämme aus Asche-Schlacke-Betonkörper geprägt. Diese Randdämme gewährleisten zugleich auch die Stabilität des Deponiekörpers.

Es ist vorgesehen, die Deponie Rautenweg auch in den nächsten Jahren weiter zu betreiben und dabei auf 45 m über Geländeoberkante aufzuhöhen.

Im Rahmen einer Studie wurde anhand von 2D-Finite-Elemente-Berechnungen aufgezeigt, dass diese Erhöhung der Deponie realisierbar ist, dass die Standsicherheit des Deponiekörpers gewährleistet ist und dass sich das Dichtwandkammersystem in den betrachteten Schnitten nur in einem vernachlässigbaren Ausmaß verformen und bewegen wird.

Die Untersuchungen der möglichen Verformungen und Bewegungen des Dichtwandkammersystems infolge der höheren Belastung aus dem Deponieeigengewicht erfordern jedoch eine dreidimensionale Betrachtung, d. h. 3D-Finite-Elemente-Berechnungen. Denn nur damit kann festgestellt werden, ob bzw. inwieweit sich das umschließende Dichtwandkammersystem hinsichtlich seiner Beanspruchbarkeit im zulässigen Maß verformen bzw. bewegen wird und ob die Funktionsfähigkeit des Dichtwandkammersystems nach der Aufhöhung der Deponie noch gewährleistet sein wird.

2 ANGABEN ZUR DEPONIE

2.1 Bestandteile der Deponie

Das System der Deponie umfasst die folgenden 3 wesentlichen Elemente:

- den Deponiekörper, bestehend aus Müll infolge zurückliegender Schüttungen seit den 1960-iger Jahren, sowie aus Verbrennungsrückständen infolge Deponierung seit den 1960-iger Jahren sowie zukünftigen Ablagerungen,

- die Randdämme aus Asche-Schlacke-Betonkörper, welche der Müllschüttung üblicherweise vorauselten,
- die vertikale Umschließung, welche die Deponie ringförmig als Kammersystem mit 2 parallelen Dichtwänden umschließt.

2.2 Dichtwandkammersystem als vertikale Umschließung

Bei der Deponie Rautenweg, die seit den 1960-iger Jahren in Betrieb ist, reicht der Deponiekörper in das oberste Grundwasserstockwerk. Um eine Beeinträchtigung des Grundwasserkörpers zu unterbinden, wurde die Deponie zwischen 1986 und 1988 mit einem doppelwandigen Dichtsystem umschlossen, welches bis zu einer Tiefe von 25 m unter GOK als Schmalwand und bei Tiefen > 25 m als Schlitzwand ausgebildet ist. Ein Schema der vertikalen Deponieumschließung findet sich in Abb. 1.

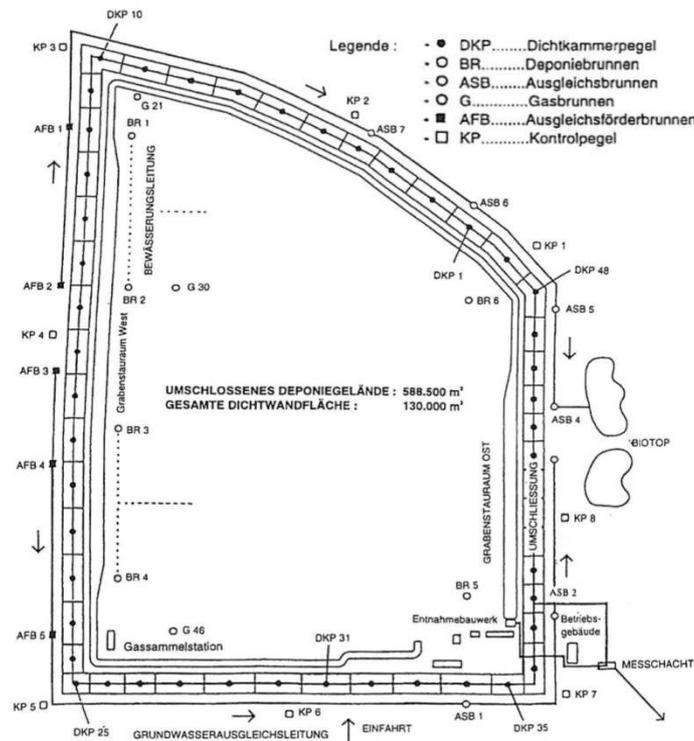


Abb. 1: Schema der vertikalen Deponieumschließung

In Abb. 6 ist das 3D-Modell der vertikalen Deponieumschließung dargestellt.

2.3 Randdämme aus Asche-Schlacke-Beton

Der Aufbau der Randdämme erfolgt mit dem Asche-Schlacke-Beton, bestehend aus den aufbereiteten Verbrennungsrückständen, welche unter Wasser-, Sand- und Zementzugabe zu einem Magerbeton aufbereitet und mit schwerem Verdichtungsgerät eingebaut werden.

Prinzipiell können folgende drei Geometrien für bisher hergestellte und geplante Randdämme unterschieden werden (siehe Abb. 5):

- Geometrie mit gegenseitig verschiebbaren Randdämmen nach Prof. Pregl (Abb. 5, rechts oben)
- Geometrie mit übereinanderliegenden Randdämmen für 3 Schütthöhen (Abb. 5, links unten)
- Geometrie für zukünftige Schüttung bis zur geplanten Endhöhe (Abb. 5, links oben):

Gemäß Projekt beträgt der Mindestabstand des Deponiekörpers zur inneren Dichtwand 5 m, wobei in den Eckbereichen der Deponie ein Mindestabstand von etwa 20 m eingehalten wird. Damit sind entsprechende Sicherheiten gegeben, durch die in der Praxis eine mögliche Verformung der inneren Dichtwand weitgehend ausgeschlossen werden kann.

3 3D-MODELLIERUNG – GRUNDLAGEN UND VORGEHENSWEISE

3.1 Entwicklung der 3D-Geometrie

Grundlage für die 3D-Modellierung bilden Überfliegungsdaten sowie die 3D-CAD-Modellierungen. Zur Erstellung des 3D-Finite-Elemente-Modells (3D-FE-Modells) wurde dabei wie folgt vorgegangen:

- **Schritt 1:** Bei der Verwendung von Überfliegungsdaten war es erforderlich, aus diesen Daten mittels CAD-Software ein Dreiecksnetz der jeweiligen Oberfläche zu erstellen (siehe Abb. 2).

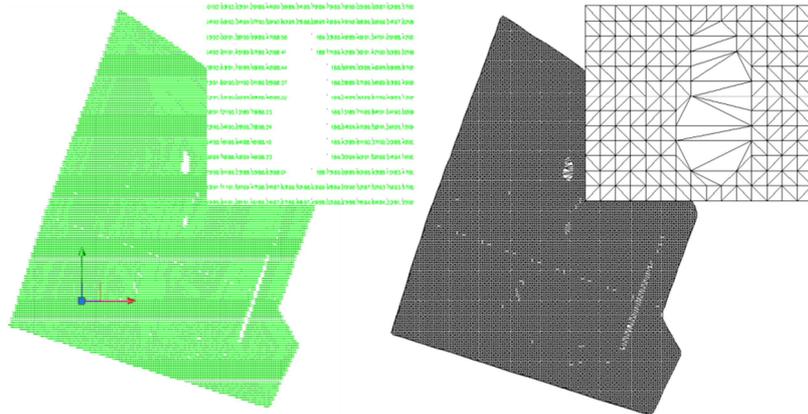


Abb. 2: Überfliegungsdaten (links), Dreiecksnetz der entsprechende Oberfläche (rechts) (Beispiel 1998)

- **Schritt 2:** Anhand der nunmehr vorliegenden CAD-Daten wird die Oberfläche als Isohyphen (Linien gleicher Höhe) dargestellt. Um ein Finite-Elemente-Modell erstellen zu können, müssen entsprechende Glättungen der Oberfläche vorgenommen werden (siehe Abb. 3).

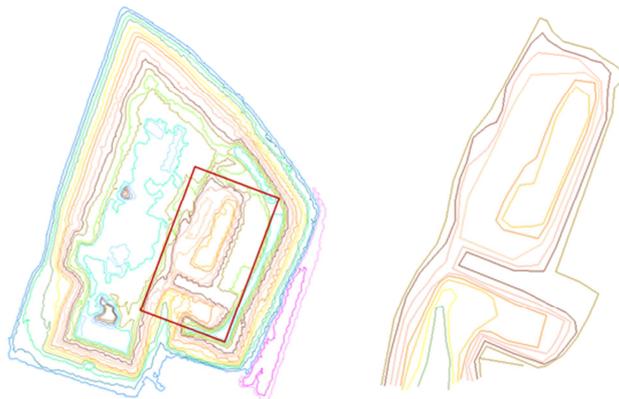


Abb. 3: Oberfläche vor Glättung (links), Oberfläche nach Glättung (rechts) (Beispiel 1998)

- **Schritt 3:** Die geglättete CAD-Oberfläche wird in den Inputteil der Finite-Elemente-Software geladen und mit der darunterliegenden Oberfläche des bereits erstellten 3D-FE-Modells verschritten. Abb. 4 zeigt im Vergleich ursprüngliche, nicht geglättete Oberfläche und die geglättete Oberfläche, nachdem sie in das 3D-FE-Modell implementiert wurde.

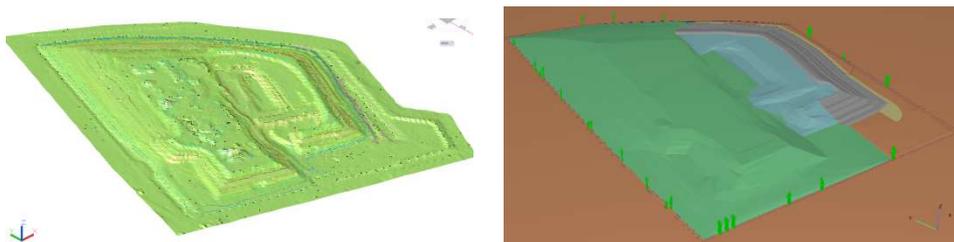


Abb. 4: Nicht geglättete Oberfläche 3D (links), 3D-FE-Modell übertragenen Oberfläche (Beispiel 1998)

3.2 Besonderheiten von komplexen 3D-Finite-Elemente-Modellen

Die Geometrie der Deponie Rautenweg ist äußerst komplex. Mit einem erheblichen Aufwand wurde diese Geometrie in ein dennoch handhabbares 3D-Finite-Elemente-Modell mit hoher Realitätsnähe erstellt.

Hierfür sind folgende Besonderheiten zu nennen:

- Es sind Glättungen der jeweiligen Oberflächen deswegen vorzunehmen, weil sonst im Bereich kleiner Aufwölbungen oder Vertiefungen lokal eine Vielzahl von 3D-Kontinuums-elementen notwendig würde und die Anzahl der Elemente insgesamt stark steigen könnte. Bei einer zu großen Elementanzahl werden FE-Modell und FE-Berechnungen trotz modernster Hard- und Software nur noch schwer oder sogar nicht mehr handhabbar und sind somit nicht praxistauglich. Die notwendigen Glättungen bei der Erstellung von 3D-FE-Modellen erfordern einen zusätzlichen Aufwand.
- Bei der Verschneidung von Oberflächen können sehr flache Bereiche entstehen, so dass bei der Finite-Elemente-Vernetzung sehr flache 3D-Kontinuums-elemente, deren Volumen gegen Null geht und somit entartet sind, entstehen. Solche Bereiche sind durch Glättungen bzw. durch manuelle Anpassungen zu verhindern. Der Aufwand hierfür kann erheblich sein.
- Bei komplexer Geometrie kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei der Verschneidung von Oberflächen die sich daraus ergebenden Vernetzungsbereiche (Clusters) nicht vollständig aneinander liegen. Bei der Netzgenerierung entstehen dann doppelte Knoten, und in diesen Bereichen können sich die Körper bei Belastung gegenseitig durchdringen. Um solche Bereiche auszuschließen bzw. zu reparieren, sind nach jeder neuen Oberflächengenerierung im FE-Modell Testrechnungen notwendig.

4 3D-FINITE-ELEMENTE-MODELL

4.1 Verwendete Software

Zur Bearbeitung der Überfliegungsdaten (Erzeugung von Isolinien, Dreiecksvernetzung) wurde GeoCAD verwendet. Die anschließende Weiterbearbeitung der so erzeugten Oberflächen sowie die Bearbeitung der übergebenen CAD-Unterlagen erfolgten mit AutoCAD.

Für die Erstellung des 3D-FE-Modells, die durchgeführten FE-Berechnungen sowie die Auswertung und Darstellung der Berechnungsergebnisse wurde PLAXIS 3D verwendet.

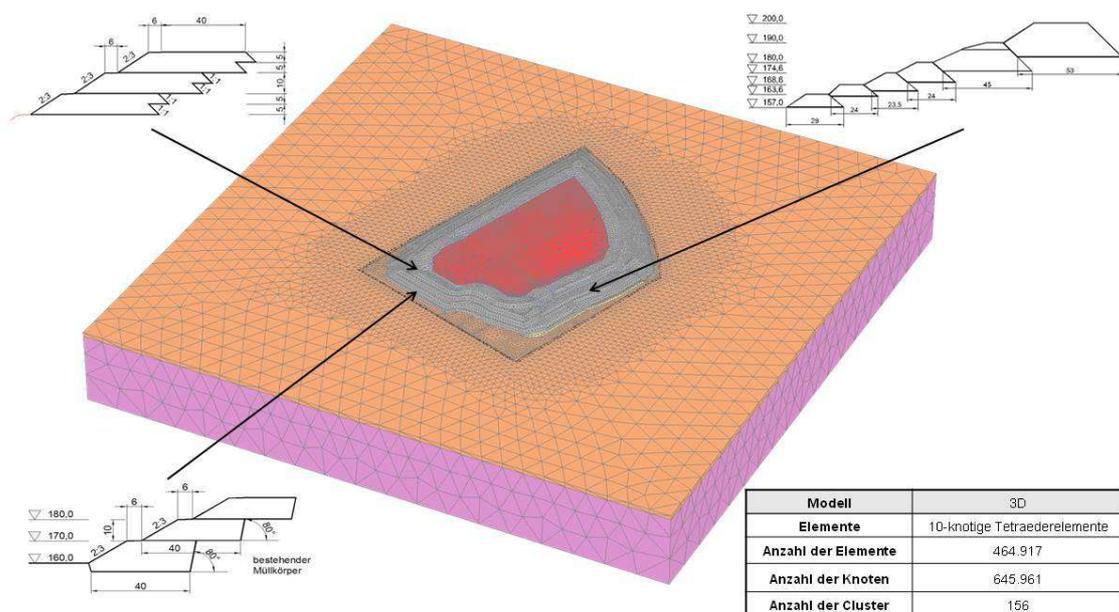


Abb. 5: 3D-FE-Modell der gesamten Deponie im Endzustand mit Darstellung der verschiedenen Randaufbauformen und Angaben zur Anzahl der 3D-Kontinuums-elemente

4.1 Geometrie, Finite-Elemente-Netz, Stoffmodelle

Die Geometrie des 3D-FE-Modells ist das Ergebnis der in 3.1 beschriebenen Vorgehensweise. Es war dabei ein wesentliches Ziel, einerseits die Geometrie der Deponie möglichst realitätsnah zu erfassen und andererseits ein 3D-FE-Modell, das sich ausreichend gut handhaben lässt, zu erhalten.

Das FE-Netz des Gesamtmodells – bestehend aus 464.917 10-knotigen Tetraederelementen – ist in Abb. 5 dargestellt. Die Modellabmessungen betragen: Breite 2000 m, Länge 2000 m und Gesamthöhe 245 m.

Für die Beschreibung des Materialverhaltens des anstehenden Bodens wurde ein Stoffmodell der neuesten Generation – das Hardening Soil Small Strain Modell (HSS-Modell) – verwendet. Für die Müllschüttung wurde das Hardening Soil Modell (HS-Modell) angesetzt.

Für die Randdämme aus Asche-Schlacke-Beton sowie die losen Verbrennungsrückstände kam das Mohr-Coulomb Modell (MC-Modell) mit einer Approximation für betonartiges Material einschließlich der Berücksichtigung von Zugfestigkeit zum Einsatz.

Die Materialkennwerte des anstehenden Bodens und des Müllkörpers wurden aus der Diplomarbeit von Daniela Zehetner (Zehetner 2000) übernommen.

In dem 3D-FE-Modell wurde das Dichtwandkammersystem als 2-Wand-System angenommen. Abb. 6 zeigt das aus 2 Reihen von Platten-Elementen bestehende Modell.

Sowohl für die Schmalwände als auch für die Schlitzwände wurden isotrope linear-elastische Materialeigenschaften angenommen. Für die Schmalwände werden eine virtuelle Dicke von 25 cm und eine sehr geringe Steifigkeit angenommen, so sie keine mittragende Wirkung bei der Ermittlung der Spannungen und Verformungen im gesamten Finite-Elemente-Modell aufweisen. Für die Schlitzwände gelten eine Dicke von 50 cm und eine höhere Steifigkeit im Sinne einer Bentonitwand.

4.2 Berechnungsablauf

Insgesamt sind 17 verschiedene Berechnungsphasen, in denen die maßgeblichen Herstellungszustände bis zur geplanten Endhöhe der Deponie berücksichtigt wurden, modelliert und berechnet worden.

In allen Berechnungsphasen wurde angenommen, dass in der tertiären grundwasserstauenden Schicht (Ton) kein freies Grundwasser vorhanden ist und somit keine Porenwasserdrücke während des Berechnungsablaufes entstehen.

5 7 MASSGEBLICHE ERGEBNISSE DER 3D-FINITE-ELEMENTE-BERECHNUNGEN

5.1 Verformungen des Dichtwandkammersystems

In Abb. 6 sind die Verformungen des Dichtwandkammersystems für den Endzustand dargestellt. Die maximalen Gesamtverschiebungen betragen 3,3 cm. Es zeigt, dass sich die Dichtwände weitgehend orthogonal nach außen bewegen werden und die Eckbereiche hinsichtlich Verformungen als unkritisch anzusehen sind.

5.1 Verformungen des Deponiekörpers

In Abb. 7 ist das deformierte Finite-Elemente-Modell in einem geeigneten Maßstab für den Endzustand dargestellt. Es zeigt sich, dass sich trotz der endgültigen Aufhöhung keine lokalen Setzungsmulden eingestellt haben. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die Deponie im Endzustand gleichmäßig mit einem Maximalwert von 3,70 m setzen wird.

Aufgrund der zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehenen zusätzlichen Bewässerung des Deponiekörpers zur biologischen Intensivierung der Abbauvorgänge werden zur Verifizierung dieses 3D-Finite-Elemente-Modelles speziell in diesen Bereichen Inklinometer installiert. Auch wenn – aufgrund der 3D-Finite-Elemente-Analyse – mit Sicherheit davon auszugehen ist, dass es zu keinen Verformungen der inneren Dichtwand kommen wird, die zu deren Beschädigung

führen könnten, werden im Zuge des fortschreitenden Deponiebaues Inklinometer zur regelmäßigen Kontrolle möglicher Verformungserscheinungen installiert.

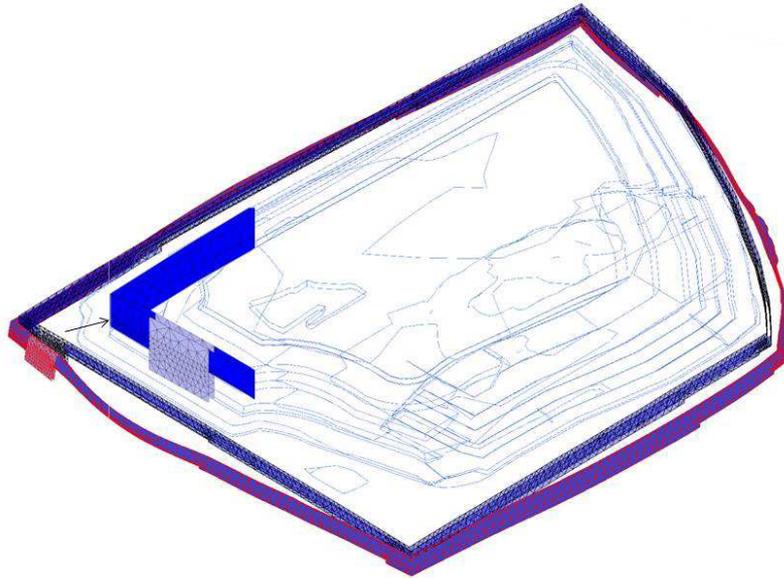


Abb. 6: 3D-FE-Modell des Dichtwandsystems, unverformt und verformt für den Endzustand

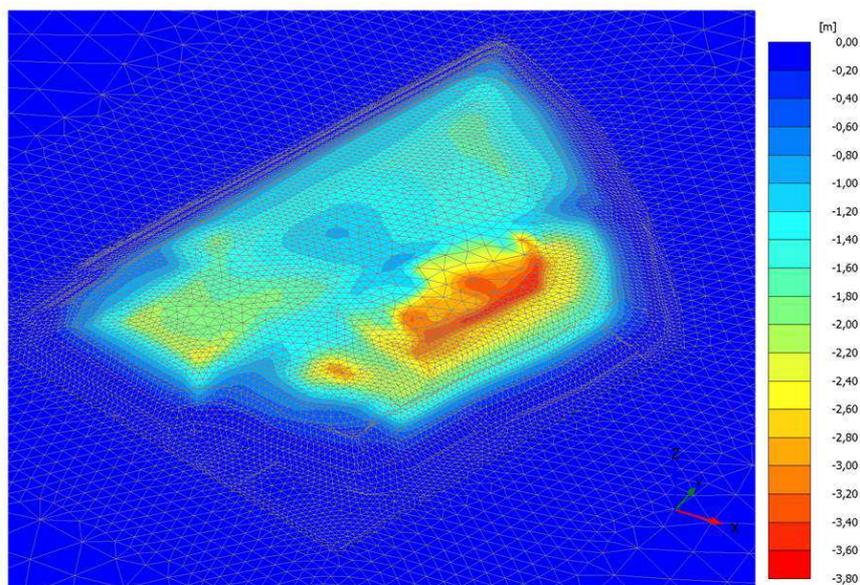


Abb. 7: Setzungen des Deponiekörpers im Endzustand

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die 3D-Finite-Elemente-Analyse hat eindeutig ergeben, dass bei einer geplanten Aufhöhung der Deponie auf 45 m keine Verschiebungen entstehen werden, die zu einer Beeinträchtigung der Funktionalität des Dichtwandkammersystems führen. Insbesondere in den Eckbereichen des Dichtwandkammersystems sind keine nennenswerten nach außen gerichteten Verschiebungen ermittelt worden, so dass auch diese Bereiche nicht als kritisch angesehen werden müssen.

LITERATUR

Zehetner, D. (2000), Verformungs- und Standsicherheitsbeurteilungen an einem Deponiekörper, Diplomarbeit Nr. °256, BOKU Wien, Institut für Geotechnik