

## **E 2-29 Standsicherheitsnachweis für Deponiekörper mit anisotropen Festigkeiten**

Stand: Bautechnik 1998

### **1 Allgemeines**

Nichtbodenähnliche Abfälle (nach E 1-8, Tab. 1-8.1) unterscheiden sich in ihrem Scherverhalten deutlich von Boden. Nach Kockel (1995) [1] und Kölsch (1996)[2] wird der nichtbodenähnliche Abfall als Kompositmaterial betrachtet, das aus einer Grund- und einer Fasermatrix besteht. Zugfeste Faser- und Folienbestandteile, die nach E 1-7 als Dim 1 und Dim 2-Komponenten erfasst werden, bilden die Fasermatrix.

Die Fasermatrix nimmt im wesentlichen Zugkräfte auf, die zusammen mit der inneren Reibung der Grundmatrix die Scherfestigkeit des Abfallkörpers bewirken. Der Anteil des Scherwiderstandes, der in der Scherfläche durch Fasern geleistet wird, wird in Anlehnung an die Begriffe der Bodenmechanik als Faserkohäsion bezeichnet.

Für die Standsicherheitsberechnung von nichtbodenähnlichen Abfallkörpern entsprechend der hier skizzierten Modellvorstellung stehen zwei analytische Berechnungsmethoden für den Nachweis des Grenzzustandes zur Verfügung. E 2-23 behandelt die Berechnung mit verformungsabhängig mobilisierten Scherparametern für isotropen Aufbau des Abfallkörpers. In E 2-29 wird für anisotropen Aufbau des Deponiekörpers, der sich z.B. bei Dünnschichteinbau einstellt, die Berechnung mit überlagerten Scherparametern für die aufnehmbaren Zug- und Reibungskräfte der bewehrungsähnlichen Abfallbestandteile behandelt.

### **2 Bewehrungseigenschaften**

Nach der Modellvorstellung über das Zusammenwirken von Zug- und Reibungskräften ergibt die Überlagerung der beiden Scherfestigkeitskomponenten i.A. eine nichtlineare Bruchbedingung. Solche Bruchbedingungen sind auch von bewehrten Böden bekannt. Ursache der Nichtlinearität ist die Normalspannungsabhängigkeit der Bewehrungswirkung. Die Größe der Zugkräfte, die von den bewehrungsähnlichen Bestandteilen aufgenommen werden können, hängt von den Eigenschaften der Fasern und von der Auflast ab.

Die Festigkeitseigenschaften der Fasermatrix werden durch zwei Materialkennwerte beschrieben, die faserspezifische Zugfestigkeit  $z_{\max}$  und den Winkel  $\zeta$ . Dazu kann ein auflastunabhängiger Anteil der Zugfestigkeit ( $z_0$ ) kommen. Die Definitionen sind in Bild 2-29.1 dargestellt.

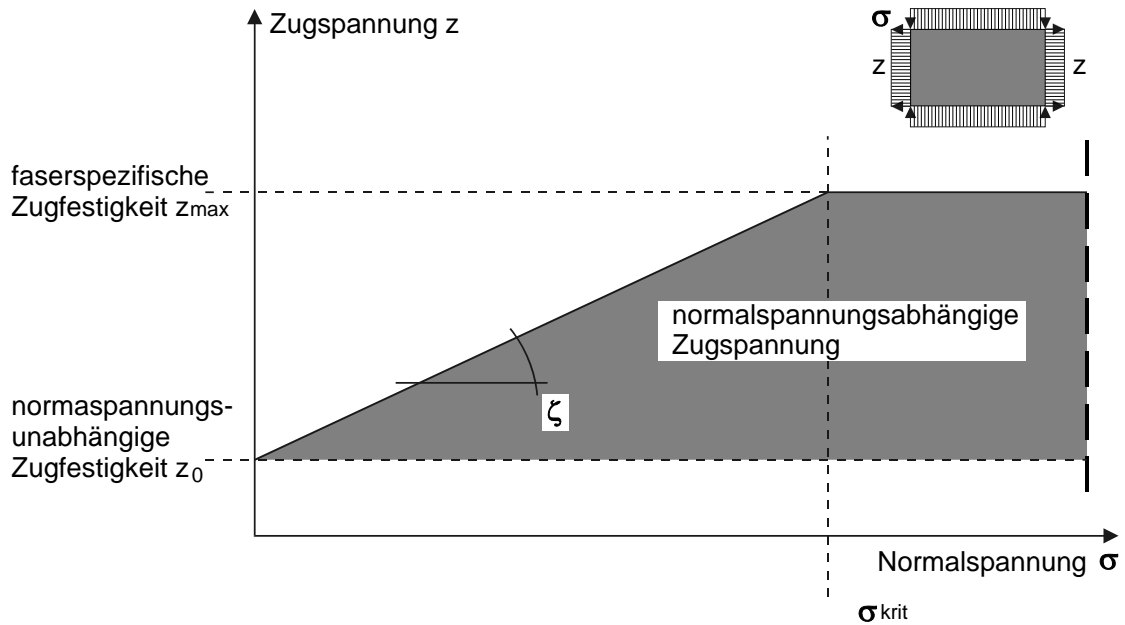


Bild 2-29.1: Beschreibung der maximal möglichen Zugspannungen in der Fasermatrix

Der Winkel  $\zeta$  beschreibt die Normalspannungsabhängigkeit der Bewehrungswirkung. Durch die Zunahme der Normalspannung senkrecht zur Faserlage wird die Verankerung der Fasern verstärkt und damit die Aufnahme von Zugkräften erhöht. Die Aufnahme der Zugkräfte durch die Fasern ist begrenzt durch die faserspezifische Zugfestigkeit  $z_{\max}$ . Bei Erreichen der faserspezifischen Zugfestigkeit reißen die Fasern und die Tragwirkung der Fasermatrix versagt. Die zugehörige Normalspannung wird als  $\sigma_{\text{krit}}$  bezeichnet.

### 3 Ermittlung der Materialkennwerte der Fasermatrix

Die Festigkeitseigenschaften der Fasermatrix hängen von der Zusammensetzung und vom Zustand des Abfalls ab. Als besonders signifikante Größen haben sich der Anteil an Dim 2-Materialien (flächige Bestandteile), der Anteil an Papier und Kunststoff, sowie an Bestandteilen mit einer Stückgröße  $>40$  mm ergeben. Diese Größen werden im Rahmen der Identifizierung und Beschreibung der Abfälle (E1-7) ermittelt.

Nach dem bisherigen Stand der Untersuchungen kann hinsichtlich der Bewehrungseigenschaften grob nach unzersetzten und zersetzten Abfällen unterschieden werden. Bei den untersuchten unzersetzten Abfällen handelt es sich um unmittelbar nach der Anlieferung auf der Deponie entnommene Proben von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen mit und ohne Bioabfallanteil, bei den zersetzten Abfällen um biologisch vorbehandelten Siedlungsabfall oder aus Grabungen und Bohrungen gewonnene Abfallproben. Bei der Materialbeschreibung erfolgt die Unterscheidung zwischen unzersetzten und zersetzten Abfällen durch die Bestimmung der biologischen Stabilität z.B. als Sauerstoffzehrung. Das Alter ist als Kennwert nur bedingt geeignet.

Tabelle 2-29.1 Beispiel für Materialkennwerte der Fasermatrix verschiedener Abfälle

	Probe: Rest (Unzersetzer Abfall)	Probe: Freiburg (Zersetzer Abfall)
<b>Identifizierung</b>		
Anteil Dim1, Dim 2-Materialien	43,4 Gew.-%-TS	16,1 Gew.-%-TS
Anteil Papier und Kunststoff	54,1 Gew.-%-TS	14,6 Gew.-%-TS
Anteil Stückgröße > 40 mm	75,1 Gew.-% TS	30,6 Gew.-%-TS
biol. Stabilität (als Sauerstoffzehrung)	0,75 g O <sub>2</sub> /kg oTS·h	0,01 g O <sub>2</sub> /kg oTS·h
biol. Stabilität (als Rottegrad)	I	V
Glühverlust	50,3 Gew. %	24,3 Gew. %
<b>Einbaubedingungen</b>		
Wassergehalt(bez. auf Gesamtmasse)	< 40 Gew. %	< 40 Gew. %
Trockendichte (bei 200 kN/m <sup>2</sup> )	0.68 t/m <sup>3</sup>	0.86 t/m <sup>3</sup>
<b>Festigkeitseigenschaften</b>		
Z <sub>max</sub>	220 kN/m <sup>2</sup>	115 kN/m <sup>2</sup>
ζ	35°	14°
σ <sub>krit</sub>	284 kN/m <sup>2</sup>	380 kN/m <sup>2</sup>

In Tabelle 2-29.1 sind Messwerte der Material- und Festigkeitseigenschaften am Beispiel einer unzersetzten und einer zersetzten Abfallprobe zusammengestellt. Die Festigkeitseigenschaften sind im Einzelfall versuchstechnisch zu bestimmen.

Der im Zugversuch mit variiertem Auflast [2] beobachtete Zusammenhang zwischen Zug- und Normalspannungen und die daraus ermittelten Winkel ζ sind in Bild 2-29.2 für drei verschiedene Abfallproben beispielhaft dargestellt. Für die untersuchte Probe REST (unzersetzer Abfall) wurde ζ=35° ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde an der Probe FREIBURG (zersetzter Abfall) ζ=14° gemessen. An der Probe SIEB (gesiebter Abfall mit einem Größtkorn von 40mm) konnten im Zugversuch versuchsbedingt keine auflastabhängigen Zugspannungen nachgewiesen werden (ζ=0).

Beim Ansatz der Materialkennwerte in Berechnungsverfahren nach Kapitel 6 ist zu beachten, dass die für die Aktivierung des Faserwiderstandes notwendigen Verformungen für das Bauwerk verträglich sind und dass ein ausreichender Sicherheitsabstand zu z<sub>max</sub> eingehalten wird. In den Zugversuchen des Bildes 2-29.2 waren z.B. Dehnungen bis zu 5 % für die Aktivierung des Faserwiderstandes erforderlich.

Abfall, v.a. die kunststoffhaltige Fasermatrix, weist i.a. ein zeitabhängiges Festigkeitsverhalten auf. Bei der Berechnung von Standsicherheiten über den Betriebszustand hinaus ist dies zu berücksichtigen (in Anlehnung an EB GEO 5.2.3.4) [3].

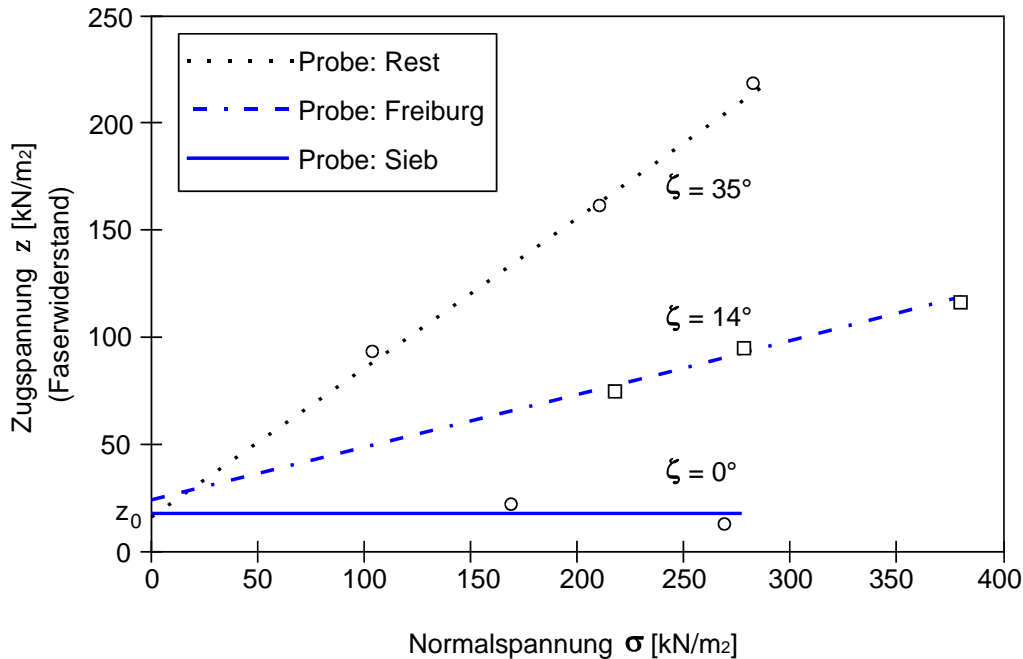


Bild 2-29.2: Beispiel für Zugversuche - ermittelte Zugspannungen

#### 4 Scherfestigkeit des anisotropen Abfallkörpers

Die Bruchbedingung im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm beschreibt die Scherfestigkeit des Abfalls in Abhängigkeit von der Normalspannung.

Für die Ermittlung der Scherfestigkeit des anisotropen Abfallkörpers werden die Scherfestigkeitsanteile der Grund- und der Fasermatrix, die experimentell separat bestimmt werden, überlagert.

Der Scherfestigkeitsanteil der Grundmatrix wird im direkten Scherversuch nach E 3-11 so ermittelt, dass dabei keine Anteile aus der Tragwirkung der Fasermatrix mit erfasst werden. Er wird beschrieben durch die Materialkennwerte  $\varphi_{GM}$  und  $c_{GM}$ .

Der Scherfestigkeitsanteil der Fasermatrix wird in normalkraftabhängigen Zugversuchen ermittelt [2]. Aus den dabei gemessenen Zugkräften wird über die Zugspannungen  $z$  die Faserkohäsion  $\tau(z)$  nach den Regeln der technischen Mechanik berechnet. Dabei wird der Winkel zwischen der Scherfuge und der Faserlage, in der die Zugspannung  $z$  wirkt, berücksichtigt. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass die Faserkohäsion  $\tau(z)$  unter einem Winkel zwischen Scherfuge und Faserlage von  $60^\circ$  etwa die gleiche Größe erreicht, wie die Zugspannung  $z$  [2]. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird auf die Frage der Raumstellung der Ebene maximaler Zugfestigkeit eingegangen.

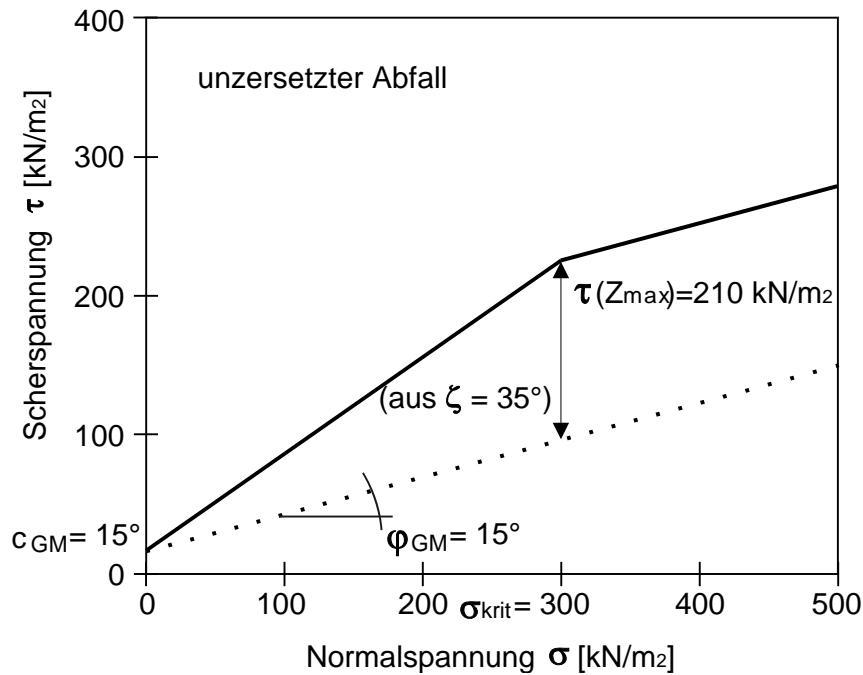


Bild 2-29.3 Beispiel für eine bilineare Bruchbedingung der Gesamtscherfestigkeit eines unzersetzten Abfalls mit anisotropen Festigkeitseigenschaften bei einer Neigung der Scherfläche gegenüber der Ebene der maximalen Zugfestigkeit von  $60^\circ$

Wird im Zugversuch die faserspezifische Zugfestigkeit nicht erreicht, wird die bei der höchsten Laststufe ermittelte Zugspannung  $z_{\max}$  als faserspezifische Zugfestigkeit angesetzt. In Bild 2-29.3 ist beispielhaft für einen unzersetzten Abfall ( $\varphi_{GM}=15^\circ$ ,  $\zeta=35^\circ$ ,  $\tau(z_0)=0$ ,  $c_{GM}=15 \text{ kN/m}^2$ ) die Überlagerung der beiden Scherwiderstandskomponenten dargestellt.

## 5 Einfluss der räumlichen Ausrichtung der Einbaulagen auf die Scherfestigkeit des Abfalls

Eine Besonderheit faser- und folienhaltiger, nichtbodenähnlicher Abfälle besteht darin, dass beim Dünnschichteinbau und durch das Überfahren mit dem Kompaktor das Material plattgedrückt und parallel ausgerichtet wird. Daraus ergibt sich ein anisotropes Festigkeitsverhalten. Aus der Mechanik anisotroper, faserbewehrter Böden [4] ist bekannt, daß die Aktivierung der Faserkohäsion vom Winkel  $\vartheta$  zwischen Faserlage und Scherfuge abhängt.

Die Veränderlichkeit der Faserkohäsion in Abhängigkeit vom Winkel der Faserlage wird durch eine Anisotropiefunktion beschrieben. Die maximale Faserkohäsion wirkt unter einem Winkel von ca.  $60^\circ$ . Unter diesem Winkel entspricht sie näherungsweise der in den Zugversuchen ermittelten Größe der aufnehmbaren Zugspannung in der Fasermatrix. Die Anisotropiefunktion stützt sich auf Messungen von Jewell, Wroth

(1987) [4]. In Bild 2-29.4 sind die Messungen und eine rechnerisch ermittelte trigonometrische Ausgleichsfunktion in Abhängigkeit von  $\vartheta$  angegeben, die die rechnergestützte Verarbeitung der Werte für die Anisotropie der Faserkohäsion vereinfacht.

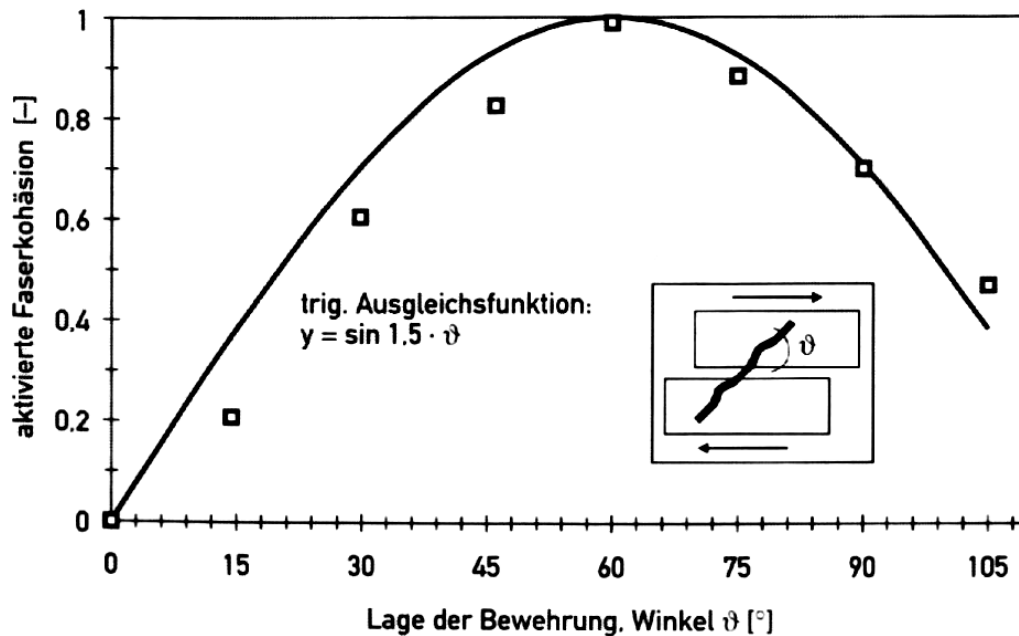


Bild 2-29.4: Aktivierte Faserkohäsion in Abhängigkeit von der Faserlage mit Ausgleichsfunktion [4]

## 6 Berechnungsverfahren

Mit den nach Grund- und Fasermatrix unterschiedenen Materialkennwerten ( $\varphi_{GM}$ ,  $c_{GM}$ ,  $\zeta$ ,  $z_{max}$ ) können Standsicherheitsberechnungen durchgeführt werden. Durch den getrennten Ansatz kann einerseits die Anisotropie der Fasermatrix rechnerisch berücksichtigt werden, andererseits kann trotz der nichtlinearen Bruchbedingung mit auflastunabhängigen Materialkennwerten gearbeitet werden. Grundlage der Böschungsbruchberechnungen ist das Lamellenverfahren. Die Formel für die Berechnung der Lamellensohlkraft wird um einen Term für die Faserkohäsion erweitert. In diesem Term ist die Abminderung der Faserkohäsion infolge Anisotropie nach Bild 2-29.4 enthalten. Der Winkel  $\vartheta$  zwischen Faserlage und Scherfuge entspricht bei horizontal geschichteten Fasern dem Winkel  $\alpha$ , der die Neigung der Lamellensohle beschreibt. Die Lamellensohlkraft  $T$  berechnet sich nach Gl. (1) zu:

$$T = (1) \frac{G \cdot \tan \varphi_{GM} + c_{GM} \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5\alpha)}{1/\eta \cdot \sin \alpha \cdot \tan \varphi_{GM} + \cos \alpha}$$

$$G/b \cdot \tan \zeta < z_{max} \quad (2)$$

Die Herleitung der Gleichung (1) ist in [2] ausführlich beschrieben. Beim Ansatz der Kohäsion  $c_{GM}$  ist zu berücksichtigen, dass auflastunabhängige Anteile der Scherfestigkeit sowohl bei der Grundmatrix (Kohäsion  $c_{GM}$ ), als auch bei der Fasermatrix (auflastunabhängige Faserkohäsion  $\tau(z_0)$  aus den auflastunabhängigen Zugspannungen) auftreten können (vgl. Bild 2-29.3). Da bei der getrennten versuchstechnischen Bestimmung der Festigkeit der Grund- und der Fasermatrix diese auflastunabhängigen Scherfestigkeitsanteile nicht exakt unterschieden werden können, dürfen diese nicht gleichzeitig in der Berechnung angesetzt werden.

Bei der Anpassung herkömmlicher Böschungsbruchprogramme für die Stand-sicherheitsberechnung nach DIN4084 ist wie folgt vorzugehen:

- Eingabemöglichkeit für  $\zeta$
- Erweiterung der Formel für die Berechnung der Lamellensohlkraft nach Gl.1
- In Bereichen negativer Sohlneigung wird die Faserkohäsion gleich Null (keine antreibende Wirkung)
- Berücksichtigung der Ungleichung (2)

**Literatur zu E 2-29:**

- [1] KOCKEL (1995): Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr- Universität Bochum, Heft 24
  
- [2] KÖLSCH, F. (1996): Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Heft 133
  
- [3] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen - EBGeo, Ernst & Sohn, 1997
  
- [4] JEWELL, WROTH (1987): Direct shear tests on reinforced sand. Geotechnique, 37, Institution of civil engineers, London