

E 2-34 Statische Berechnung von vertikalen Schächten in Deponien

Stand: Bautechnik 2000

1 Allgemeines

Die Standsicherheit vertikaler Schächte, die zur Sickerwasserfassung in Deponien angeordnet werden, ist gemäß E 2-22 mit einer prüffähigen statischen Berechnung nachzuweisen. Dabei sind Einwirkungen und Beanspruchungen nach E 2-25 zu berücksichtigen und in Anlehnung an DIN V 1054-100 [1] alle maßgebenden Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu erfassen. Nach DIN V 1054-100 müssen vertikale Schächte in Deponien mindestens in die Kategorie 2 eingeordnet werden. Bei Kategorie 2 ist die Einschaltung eines Sachverständigen (Geotechnik) erforderlich. Daraus folgt die Erfordernis entsprechender geotechnischer Untersuchungen unter Hinzuziehung eines geotechnischen Sachverständigen bei der Tragwerksplanung (siehe E 2-25). In den Ausschreibungsunterlagen sind die Anforderungen und Angaben für den Standsicherheitsnachweis der Schächte in Abstimmung mit dem Deponiebetreiber möglichst genau festzulegen. Bei der Herstellung der Schächte und beim Deponiebetrieb ist die Einhaltung der in der statischen Berechnung zugrunde gelegten Randbedingungen sicherzustellen.

Wegen der bestehenden Unsicherheiten bei der Quantifizierung der zugrunde zu legenden Einwirkungen und damit der Ermittlung des tatsächlichen Beanspruchungszustands sowie zur Weiterentwicklung des Kenntnisstands über das Verhalten solcher Bauwerke ist es zu empfehlen, das rechnerisch prognostizierte Verhalten der Schächte durch regelmäßige Kontrollen (Feldmessungen) zu überprüfen.

2 Sicherheitskonzept

Die Nachweisführung kann nach dem Teilsicherheitskonzept entsprechend DIN V 1054-100 [1] oder mit globalen Sicherheitsbeiwerten erfolgen. Die Anwendung des Teilsicherheitskonzepts ist wegen z. T. nicht vorliegender Teilsicherheitsbeiwerte für tragende Kunststoffe derzeit nicht ohne weiteres möglich. Es wird daher i. d. R. noch mit globalen Sicherheitsbeiwerten gearbeitet, die ggf. in Abhängigkeit bestehender Unsicherheiten bei den Einwirkungen und deren Auswirkungen auf die Standsicherheit gegenüber üblichen Anwendungsbereichen noch erhöht werden müssen. Hierbei sind in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit für alle Lastfälle bei tragenden Kunststoffbauteilen mindestens globale Sicherheitsbeiwerte $\gamma \geq 2$ nachzuweisen:

Für PE-HD-Werkstoffe, bei denen hinsichtlich der Grenzspannungen für Zug- und Druckbeanspruchung in den einschlägigen Normen nicht differenziert wird, kann beim Spannungsnachweis die Sicherheit bei Druckbeanspruchung auf 1,5 abgemindert werden (siehe [2]).

Stahlbetonschächte sind gemäß DIN 1045 [3] zu bemessen.

3 Berechnungsannahmen

3.1 Einwirkungen

Es sind Einwirkungen gemäß E 2-25 zu berücksichtigen. Für die Ermittlung der Eigengewichte der Schachtbettung (Kiesring) und der horizontalen und vertikalen Belastung aus dem Deponiekörper sind Rechenwerte nach 3.2, für das Eigengewicht des Schachtes nach 3.3 anzunehmen.

3.2 Rechenwerte für Boden und Abfall

Die abfallmechanischen Kennwerte sind unter Berücksichtigung von E 2-6 und E 2 35 entsprechend E 2-25 festzulegen. Die Rechenwerte für den Abfall und das Bettungsmaterial des Schachtes sollen als auf der sicheren Seite liegende Mittelwerte (charakteristische Werte) im geotechnischen Gutachten [1] festgelegt werden. Der zur Beschreibung der horizontalen Bettungsreaktion maßgebende Steifemodul $cal E_{s,h}$ im Bereich des Schachtmantels bzw. die Bettungszahl $cal k_{s,h}$ für den Stabilitätsnachweis können nach den Formeln (1) und (2) bestimmt werden. Dabei kann angenommen werden, dass sich ein bettungswirksamer Bereich in der Größenordnung des 1,5fachen Schachtdurchmessers ausbildet. Siehe hierzu Bild 2-34.1.

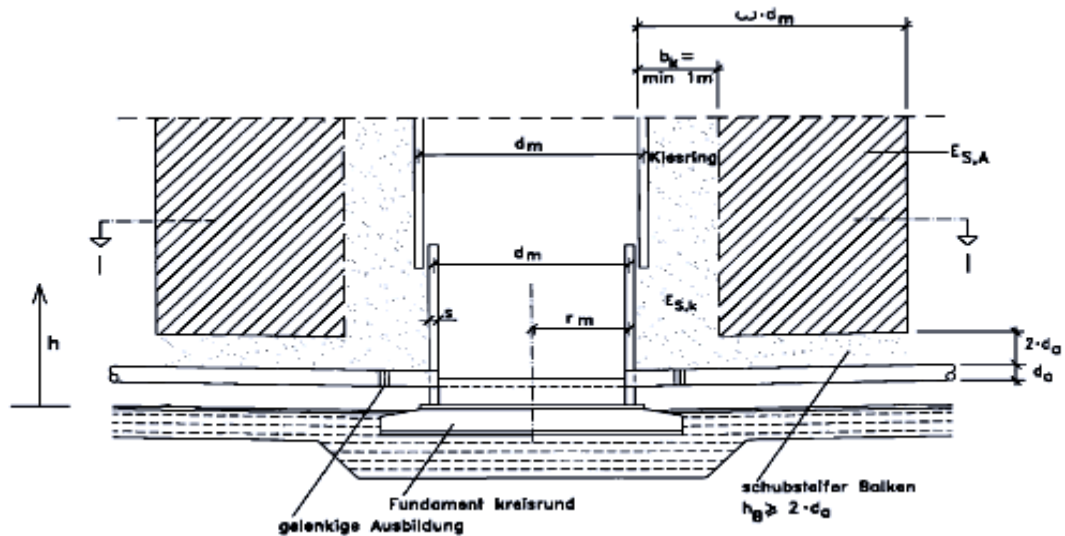
$$cal E_{s,h} = \omega \cdot d_m / [(b_k / E_{s,k}) + (\omega \cdot d_m - b_k) / E_{s,A}] \quad (1)$$

Der Gültigkeitsbereich der Formel (1) beschränkt sich auf Werte $b_k \leq 1,5 d_m$.

$$cal k_{s,h} = 0,6 \cdot cal E_s / r_m \quad (2)$$

mit

$E_{s,k}$	Steifemodul des Kiesrings in vertikaler Richtung
$E_{s,A}$	Steifemodul des Abfalls in vertikaler Richtung
d_m, r_m	mittlerer Schachtdurchmesser bzw. -radius
b_k	Dicke des Kiesrings (E 2-22)
ω	1,5



Schnitt I-I

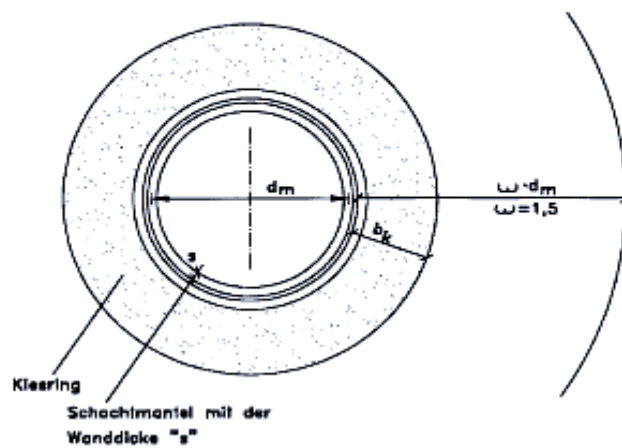


Bild 2-34.1. Prinzipskizze eines längsverschieblichen Schachtes

3.3 Rechenwerte für den Schachtwerkstoff

Für die derzeit üblichen Schachtwerkstoffe können z. B. nachfolgende Unterlagen zur Festlegung der erforderlichen Kennwerte (Wichte, Zug- und Druckfestigkeiten, Grenzdehnungen) herangezogen werden. Dabei ist bei Kunststoffen die Zeitabhängigkeit der Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Stahlbeton: DIN 1045 [3]
- PE-HD: Bemessungsgrundsätze des DIBt für Rohre aus PE-HD [4]
- GF-UP: bei Laminaten entsprechend DIN 18820-1 nach DIN 18820-2 oder nach „Durchführung von Zulassungsprüfungen bei GF-UP-Bauteilen“, DIBt [5]; bei Fertigung in Anlehnung an DIN 19565-5 Kennwerte nach DIN 19565-1, Abschnitt 4.3 (siehe auch ATV A127 [6], Tab. 3)

3.4 Berücksichtigung von Temperaturen, chemischen Einwirkungen, geometrischen und strukturellen Imperfektionen sowie Fügstellen bei geschweißten Bauteilen aus Kunststoff

Chemische Einwirkungen und erhöhte Temperaturen müssen bei Kunststoffen durch eine entsprechende Abminderung der Rechenwerte für die Materialfestigkeiten (E-Modul, Grenzbiegespannungen) berücksichtigt werden. Stahlbetonschächte sind gemäß E 2-22 zu schützen.

Bei biegeweichen Schächten sind geometrische und strukturelle Imperfektionen nach E 2-25 beim Stabilitätsnachweis anzusetzen.

An Fügstellen bei geschweißten Bauteilen aus PE-HD sind die Zugfestigkeiten in Abhängigkeit vom Schweißverfahren mit Faktoren nach DVS 2205-1 in Verbindung mit DVS 2203-1 abzumindern. Dabei sollte ab einer Einwirkungsdauer von mehr als drei Monaten der Langzeitschweißfaktor zugrunde gelegt werden. Eine Abminderung der Druckfestigkeit ist hingegen nicht erforderlich.

Bei Einsatz von Stahlbetonfertigteilen sind die Fugen zugfest zu verbinden.

3.5 Lastfälle (LF)

Die zu untersuchenden Lastfälle sind aus den maßgebenden Einwirkungskombinationen für langzeitige (LF 1) und kurzzeitige Zustände (LF 2) entsprechend DIN 1054-100 zu bilden. Dabei sind die maßgebenden vertikalen und horizontalen Lasten zusammenzustellen, die nach Ermittlung der entsprechenden Schnittgrößen nach Abschn. 4 bei den Nachweisen nach Abschn. 5 zu superponieren sind.

Zusätzlich sind ggf. als außergewöhnlicher Lastfall (LF 3) LF 1 und LF 2 mit der außergewöhnlichen Einwirkung Einstau entsprechend der Abschätzung nach E 2-25 und/oder ggf. einer Anpralllast zu kombinieren. Siehe hierzu Bild 2-34.2.

4 Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen des Schachtes

4.1 Berechnungsverfahren

Zur Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen stehen analytische (z. B. Schalentheorie) und numerische (z. B. Finite-Elemente-Methode) Berechnungsverfahren zur Verfügung.

Bei Anwendung der FEM sind u. a. folgende Grundsätze zu beachten:

- In Störbereichen, z. B. Anschluss Schachtmantel – Schachtboden ist ausreichend fein zu elementieren, um Randstörungen zutreffend zu erfassen [8]
- Das Kontaktproblem Boden – Schachtmantel ist durch geeignete Kontaktelemente zu erfassen, die keine Zugkräfte übertragen und Gleiten des Bodens am Schachtmantel zulassen.

Die nachfolgenden Hinweise beziehen sich vornehmlich auf analytische Verfahren.

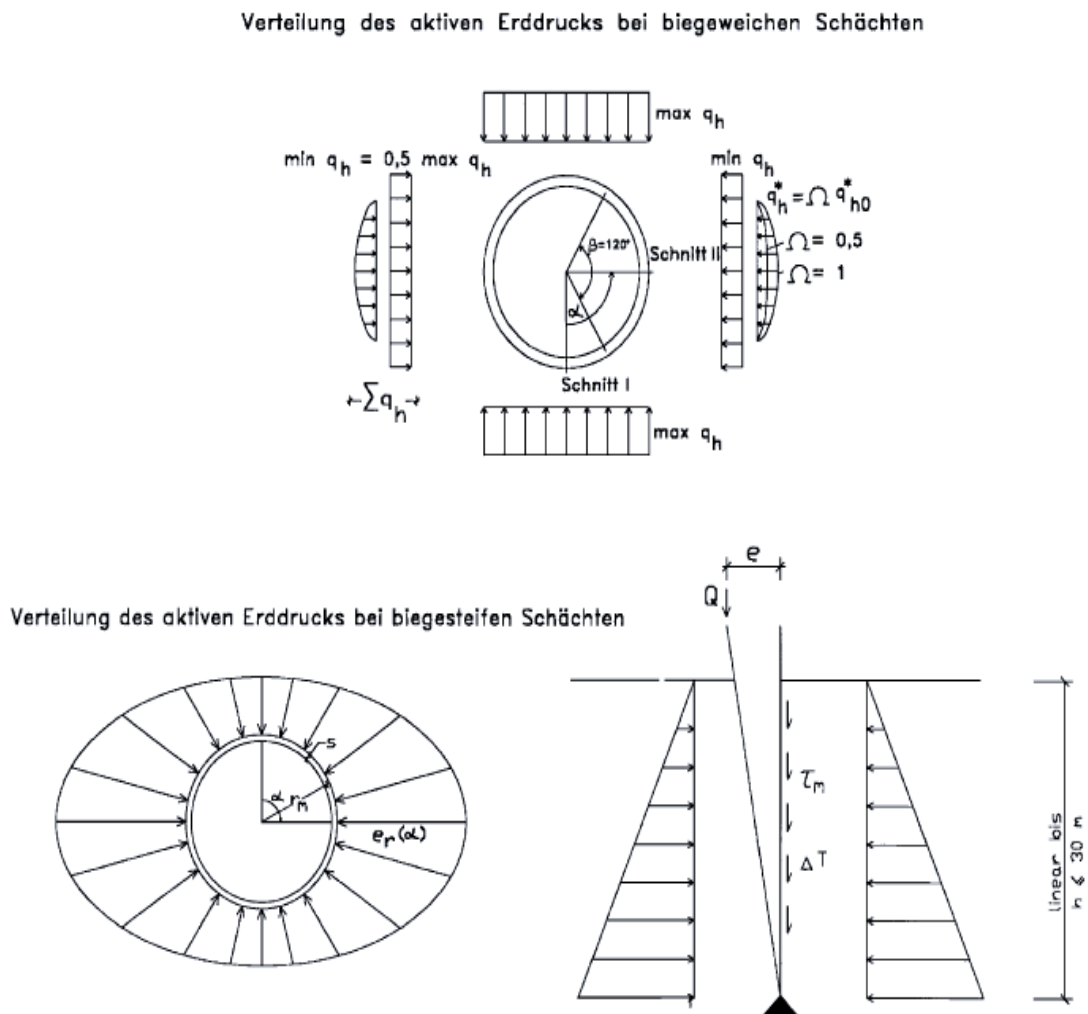


Bild 2-34.2. Lastansätze

4.2 Schachtabdeckung

Die Schnittgrößen und Verformungen der Schachtabdeckung können mit üblichen statischen Modellen, z. B. Platten- oder Balkenmodellen, berechnet werden. Sofern nicht planmäßig Verkehrslasten anzusetzen sind, ist mindestens eine gleichmäßig verteilte Ersatzverkehrslast von 2 kN/m² und an ungünstigster Stelle eine Mannlast von 1 kN zu berücksichtigen. Der Einfluss von Domen und Öffnungen ist zu untersuchen.

4.3 Schachtmantel

Die Ermittlung der Schnittgrößen in Axialrichtung erfolgt unter Berücksichtigung von Eigengewicht, Mantelreibungskräften und Lotabweichungen der Schachtachse und ggf. zeitweiligen Einwirkungen. Bei der Ermittlung der Biegemomente aus Lotabweichung darf der Schacht näherungsweise als Balken betrachtet werden. Krümmungen der Schachtachse infolge Wanderungen des Abfallkörpers können derzeit rechnerisch nicht prognostiziert werden und sind daher durch geeignete konstruktive Maßnahmen zu vermeiden (siehe E 2-25).

Für die Ermittlung der Schnittgrößen in Radialrichtung und der Durchmesseränderung von biegeweichen Schächten infolge horizontaler Erddruckbelastung kann als mechanisches Modell ein unsymmetrisch belasteter, elastisch gebetteter Kreisring zugrunde gelegt werden.

Die Schnittgrößen für die in E 2-25 in Formel 2 angegebene Erddruckverteilung können für biegesteife Schächte nach [9] und für biegeweiche Schächte nach [6] ermittelt werden.

Bei aufgelösten Wandquerschnitten dürfen die Schnittgrößen näherungsweise mit der Ersatzwanddicke ermittelt werden. Die Spannungs- oder Randfaserdehnungsnachweise sind jedoch mit den tatsächlichen, in der jeweiligen Belastungsrichtung wirksamen Querschnittswerten zu führen.

Die relative Durchmesseränderung des Schachtmantels ist an der Stelle der maximalen Erddruckordinate zu bestimmen und kann sowohl für kompakte als auch aufgelöste Wandquerschnitte näherungsweise nach ATV A127 [6] Abschn. 8.4 berechnet werden. Dabei wird in Gl. (8.16a) des Arbeitsblattes eingeführt:

$$q_v = \max. e_R(\alpha) \text{ und } q_h = \min. e_R(\alpha) \quad (3)$$

$$e_R(\alpha) \text{ siehe Bild E 2-34.2 oder E 2-25, Gl.} \quad (2)$$

Die Verformungsbeiwerte c ($c_{v,qv}$, $c_{v,qh}$ und c_{v,qh^*}) sind für einen Auflagerwinkel von $\alpha = 180^\circ$ zu ermitteln.

Bei vertikal verschieblichen Schächten kann eine Lotabweichung der Schachtachse bei der Berechnung der Schnittgrößen der Schachtelemente und des Schachtfußes i. d. R. unberücksichtigt bleiben.

4.4 Anschluss Schachtmantel – Schachtboden, Wanddickensprünge

Bei Wanddickensprüngen und im Anschlussbereich des Mantels an den Boden kommt es zu Randstörungen, deren Größe und Verlauf zu bestimmen sind. Schwierig stellt sich i. d. R. die zutreffende Feststellung des Einspanngrades des Anschlusses dar.

Hinweise hierfür und für die Ermittlung der Schnittgrößen im Anschlussbereich des Schachtmantels an den Schachtboden werden sowohl für die Berechnung mit der Schalentheorie als auch der FEM in [8] gegeben.

4.5 Schachtfundament

Die Schnittgrößen für das Schachtfundament werden aus den Sohldruckspannungen, deren Verteilung in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit des Fundaments zu ermitteln ist, und den Auflasten mit üblichen statischen Modellen berechnet. In der Regel sind kreisrunde Fundamente zu bevorzugen.

5 Erforderliche Nachweise

5.1 Grenzzustände

Folgende Grenzzustände sind zu untersuchen:

- Grenzzustände der Gesamttragfähigkeit des Bodens und Schachtes (Grenzzustände 1A, 1C) Versagen des Bodens einschließlich des Schachtes z. B. durch Grundbruch, Lagesicherheit
- Grenzzustände der Tragfähigkeit des Schachtes (Grenzzustand 1B) Überschreiten von Grenzspannungen bzw. –dehnungen des Schachtwerkstoffes Versagen durch Instabilität, global oder lokal
- Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit des Schachtes (Grenzzustand 2) Durchmesseränderungen, unzulässige Setzungen/ Setzungsdifferenzen, Stauchungen des Schachtes in vertikaler Richtung Rissbreiten bei Stahlbetonschächten

5.2 Nachweise der Gesamtstandsicherheit (Grenzzustand 1A, 1C)

Es ist nachzuweisen, dass Erd- (Abfall-)körper und das Schachtbauwerk als Ganzes standsicher sind. Als mögliche Grenzzustände sind Auftrieb, Grundbruch und ggf. Gleitsicherheit und Böschungsbruch unter Heranziehung der einschlägigen technischen Regeln und der dort geforderten Sicherheitsbeiwerte zu untersuchen [10], [11].

5.3 Nachweise der Tragfähigkeit des Schachtes (Grenzzustand 1B)

5.3.1 Spannungs- bzw. Randfaserdehnungsnachweise

In Abhängigkeit von dem vorgesehenen Schachtwerkstoff sind Spannungs- und/oder Randfaserdehnungsnachweise für die maßgebenden Lastkombinationen nach Abschn. 3.5 für den Schachtboden, den Schachtmantel bzw. die Schachtringe und die Abdeckung zu führen. Schwächungen, z. B. des Schachtmantels durch Rohrdurchführungen, sind in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Bei geschweißten Kunststoffbauteilen ist zusätzlich ausreichende Festigkeit der Nähte nachzuweisen (s. Abschn. 3.4).

5.3.2 Stabilitätsnachweis

Die Stabilität des Schachtbauwerks ist sowohl für die Axial- als auch Radialrichtung zu untersuchen. Die geometrischen und strukturellen Imperfektionen nach Abschn. 3.4 sind in den nachfolgend angegebenen Verfahren bereits berücksichtigt.

Axialrichtung (x)

In Axialrichtung kann der Schacht mit der Beulformel für ungebettete Kreiszyinderschalen nachgewiesen werden, sofern zusätzlich zur Berücksichtigung der elastischen Bettung ein Bettungsfaktor eingeführt wird. Dabei sind kurze bis mittellange und lange Kreiszyinder zu unterscheiden:

kurze bis mittellange Zylinder:

$$h/r_m \leq 0,5 \cdot \sqrt{r_m/s} \quad (4)$$

lange Zylinder:

$$h/r_m > 0,5 \cdot \sqrt{r_m/s} \quad (5)$$

Die kritische Beulspannung ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,k} &= \alpha \cdot \beta \cdot \xi \cdot s \cdot E_L^T / (r_m \cdot \sqrt{3} \cdot (1 - \mu^2)) \\ &\leq \text{Langzeitfestigkeit} \end{aligned} \quad (6)$$

mit

$$\alpha = 0,70 / \sqrt{1 + r_m / (100 \cdot s)} \quad (7)$$

$\sigma_{x,k}$ kritische Beulspannung in Axialrichtung

β Bettungsfaktor ≈ 21

ξ 1,0 bei kurzen und mittellangen;

0,6 bei langen Zylindern

E_L^T Langzeitelastizitätsmodul unter Berücksichtigung von Temperatur- und Medieneinfluss

μ Querdehnzahl

h Höhe des Schachtes

s Wanddicke des Schachtes

Es ist darauf zu achten, dass bei aufgelösten Querschnitten nur die in Axialrichtung tatsächlich wirksamen Querschnitte berücksichtigt werden.

Radialrichtung (φ)

Der Nachweis der Stabilität in Radialrichtung kann nach [6] erfolgen. Werden die Schnittgrößen und Verformungen mit der FEM ermittelt, wird das Verfahren nach Sonntag [12] empfohlen. Bei Anwendung des Verfahrens nach Sonntag kann der das Rohr umgebende Boden als elastische Bettung mit dem Steifemodul $c_{aEs,h}$ nach Abschn. 3.2 angenommen werden.

Die kritische Beullast $p_{\varphi,K}$ ist mit E_L^T getrennt für LF1 und LF3 zu ermitteln.

Interaktionsnachweis

Zusätzlich ist an der bemessungs-maßgebenden Stelle des Schachtes, i. d. R. im Schnitt oberhalb der Fundamentplatte bzw. oberhalb vorgesehener Wanddickenabstufungen, ein Interaktionsnachweis für die Beanspruchung in Axial- und Radialrichtung zu führen. Dabei muss folgende Bedingung erfüllt sein (Angaben bezogen auf den Nachweis mit globalen Sicherheitsbeiwerten):

$$[\sigma_x / (\gamma \cdot \sigma_{x,K})] 1,25 + [\max q_\varphi / (\gamma \cdot p_{\varphi,K})] 1,25 \leq 1,0 \quad (8)$$

mit

σ_x	Druckspannung in Axialrichtung
$\max q_\varphi$	\max horizontaler Erddruck $e_R(\alpha)$ + ggf. Wasseraußendruck
$p_{\varphi,K}$	kritische Beulspannung in Radialrichtung
γ	globaler Sicherheitsbeiwert ≥ 2

Sofern aufgrund der Geometrie einzelner Bauteile oder der Schachtwandung ein lokaler Stabilitätsverlust mit der Folge globalen Versagens nicht auszuschließen ist, muss hierfür die lokale Stabilität mit geeigneten Verfahren nachgewiesen werden. Als geeignete Verfahren können auch entsprechende Versuche herangezogen werden.

5.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Schachtes (Grenzzustand 2)

Durch die ermittelten Verformungen wie Lotabweichungen oder Durchmesseränderungen darf der geforderte nutzbare Schachtquerschnitt sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung nicht eingeengt werden. Entsprechende Grenzwerte der Verformungen sind in Abstimmung mit dem Betreiber unter Berücksichtigung folgender Faktoren festzulegen:

- die Zuverlässigkeit, mit der diese Werte ermittelt werden können
- das Verformungsverhalten des Schachtes (in Längsrichtung verschieblich oder unverschieblich)
- die Abfalleigenschaften.

Die Setzungen des Schachtes und das Setzungsverhalten des Schachtes im Verhältnis zum umgebenden Abfall einschließlich Kiesring sind zu untersuchen. Hieraus sind die bei verschieblichen Schächten erforderlichen Kompensationslängen zwischen den Schachtelementen und die an den Sollbruchstellen aufzunehmenden Kräfte zu berechnen. Relevante Setzungsdifferenzen im Bereich der Rohranschlüsse sind durch konstruktive Maßnahmen wie eine geeignete Ausbildung des Schachtfundaments und flexible Anschlüsse auszuschließen (siehe E 2-22).

Literatur zu E 2-34:

- [1] SONNTAG, G.: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol. IV/3, 1966.
- [2] FALTER, B.: Standsicherheit von Rohren und Schächten – Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden. Vortrag zur 13. Fachtagung „Die sichere Deponie“, 13. und 14.02.1997, SKZ Würzburg.
- [3] BUNDESVERBAND DEUTSCHE BETON- UND FERTIGTEILINDUSTRIE E.V.: Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- [4] HOCH, A.: Statische Berechnung von Rohren und Schächten aus PE-HD. 7. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg 1991.

Regelwerke:

DIN V 1054-100: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Teil 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten.

DIN 1045: Beton und Stahlbeton.

DIBT: Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien – Rohrleitungen aus PE-HD, Okt. 1996.

DIBT: Durchführung von Zulassungsprüfungen bei GF-UP-Bauteilen, Juli 1995.

ATV: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und- leitungen. ATV-Arbeitsblatt A 127, 3. Auflage, in Vorbereitung.

DVS: DVS-Merkblätter und Richtlinien, Kunststoffe, Schweißen und Kleben. Düsseldorf, 1993.

DIN 4084-100: Böschungs- und Geländebruchberechnungen.

DIN 4017-100: Berechnung des Grundbruchwiderstands von
Flachgründungen.