

Nachweis der Erdbebensicherheit von Silos aus Stahl unter Erdbebenbelastung

Christoph Butenweg

Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen

ZUSAMMENFASSUNG: Die Schäden an dünnwandigen Stahlsilos bei zurückliegenden Erdbeben haben die Notwendigkeit einer erdbebensicheren Auslegung von Silos verdeutlicht. Im EC 8, Teil 4 wurde diesem Umstand durch die Einführung eines neuen seismischen Bemessungskonzeptes mit zusätzlichen konstruktiven Anforderungen Rechnung getragen. Der Bemessung wird hierbei eine ungleichmäßig über den Umfang und über die Höhe veränderliche statische Ersatzbelastung zugrunde gelegt. Die Ergebnisse des statischen Lastansatzes werden mit den Ergebnissen aus nichtlinearen numerischen Simulationen verglichen und bewertet. Weiterhin werden Empfehlungen zur Berechnung der Eigenfrequenzen, zum Dämpfungsansatz und zur Berücksichtigung der Boden-Bauwerk Interaktion formuliert. Da die praktische Anwendung der Lastansätze auf Grundlage analytischer Lösungen mit einigen Problemen behaftet ist, wird die Möglichkeit der Berechnung und Bemessung auf Grundlage eines vollständig parametrisierten Finite-Elemente Modells diskutiert.

1. EINLEITUNG

Eine ausreichende Erdbebensicherheit von Silobauwerken ist im Anlagenbau von großer Bedeutung, da strukturelle Schäden häufig Folgeschäden wie Brände, Explosionen und die Freisetzung giftiger Substanzen in den Boden und in die Luft nach sich ziehen. Außerdem sind Silos wichtige Versorgungsbauwerke, die der Speicherung von Nahrungs- und Industriegütern und dem Ausgleich von Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch dienen.

In zurückliegenden Erdbeben sind jedoch immer wieder Schäden an Silobauwerken aufgetreten. Eine der Hauptursachen der Schäden ist das Beulversagen oder plastische Versagen der Siloschale im Bereich von Einzelstützen (Abbildung 1a) und im Fußbereich von Silos mit Standzarge (Abbildung 1b). Dieses Versagen infolge einer Kombination von vertikalen Druckspannungen, Ringzugspannungen und hohen Schubspannungen wird mit „Elefantenfußbeulen“ bezeichnet.

Silos mit Unterkonstruktionen sind durch die große kopflastig wirkende Silomasse kippgefährdet. Häufige Ursache für einen Verlust der globalen Stabilität durch Kippen sind eine unzureichende Verankerung oder ein Gründungsversagen (Abbildung 1c). Ein weiterer Grund für das Versagen von aufgeständerten Silos ist eine unzureichende Bemessung der Unterkonstruktion für die zusätzlichen Horizontalkräfte aus Erdbeben.

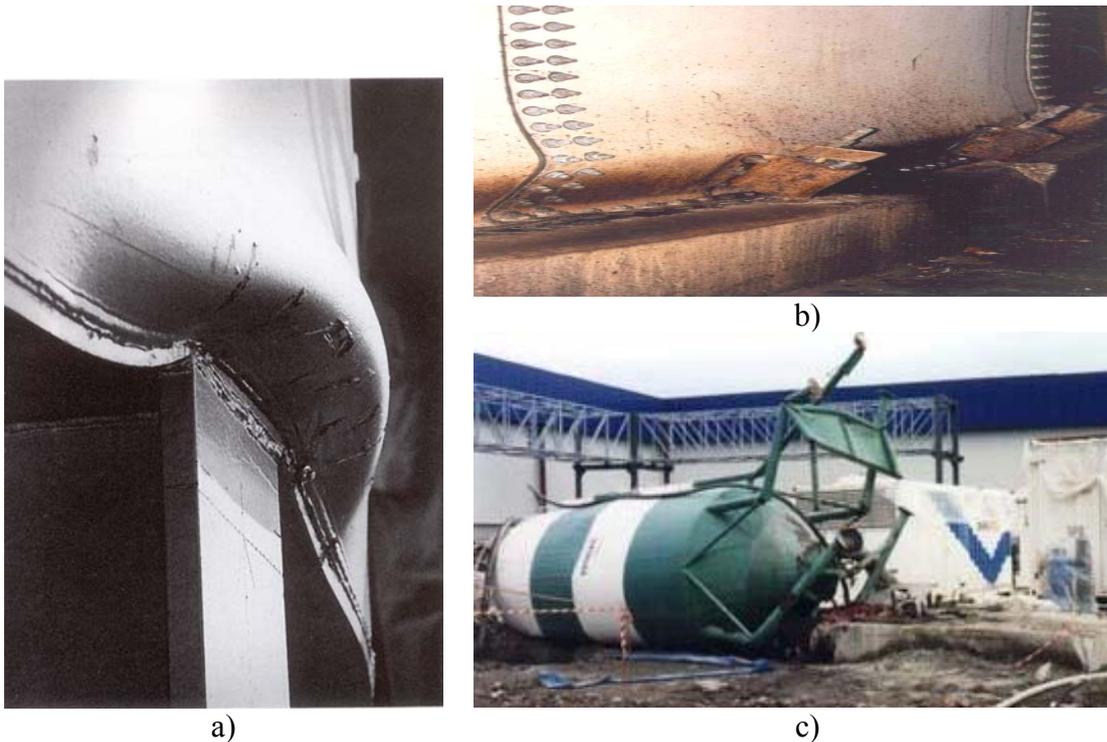


Abbildung 1: a) Beulversagen über einer Punktstütze (Guggenberger, 1998),
 b) Beulversagen im Fußbereich einer Standzarge
 c) Umgekipptes Silo auf Stützen

Zur Vermeidung dieser Schadensfälle wurden in den letzten 20 Jahren intensive Forschungsarbeiten durchgeführt (Braun, 1997; Wagner, 2002), die als Ergebnis in das Bemessungskonzept des EC 8, Teil 4 (2006) eingeflossen sind. Dieses europäische Konzept berücksichtigt die wesentlichen Forschungsergebnisse und besitzt auch außerhalb Europas einen hohen Stellenwert.

Im Folgenden wird zunächst der Bemessungsansatz nach EC 8, Teil 4 vorgestellt. Hierbei werden kritische Punkte der Norm beleuchtet und es werden für den Anwender der Norm Möglichkeiten zur Berechnung der Eigenfrequenzen, zum Ansatz der Dämpfung und zur Berücksichtigung der Boden-Bauwerk Interaktion aufgezeigt. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse des statischen Lastansatzes nach EC 8, Teil 4 (2004) den Ergebnissen aus nichtlinearen numerischen Simulationen gegenübergestellt. Im Anschluss daran wird kurz ein Konzept zur parametrisierten Berechnung und Bemessung von Silos aus Stahl unter Berücksichtigung von Erdbebenlasten erläutert. Sämtliche Ausführungen beziehen sich auf die in der Praxis am häufigsten eingesetzten zylindrischen Silos, lassen sich aber sinngemäß auf davon abweichende Silogeometrien übertragen.

2. BEMESSUNGSKONZEPT NACH EUROCODE 8, TEIL 4 (2006)

2.1 ERSATZLASTEN FÜR DIE HORIZONTALE ERDBEBENEINWIRKUNG

Die horizontale Erdbebeneinwirkung wird durch einen zusätzlichen Ringdruck (Abbildung 2) auf die Silowand berücksichtigt, der im Falle zylindrischer Silos wie folgt berechnet wird:

$$\Delta_{\text{ph,s}} = \Delta_{\text{ph,so}} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Hierbei ist $\Delta_{\text{ph,so}}$ der Referenzdruck der sich an Punkten auf der Silowand mit der vertikalen Entfernung x von einem flachen Boden oder der Spitze eines Trichters ergibt:

$$\Delta_{\text{ph,so}} = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*, 3x) \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{ph,so}} = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*, 3x) / \cos \beta \quad (3)$$

mit:

$\alpha(z)$ Verhältnis der Antwortbeschleunigung des Silos mit einer vertikalen Entfernung z von der äquivalenten Oberfläche des Lagerguts zur Erdbeschleunigung.

γ Wichte des Schüttguts.

r_s^* $r_s^* = \text{Min}(h_b, d_c / 2)$, h_b : Gesamthöhe des Silos; d_c : Innendurchmesser des Silos.

θ Umfangswinkel gemessen zur angesetzten Erdbebenrichtung ($0 \leq \theta \leq 360^\circ$).

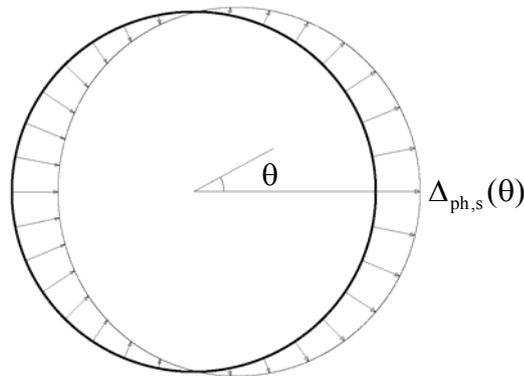


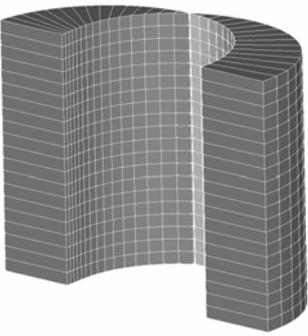
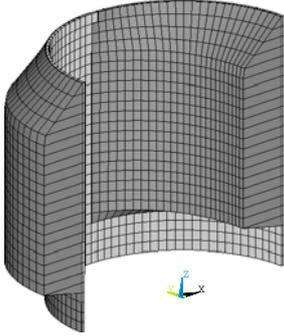
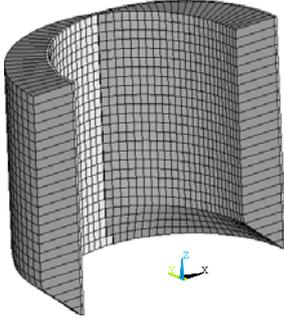
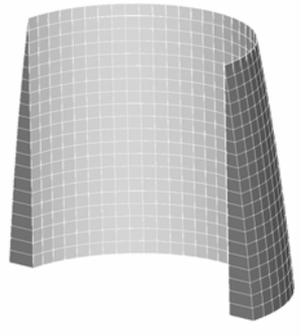
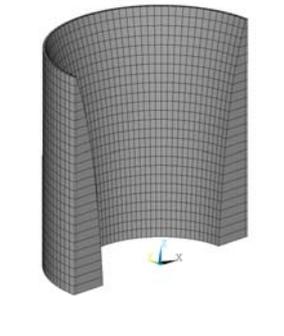
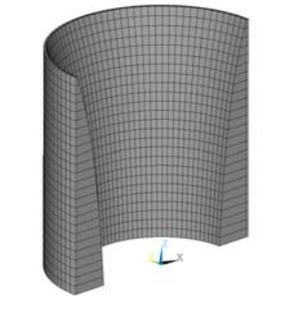
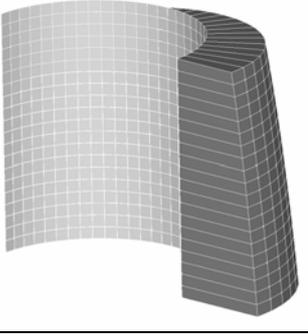
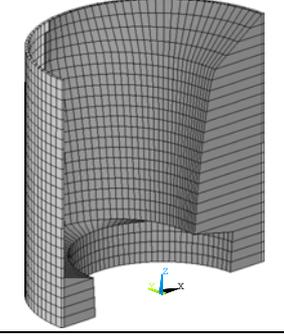
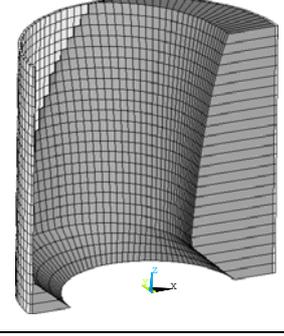
Abbildung 2: Statischer Lastansatz für zylindrische Silos (EC 8, Teil 4 2006)

Benötigt wird die Antwortbeschleunigung, die in der Regel mit dem vereinfachten Antwortspektrum bestimmt wird. Hierzu wird mit entsprechenden Näherungsformeln (Abschnitt 3) die Eigenperiode des Silos bestimmt. Mit dieser wird aus dem Antwortspektrum die Spektralbeschleunigung bestimmt, die dann im Massenschwerpunkt des Silos angesetzt wird. Auf der sicheren Seite liegend wird dann für $\alpha(z)$ das Verhältnis dieser Spektralbeschleunigung zur Erdbeschleunigung über die gesamte Silohöhe konstant angesetzt.

Die Verteilung der statischen Ersatzlast über den Umfang hat sich als gute Näherung herausgestellt und findet sich in vielen nationalen Normen wieder. Unterschiede in verschiedenen Normansätzen finden sich jedoch in der Verteilung der statischen Ersatzlasten über die Silohöhe. Diese Verteilung ist im Laufe der Überarbeitung des EC 8, Teil 4 mehrfach geändert worden. Grundsätzlich ist die statische Ersatzlast für Erdbeben mit den Fülllasten immer so zu überlagern, dass sich an keiner Stelle der Siloschale nach innen gerichtete Kräfte (Innensog) ergeben. Unterschiedlich ist jedoch der Ansatz der Kräfte im unteren und oberen Bereich des Silos. Im EC 1, Teil 4 von 1995 wurde die statische Ersatzbelastung konstant über die Höhe angesetzt und mit den Fülllasten überlagert. Dieser Ansatz findet sich auch in der DIN 1055, Teil 6 (2005). In der Version des EC 8, Teil 4 aus dem Jahr 2004 wurde, wie von Holler (2006)

beschrieben, die Verteilung dahingehend geändert, dass im unteren Bereich des Silos bis zu einer von der Silogeometrie abhängigen Höhe keine Belastung angesetzt wurde und im oberen Bereich ein linearer auf Null zulaufender Verlauf unterstellt wurde, der die Schüttkegelbildung berücksichtigen sollte. In der aktuellsten Fassung des EC 8, Teil 4 (2006) wird auf den linearen Ansatz im oberen Silobereich wieder verzichtet und der Verlauf im unteren Bereich des Silos wurde dahingehend geändert, dass nun ein linearer Verlauf bis zu einer von der Silogeometrie abhängigen Höhe angesetzt wird. In Tabelle 1 sind die Lastverläufe der seismischen Ersatzlast, der Fülllasten und deren Überlagerung für eine maximale horizontale Beschleunigung von 10 m/s^2 dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Ansätze für Erdbebenlasten in zylindrischen Silos

Statische Ersatzlast für Erdbeben		
		
Fülllasten		
		
Überlagerung von Erdbebenlasten und Fülllasten		
		
DIN 1055, Teil 6 (2005) EC 1, Teil 4 (1995)	EC 8, Teil 4 (2004)	EC 8, Teil 4 (2006)

Die Änderungen der Lastansätze für den oberen Silobereich fallen bei der Bemessung kaum ins Gewicht. Deutliche Unterschiede weisen jedoch die Ansätze für den unteren hoch belasteten Bereich der Siloschale auf. Diese Unterschiede wirken sich in der Bemessung insbesondere bei gedrungenen Silos aus, in denen das Verhältnis von Höhe und Durchmesser klein ist. Die aktuelleren Lastansätze berücksichtigen, dass horizontale Erdbebenlasten bei gedrungenen Silos nicht nur über die Siloschale, sondern zu einem großen Teil auch über die Reibung des Schüttgutes in das Fundament bzw. in die Unterkonstruktion eingeleitet werden.

2.2 ERSATZLASTEN FÜR DIE VERTIKALE ERDBEBENEINWIRKUNG

Nach EC 8, Teil 4 ist zusätzlich zur horizontalen Erdbebeneinwirkung auch die vertikale Anregung zu berücksichtigen. Die resultierenden Beanspruchungen sind wie im EC 8, Teil 1 erläutert entweder quadratisch oder mit der 30% Regel zu überlagern. Der EC 8, Teil 4 macht jedoch keine Angaben darüber, wie die vertikale Anregung zu berücksichtigen ist. Eine Möglichkeit der Berücksichtigung sind nichtlineare Berechnungen. Diese sind jedoch in der Praxis nicht durchführbar und stehen im Widerspruch zu dem Vorgehen mit Ersatzbelastungen in horizontaler Richtung. Deshalb wird zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte vorgeschlagen, diese in Anlehnung an die Lastverteilung aus dem Lastfall „Fülllasten“ anzusetzen. Dazu ist zunächst die Spektralbeschleunigung aus dem vertikalen Antwortspektrum mit der maßgebenden ersten vertikalen Eigenperiode zu bestimmen. Messungen und Berechnungen haben gezeigt, dass die erste vertikale Eigenfrequenz in der Regel im Anfangsbereich des Spektrums liegt, so dass die Einhängebeschleunigung oder auf der sicheren Seite liegend die Spektralbeschleunigung des Spektrumplateaus angesetzt werden kann. Mit der Spektralbeschleunigung S_{av} kann ein dynamischer Überhöhungsfaktor C_d berechnet werden:

$$C_d = 1 + \frac{S_{av}}{g} \quad (4)$$

Mit diesem wird die Vertikallast p_v entsprechend der „Fülllasten“ berechnet:

$$p_v(z) = C_d \frac{\gamma A}{K_s \mu g U} \left(1 - e^{-z K_s \mu \frac{U}{A}} \right) \quad (5)$$

Hierbei sind A die Grundfläche des Silos, U der Siloumfang, μ der Wandreibungsbeiwert und K_s das Horizontallastverhältnis. Aus dieser Vertikallast können wie gewohnt alle weiteren anzusetzenden Lasten normal und parallel zur Siloschale für Wand und Trichter berechnet werden.

Tabelle 2: Dynamischer Erhöhungsfaktor C_d für Lasten aus EG, EC 8, Teil 4 (1997)

	$h/d \leq 2$	$H/d \geq 4$
$0,75 < \zeta < 1$	1,20	1,35
$0,5 < \zeta < 0,75$	1,45	1,60
$0,25 < \zeta < 0,5$	1,65	1,85
$0,25 < \zeta < 0$	1,65	1,85
Trichter	1,65	1,85
Boden aus Beton	1,50	1,50
Boden aus Stahl	1,75	1,75

Damit können die Beanspruchungen wie bei der horizontalen Anregung durch statische Ersatzlasten bestimmt werden. Warum die aktuelle Normfassung zur vertikalen Anregung keinerlei Angaben macht ist unklar, zumal in der Fassung des EC 8, Teil 4 aus dem Jahre 1997 ein pauschaler dynamischer Erhöhungsfaktor C_d für alle statischen Lasten definiert war (Tabelle 2). Mit diesem war es in einfacher Weise möglich, die mindestens anzusetzende Erdbebenbelastung zu bestimmen.

3. EIGENFREQUENZEN UND BERECHNUNGSVERFAHREN

3.1 SILOS MIT DIREKTER LAGERUNG AUF EINER GRÜNDUNG

Direkt auf einem Fundament gelagerte Silos verhalten sich vereinfacht wie eingespannte Biegestäbe. Für die Ermittlung der horizontalen Eigenfrequenzen von diesen Silos können deshalb die Formeln nach Nottrott (1963) oder Rayleigh (Petersen, 2000) angewendet werden.

Nach Rayleigh ergibt sich die erste horizontale Eigenfrequenz unter Berücksichtigung von Effekten nach Theorie II. Ordnung und der vereinfachten Annahme einer konstanter Druckkraft D_A zu:

$$f = \frac{1}{2\pi} 3,530 \frac{1}{h^2} \sqrt{\frac{EI}{\gamma_L}} \sqrt{1 - \frac{4,451 D_A h^2}{12,461 EI}} \quad (6)$$

mit:

h Silohöhe [m]

EI Biegesteifigkeit der Siloschale [kNm^2]

γ_L Gewicht pro Längeneinheit [t/m]

D_A Druckkraft am Silofuß [kN]

Nach Nottrott (1963) berechnet sich die erste horizontale Eigenfrequenz für Silos mit abgestufter Blechdicke wie folgt:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M}} \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{4} \frac{A_u \gamma h}{g} \cdot \frac{1+K}{3-K}, \quad c = \frac{3EI_u}{h^3} \cdot \frac{2(1+K)}{3+K}, \quad K = \frac{t_o}{t_u}, \quad I_u = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

mit:

r Siloradius [m]

h Silohöhe [m]

t_o kleinste Blechdicke (oben) [m]

t_u größte Blechdicke (unten) [m]

A_u Fläche des Silos (unten) [m^2]

I_u Trägheitsmoment des Silos unten [m^4]

M Angesetzte Silomasse [t]

γ_S Schüttgutwichte [kN/m^3]

c Federzahl [kN/m]

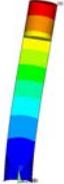
Die angegebenen Berechnungsformeln liefern nur für vorwiegend auf Biegung abtragende schlanke Silos gute Ergebnisse. Bei sehr gedrungenen Silos kommen bei

leeren Silos Schubverformungen hinzu, und bei vollen Silos beteiligt sich das Schüttgut am Lastabtrag. Beide Effekte können die Berechnungsformeln nicht abdecken. Eine genauere Bestimmung kann mit FE-Modellen erfolgen. Im Falle des vollen Silos kann die Silowand mit Schalenelementen und das Schüttgut mit Volumenelementen in einem linearen Modell abgebildet werden, wobei das Schüttgut vereinfachend fest an die Silowand angeschlossen wird. Für das leere Silo führt die Modellierung mit Schalenelementen jedoch zu zahlreichen lokalen Eigenformen, so dass die Berechnung mit einem Balkenmodell mit dünnwandigem Querschnitt sinnvoller ist.

In Tabelle 3 sind für vier Silos die Eigenfrequenzen der Berechnungsformeln denen aus FE-Berechnungen gegenübergestellt. Bei den ersten drei Silos handelt es sich um vollgefüllte Silos mit flachem Boden und bei dem Silo 4 um ein 25 m hohes Silo mit Trichter und einer Füllhöhe von 20 m. Für dieses Silo wurde in den Berechnungsformeln als Kragarmlänge näherungsweise die Füllhöhe von 20 m angesetzt. Die Ergebnisse zeigen für die schlankeren Silos eine sehr gute Übereinstimmung. Im Falle des gedrungenen Silos ergeben sich aus oben genannten Gründen Differenzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die in der Praxis üblichen Schlankheiten und Ausführungsformen von Silos mit direkter Lagerung auf einer Gründung die Berechnungsformeln ausreichend genaue Ergebnisse liefern. Im Falle gedrungener Silos wird empfohlen bei Anwendung der vereinfachten Formeln auf der sicheren Seite liegend den Plateauwert des Spektrums anzusetzen, da diese, wie Silo 1 in Tabelle 3 zeigt, tendenziell zu hohe Frequenzen liefern. Mit den Eigenfrequenzen und der zugehörigen Spektralbeschleunigung kann die in Abschnitt 2.1 definierte Ersatzlast berechnet werden.

Tabelle 3: Eigenformen und Eigenfrequenzen von vier Silos

	Silo 1 h = 10 m, d = 5 m	Silo 2 h = 20 m, d = 5 m	Silo 3 h = 30 m, d = 3 m	Silo 4 h = 25 m, d = 3,60 m
Eigenform				
FE-Lösung	6,18 (37,14)	2,22 (11,46)	1,10 (6,20)	2,06 (12,38)
Nottrott	10,59 (50,41)	2,65 (12,60)	1,29 (6,72)	2,23 (9,07)
Rayleigh	10,79 (51,37)	2,69 (12,84)	1,32 (6,85)	2,27 (9,25)
Materialkennwerte: Schüttgut: $\rho = 1,70 \text{ t/m}^3$, $E = 60 \text{ MPa}$, Silowand: $t = 0,01 \text{ m}$, $\rho = 7,85 \text{ t/m}^3$. Die Klammerwerte geben sie Werte für das leere Silo an.				

3.2 SILOS MIT UNTERKONSTRUKTION

Betrachtet wurde bisher nur der Fall von Silos mit direkter Lagerung auf einer Gründung. In der Praxis sind Silos jedoch zur Schüttgutentnahme auf einer Unterkonstruktion aufgelagert, die dann zusammen mit dem Silo das dynamische System bildet.

Unter der Annahme, dass die Unterkonstruktion im Vergleich zum Silo sehr steif ist und sich nicht am Schwingungsverhalten beteiligt, kann eine starre Lagerung an der

Silounterkante angenommen werden. In diesem Fall können die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Bemessungsformeln angewendet werden. Handelt es sich jedoch um eine Unterkonstruktion, die am Schwingungsverhalten maßgeblich beteiligt ist, so muss das Gesamtsystem untersucht werden. Dazu ist es ausreichend, die Unterkonstruktion zusammen mit dem Silo als einfaches Stabmodell abzubilden. Die Berücksichtigung des Gesamttragwerks ist notwendig, da nicht vorhergesagt werden kann, ob die Silo- oder die Systemeigenfrequenz bemessungsrelevant ist. Zudem kann es auch bei geringerem Frequenzabstand zwischen Silo und Unterkonstruktion zu höheren Belastungen in der Siloschale kommen. Bei Einhaltung der Regelmäßigkeitskriterien nach EC 8, Teil 1 (2004) können die horizontalen Richtungen unabhängig voneinander mit ebenen Systemen untersucht werden.

Die Interaktion soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden. Dazu wird das Silo 4 aus Tabelle 3 auf eine Unterkonstruktion auf Stahl aufgelagert. Die Gesamtkonstruktion wird als einfaches Balkenmodell abgebildet, wobei der das Silo abbildende Balken mit einer zusätzlichen Masse zur Berücksichtigung der Schüttgutmasse beaufschlagt wird (Tabelle 4).

Als maßgebende Eigenfrequenz in Richtung der starken Systemachse (x-Richtung) ergibt sich eine lokale Schwingung des Silos mit einer Frequenz von 0,63 Hz, die 70% der effektiven modalen Masse aktiviert. Zusätzlich ergibt sich eine translatorische Eigenform des Gesamtsystems mit einer Frequenz von 2,38 Hz, bei der 28% der effektiven Gesamtmasse aktiviert werden.

In Richtung der schwachen Systemachse (y-Richtung) ergibt sich als maßgebende Schwingung eine Eigenform des Gesamtsystems mit einer Frequenz von 0,35 Hz (98% der effektiven modalen Masse aktiviert). In vertikaler Richtung (z-Richtung) beträgt die maßgebende Eigenfrequenz 2,65 Hz (97% der effektiven modalen Masse aktiviert). Für das System wird eine Berechnung nach dem Antwortspektrenverfahren mit dem Standortantwortspektrum von Chang Bin in Taiwan durchgeführt. Das Spektrum für Chang Bin, aufgestellt nach der Erdbebennorm für Taiwan (2005), ist in Abbildung 3 dargestellt.

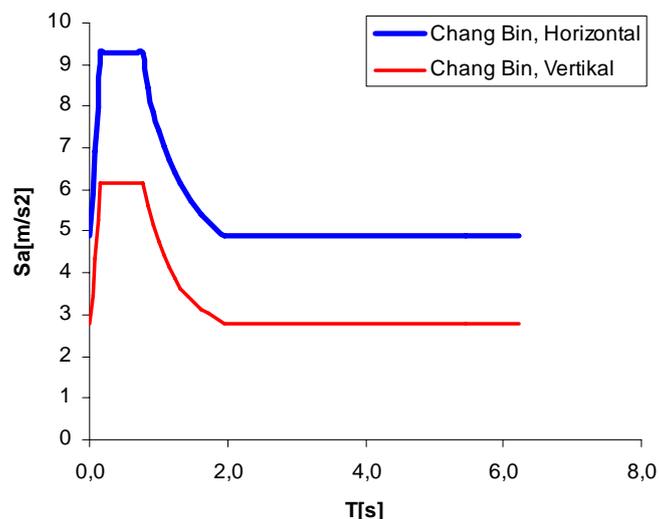


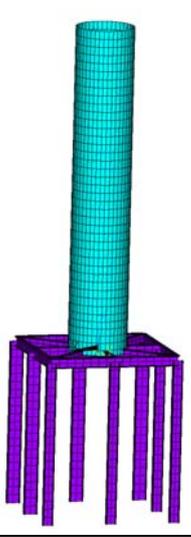
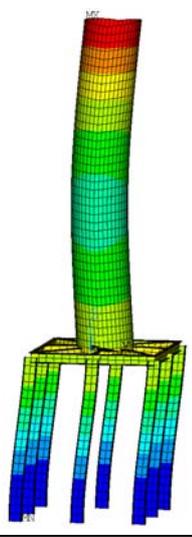
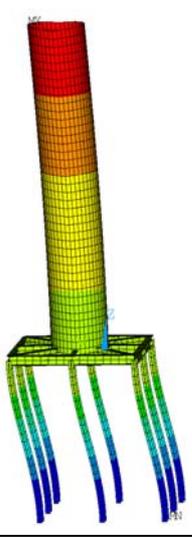
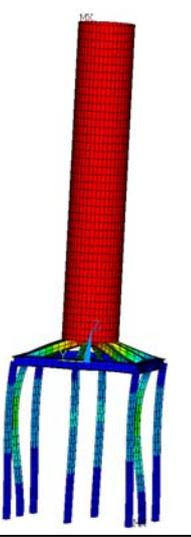
Abbildung 3: Vertikales und horizontales Antwortspektrum für Chang Bin, Taiwan

Als Berechnungsergebnisse wurden die resultierenden Beschleunigungen über die Silohöhe mittels quadratischer Überlagerung nach der SRSS-Regel bestimmt. Tabelle 4 zeigt die Verläufe der Beschleunigungen sowie die minimalen und maximalen

Beschleunigungen in der Siloschale in x-, y- und z-Richtung. Nach EC 8, Teil 4 (2006) ist bei zylindrischen Silos nur eine horizontale Erdbebenrichtung zu berücksichtigen. Maßgebend in diesem Falle ist die x-Richtung mit der lokalen Siloschwingung von 0,63 Hz. In der Schale ergeben sich für diese Richtung Beschleunigungen zwischen $7,98 \text{ m/s}^2$ (unterer Bereich) und $11,96 \text{ m/s}^2$ (oberer Bereich). Mit den berechneten Beschleunigungen kann die statische Ersatzlast nach Gleichung (1) als veränderliche Last über die Silohöhe bestimmt werden. Alternativ kann die statische Ersatzlast, wie in Abschnitt 2 beschrieben, vereinfacht mit der Beschleunigung im Siloschwerpunkt von etwa $7,5 \text{ m/s}^2$ konstant über die Höhe angesetzt werden. In vertikaler Richtung ergibt sich eine Beschleunigung von $6,32 \text{ m/s}^2$ und damit ein dynamischer Erhöhungsfaktor von $C_d = 1,64$ für alle statischen Lasten.

Im Vergleich dazu ergibt sich bei Nichtberücksichtigung der Unterkonstruktion für das Silo 4 (Tabelle 3) eine Eigenfrequenz von 2,23 Hz (Nottrott) bzw. 2,27 Hz (Rayleigh). Mit diesen Eigenfrequenzen ergibt sich aus dem Spektrum (Abbildung 3) eine maximale Spektralbeschleunigung von $9,27 \text{ m/s}^2$. In vertikaler Richtung wird nach Abschnitt 3.1 auf der sicheren Seite liegend der Plateauwert von $6,18 \text{ m/s}^2$ angesetzt. Daraus ergeben sich in horizontaler Richtung auf der sicheren Seite liegende Bemessungskräfte, wohingegen in vertikaler Richtung die Unterschiede vernachlässigbar sind.

Tabelle 4: Silo mit Unterkonstruktion: Maßgebende Beschleunigungen der Siloschale aus dem Antwortspektrenverfahren in x-, y- und z-Richtung

			
FE-Modell	x-Richtung max. $a_x = 11,96 \text{ m/s}^2$ min. $a_x = 7,98 \text{ m/s}^2$	y-Richtung max. $a_y = 6,71 \text{ m/s}^2$ min. $a_y = 4,48 \text{ m/s}^2$	z-Richtung max. $a_z = 6,32 \text{ m/s}^2$ (konstant über die Höhe)

Als Fazit für die Bemessung von Silos auf Unterkonstruktionen kann festgehalten werden, dass die Anwendung des multimodalen Antwortspektrenverfahrens mit einem einfachen Balkenmodell zur Bestimmung der Beschleunigungen über die Silohöhe einen sinnvollen Ansatz mit überschaubarem Modellierungsaufwand darstellt. Durch die Betrachtung des Gesamtsystems werden sämtliche Interaktionen erfasst, und das Modell kann gleichzeitig zur Auslegung der Unterkonstruktion herangezogen werden.

Die vereinfachte Betrachtung als eingespannter Kragarm stellt im Regelfall eine konservativere Annahme dar, da sich höhere Eigenfrequenzen ergeben, die im oder

näher am Plateaubereich der Antwortspektren liegen. Die Annahme ist häufig notwendig, da zum Zeitpunkt der Silobemessung die konstruktive Ausbildung der Unterkonstruktion und in vielen Fällen nicht einmal das Baumaterial bekannt sind. Im Sinne einer wirtschaftlichen Bemessung und zur Erfassung möglicher ungünstiger Interaktionseffekte bei geringem Frequenzabstand zwischen Silo und Unterkonstruktion ist dennoch zu empfehlen, nach Möglichkeit das Gesamtsystem zu analysieren.

4 DÄMPFUNGSANSATZ

Im Eurocode 8, Teil 4, Abschnitt 2.3.2 sind Empfehlungen für die Dämpfungswerte der Silostruktur, des Schüttguts und der Gründung angegeben. Aus diesen ist eine gewichtete Dämpfung des Gesamtsystems zu bestimmen. Im Folgenden werden einige Anmerkungen zu den einzelnen Dämpfungsanteilen und zur Bestimmung der gewichteten Dämpfung gemacht.

4.1 STRUKTURDÄMPFUNG

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist die Dämpfung nach EC 8, Teil 1 (2004) mit 5 % anzusetzen. Die Strukturdämpfung beinhaltet die reine Dämpfung des Materials und die Dämpfung durch Reibung in den Verbindungen. Es ist zu empfehlen den 5% Dämpfungswert nicht zu ändern, insbesondere da bei Berücksichtigung eines q -Faktors bereits ein nichtlinearer Dämpfungsanteil in dem q -Faktor selbst berücksichtigt wird.

4.2 DÄMPFUNG DES UNTERGRUNDS

Die Materialdämpfung des Untergrunds ist nach EC 8, Teil 5 (2003), Tabelle 4.1 in Abhängigkeit von der Größe der Bodenverzerrungen anzusetzen. Die Abstrahldämpfung ist aus den vor Ort vorliegenden Verhältnissen experimentell oder rechnerisch (z.B. eindimensionale Wellenausbreitungsmodelle) zu bestimmen. Da jedoch die Spektren bereits die Dämpfungseffekte des Baugrunds berücksichtigen, ist es zu empfehlen, keine zusätzliche Dämpfung des Untergrunds zu berücksichtigen.

4.3 DÄMPFUNG DES SCHÜTTGUTS

Die Dämpfung des Schüttgutes kann für granulare Schüttgüter näherungsweise mit 10 % angesetzt werden, sofern keine genaueren Informationen zur spezifischen Dämpfung vorliegen. Eine genauere Bestimmung der Dämpfung kann durch folgende Tests durchgeführt werden:

- Resonant Column Test
- Vibrationsscherzellen

Diese Tests sind komplex und können nur von wenigen Labors durchgeführt werden. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen: Haack und Tomas (2003); Yanagida et al. (2003).

4.4 ANSATZ EINER GEWICHTETEN DÄMPFUNG

Aus den oben genannten Dämpfungsanteilen ist nach EC 8, Teil 4 (2006), Abschnitt 2.3.2.4 eine gewichtete Dämpfung zu berechnen. Die gewichtete Dämpfung setzt sich

nach den Abschnitten 4.1 bis 4.3 nur aus den Anteilen der Strukturdämpfung und der Dämpfung des Schüttguts zusammen. Für jede Eigenform kann eine gewichtete äquivalente modale Dämpfung D_j proportional zu den in der Struktur und dem Schüttgut gespeicherten Arbeitsanteilen W_i berechnet werden. Die Arbeit entspricht der Verformungsenergie und kann aus den modalen Verschiebungen $\underline{\Phi}$ und der Steifigkeitsmatrix \underline{k}_i (i für das Schüttgut bzw. die Struktur) berechnet werden:

$$D_j = \frac{\sum_i D_i W_{i,j}}{\sum_i W_{i,j}}, \text{ mit } W_{i,j} = \frac{1}{2} \underline{\Phi}_j^T \underline{k}_i \underline{\Phi}_j \quad (8)$$

Die Berechnung einer gewichteten Dämpfung setzt eine Berücksichtigung des Schüttgutes in dem Berechnungsmodell voraus. Dies ist mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden, so dass der Ansatz einer gewichteten Dämpfung auf Ausnahmefälle beschränkt sein dürfte.

5. BODEN-BAUWERK INTERAKTION

Die Boden-Bauwerk Interaktion ist nach Eurocode 8, Teil 5, Abschnitt 6 zu berücksichtigen für:

- Schlanke, hohe Bauwerke
- Bauwerke mit massiven oder tief liegenden Gründungen
- Bauwerke mit wesentlichen Effekten nach Theorie II. Ordnung
- Bauwerke auf sehr weichem Untergrund

Im Falle von schlanken Silos sollte demnach die Boden-Bauwerk Interaktion berücksichtigt werden. Da die Siloberechnung standardmäßig mit dem Antwortspektrenverfahren erfolgt, muss die Boden-Bauwerk Interaktion durch lineare Feder-Dämpfer Modelle berücksichtigt werden. Verwendet werden kann das Modell von Wolf (1994), das den Boden als homogenes, linearelastisches, halbunendliches Medium idealisiert, und für Fundamente auf homogenen sowie geschichteten Böden angewendet werden kann. Die einfachste Möglichkeit liegt im Ansatz von dynamischen Federkennwerten für die Translationen und die Rotationen in Kombination mit einem vereinfachten Ansatz für die Abstrahldämpfung (Smoltczyk, 1991).

6. PARAMETRISIERTES FINITE-ELEMENTE MODELL

Durch die überarbeiteten Belastungsansätze nach EC 1, Teil 4 (2005) oder DIN 1055, Teil 6 (2005) sind für Silos unsymmetrische Fülllasten, Entleerungslasten und Erdbebenlasten (Abschnitt 2) anzusetzen, deren analytische Lösung sich schwieriger gestaltet als eine Lösung für die Belastungsansätze der alten Normengeneration. Hinzu kommt ein erhöhter Kostendruck, der es erfordert, mit einem minimalen Zeitaufwand eine sichere und wirtschaftliche Silobemessung für beliebige Silogeometrien durchführen zu können. Die dafür notwendige Flexibilität kann durch eine vollständig parametrisierte Beschreibung der Silos erfolgen, auf deren Grundlage voll automatisch ein FE-Modell generiert wird. Auf Grundlage der FE-Berechnungsergebnisse kann eine Bemessung durchgeführt werden. Im Anschluss wird die gesamte statische Berechnung und Bemessung in Form eines prüffähigen Berichtes digital aufbereitet. Die

beschriebenen Schritte wurden in dem Programmsystem EASYSilo (2007) umgesetzt, dass als Rechenkern das FE-Programmsystem ANSYS (2007) verwendet. Die Parametrisierung wurde in ANSYS mit der APPL-Programmiersprache umgesetzt und sämtliche Eingabeparameter und Berechnungsergebnisse werden für die dokumentierte Berichtsausgabe in einer strukturierten Datenbank gespeichert.

7. VERGLEICH: STATISCHER LASTANSATZ MIT EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN UND NICHTLINEAREN SIMULATIONEN

Die Vorgehensweise beim Verfahren mit statischen Ersatzlasten wird an einem gedrunenen Stahlsilo mit einem Durchmesser und einer Höhe von 10 m sowie einer Wandstärke von 1 cm demonstriert (Meskouris et al., 2007). Das Schüttgut hat eine Wichte von $15,1 \text{ kN/m}^3$, ein Horizontalverhältnis von 0,45, und der Wandreibungskoeffizient beträgt $\mu = 0,4$. Der Fundamentanschluss ist biegesteif.

Die Berechnung erfolgt mit den statischen Ersatzlasten und einem nichtlinearen Simulationsmodell bestehend aus dem Schüttgut, der Siloschale, dem Kontaktbereich, dem Fundament und dem Boden (Meskouris et al., 2002). Das nichtlineare Verhalten des Schüttguts wird hierbei durch das hypoplastische Materialgesetz mit der Erweiterung der intergranularen Dehnung beschrieben. Die Silowand wird durch Schalenelemente mit linear-elastischem Materialverhalten abgebildet. Im Kontaktbereich verhindern Kontaktelemente zwischen den Knoten des Schüttgutes und den Knoten der Schale die gegenseitige Durchdringung und bilden die Reibung zwischen Wand und Schüttgut durch das Mohr-Coulombsche Gesetz ab.

Zunächst erfolgt der Vergleich der statischen Silodrucke, ermittelt mit dem Simulationsmodell und den statischen Ersatzlasten. Abbildung 4 zeigt die gute Übereinstimmung der Spannungsverläufe.

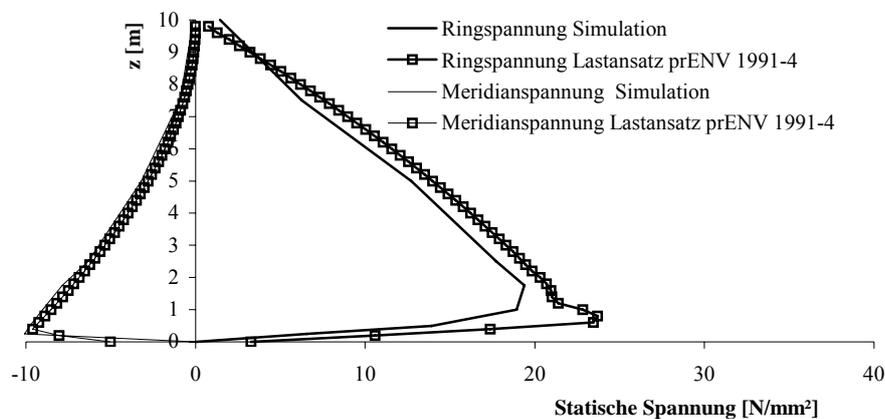


Abbildung 4: Vergleich der statischen Spannungen aus Simulation und statischen Ersatzlasten (Meskouris et al, 2007)

Das horizontale und vertikale Erdbebenspektrum wird für den Standort Istanbul mit einer Einhängebeschleunigung von $a = 0,416 \text{ g}$ für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren und der Baugrundklasse B aufgestellt. Mit den Eigenfrequenzen in horizontaler und vertikaler Richtung von 8,1 Hz ergeben sich aus dem linearen Antwortspektrum ($q = 1$) Spektralbeschleunigungen von $10,9 \text{ m/s}^2$ in horizontaler Richtung und $11,0 \text{ m/s}^2$ in vertikaler Richtung. Diese bilden die Eingangswerte für das Verfahren mit den

statischen Ersatzlasten nach Abschnitt 2. Als Belastung für das nichtlineare Simulationsmodell werden aus diesen spektrumskompatible Zeitverläufe generiert.

Für den Ergebnisvergleich werden für jede Höhenkote die Quotienten aus der dynamischen und der statischen Spannung berechnet. Mit dem Quotienten kann der Einfluss der dynamischen Einwirkung in Bezug auf den statischen Spannungszustand über die Höhe des Silos direkt abgelesen werden. Der Quotient entspricht der Erhöhung der statischen Lasten infolge Fülldrucks durch die Erdbebeneinwirkung. Die Ergebnisse der Erhöhungsfaktoren sind in Abbildung 5 dargestellt.

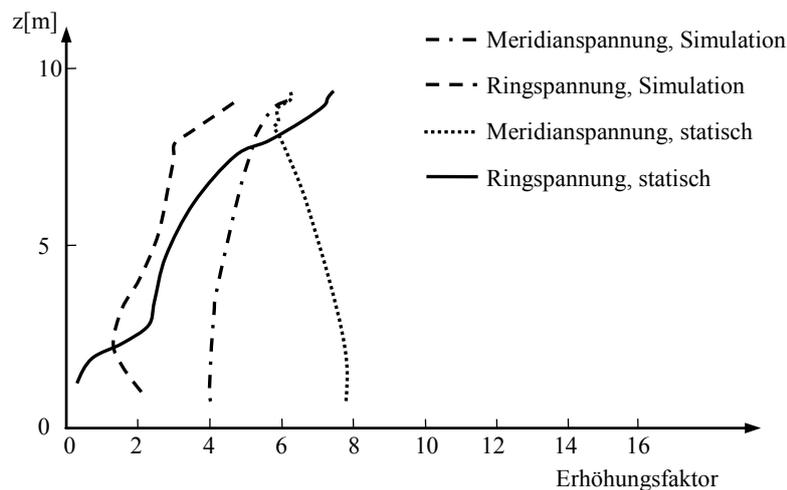


Abbildung 5: Vergleich der Meridianspannungen aus Simulation und statischen Ersatzlasten (Holler, Meskouris 2006)

Die Ergebnisse zeigen, dass der statische Lastansatz im Falle gedrungener Silos zu konservativ ist, da der Lastabtrag über das Schüttgut im EC 8, Teil 4 (2004) nicht berücksichtigt ist. Für schlankere Silos kann gezeigt werden, dass die Ergebnisse von Simulation und statischen Ersatzlasten näher beieinander liegen und dass der statische Lastansatz als Umhüllende der nichtlinearen Simulationen auf der sicheren Seite liegt.

8. AUSBLICK

Die Bemessung von Silos unter Erdbebenbelastung nach EC 8, Teil 4 (2004) wirft für die praktische Anwendung noch einige Fragen auf und geht hinsichtlich der Anforderungen wesentlich weiter als die in Deutschland anzuwendende DIN 1055, Teil 6 (2005). Insbesondere wird für den verlangten Ansatz der vertikalen Erdbebeneinwirkung keine statische Ersatzbelastung angegeben, so dass eine Berücksichtigung in einem vereinfachten Bemessungskonzept mit statischen Ersatzlasten nicht möglich ist. Im Rahmen des Beitrags wurde hierfür ein sinnvoller und praktikabler Ansatz vorgeschlagen. Des Weiteren ist der Ansatz der gewichteten Dämpfung zwar sinnvoll und richtig, jedoch setzt dieser voraus, dass das Schüttgut im Modell mit abgebildet wird. Dies stellt einen zu hohen Aufwand mit fragwürdiger Genauigkeit dar, zumal für die meisten Schüttgüter keine verlässlichen Dämpfungswerte existieren. Es ist zu erwarten, dass auf Grund der komplexeren Lastansätze und der Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit zukünftig den parametrisierten Modellen der Vorzug vor analytischen Lösungen gegeben wird.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Braun, A: Schüttgutbeanspruchungen von Silozellen unter Erdbebeneinwirkungen, TU Karlsruhe, 1997.
- DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, März 2005.
- EASYSilo: Programm zur automatischen Berechnung und Bemessung von Silos aus Stahl, SDA-engineering GmbH, <http://www.sda-engineering.de>, 2007.
- Eurocode 1: Actions on structures, Part 4: Silos and tanks, Central Secretary: rue de Stassart 36, B1050 Brussels, 1995.
- Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005.
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkung und Regeln für Hochbauten. Central Secretary: rue de Stassart 36, B1050 Brussels, 2004.
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Teil 4: Silos, Tanks und Pipelines. Central Secretary: rue de Stassart 36, B1050 Brussels, 2004.
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Teil 4: Silos, Tanks und Pipelines. Central Secretary: rue de Stassart 36, B1050 Brussels, 2006.
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte. Central Secretary: rue de Stassart 36, B1050 Brussels, 2003.
- Guggenberger, W.: Schadensfall, Schadensanalyse und Schadensbehebung eines Silos auf acht Einzelstützen, Stahlbau, Nr. 67, Heft 6, 1998.
- Haack, A., Tomas, J.: Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten hochdisperser, kohäsiver Pulver, Chemie Ingenieur Technik, Band 75, Nr.11, 2003.
- Holler, S., Meskouris, K.: Granular Material Silos under dynamic excitation: Numerical simulation and experimental validation, Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 10, pp. 1573-1579, 2006.
- Nottrott, Th.: Schwingende Kamine und ihre Berechnung im Hinblick auf die Beanspruchung durch Kármán-Wirbel, Sie Bautechnik, Heft 12, S. 411-415, 1963.
- Martens, P.: Silohandbuch, Wilhelm Ernst&Sohn Verlag: Berlin, 1998.
- Meskouris, K., Hinzen, K.-G., Butenweg, Chr., Mistler, M.: Bauwerke und Erdbeben – Grundlagen, Anwendung, Beispiele. 2. Auflage, Vieweg-Verlag Wiesbaden 2007.
- Meskouris, K., Noh, S.-Y., Wagner, R., Butenweg, C.: Seismic excited granular material silos. In: Tagungsband: Eurodyn 2002, München, S. 253-258, 2002.
- Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2000.
- Smolczyk, U.: Grundbau Taschenbuch, Vierte Auflage Teil 1, Ernst & Sohn, ISBN: 3-433-01085-4, 1991.
- Taiwan earthquake code, (2005/07/01).
- Wagner, R.: Seismisch belastete Schüttgutsilos, Dissertation, RWTH-Aachen, 2002.
- Wolf, John P., Foundation vibration analysis using simple physical models. PTR Prentice Hall, Prentice-Hall, Inc., S. 27 ff., 1994.
- Yanagida, T., Matchett, A., Asmar, B., Langston, P., Walters, K., Coulthard, M.: Damping characteristics of particulate materials using low intensity vibrations: effects of experimental variables and their interpretation, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 36, No. 11, pp. 1339-1346, 2003.