

Erdbebenbemessung von Tanks – Erfahrungen aus der Praxis

Herrn Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. *Richard Greiner* zur Vollendung des 70. Lebensjahres gewidmet

Bei der Erdbebenbemessung im Hoch- und Anlagenbau werden die Massen des Tragwerks und der Ausrüstung meistens auf den Deckenebenen zusammengezogen. Gemeinsam mit den horizontalen Geschossteifigkeiten, die man aus dem Aussteifungssystem ableitet, verfügt man über alle Informationen, die man zum Formulieren eines Feder-Masse-Schwingers benötigt. Die Antworten dieses dynamischen Systems werden dann entweder instationär durch Aufbringen unterschiedlicher Beschleunigungs-Zeitverläufe ermittelt oder stationär durch Verwendung eines Antwortspektrums.

Bei Tanks ist es etwas schwieriger, zu hand-tauglichen Rechenmodellen zu kommen, da die Flüssigkeit statt der Kragarmschwingung auch noch eine Schwappbewegung ausführt und Kräfte zwischen Tank und Flüssigkeit nur durch Druckkontakt übertragen werden können. Die Tankwand selbst kann als dünnwandige Membran dehnungslose Verformungen in Form von *Fourier-Harmonischen* ausführen. Im vorliegenden Beitrag werden die Grundlagen der Erdbebenbemessung bei Tanks beleuchtet und anschließend Beispiele aus der Bemessungspraxis genannt.

Seismic design of tanks – Practical experience. *When designing skeletal structures for plants in seismic hazard areas you consider the masses of the structure and the equipment, the stiffnesses of the bracing systems and thus model your structure into a spring-mass-oscillator. Depending on the desired degree of accuracy the actual masses are condensed in many or only a few mass lumps, the bracing systems are considered to have linear restoring forces or non-linear features are included. The response of this dynamic model is then calculated transiently by applying several different artificial ground acceleration time histories or steady state by using a given peak ground acceleration spectrum.*

With tanks it is much more difficult to extract easy-to-handle calculation models: the liquid may perform a sloshing motion rather than a cantilever oscillation; accelerations can be transferred into the liquid by compression between the tank wall and the liquid only, while the tank wall itself is a thin-walled membrane which may undergo strainless deformation modes in the shape of Fourier-harmonics. In the present paper we will have a short look on the basics of seismic design and report on some tanks of different sizes, where we were involved in the seismic design.

1 Einleitung

Aus der Sicht des Tragwerkplaners wird im Folgenden die Bemessung von zylindrischen Behältern unter Erdbe-

benlasten beschrieben. Aus Platzgründen werden die Besonderheiten von stehenden, drucklosen Tanks und flüssigen Medien behandelt und nicht liegende, sattelgelagerte Tanks oder Silos für körnige Güter. Es werden die Oberflächenformen der schwappenden Flüssigkeit beschrieben, mit Schwerpunkt auf den Aspekten der Modellbildung. Weiter wird insbesondere die Bandbreite der anzusetzenden Dämpfungsziffern und Verhaltensbeiwerte diskutiert. Zum Schluss gibt eine Tabelle Abmessungen und Kenngrößen von Tanks aus der Bemessungspraxis wieder.

2 Begriffe, Abkürzungen, Formelzeichen

Dämpfung	Zur Beschreibung der Dämpfung werden zwei unterschiedliche Maße verwendet: a) Dämpfungsgrad D (<i>Lehrsches</i> Dämpfungsmaß, damping ratio); in der angelsächsischen Literatur ist der Formelbuchstabe ζ (zeta) üblich, im EC8 ([1], [2]) wird die Variable ξ (xi) verwendet b) logarithmisches Dekrement δ , erhält man aus der Beziehung $\delta = 2\pi D$
EMS	Einmassenschwinger (SDOF – single degree of freedom (system))
impulsiv	Größen der unten im Behälter liegenden Masse, die sich näherungsweise wie ein Starrkörper verhält, s. konvektiv
Kippmoment	wird in diesem Artikel statt des auch in EC 8-4 [1] verwendeten, sprachlich äußerst unglücklichen Begriffes „Umsturzmoment“ verwendet
konvektiv	Größen der oben im Behälter liegenden schwappenden Masse, s. impulsiv
Schlankheit	$\lambda = h/D$ Schlankheit der Flüssigkeitssäule (aspect ratio)
Schwappen	konvektive Bewegung der Flüssigkeit (sloshing)
g	Gravitationskonstante
D, R	Durchmesser, Radius des Tanks
h	Füllhöhe des Tanks
ϕ	polare Umfangskoordinate am Zylinder, $\phi = 0$ zeigt in Richtung der Fußpunktsbeschleunigung, d. h. entgegen der virtuellen, auf den Tank-Oberbau wirkenden Kraft

3 Baudynamische Grundlagen

3.1 Eigenfrequenzen

3.1.1 Füllung

Das flüssige Medium im Tank gehorcht den Gleichgewichtsbedingungen, den *Newtonschen* Axiomen sowie den hydrodynamischen Regeln für eine allgemeine Flüssigkeit. Mit entsprechender Formulierung sowie Kontaktelementen zur Tankwand können die Bewegungszustände aus Erdbebenanregung genügend genau gelöst werden (s. z. B. [3], [4]).

Die Eigenkreisfrequenz der Schwappbewegung erhält man aus ([5], [6], [7]) zu

$$\omega^2 = g \cdot \alpha_{m,n} \cdot \tanh(\alpha_{m,n} \cdot h) \quad (1)$$

Die Schwingungsperioden der Schwappbewegung erhält man durch Umformen aus

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{g \cdot \alpha_{m,n} \cdot \tanh(\alpha_{m,n} \cdot h)}} \quad (2)$$

Der Parameter $\alpha_{m,n}$ mit der Dimension 1/m wird dabei aus der Randbedingung

$$J'_m(\alpha_{m,n} \cdot R) = 0 \quad (3)$$

bestimmt. Die Indizes m und n beschreiben die Ordnung der *Besselfunktion* (1. Art) und die Ordnungszahl der Nullstelle. Die längste Periode erhält man für den Parameterproduktwert

$$\alpha_{m,n} \cdot R = 1,841184 \dots$$

mit

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{R} \cdot 1,84 \cdot \tanh\left(1,84 \cdot \frac{h}{R}\right)}} \quad (4)$$

die darauf folgenden Perioden mit den Parameterproduktwerten

$$3,05; 4,20; 5,32; 5,33; 6,42; 6,71; 7,50; 8,02; 8,54; 9,28; \dots (5)$$

Ähnlich wie bei den in Girlandenkurven angeordneten Beulwerten für Zylinderschalen unter Axiallast, ergeben sich auch diese Eigenwerte jeweils durch eine Kombination aus der Ordnung der *Besselfunktion*, die im Wesentlichen die Welligkeit der Eigenform entlang des Umfangs beschreibt, und der Ordnungszahl der Nullstelle, die die Welligkeit der Eigenform entlang eines Radius beschreibt. Die Eigenformen zu den drei tiefsten Eigenfrequenzen sind in Bild 3 dargestellt.

In EC 8-4, Abs. A.2.1.3 Gl. A.8 [1b] sind die Parameterproduktwerte 1,841, 5,331 und 8,536 angegeben. Ein Vergleich mit der in Gl. (5) angegebenen Zahlenreihe zeigt, dass die Werte im EC 8 zwar auszugsweise die Reihe der Eigenwerte für die Nullstellen der *Besselfunktion* 1. Ordnung beschreiben, aber nicht die lückenlose Reihe der möglichen Eigenfrequenzen.

Für die ingenieurmäßige Behandlung benutzt man vereinfachend die Vorstellung, dass ein unten im Behälter lie-

gender Teil der Flüssigkeit wie ein Starrkörper gemeinsam mit der ebenfalls als starr angenommenen Behälterwand horizontale Bewegungen ausführt. Die darüber liegende Menge der Flüssigkeit wird in n Teile unterteilt, die in der 1., 2. ... n . Schwapp-Eigenform schwingen. In den meisten Quellen wird hierfür eine Arbeit von *Housner* [8] angeführt, dieses Mehrschichtenmodell ist von ihm jedoch schon in [9] beschrieben. Die Darstellung der einzelnen Anteile dieser schwappenden Massen in Bild 1 lässt erkennen, dass es für die üblichen Bemessungsfälle ausreicht, nur die erste Schwappfrequenz zu betrachten. Die Flüssigkeit im Tank ist damit als Zwei-Massen-Schwinger ausreichend modelliert, wobei man den unteren Anteil als impulsive Masse und den oberen Anteil als konvektive Masse bezeichnet (Bild 2).

Für den unteren Teil der Masse einschließlich Behälterwand wird dabei die Schwingfigur eines eingespannten Kragarms zugrundegelegt, was für einen gedrunge-

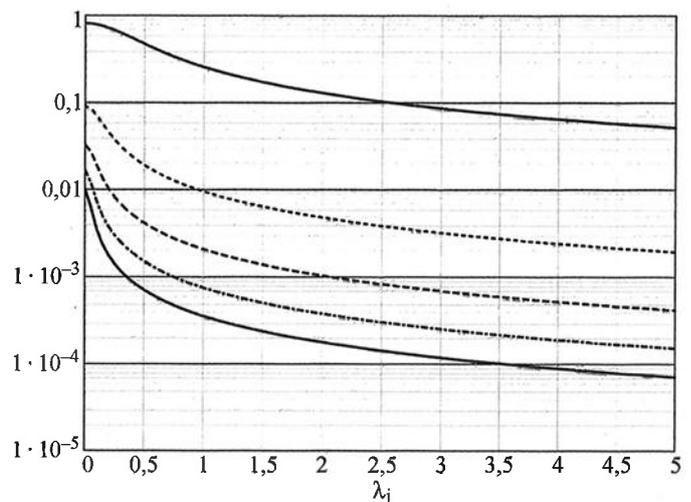


Bild 1. Anteil $k_M(n, \lambda)$ der schwappenden Masse an der gesamten Füllmasse über der Schlankheit λ (Auswertung nach [10])

Fig. 1. Ratio $k_M(n, \lambda)$ of sloshing mass to total liquid mass versus slenderness λ (evaluation according to [10])

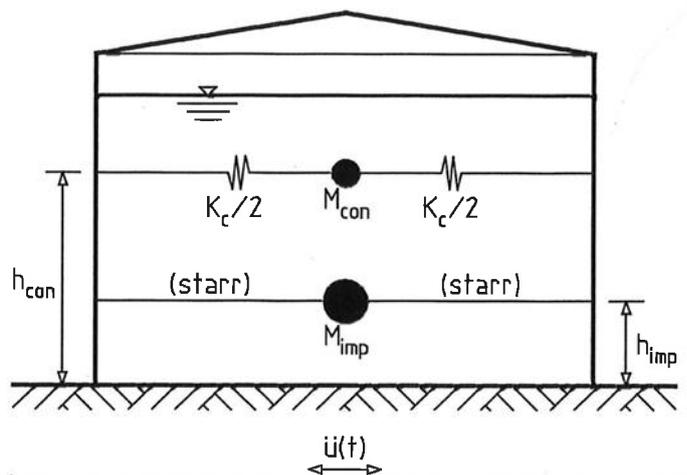


Bild 2. Ingenieurmodell für die dynamischen Reaktionen des Tanks (aus [12])

Fig. 2. Engineering model for the dynamic response of the tank (taken from [12])

hälter offensichtlich ein ziemlich unzutreffendes Modell ist. Für die Erfordernisse einer Handrechnung ist dies jedoch eine notwendige Vereinfachung, die für baupraktische Zwecke akzeptabel ist (s. Tabelle 1).

Die Anteile der in den einzelnen Eigenformen schwappenden Teil-Flüssigkeitsmassen in Bezug auf die Gesamt-Flüssigkeitsmasse des Behälters werden in EC 8-4 Gl. A.12 [1] angegeben:

$$k_M(n, \gamma) = \frac{M_{\text{schwapp}}}{M_{\text{gesamt}}} = \frac{2 \cdot \tanh(\lambda_n \cdot \gamma)}{\gamma \cdot \lambda_n \cdot (\lambda_n^2 - 1)}$$

mit

$$k_M(n, \gamma \rightarrow 0) = \frac{2}{\lambda_n^2 - 1} \tag{6}$$

Anders als in der einschlägigen Fachliteratur üblich wird die Schlankheit der Flüssigkeitssäule nicht mit λ sondern mit γ bezeichnet, wobei hier der Parameter λ_n für das in Gl. (3) angegebene Parameterprodukt $\alpha_{m,n} \cdot R$ steht. n ist die Ordnungszahl der Schwingungsform. Den Grenzwert für kleine Flüssigkeitsschlankheiten mit $\gamma \rightarrow 0$ gewinnt man unter Verwendung der Beziehung $\tanh(x) = x$ für kleine x .

Mit den bereits oben genannten Werten

$$\lambda_n = 1,841; 5,331; 8,536 \tag{7}$$

erhält man

$$k_M(n, \gamma \rightarrow 0) = 0,8371; 0,0729; 0,0278 \tag{8}$$

Verwiebe [10] gibt diese Massenanteile an zu

$$k_M(n, \lambda) = \frac{8 \cdot \tanh[(2n - 1)\pi\lambda]}{\pi^3(2n - 1)^3\lambda}$$

mit

$$k_M(1, \lambda) = \frac{8 \cdot \tanh(\pi\lambda)}{\pi^3\lambda} \tag{9}$$

Die Funktion ist für die ersten fünf Schwingungsformen in Bild 1 dargestellt. Der Maximalwert für die Grundswingungsform mit $n = 1$ bei beliebig niedriger Flüssigkeitssäule beträgt

$$k_M(1, \lambda \rightarrow 0) = \frac{8}{\pi^2} = 0,8106;$$

Tabelle 1. Modellierungsgenauigkeit bei Zeitverlaufsrechnung und Antwortspektrenverfahren
Table 1. Model errors in time history analysis and response spectra analysis

	Zeitverlaufsrechnung	Antwortspektrenverfahren
Struktur	relativ genau erfasst	stark vereinfacht
Steifigkeiten	relativ genau erfasst	nur überschlägig
Massen der Tragstruktur	relativ genau erfasst	geschätzt
Massen der Füllung	Parameterstudie mit unterschiedlichen Füllzuständen	z. B. 80 % des Nennvolumens
mechanisches Modell	relativ genau erfasst	eingespannter Kragarm: bei schlanken Tanks brauchbar, bei gedrungenen Tanks falsch
geometrische Nichtlinearität	erfasst	vernachlässigt
materielle Nichtlinearität	erfasst	ggfs. im Bauteilwiderstand berücksichtigt
Materialdämpfung	ggfs. zufriedenstellend erfasst	grob und konservativ geschätzt
effektive Dämpfung aus nichtlinearen Effekten („Duffing“) [39], [36]	relativ genau erfasst	vernachlässigt
Dissipation durch Plastizieren z. B. in den Biegestörungen	relativ genau erfasst	indirekt und nur grob durch den Verhaltensbeiwert erfasst
Schnittgrößen	relativ genau erfasst	FALSCH
Bodenverhältnisse/Bodeneigenschaften	genügend genau erfasst	grob geschätzt nach Zonen- und Bodenkarte
Horizontalbeschleunigung	genügend viele gemessene oder synthetische Beschleunigungs-Zeit-Verläufe nachgerechnet	statistisch vermutlich richtiger Maximalwert für eine mittlere Wiederkehr von 475 Jahren
Antwortspektrum	relativ genau erfasst	für linearen EMS theoretisch richtig
mögliches Abheben bei unverankerten Tanks	relativ genau erfasst	aufgrund der falschen Schnittgrößen vermutlich nicht richtig erfasst
Verformungen des Tankfußes auf der Zugseite bei verankerten Tanks	relativ genau erfasst (vgl. [22])	Auswirkung auf die Schnittgrößen durch Aktivierung höherer Fourier-Umfangsharmonischer nicht erfasst
Tatsächlicher Ausnutzungsgrad der Schweißnähte am Tankfuß im Hinblick auf DIN EN 1090 [40]	beliebig genau erfasst	nur grob und sehr konservativ zu ermitteln

bei schlanken Flüssigkeitssäulen werden die Schwappanteile schnell kleiner, z. B. $k_M(1, 25) = 0,010$.

Gehrig gibt das Massenverhältnis für die Grundswingungsform ([11], [12], z. B. unter Bezug auf IITK 2007 [13] und Malhotra et al. [14]) an mit

$$k_M(1, \lambda) = 0,23 \cdot \frac{\tanh(3,68 \cdot \lambda)}{\lambda}$$

mit

$$k_M(1, \lambda \rightarrow 0) = 0,23 \cdot 3,68 = 0,8464 \quad (10)$$

In einer neueren Veröffentlichung verwenden Pappa et al. [4] den Term

$$k_M(n, \gamma) = \frac{2 \cdot \tanh(k_n \cdot R \cdot \gamma)}{k_n \cdot R \cdot \gamma \cdot (k_n^2 \cdot R^2 - 1)}$$

mit

$$k_M(n, \gamma \rightarrow 0) = \frac{2}{k_n^2 R^2 - 1} \quad (11)$$

wobei k_n die Bedeutung des in Gl. (3) angegebenen Parameters $\alpha_{m,n}$ hat und die Schlankheit der Flüssigkeitssäule in Anlehnung an den EC 8 [1] mit γ bezeichnet wird. Für die Grundform der Schwappbewegung bei sehr flachen Behältern erhält man den Grenzwert

$$k_M(1, \gamma \rightarrow 0) = \frac{2}{1,8412^2 - 1} = 0,8371 \quad (12)$$

Die verschiedenen Angaben sind vermutlich auf unterschiedliche Vereinfachungen bei der Modellbildung zurückzuführen. Im Zuge dieser Arbeit konnte dies nicht geklärt werden, da die Quellen in den meisten Fällen nicht lückenlos bis zu den Annahmen verfolgt werden können. Aus ingenieurmäßiger Sicht ist die Spannweite der Ergebnisse unbedeutend, sie verschwindet in den anderen Unschärfen der Handrechnung (s. Tabelle 1).

3.1.2 Behälter

Bei freiem oberem Behälterrand ohne Ringsteife entstehen bei den einzelnen Eigenfrequenzen in der Behälterschale Eigenformen in Form von *Fourier*-Harmonischen, deren Verformungsfiguren am oberen Rand elementar beschreibbar sind. Die radialen Verschiebungen betragen

$$w_\varphi = \sum_n \hat{w}_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) \quad (13)$$

wobei \hat{w}_n die Amplitude der Verformungsfigur der jeweiligen *Fourier*-Harmonischen ist. Man geht dabei davon aus, dass die angeregten Verformungsfiguren einfach-symmetrisch sind, sodass in der *Fourier*-Reihe keine Sinus-Terme zu berücksichtigen sind. Bei Behältern mit Ringstifen können ebenfalls quasi-dehnungslose Verformungsfiguren entstehen, die harmonisch entlang des Umfangs verlaufen. Deren Ausprägung wird jedoch auch von den Verformungen der Ringsteife beeinflusst, so dass diese nicht mehr elementar beschreibbar sind.

Diese Eigenformen der Behälterschale sah man bisher als unbedeutend an, weil ihre Eigenfrequenzen bei üblichen Behälterabmessungen deutlich höher als die Schwappfrequenz liegen. Es ist jedoch denkbar, dass diese Eigenfre-

quenzen durch die Freifeldbeschleunigungen des Bodens unmittelbar angeregt werden und daraus im Zusammenspiel mit den Flüssigkeitsreaktionen auf diese Verformungsfiguren Meridianspannungen entstehen, die stabilitätsrelevant werden können. Arbeiten hierzu sind nicht bekannt – allerdings sind auch keine Schäden bekannt, die auf diesen Effekt hindeuten. Forschungsarbeiten mit dem Ziel, diese Frage zu klären, wären wünschenswert.

3.1.3 Boden/Gründung

Im Allgemeinen wird bei den Handrechenverfahren der Einfluss der Gründung außer Acht gelassen, diese wird als starr angenommen. Falls dies nicht zutrifft, treten zwei Effekte ein:

- eine Biegeverformung der Bodenplatte mit einem Momentenpfeil quer zur Angriffsrichtung des Erdbebens prägt dem Behälter eine dehnungslose $\cos(2\phi)$ -Verformung auf
- eine nicht mehr unendliche Bettungsziffer des Bodens verringert die Eigenfrequenz des Behälters bei Kragarm-Schwingungen

Eine Berücksichtigung dieser Effekte bei der Schnittgrößenermittlung des Behälters bleibt den numerischen Verfahren vorbehalten. Bei den Handrechenverfahren kann die Kenntnis dieser Effekte lediglich dazu dienen, abzuschätzen, ob die tatsächlichen Beanspruchungen des Behälters eher über oder eher unter den händisch ermittelten Werten liegen.

3.2 Dämpfung

3.2.1 Füllung

Die Dämpfung in der Flüssigkeit ist abhängig von der Oberflächenform der Schwapp-Eigenform (s. Bild 3). Sie entsteht durch Scherströmungen innerhalb der Flüssigkeit und durch Reibung an der Behälterwand. Als Zahlenwert darf nach EC 8-4, Abs. 2.3.3.2 [1] ein Wert von $D = 0,5 \%$ angesetzt werden, das entspricht immerhin einem logarithmischen Dekrement von $\delta = 0,031$.

3.2.2 Behälter

Für Stahlbehälter könnte man ein logarithmisches Dekrement von $\delta = 0,012$ annehmen nach DIN V 4133, Tab. A.1 [15], entspricht $D = 0,2 \%$; ebenso $\delta = 0,050$ nach DIN 1055-4, Tab. F.2 [16], entspricht $D = 0,8 \%$. Eine differenziertere Ermittlung ist nach Petersen [17] möglich. Dieser Zahlenwert beschreibt die effektive Dämpfung geschweißter oder schlupffrei geschraubter Stahlkonstruktionen, im Wesentlichen wird er der inneren Dämpfung des Werkstoffes zugeschrieben. In Sonderfällen kann dieser Wert allerdings auch noch deutlich tiefer liegen [18]. Andererseits darf man nach EC 8-4 Abs. 2.3.3.1 [1] für den Tank immerhin $D = 5 \%$ (entspricht $\delta = 0,314$) ansetzen.

Höhere Dämpfungsziffern sind nur zu erwarten, wenn während der Tankverformungen Teile der Tankstruktur plastizieren. Greiner und Ofner haben bereits 2003 darauf hingewiesen, dass dies insbesondere bei unverankerten Großtanks nicht zu erwarten ist ([19], s. auch [20]). Insofern verbietet sich aus Sicht der Verfasser bei Ansatz der Duktilitätsklasse „niedrig“ der Ansatz eines Verhaltens-

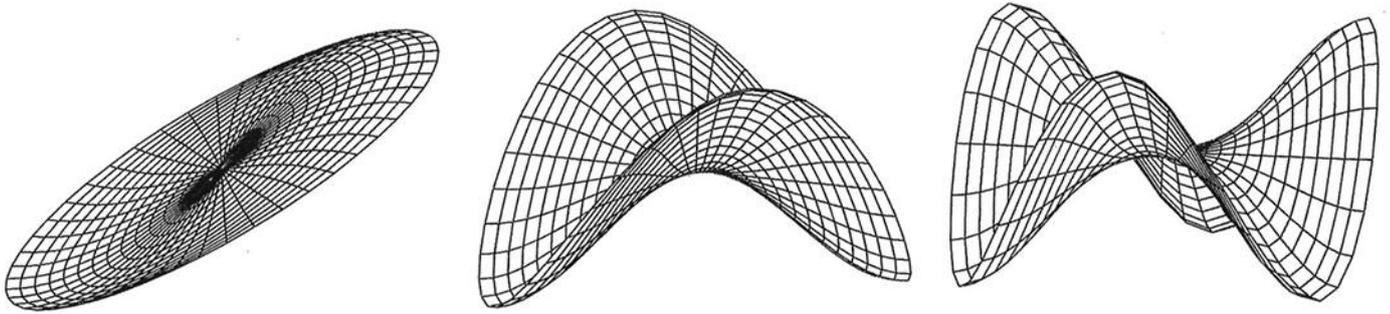


Bild 3. Schwapp-Eigenformen der Flüssigkeitsoberfläche für die tiefsten drei Eigenwerte
Fig. 3. Sloshing surface modes for the first three natural frequencies

beiwertes von $q = 1,5$ (s. Abschnitt 3.3 zum Verhaltensbeiwert).

Gehrig geht bei verankerten, mittelschlanken bis schlanken Tanks ([11], [12]) davon aus, dass die Anker sowie die umgebenden Teile, wie z. B. Bodenblech, Pratten oder Tankmantel, während der Abhebewegung des Tanks soweit plastizieren können, dass die Annahme eines Verhaltensbeiwertes von $q = 1,5$ gerechtfertigt ist [21]. Tatsächlich lassen sich bei detaillierter Betrachtung der stahlbaulichen Ausbildung von Behälterverankerungen zum Teil relativ große plastische Verformungsmöglichkeiten identifizieren [22].

3.2.3 Boden/Gründung

Im Boden wird eine sogenannte Abstrahldämpfung aktiviert (vgl. EC 8-4, Abs. 2.3.3.3 [1]). Diese bezeichnet den Energieverlust des Systems durch Erzeugung von Wellen im Untergrund. In quasi-isotropem Untergrund (elastischer Halbraum) breiten sich diese Wellen halbkugelförmig aus, bei geschichteten Böden oder einer grundwasserführenden Schicht unter dem Bauwerk können die Verhältnisse ungünstiger sein, da sich die Wellen dann u. U. nur noch zweidimensional ausbreiten.

Den Darstellungen von Studer et al. (2007) [23] ist zu entnehmen, dass die Dämpfung erst dann wesentlich über einen Grundwert von $D = 2,5 \%$ steigt, wenn der Boden so weich ist, dass die Eigenfrequenz des Behälters signifikant abnimmt ([23], Bilder 7.26 und 7.27).

3.3 Verhaltensbeiwert

In EC 8-4 [1] Abs. 4.4 (3) und (5) ist für den Schwappanteil ein Verhaltensbeiwert von $q = 1,0$ vorgegeben. Die Regelung in EC 8-4 Abs. 4.4 (1) [1] sieht aus wie eine generelle Zustimmung zu einem Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ für den Behälter mit dem Nicht-Schwappanteil. Allerdings steht dort „... bis 1,5, um die Überfestigkeit zu berücksichtigen.“, wobei der zweite Halbsatz fachlich nicht nachvollziehbar ist (vgl. auch [24]). Die Regelung im darauf folgenden Absatz des EC 8-4 schränkt dies allerdings insofern ein, als die „Energiedissipation entsprechend dem gewählten Wert von q ... genau nachzuweisen“ ist. Nach Auffassung der Verfasser unterstreicht das die Notwendigkeit eines entsprechenden rechnerischen Nachweises, falls ein Verhaltensbeiwert $q > 1,0$ verwendet wird.

Es ist bekannt, dass in US-Regelwerken, wie z. B. API 650, Tab. E-4 [25], mit $q = 2$ bis 4 deutlich höhere Ver-

haltensbeiwerte verwendet werden. Da dies bisher offensichtlich nicht zu einer erhöhten Schadensrate geführt hat, kann man vermuten, dass möglicherweise die zugehörigen kartierten Bodenbeschleunigungen entsprechend üppig angegeben sind. Von Pappa et al. [4] wird dies ausführlich diskutiert; dabei wird angegeben, dass in diesen hohen Werten wohl auch Dämpfungsanteile aus der Abstrahlung und aus plastischem Verhalten der Metallstruktur enthalten sind.

4 Ingenieurmäßige Ermittlung der Beanspruchungszustände

4.1 Zeitverlaufsrechnung

In der Zeitverlaufsrechnung wird das komplette System aus Tank, Füllung, Gründung und Boden in einem Umfang und mit einer Detailgenauigkeit modelliert, die eine genügend genaue Antwort auf die gestellten Fragen ermöglicht (s. z. B. [26] bis [33]). In der Regel wird dabei eine Modellierung mit dem Verfahren der Finiten Elemente vorgenommen. Dies erfordert die wenigsten a priori Annahmen, bedingt aber, dass alle Daten wie z. B. Geometrie- und Ist-Eigenschaften von Bauwerk und Boden genügend genau bekannt sein müssen.

Es wird an dieser Stelle aus Platzgründen vermieden, eine lange Liste an Besonderheiten wiederzugeben, die bei der zutreffenden Modellierung dünnwandiger, stabilitätsgefährdeter Schalentragwerke zu beachten ist. Diesbezüglich wird z. B. auf den Kommentar zu EC 3-1-6 [34] sowie die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Der Beitrag ist insofern auf die Punkte beschränkt, die auch bei Hochbauten im Auge zu behalten wären. Falls die Berechnungen handwerklich richtig durchgeführt werden (s. Liste in Tabelle 1), gelten die Ergebnisse im Rahmen der gewählten physikalischen Modelle als richtig.

Interpretationsbedarf besteht im Hinblick auf den gewählten nachgerechneten Beschleunigungsverlauf. Häufig werden gemessene Beschleunigungs-Zeit-Verläufe als Fußpunkterregung auf das Bauwerk aufgegeben (in Europa z. B. Friaul [35]). Damit hat man jedoch offensichtlich das Bauwerk für ein Erdbeben nachgewiesen, das am Bauwerkstandort gar nicht so auftreten würde. Es ist daher üblich, unterschiedliche gemessene Beben nachzurechnen; dabei erhält man nach einer genügend großen Zahl von Rechnungen Einhüllende für die Schnittgrößen, die sich zunehmend stabilisieren. Man interpretiert diese Ergebnisse dann ingenieurmäßig als: „die Bemessung passt für jedes Erdbeben“.

Alternativ zu gemessenen Akzelerogrammen werden künstliche Beschleunigungsverläufe angesetzt, die so ge-

neriert werden, dass sie z. B. gewisse spektrale Eigenschaften erfüllen. Dieses Verfahren ermöglicht z. B. – sofern Messergebnisse für den Standort vorliegen –, unterschiedliche, aber standortspezifische Beschleunigungsverläufe mit den gewünschten Maximalwerten zu generieren. Hierbei wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die spektralen Eigenschaften des Erdbebens aus der Geologie in der unmittelbaren Umgebung herrühren. Dies trifft wohl aus ingenieurmäßiger Sicht zu, enthält aber die Annahme, dass das nächste oder maßgebende Erdbeben in der gleichen Herdtiefe entsteht. Die Zeitverlaufsrechnung ist im Vergleich zum Antwortspektrenverfahren sehr aufwändig.

4.2 Antwortspektrenverfahren

Zur Anwendung des Antwortspektrenverfahrens ist ebenfalls eine vorausgehende Zeitverlaufsrechnung erforderlich, mittels derer die Systemantwort von linearen Einmassenschwingern mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen ermittelt wird. Diese wird jedoch nicht vom Tragwerksplaner für sein aktuelles Projekt durchgeführt, sondern geschah aus seiner Sicht in einer Black Box, z. B. innerhalb oder im Hintergrund eines Normenausschusses. Beispiele dafür sind z. B. in *Bachmann* [35] enthalten.

Ein Antwortspektrum wird in der Regel vom Tragwerksplaner nicht hinterfragt und als robust und allgemeingültig angenommen. Wenn man jedoch z. B. die – alle auf dem EC 8 beruhenden – unterschiedlichen Spektren in Frankreich, Deutschland und Rumänien vergleicht, so wird deutlich, dass ein Antwortspektrum tatsächlich noch einen hohen Grad an Individualität enthält.

4.3 Gegenüberstellung

In Tabelle 1 werden die beiden zuvor beschriebenen Verfahren einander gegenüber gestellt. Zwar könnte man auch die Einspanngrößen eines stark vereinfachten Ein-Massen-Schwingers mit einer Zeitverlaufsrechnung ermitteln (vgl. [36]). Aufgrund des hierbei erforderlichen, relativ hohen numerischen Aufwandes wird aber üblicherweise dann auch die Struktur entsprechend aufwendig modelliert. Hiervon wird bei den Statements zur Zeitverlaufsrechnung in Tabelle 1 ausgegangen.

Die mit relativ geringem Aufwand zu bewerkstellende Handrechnung unter Verwendung mit Antwortspektren liefert bei Tanks mit mittleren bis eher kleineren Durchmessern, eher schlanken als gedrungene Behältern und eher mittleren bis geringen Erdbebenlasten zufriedenstellende Ergebnisse. Der Begriff „zufriedenstellend“ ist hier nicht dogmatisch im Sinne von „genügend wirklichkeitsnah“ zu verstehen, sondern pragmatisch im Sinne von „die Ergebnisse bedingen eine kaum stärkere Bemessung z. B. der Verankerung, als man diese nach konstruktiven Gesichtspunkten ohnehin gewählt hätte“.

Die mit mindestens dem Faktor 30 zeitaufwendigere (einschließlich Modellierung) Zeitverlaufsrechnung ist z. B. bei unverankerten Großtanks erforderlich, deren Schnittgrößenermittlung sich einer Handrechnung entzieht. Sie ist bei mittleren bis hohen Erdbebenbeschleunigungen empfehlenswert, da durch die vielen, sich addierenden, versteckten Reserven aufgrund der erforderlichen konservati-

ven Rechenannahmen z. B. sehr hohe Verankerungskräfte erhalten werden, deren adäquate konstruktive Umsetzung sehr schwierig ist (s. Tabelle 2).

5 Konstruktive Ausführung

Bei mittelschlanken und schlanken Behältern im Anlagenbau ist in der Regel eine Verankerung am Fundament erforderlich. Bei Großbehältern für die Lagerung von Schmutzwasser (*Greiner/Ofner* [19]) oder Öl wird häufig auf eine Verankerung verzichtet. Hierfür sind dann jedoch aufwendige Nachweise erforderlich (*Greiner/Taras* [37]), in denen Umkippen des Tanks, mögliches Gleiten und die Integrität der strukturellen Teile der Tankschale, wie z. B. des Mantel-Bodenblech-Anschlusses, nachzuweisen sind.

Tanks dieser Größe werden in der Regel mit Schwimmdach ausgeführt, so dass in diesem Zusammenhang auch der Bemessung und der konstruktiven Ausführung der Endringsteife (wind girder) eine besondere Bedeutung zukommen (*Greiner/Taras/Hübner/Saal* [38]).

Bei der Verankerung sind hinsichtlich des Tragverhaltens zwei unterschiedliche Typen zu unterscheiden:

a) Prätzenlagerung: bei der die Ankerzugkräfte über eine aufwändige Doppelsteg-Konsole direkt in den Tankmantel eingeleitet werden

Duktilen Verhalten kann hier nur durch Dehnung des Ankers selbst und durch örtliches Plastizieren im Tankmantel entstehen. Zur Diskussion der anzusetzenden Verhaltensbeiwerte wird auf den Abschnitt 3.2.2 verwiesen.

b) Fußblechverankerung: bei der die Ankerzugkräfte über Biegung des Fußbleches bis zum Tankmantel geleitet werden

Dieser Anschluss ist sehr weich, hinsichtlich des Plastizierungsvermögens aber robust, und er ist geeignet, örtlich hohe Ankerlasten aus $\cos(\varphi)$ -Verformungen des Tankmantels deutlich zu verringern [22]. Hier sehen die Verfasser die Bedingungen für $q = 1,5$ gegeben.

6 Anwendungsbeispiele

In Tabelle 2 wird ein Auszug aus Projekten wiedergegeben, an denen die Verfasser beteiligt waren. Dadurch werden übliche Abmessungsbereiche im Anlagenbau, aber auch die Bandbreite von Referenzbeschleunigungen erkennbar. Man erkennt an der Höhe der Ankerkräfte, dass diese hinsichtlich der Weiterleitung in die Gründung zum Teil kaum mehr beherrschbar sind. Erfahrungsgemäß liegt das daran, dass im Anlagenbau häufig die Tragwerkplaner erst dann eingeschaltet werden, wenn das Layout der gesamten Anlage und deren Komponenten schon sehr weitgehend geplant sind. Manchmal hat auch ein Generalunternehmer eine quasi-baugleiche Anlage ohne nennenswerte Erdbebenlasten schon in einem anderen Teil der Welt gebaut und ist dann sehr erstaunt, dass diese Anlage an dem neuen Standort mit nennenswerten Erdbebenlasten nicht mit der gleichen Tonnage reproduziert werden kann. Konzeptionelle Änderungen, wie z. B. einen Tank bei gleichem Volumen mit kleinerer Schlankheit zu bauen, wollen dann nicht mehr angenommen werden, weil dann das Layout der Anlage völlig überarbeitet werden müsste.

Dies erinnert an die Erfahrungen mit ermüdungsbeanspruchten Bauteilen, von denen häufig angenommen

Tabelle 2. Bemessungsbeispiele
Table 2. Design examples

Projekt	Auftraggeber	Standort	Bezeichnung	Durchmesser [m]	Füll-Höhe [m]	Wanddicke [mm]	Werkstoff	Füllung	Dichte [kg/m³]	Berechnungs-temperatur [°C]	Erdbebenzone	Bedeutungs-beiwert γ_1	Referenz-beschleunigung $a_{g,R}$ [m/s²]	max H,d [kN]	Anzahl Anker	Ankerkräfte [kN]				
F0703	H	Bruchsal		4,4	12,7		1.4571	Wasser	1.000		1	1,0	0,4	2.005						
F0737	H	Schabs, Südtirol		6,0 2,9	9,1	4 4	1.4162	Palmöl	920		1)									
F0806	R	Ludwigs-hafen		7,7	23,5	9	1.4541	MDEOA	1.040	150	1	1,4	0,4	1.129	24	247				
F0809	H	Franzens-feste, Südtirol		5,0 10,0 15,0	10,2	3	1.4162	Palmöl	920		1)									
F0814	R	Ludwigs-hafen	B1640 B3240	10,2 10,2	8,0 8,0	6 6	1.4541 1.4541	CDT CDON	1.000 1.000	120 200	1 1	1,4 1,4	0,4 0,4	409 417	18 18	21 18				
F0815	R	Ludwigs-hafen	B5420 B5440	3,0 5,1	8,1 8,1	5 5	1.4541 1.4541	CPON CPON	1.000 1.000	150 150	1 1	1,4 1,4	0,4 0,4	44 25	6 8	36 25				
F0838	R	Ludwigs-hafen	T026	2,6	8,8	5	1.4539	PTSA	1.240	50	1	1,4	0,4	38	4	51				
F0843	R	Ludwigs-hafen	B31	2,8	8,5	5	1.4571	Diverse	1.500	200	1	1,4	0,4	55	6	48				
F0905	V	französische Überseegebiete	B1	6,0	9,0	4)	S235	Wasser	1.000	4)	2)	1,2	4,5	1.340	19	165				
			B3	8,0	12,6		S235	Schweröl	990-1010				4,5	4.106	25	387				
			B4	36,0	14,4		S235	Schweröl	990-1010				4,5	74.938	113	369				
			B5	6,0	5,4		S235	Klärschlamm	1100-2100				4,5	1.349	19	98				
			B6	16,0	14,4		S235	Löschwasser	1.000				4,5	18.265	50	447				
			B4.1	36,0	14,4		S235	Schweröl	990-1010				4,5	99.000	113	483				
B7	6,0	9,0	S235	Wasser	1.000	4,5	1.154	19	142											
B10	8,0	12,6	S235	Schweröl	990-1010	4,5	5.870	25	554											
B11	6,0	5,4	S235	Klärschlamm	1100-2100	4,5	1.085	19	71											
F1012	R	Weseling	7790	11,9	19,2	6 / 8 / 10	1.4301	MMP	1.043	+80/-10	2	1,0	0,6	2.930	20	315				

H = Hydro-Elektrik, Ravensburg
R = Raum-Inox, Hersbruck
V = Voss & Kamb und Partner, Kaiserslautern

MDEOA = Methyl-diethanolamin
CDT = Cyclododecatrien
CDON = Cyclododecanon
CPON = Cyclopentanon
PTSA = para-Toluolsulfonsäure
MMP = Methylmercaptopropionaldehyd

¹⁾ gem. ital. Vorschrift: Zone 4, $a_g=0,8$ m/s², aber: nur „strategisch wichtige oder relevante Gebäude“ sind zu bemessen. Diese Behälter gehören nicht dazu.
²⁾ PS92 Zone III, Baugrundklasse C, S2, $q=1,0$
³⁾ PS92 Zone III, Baugrundklasse C, S2, $q=1,0$, risque special
⁴⁾ Entwurfsplanung – Werte noch nicht festgelegt

wird, man müsse nur schärfer rechnen, dann lasse sich der Ermüdungsnachweis schon erbringen. Das kann in den Fällen nicht zum Ziel führen, in denen der Entwurf des Bauteils von vorne herein an der erforderlichen Funktionalität vorbei geht. Insofern wird an dieser Stelle für eine ganzheitliche Betrachtungsweise mit frühzeitiger Einbindung aller Fachingenieure plädiert.

Literatur

[1] DIN EN 1998 (EC 8): Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 +

AC:2009, Dezember 2010. – Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen. Deutsche Fassung EN 1998-4:2006, Januar 2007.

[2] DIN EN 1998/NA (EC 8): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. Januar 2011.
[3] Brüggemann, M.: Zur nichtlinearen Zeitbereichssimulation flüssigkeitsgefüllter Tankbauwerke unter Erdbebanregung. Dissertation, Universität Wuppertal, 2002.
[4] Pappa, P., Vasilikis, D., Vazouras, P., Karamanos, S. A.: On the Seismic Behaviour and Design of Liquid Storage Tanks. In: Papadrakakis, M., Fragiadakis, M., Plevris, V. (eds.): COMPdyn 2001 – III ECCOMAS Thematic Conference on

- Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, 26–28 May 2011.
- [5] Sandberg, A.: The Best (Spill-free) Coffee Cup is Elliptic. essay on technology 2006. www.aleph.se/andart/archives/2006/07/the_best_spillfree_coffe_cup_is_elliptic.html. 22.05.2011.
- [6] Rhodes, T., Seebold, J.: Flare pulsation due to seal drum sloshing. AFRC-JFRC 2004 Joint International Combustion Symposium: Environmental Control of Combustion Processes – Innovative Technology for the 21st Century. Maui, Hawaii, USA, 10th–13th October 2004. <http://home.earthlink.net/~jim.seebold/id6.html>
- [7] Ibrahim, R. A.: Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications. Cambridge University Press, May 2005.
- [8] Housner, G. W.: The Dynamic Behaviour of Water Tanks. Bulletin of the Seismological Society of America 53 (1963), pp. 381–387.
- [9] Housner, G. W.: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. Bulletin of the Seismological Society of America 47 (1957), pp. 15–35.
- [10] Verwiebe, C.: Grundlagen für den baupraktischen Einsatz von Schwingungsdämpfern auf Flüssigkeitsbasis. Dissertation, RWTH Aachen, 1998.
- [11] Gehrig, H.: Vereinfachte Berechnung flüssigkeitsgefüllter verankerter Kreiszyinderschalen unter Erdbebenbelastung. Stahlbau 73 (2004), Heft 1, S. 37–45.
- [12] Gehrig, H.: Berechnung erdbebenbeanspruchter stehender zylindrischer Flüssigkeitsbehälter aus Stahlblech. Teil 1. Technische Überwachung 49 (2008) Nr. 6 – Juni, S. 31–36. Teil 2, Technische Überwachung 49 (2008) Nr. 7/8 – Juli/August, S. 20–23.
- [13] IITK-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks. Provisions with Commentary and Explanatory Examples. Indian Institute of Technology Kanpur; Gujarat state Disaster Management Authority; NICEE National Information Center of Earthquake Engineering. October 2007. www.nicee.org
- [14] Malhotra, P. K., Wenk, T., Wieland, M.: Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. Structural Engineering International 3/2000, p. 197–201.
- [15] DIN V 4133:2007-07 Freistehende Stahlschornsteine.
- [16] DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke. – Teil 4: Windlasten. März 2005.
- [17] Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen. Wiesbaden: Vieweg 1996.
- [18] Peil, U., Scharff, R.: Dämpfung bei schlanken Zuggliedern. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt PE 437/20-1. Lehrstuhl für Stahlbau, Universität Braunschweig, Förderzeitraum 1998–2001.
- [19] Greiner, R., Ofner, R.: Large Cylindrical Flat-Bottom Storage Tanks – Design Calculations for Seismic Effects. pp. 116–121. In: Krupka, V. (ed): Proc., Int. Conf. Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines, Prague, Czech Republic, 8.–11. Oct. 2003.
- [20] Koller, M. G., Malhotra, P. K.: Seismic Evaluation of Unanchored Cylindrical Tanks. Paper No. 2534, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada, August 1–6, 2004.
- [21] Gehrig, H.: Persönliche Mitteilung an P. Knödel, 2008.
- [22] Knödel, P., Ummenhofer, T.: Ankerkräfte bei kurzen Zylinderschalen. Stahlbau 75 (2006), Heft 9, S. 723–728.
- [23] Studer, J. A., Koller, M. G., Laue, J.: Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. 3. Auflage, Berlin: Springer Verlag 2007.
- [24] Knoedel, P., Hrabowski, J.: Seismic Design in Plant Construction – Shortcomings of EC 8. In: Dunai, L., Iwany, M., Jarmai, K., Kovacs, N., Vigh, L. G. (eds.): Proceedings Vol. B, p. 1083–1088, Eurosteel 2011, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary, 31. 08.–02. 09. 2011.
- [25] API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage, Eleventh Edition June 2007. Appendix E Seismic Design of Storage Tanks.
- [26] Wunderlich, W., Schäpertöns, B., Springer, H., Temme, C.: Dynamic soil-structure-interaction of nonlinear shells of revolution in the time domain. pp. 455–466 in IBF (ed.): Soil Dynamics and Earthquake Engineering V, London: Elsevier Applied Science 1991.
- [27] Wunderlich, W., Temme, C., Schäpertöns, B.: Dynamisches Tragverhalten flüssigkeitsgefüllter Behälter im Zusammenwirken mit der Gründung. 1. Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Wu 67/21-1, Technische Universität München, Juni 1992.
- [28] Wunderlich, W., Seiler, C., Schwarz, J., Habenberger, H.: Seismic Response and Failure Mechanism of Flexibly supported Liquid Storage Tanks. Paper No. 1318, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 30. 01.–04. 02. 2000.
- [29] Habenberger, J.: Beitrag zur Berechnung von nachgiebig gelagerten Behältertragwerken unter seismischen Einwirkungen. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2001.
- [30] Habenberger, J.: Berechnung von Flüssigkeitsbehältern unter Erdbebeneinwirkung. Stahlbau 77 (2008), H. 1, S. 42–45.
- [31] Mahran, E.: Finite-Infinite-Elemente-Modellierung zur Simulation der Boden-Bauwerk-Flüssigkeit-Interaktion unter dynamischer Anregung. Dissertation, Universität Wuppertal, 2004.
- [32] Karamanos, S. A., Patkas, L. A., Platyrrachos, M. A.: Sloshing Effects on the Seismic Design of Horizontal-Cylindrical and Spherical Industrial Vessels. ASME Journal of Pressure Vessel Technology 128 (2006), pp. 328–340.
- [33] Karamanos, S. A., Papaprokopiou, D., Platyrrachos, M. A.: Finite Element Analysis of Externally-Induced Sloshing in Horizontal-Cylindrical and Axisymmetric Liquid Vessels. ASME Journal of Pressure Vessel Technology 131 (2009), pp. 1–11.
- [34] Rotter, J. M., Schmidt, H. (eds.): ECCS TC8 TWG 8.4 Shells – Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations, 5th Edition, 2008, Eurocode 3, Part 1-6.
- [35] Bachmann, H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. 2. Auflage, Basel: Birkhäuser 2002.
- [36] Knoedel, P.: On the Dynamics of Steel Structures with X-Type Bracing. Stahlbau 80 (2011), H. 8, S. 566–571.
- [37] Greiner, R., Taras, A.: Zylindrische Behälter aus Stahl – Bemessungskonzept und statische Tragwirkung. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2006, Berlin: Ernst & Sohn Verlag.
- [38] Greiner, R., Taras, A., Hübner, A., Saal, H.: Design of Wind Girders for Open-Top Liquid Storage Tanks Made of Steel. Shell Structures: Theory and Applications. Proceedings of the 8th SSTA Conference 2005 Jurata Poland. Taylor and Francis Group, London 2006.
- [39] Knödel, P.: Störabspannungen für Stahlschornsteine. Stahlbau 73 (2004), H. 4, S. 254–261.
- [40] DIN EN 1090: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken. Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken. Deutsche Fassung EN 1090-2:2008, Dezember 2008.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Peter Knödel,
Beratender Ingenieur,
Professor für Stahlbau an der Hochschule Augsburg,
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg,
peter.knoedel@hs-augsburg.de
Dipl.-Ing. (FH) Andrea Heß,
Ingenieurbüro Dr. Knödel,
Peterhofstraße 3b, 86438 Kissing, info@peterknoedel.de