

LEITFADEN

DER LASTFALL ERDBEBEN IM ANLAGENBAU

Entwurf, Bemessung und Konstruktion von Tragwerken und Komponenten in der chemischen Industrie in Anlehnung an die DIN EN 1998-1

Oktober 2012

Verantwortliches Handeln

Der VCI unterstützt die weltweite Responsible-Care-Initiative



Der vorliegende Leitfaden und die dazu gehörigen Erläuterungen wurden erarbeitet durch

Dr. C. Butenweg	Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen
Dr. H.-J. Dargel	Bayer Technology Services GmbH
T. Höchst	Verband der Chemischen Industrie e.V.
Dr. B. Holtschoppen	Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen
R. Schwarz	Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
M. Sippel	BASF SE

Ansprechpartner:

Verband der Chemischen Industrie e.V.
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt, Internet: <http://www.vci.de>
Thilo Höchst, Tel.: +49 69 2556-1507, Fax: +49 69 2556-2507, E-Mail: hoechst@vci.de

Der vorliegende VCI-Leitfaden „Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau, Oktober 2012“ entbindet in keinem Fall von der Verpflichtung zur Beachtung der gesetzlichen Vorschriften. Der Leitfaden wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernehmen die Verfasser und der VCI keine Haftung für die Richtigkeit der Angaben, Hinweise, Ratschläge, sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können deswegen keine Ansprüche, weder gegen die Verfasser noch gegen den VCI, geltend gemacht werden. Dies gilt nicht, wenn die Schäden vom VCI oder seinen Erfüllungshelfern vorsätzlich oder grob fahrlässig verursacht wurden.

Übersicht über die wesentlichen Änderungen zum Leitfaden 2009

- 1) Umstellung der Normbezüge von DIN 4149 auf DIN EN 1998-1 und, wo erforderlich, auf weitere Teile der Normenreihe DIN EN 1998.
- 2) Dadurch bedingte redaktionelle Änderungen.
- 3) Teilweise Neuordnung von Absätzen

Wesentliche inhaltliche Änderungen:

- 1) Abschnitt 4.c: Neu: Konstruktive Hinweise zu Ausfachungsmauerwerk
- 2) Abschnitte 5.1, 5.2 und 5.4: Detailliertere Ausführungen zur Erdbebeneinwirkung und zu Untergrundverhältnissen
- 3) Tabelle 5.1: Neue Einordnung gehandhabter Stoffe bzgl. ihres Schadenspotentials
- 4) Abschnitt 6.1.b: Detaillierte Ausführungen und Verweise zur Modellierung von Tanks, Silos
- 5) Abschnitt 6.1.c: Hinweise zur Modellierung von Rohrleitungen
- 6) Abschnitt 6.2: Nichtlineare Berechnungsverfahren zugelassen
- 7) Abschnitt 7.1 bzw. 7.3: Nachweis im Schadensbegrenzungszustand möglich
- 8) Abschnitt 9: Besondere Regeln für verschiedene Bauweisen kürzer gefasst
- 9) Abschnitt 10: Erdbebenschutzsysteme kürzer gefasst

Inhalt

Einleitung	5
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe.....	6
4 Entwurf und konstruktive Auslegung.....	7
4.a Tragstrukturen von Anlagen.....	7
4.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen.....	7
4.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen im Tragwerk.....	7
5 Erdbebeneinwirkung	8
5.1 Erdbebenzonen.....	8
5.2 Untergrundverhältnisse, Geologie und Baugrund.....	8
5.3 Bedeutungsbeiwerte	9
5.4 Regeldarstellung der Erdbebeneinwirkung	10
5.5 Kombinationen der Einwirkung mit anderen Einwirkungen	11
6 Tragwerksberechnung	12
6.1 Modellabbildung	12
6.1 a Tragstrukturen von Anlagen.....	12
6.1.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen.....	13
6.1.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen	13
6.2 Berechnungsverfahren.....	13
6.3 Berechnung der Verformungen.....	14
6.4 Nicht tragende Bauteile und Rohrleitungen	14
7 Sicherheitsnachweise	16
7.1 Allgemeines.....	16
7.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	16
7.2.a Tragstrukturen von Anlagen.....	16
7.2.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen.....	16
7.2.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen	16
7.3 Nachweis der Schadensbegrenzung	17
7.3.a Tragstrukturen von Anlagen.....	17
7.3.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks, und Kolonnen.....	17
7.3.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen	17
8 Besondere Regeln	18
9 Erdbebenschutzsysteme.....	18
10 Beurteilung bestehender Anlagen	18
10.1 Zustandserfassung.....	19
10.2 Ertüchtigung	20
11 Literaturangaben.....	20

Einleitung

Im Jahr 2009 wurde vom Verband der Chemischen Industrie in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik der RWTH Aachen erstmalig der Leitfaden „Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau“ herausgebracht, um in Anlehnung an die damals gültige DIN 4149:2005 Empfehlungen zur Handhabung des Lastfalls Erdbeben im Anlagenbau der chemischen Industrie und verwandter Industrien zu geben.

Im Zuge der Harmonisierung technischer Regelwerke in Europa wird die DIN 4149:2005 durch die DIN EN 1998-1 ersetzt und durch weitere Teile der DIN EN 1998 (Eurocode 8) ergänzt. DIN EN 1998-1 gilt dabei für den erdbebengerechten Entwurf, sowie die entsprechende Bemessung und Konstruktion von Bauwerken des Hoch- und Ingenieurbaus. Sonderbauwerke, zu denen auch Anlagen der chemischen Industrie mit erhöhtem Gefahrenpotential gehören können, fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm. Daher soll die vorliegende Neuauflage des VCI-Leitfadens Betreibern und Planern Handlungsanweisungen für Entwurf, Bemessung und Konstruktion von Anlagen der Chemischen Industrie oder verwandten Industrie nach dem Stand der Technik an die Hand geben.

Der Leitfaden ist in erster Linie für die Errichtung neuer Anlagen gedacht. Es werden aber auch wirtschaftliche und sicherheitstechnisch sinnvolle Empfehlungen im Umgang mit bestehenden Anlagen gegeben. Dabei ist zu beachten, dass das Immissionsschutzrecht nicht generell die Anpassung von bestehenden Anlagen an den aktuellen Stand der Technik verlangt. Die Verhältnismäßigkeit von Ertüchtigungsmaßnahmen muss im Einzelfall, d.h. für jede Einzelanlage und für jede einzelne Anforderung, beurteilt werden.

Wie bisher beschränkt sich der Leitfaden auf die für chemische Anlagen bedeutsamen anwendungsrelevanten Änderungen und Erweiterungen zur DIN EN 1998-1 und ist somit in Kombination mit der Norm anzuwenden. Für Anlagen, deren seismisches Verhalten von dem üblicher Hochbauten abweicht, verweist der Leitfaden auf die weiteren Teile der Normenreihe DIN EN 1998. Der Anwender sollte demnach über ausreichend Erfahrung im Umgang mit der DIN EN 1998 und ein ausreichendes Verständnis im Allgemeinen für die Wirkung von Erdbeben auf bauliche Anlagen verfügen. Um dem Anwender den Umstieg auf den neuen Leitfaden zu erleichtern, und um eine gute Übersicht zu gewährleisten, wurde – soweit möglich – die Gliederung der ersten Auflage beibehalten. Dadurch sind die einzelnen Abschnitte thematisch nicht immer analog zur DIN EN 1998-1 strukturiert, es werden aber Verweise zu den entsprechenden Abschnitten der Norm genannt. Weitergehende Anmerkungen und Erklärungen zu theoretischen Hintergründen sind weiterhin in den Erläuterungen zum Leitfaden zusammengefasst.

1 Anwendungsbereich

- (1) Dieser Leitfaden gilt in Kombination mit der DIN EN 1998-1 für den erdbebenge-rechten Entwurf, die Bemessung und die Konstruktion von Anlagen (Neuanlagen) der Chemischen Industrie oder verwandter Industrien. Für Bauteile und Konstrukti-onen, deren seismisches Verhalten von dem üblicher Hochbauten abweicht, bezieht sich der Leitfaden auf die jeweils relevanten Teile der Normenreihe DIN EN 1998.
- (2) Der Leitfaden enthält darüber hinaus Vorgehensweisen für die Beurteilung und Vorschläge zur Verbesserung der Erdbebensicherheit von bestehenden Anlagen.
- (3) Der Leitfaden berücksichtigt die baulichen Tragstrukturen der Anlagen, freistehen-de Behälter, Silos, Tanks, Kolonnen, sowie bauliche Einbauten, nicht tragende (verfahrens-) technische Komponenten und Rohrleitungen in den Anlagen.
- (4) DIN EN 1998-1 stellt gemäß Absatz 3.2.1 (5) keine Anforderungen an Bauwerke in Gebieten sehr geringer Seismizität (Erdbebenzone 0). Aus Vorsorgegründen wird für diese Bauwerke die Anwendung des Abschnitts 4 dieses Leitfadens (Entwurf und konstruktive Auslegung) empfohlen.

2 Normative Verweisungen

- (1) Zusätzlich zu den Normverweisen in DIN EN 1998-1 Abschnitt 1.2 sind für die An-wendung dieses Leitfadens folgende Dokumente erforderlich (es gilt jeweils die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments einschließlich aller Ände-rungen):
 - Liste der Technischen Baubestimmungen der Bundesländer
 - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreini-gungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BImSchG)
 - Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung – 12. BImSchV)
 - Normenreihen DIN EN 199x mit ihren nationalen Anhängen, sofern vorhanden.

3 Begriffe

- (1) Es gelten die Definitionen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 1.5. Darüber hinaus wird festgelegt:

Anlagen im Sinne dieses Leitfadens sind Gebäude, Gebäudeteile, Traggerüste mit ihren verfahrenstechnischen Komponenten, Einbauten und Rohrleitungen, sowie Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen.

4 Entwurf und konstruktive Auslegung

4.a Tragstrukturen von Anlagen

- (1) Die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 2.2.4 (Besondere Maßnahmen) sind zu beachten.
- (2) Die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.3 (Eigenschaften erdbebensicherer Hochbauten) sind zu beachten.
- (3) Aussteifungssysteme sollten so angeordnet und über Deckenscheiben verbunden werden, dass ein direkter horizontaler Lastabtrag gewährleistet und Torsionsschwingungen vermieden werden. Einzelne nebeneinander angeordnete bauliche Anlagen müssen über eigene Aussteifungssysteme und ausreichende Fugenabstände verfügen.
- (4) Unterschiedliche Gründungstiefen und Gründungsarten innerhalb einer baulichen Anlage sind zu vermeiden. Des Weiteren sind die Empfehlungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 2.2.4.2 (Besondere Maßnahmen für Gründungen) und DIN EN 1998-5 Abschnitt 5.2 (Regeln für den konzeptionellen Entwurf von Gründungen) zu berücksichtigen.

4.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen

- (1) Tanks und direkt auf dem Boden oder der Gründung gelagerte Behälter und Silos sollten gleichmäßig über den gesamten Umfang fest verankert werden. Durch Wahl ausreichender Wanddicken ist die Stabilität im hoch beanspruchten Fußbereich sicherzustellen.
- (2) Aufgeständerte Behälter, Tanks und Silos sind gegen Umstürzen und Gleiten durch Wahl geeigneter Maßnahmen (z.B. Aussteifungssysteme und Verankerungen) zu sichern.
- (3) Grundsätzlich sind Verankerungen und Verbindungsmittel nicht-dissipativ auszulegen (siehe 7.2.b (4)).
- (4) Leitungsanschlussbereiche an Behältern, Silos, Tanks und Kolonnen müssen eine ausreichende Verformungsfähigkeit aufweisen.

4.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen im Tragwerk

- (1) Die Unterkonstruktionen von Einbauten (Apparate, Behälter, Rohrleitungen, Fassadenteile, u. ä.) sind auf die horizontale Beanspruchung infolge Erdbeben auszulegen. Durch erdbebengerechte konstruktive Auslegung und Bemessung sind folgende Effekte auszuschließen:
 - Umstürzen (Kippen),
 - Verrutschen mit Schadensfolge,
 - Aufschaukeln hängender Komponenten und gegenseitiges Anstoßen.
 - Herabfallen,
 - Abreißen von Leitungen,

- (2) Soweit verfahrenstechnisch möglich, sind schwere Einbauten in geringer Höhe und mittig oder symmetrisch im Tragwerk anzuordnen.
- (3) Die Unterkonstruktionen von Einbauten sollten so ausgeführt werden, dass Resonanzeffekte zwischen Einbauten und Tragwerk vermieden werden. Ist eine weiche Unterkonstruktion für den Betrieb der Anlage erforderlich (bei rotierenden Maschinen, Nähe zu Dehnfugen im Tragwerk, u. ä.), sind die Anschlüsse von Rohrleitungen und die Positionierung von angrenzenden Einbauten mit besonderer Sorgfalt auszuführen. Ggf. müssen Dämpfungselemente zur Begrenzung der Einbautenbewegungen angeordnet werden.
- (4) Hängende Einbauten sind in ausreichendem Maße konstruktiv in den horizontalen Richtungen auszusteifen, um ein Aufschaukeln und Schwingen zu verhindern. Weiterhin ist zu unmittelbar benachbarten Einbauten ausreichend Abstand einzuhalten.
- (5) Bei Leitungsanschlüssen an Behälter und andere technische Komponenten ist eine ausreichende Verformungsfähigkeit vorzusehen.
- (6) Grundsätzlich sind Verankerungen und Verbindungsmittel nicht-dissipativ auszulegen (siehe 7.2.c (2)).
- (7) Bei der konstruktiven Auslegung von Ausfachungsmauerwerk sind die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.3.6 zu beachten.

5 Erdbebeneinwirkung

5.1 Erdbebenzonen

- (1) Eine schematische Darstellung der Erdbebenzonen in der Bundesrepublik Deutschland, sowie die Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenzspitzenwerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen sind in DIN EN 1998-1/NA angegeben.
- (2) Abweichend von DIN EN 1998-1/NA NDP zu 3.2.1(5) bzw. DIN EN 1998-1 Abschnitt 3.2.1(5) wird aus Vorsorgegründen die Anwendung des Abschnitts 4 dieses Leitfadens auch in Erdbebenzone 0 empfohlen.

5.2 Untergrundverhältnisse, Geologie und Baugrund

- (1) Es gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 3.1 (Baugrundbeschaffenheit) und die zugehörigen Regelungen des DIN EN 1998-1/NA.
- (2) Zusätzlich zum Baugrund ist entsprechend DIN EN 1998-1/NA zu Abschnitt 3.1 der geologische Untergrund bei der Ermittlung der Erdbebeneinwirkung zu berücksichtigen. Die Definition der drei vorgesehenen geologischen Untergrundklassen sowie eine schematische Darstellung der Untergrundklassen in den Erdbebenzonen der BRD ist in DIN EN 1998-1/NA angegeben.

5.3 Bedeutungsbeiwerte

- (1) Aus der Kombination von Schadenspotential und möglicher Auswirkung für den Personenschutz, den Umweltschutz und für Lifeline Einrichtungen ergibt sich das Schadensrisiko der Anlage oder Komponente, auf Grundlage dessen der Anlage drei Bedeutungsbeiwerte nach den Tabellen 5.1 bis 5.3 zugeordnet werden. Der ungünstigste dieser Bedeutungsbeiwerte ist für die Bemessung maßgebend.
- (2) Die Zuweisung eines Bedeutungsbeiwertes kleiner als 1,0 ist für Anlagen der Chemischen Industrie oder verwandter Industrien ausgeschlossen.
- (3) Abgrenzbare Gebäude und abgrenzbare Einrichtungen, die sich im Erdbebenfall unabhängig voneinander verformen können (ausreichende Fugenbreite), dürfen getrennt voneinander nachgewiesen werden. Den Gebäuden und Einrichtungen können dabei unterschiedliche Bedeutungsbeiwerte zugeordnet werden.

Tabelle 5.1: Bedeutungsbeiwerte γ_I bzgl. des Personenschutzes

		Auswirkungen				
		In Anlagen	unmittelbare Umgebung (Block innerhalb Werk)	innerhalb Werk (eingezäunt)	außerhalb Werk	Großräumig außerhalb Werk
Schadenspotential *	Nicht flüchtige giftige Stoffe: H-Sätze** 301, 311, 331, 340, 350, 360, 370 und Dampfdruck < 0,1 hPa Entzündliche und oxidierende Stoffe: H-Sätze 221, 223, 226, 261, 271, 272	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
	Nicht flüchtige sehr giftige Stoffe: H-Sätze 300, 310, 330 und Dampfdruck < 0,1 hPa Leicht- und hochentzündliche Stoffe: H-Sätze 220, 222, 224, 225, 242, 250, 260 Oxidierende Gase: H-Satz 270	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
	Flüchtige und leichtfl. giftige Stoffe: H-Sätze 301, 311, 331, 340, 350, 360 und Dampfdruck $\geq 0,1$ hPa Flüchtige sehr giftige Stoffe: H-Sätze 300, 310, 330 und Dampfdruck $\geq 0,1$ und < 100 hPa Explosive Stoffe: H-Sätze 200, 201, 202, 203, 205, 240, 241 Hochentzündliche, verflüssigte Gase: H-Satz 220 (verflüssigt)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4
	Leichtflüchtige sehr giftige Stoffe: H-Sätze 300, 310, 330 und Dampfdruck ≥ 100 hPa	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

- * Bei den entzündlichen, leichtentzündlichen, hochentzündlichen und oxidierenden Stoffen werden ausschließlich Gase und Flüssigkeiten berücksichtigt. Als Maß für die Flüchtigkeit der giftigen bis sehr giftigen Stoffe dient der Dampfdruck bei 20°C.
- ** CLP_Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 vom 16. Dez. 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

Tabelle 5.2: Bedeutungsbeiwerte γ_I bzgl. des Umweltschutzes

	Auswirkungen		
	Keine Konsequenzen für die Umwelt außerhalb des Werkes	Geringe Konsequenzen für die Umwelt außerhalb des Werkes	Großräumige Konsequenzen für die Umwelt außerhalb des Werkes
Einfluss auf die Umwelt	1,0	1,2	1,4

Tabelle 5.3: Bedeutungsbeiwerte γ_I für Lifeline Einrichtungen

	Anforderungen		
	Normale Anforderungen an die Verfügbarkeit	Hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit	Sehr hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit
Rückhaltesysteme, Verkehrswege, Rettungswege	1,2	1,2	1,2
Lifeline Bauwerke (Feuerwachen, Löschanlagen, Rettungsdienststationen, Energieversorgung, Rohrbrücken)	1,3	1,4	1,4
Notstromversorgung*, Sicherheitssysteme*	1,4	1,5	1,6

*Systeme, die notwendig sind, um betriebliche Prozesse in den sicheren Zustand zu überführen.

5.4 Regeldarstellung der Erdbebeneinwirkung

- (1) Es gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 3.2.2.1 (Allgemeines zur grundlegenden Darstellung der Erdbebeneinwirkung).
- (2) Form und Parameter der elastischen Bodenbeschleunigungs-Antwortspektren für die horizontale und die vertikale Erdbebeneinwirkung sind DIN EN 1998-1/NA, NDP zu 3.2.2.2 zu entnehmen.
- (3) Das horizontale Bemessungsspektrum für lineare Berechnung ist DIN EN 1998-1/NA, NDP zu 3.2.2.5 zu entnehmen. Die Kontrollperiode T_B sollte dabei mit $T_B = 0,01s$ angesetzt werden.
- (4) Ist eine Berücksichtigung der Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung erforderlich (vgl. Abschnitt 6.2 (4) dieses Leitfadens), sollen zur Beschreibung des Bemessungsspektrums die Gleichungen des horizontalen Bemessungsspektrums verwendet werden, wobei der Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} durch $a_{vgR} = 0,5 \cdot a_{gR}$ und der Untergrundparameter S durch $S = 1,0$ ersetzt wird.

- (5) Abweichend von DIN EN 1998-1 Abschnitt 3.2.3 wird die Darstellung der Erdbebeneinwirkung mit Hilfe von Zeitverläufen der Bodenbeschleunigung und verwandter Größen nicht empfohlen.

5.5 Kombinationen der Einwirkung mit anderen Einwirkungen

- (1) Die Kombinationsbeiwerte $\psi_{2,i}$ zur Kombination veränderlicher Einwirkungen in der Bemessungssituation Erdbeben gemäß DIN EN 1990 Abschnitt 6.4.3.4 sind in Tabelle 5.4 des Leitfadens angegeben. Die Kombinationsbeiwerte sind an die in Tabelle NA.1.1 der DIN EN 1990/NA angegebenen Werte angelehnt und berücksichtigen die spezifischen Gegebenheiten im Anlagenbau.
- (2) Abweichend von den Regelungen der DIN EN 1998-1 (Tabelle 4.2 bzw. DIN EN 1998-1/NA Tabelle NA.5) ist der Beiwert zur Berechnung der Kombinationsbeiwerte $\psi_{E,i}$ grundsätzlich mit $\phi = 1,0$ anzusetzen.
- (3) Die Einwirkungen aus Erdbeben A_{Ed} sind für die maßgebenden Betriebslastkonstellationen zu ermitteln. Diese sind im jeweiligen Einzelfall unter Berücksichtigung der Betriebsabläufe zu definieren.
- (4) Zwangsbeanspruchungen sind als veränderliche Betriebslasten zu berücksichtigen, wenn sie in der Bemessungssituation Erdbeben ungünstig wirken.

Tabelle 5.4: Kombinationsbeiwerte $\psi_{2,i}$ in Anlehnung an DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.1.1

Einwirkung	Kombinationsbeiwert ψ_2
<i>Verkehrslasten</i>	
Lagerflächen	0,8
Betriebsflächen	0,15
Büroflächen	0,3
Anhängelasten	0,8
veränderliche Maschinenlasten, Fahrzeuglasten	0,5
Brems- und Anfahrlasten	0
Montagelasten, andere kurzzeitig oder selten auftretende Lasten	0
<i>Betriebslasten</i>	
Veränderliche Betriebslasten	0,6*
Betriebsdrücke	1,0
Betriebstemperatur	1,0
Windlasten	0
Temperatureinwirkungen von außen (temporär)	0
Schneelasten	0,5
Wahrscheinliche Setzungsdifferenzen des Baugrundes	1,0
* Ständig vorhandene Betriebslasten sind als ständige Last G_k anzusetzen.	

6 Tragwerksberechnung

- (1) Wesentliche Änderungen am Tragwerk im Laufe seiner Lebensdauer oder an der Verteilung von Massen bedürfen eines Nachweises der Erdbebensicherheit des Bauwerks. Dies gilt auch im Falle einer Erhöhung des Tragwiderstands.

6.1 Modellabbildung

6.1 a Tragstrukturen von Anlagen

- (1) Es wird empfohlen, soweit möglich für die Tragstrukturen von Anlagen die zulässigen Vereinfachungen nach DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.3.1 auszunutzen. Bei der Verwendung von ebenen Modellen sind die räumlichen Effekte aus Torsion zu berücksichtigen.
- (2) Das Modell der Tragstruktur muss die Steifigkeits- und Massenverteilung realistisch abbilden. Die horizontal und vertikal aktivierbaren Massen der nicht tragenden Komponenten können im Allgemeinen vereinfacht als Punktmassen in der Tragwerksberechnung berücksichtigt werden (vgl. Absatz 6.1c dieses Leitfadens). Hierbei müssen vorhandene Massenexzentrizitäten berücksichtigt werden.
- (3) Als Referenzwert für die Strukturdämpfung soll bei Verwendung des elastischen Antwortspektrums 5% viskose Bauwerksdämpfung angesetzt werden. Bei Verwendung des Bemessungsspektrums sind davon abweichende Dämpfungswerte bereits durch den bauartspezifischen Verhaltensbeiwert q erfasst.
- (4) Bei Anlagen, die mit Erdbebenschutzsystemen zur Energiedissipation nach Abschnitt 9 des Leitfadens ausgestattet sind, sind die entstehenden Nichtlinearitäten in den Tragwerksmodellen zu berücksichtigen.
- (5) Der Einfluss des Baugrundes ist in der Tragwerksberechnung zu berücksichtigen, wenn die daraus resultierenden Effekte das Schwingungsverhalten der Anlage nennenswert beeinflussen. Hierfür können vereinfachend Einzelfedern mit dynamischen Federkennwerten verwendet werden (siehe Erläuterungen).
- (6) Falls die rechnerische Berücksichtigung von Boden-Bauwerks-Interaktion erforderlich ist, sind die Dämpfungskennwerte für den Boden den Baugrund- und Gründungsverhältnissen anzupassen (siehe Erläuterungen und DIN EN 1998-5).
- (7) Hält ein Bodengutachten Veränderungen des Baugrunds infolge dynamischer Einwirkung für möglich (hierzu gehören bleibende Verformungen durch Verdichtung oder durch andere Veränderungen des Korngefüges sowie die Abminderung der Scherfestigkeit des Bodens, z.B. durch Bodenverflüssigung), so sind diese Vorgänge bei der rechnerischen Untersuchung der Anlage zu berücksichtigen (DIN EN 1998-5). Gegebenenfalls sind Maßnahmen zur Bodenverbesserung durchzuführen.

6.1.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen

- (1) Das Berechnungsmodell muss die Steifigkeits- und Massenverteilung sowie die Dämpfungs- bzw. Energiedissipationseigenschaften realistisch abbilden.
- (2) Der Einfluss des Baugrundes ist in der Berechnung zu berücksichtigen, wenn die daraus resultierenden Effekte das Schwingungsverhalten der Anlage nennenswert beeinflussen. Hierfür können vereinfachend Einzelfedern mit dynamischen Federkennwerten verwendet werden (siehe Erläuterungen).
- (3) Bei flüssigkeitsgefüllten Tankbauwerken sind hydrodynamische Effekte zu berücksichtigen. Dies schließt die Berücksichtigung von Interaktionseffekten zwischen Tankschale und gelagerter Flüssigkeit ein. Ein Verfahren zur vereinfachten Berücksichtigung dieser Interaktionseffekte ist in den Erläuterungen angegeben. Flüssigkeiten dürfen als inkompressibel angenommen werden.
- (4) Bei granularem Lagergut darf für die Ermittlung der Beanspruchungen der Stützkonstruktion vereinfachend die Masse des Lagerguts als starr mit der Siloschale verbunden angenommen werden.
- (5) Angaben zur Dämpfung gelagerter Flüssigkeiten und Schüttgüter sind DIN EN 1998-4 Abschnitt 2.3.3.2 zu entnehmen.
- (6) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sollte der Verhaltensbeiwert q nicht größer als 1,5 gewählt werden.
- (7) Für die Modellabbildung sehr schlanker vertikaler Anlagenteile wie Kolonnen und Schornsteine gelten die Regelungen der DIN EN 1998-6 Abschnitt 4.2.

6.1.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen

- (1) Nicht tragende Einbauten können unabhängig von der Tragstruktur der Anlage durch geeignete statische Ersatzsysteme modelliert werden, sofern sie das Gesamtschwingverhalten des Haupttragwerks nicht wesentlich durch Interaktion beeinflussen (vgl. Absatz 6.1 a (2) dieses Leitfadens).
- (2) Für die Modellabbildung oberirdischer Rohrleitungen gelten die Regelungen der DIN EN 1998-4 Abschnitt 5.4.1.
- (3) Für die Berechnung eingeeerdeter Rohrleitungen ist die Modellierung der seismischen Wellen wesentlich. Hierbei ist DIN EN 1998-4 Abschnitt 6.3 zu beachten.

6.2 Berechnungsverfahren

- (1) Wie in der DIN EN 1998-1 können das vereinfachte und das multimodale Antwortspektrenverfahren Anwendung finden.
- (2) Entsprechend DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.4.2 darf die Bemessung auf Grundlage von nichtlinearen statischen Verfahren erfolgen. Eine Bemessung auf Grundlage von Zeitverlaufsberechnungen wird nicht empfohlen.

- (3) Die Horizontalkomponenten der Erdbebeneinwirkung sind als gleichzeitig wirkend anzusetzen. Die Kombination der resultierenden Beanspruchungen erfolgt entsprechend DIN EN 1998-1, Absatz 4.3.3.5.1.
- (4) Die Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung kann bei der Berechnung des Tragwerks im Regelfall vernachlässigt werden. Zu berücksichtigen sind die vertikalen Beschleunigungen jedoch, unabhängig von der Größe der vertikalen Beschleunigung, bei der Bemessung von Tragwerksteilen der in DIN EN 1998-1, Absatz 4.3.3.5.2 (1) genannten Gruppen, sowie bei Trägern, die große anlagentechnische Massen tragen. Für diese Bauteile sind die horizontale und die vertikale Erdbebeneinwirkung als gleichzeitig wirkend anzusetzen.
- (5) Für die Berechnung von Gründungen ist DIN EN 1998-5 Abschnitt 7.3 (Berechnungsverfahren) zu beachten.
- (6) Bei der Berechnung von Silos ist DIN EN 1998-4 Abschnitt 3.3 zu beachten.
- (7) Bei der Berechnung von Tankbauwerken ist DIN EN 1998-4 Abschnitt 4.3 (Berechnungsverfahren) zu beachten.
- (8) Bei der Berechnung von oberirdischen Rohrleitungen mit einer horizontalen Ausdehnung größer 600m ist die räumliche Veränderlichkeit der Bodenbewegung entsprechend DIN EN 1998-4 Abschnitte 5.4.2 (5)-(6) zu berücksichtigen.
- (9) Bei der Berechnung von eingeeerdeten Rohrleitungen ist DIN EN 1998-4 Abschnitt 6.4 zu beachten.

6.3 Berechnung der Verformungen

- (1) Es gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.3.4.
- (2) Sind die im Grenzzustand der Tragfähigkeit berechneten Verformungen für den Betriebszustand unverträglich, sollte der Nachweis der Schadensbegrenzung nach Abschnitt 7.3 geführt werden.

6.4 Nicht tragende Bauteile und Rohrleitungen

- (1) Zur Bemessung nicht tragender Bauteile und ihrer Verankerungen und Unterkonstruktionen kann vereinfachend die maximal zu erwartende horizontale Erdbebenkraft F_a gemäß Gleichung (1) bestimmt und in der maßgebenden horizontalen Richtung im Massenschwerpunkt des Bauteils angesetzt werden.

$$F_a = 1,6 \cdot S_{e,max} \cdot \gamma_a \cdot m_a \quad [kN] \quad (1)$$

mit: $S_{e,max}$ = Plateauwert des elastischen Antwortspektrums $[m/s^2]$,
ermittelt mit dem Bauwerks-Bedeutungsfaktor $\gamma_I = 1,0$

$$S_{e,max} = 2,5 \cdot S \cdot \eta \cdot a_{gR} \cdot 1,0$$

S = Untergrundparameter

η = Dämpfungs-Korrekturbeiwert zur Berücks. der Strukturdämpfung

- des Tragwerks; $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55$; für $\xi = 5\%$ ist $\eta = 1,0$
- ξ = Wert der viskosen Dämpfung des Tragwerks [%];
in der Regel = 5% (vgl. Leitfaden Absatz 6.1 a (3))
- γ_a = Bedeutungsfaktor des Bauteils / der Komponente nach
Abschnitt 5.3 [-]
- m_a = Masse des Bauteils / der Komponente [t]

Alternativ kann die Horizontalkraft F_a unter Berücksichtigung der Einbauhöhe über Grund sowie dem Schwingverhalten der Tragstruktur gemäß Gleichung (6.5) der Erläuterungen ermittelt werden.

- (2) Die Horizontalkraft F_a ist in Kombination mit den ständigen Lasten und den ungünstig wirkenden horizontalen und vertikalen Betriebslasten anzusetzen.
- (3) Bei über mehrere Tragwerksebenen verlaufenden Bauteilen (z.B. Kolonnen) kann die Bemessungskraft F_a gemäß der Massebelegung des Bauteils auf die einzelnen horizontal führenden Lagerpunkte verteilt werden.
- (4) Für die Einbauten selbst ist F_a entsprechend der Masse- und Steifigkeitsverteilung auf das statische Ersatzsystem der Einbauten zu verteilen. F_a ist auch hier zusammen mit allen ständigen Lasten und den ungünstig wirkenden Betriebslasten anzusetzen.
- (5) Hydrodynamische Effekte können bei der Bemessung flüssigkeitsgefüllter Behälter und ihrer Verankerung vernachlässigt werden, wenn deren Einfluss auf die Beanspruchung des Behälters und seiner Verankerung unwesentlich ist. Ansonsten ist Abschnitt 6.2 (7) dieses Leitfadens zu beachten.
- (6) Für Einbauten bis zu einer Gesamtlast von 10 kN, für einzelne metallische Rohrleitungen bis zu einer Nennweite von DN 100, sowie für Leitungen deren Stützweiten gemäß Anlage 2 zu AD 2000 Merkblatt HP 100 R gewählt wurden, ist eine konstruktive Sicherung gegen Herabfallen und Umkippen ausreichend (siehe Erläuterungen). Eine ausreichende Elastizität von Rohrleitungen sowie flexible Anschlüsse an Apparate und Behälter sind sicherzustellen. Für erforderliche rohrstatische Berechnungen wird auf die Erläuterungen verwiesen. Die Halterungen von Rohrleitungen sind bis zur Krafteinleitung ins Tragwerk rechnerisch nachzuweisen.
- (7) Können aus Relativverschiebungen Beanspruchungen der Einbauten entstehen (z.B. bei Rohrleitungen zwischen zwei Gebäuden), sind diese Relativverschiebungen bei der Bemessung der Einbauten zu berücksichtigen.

7 Sicherheitsnachweise

7.1 Allgemeines

- (1) Es gilt die Regelung der DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.4.1.
- (2) Abweichend von DIN EN 1998-1/NA (NDP zu 2.1(1)P) kann der Nachweis der Schadensbegrenzung nach Abschnitt 7.3 geführt werden (vgl. DIN EN 1998-1 Abschnitt 2.1).
- (3) Als Kombinationsbeiwerte $\psi_{2,i}$ zur Kombination der veränderlichen Einwirkungen sind in der seismischen Lastfallkombination die Werte nach Tabelle 5.4 anzusetzen.

7.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

- (1) Die Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit ($\gamma_I = 1,0$) für den Grenzzustand der Tragfähigkeit beträgt 10% in 50 Jahren, dies entspricht einer Referenz-Wiederkehrperiode von 475 Jahren.

7.2.a Tragstrukturen von Anlagen

- (1) Für die baulichen Tragstrukturen der Anlagen ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.4.2 zu führen.

7.2.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks und Kolonnen

- (1) Für Silos ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1998-4 Abschnitt 3.5.2 zu führen.
- (2) Für Behälter und Tanks ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1998-4 Abschnitt 4.5.2 zu führen.
- (3) Für schlanke freistehende Anlagen wie Kolonnen und Schornsteine ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1998-6 Abschnitt 4.7.1 zu führen.
- (4) Für den Tragfähigkeitsnachweis von Verbindungsmitteln und Verankerungen sind die Beanspruchungen mit dem Verhaltensbeiwert $q = 1,0$ zu ermitteln, und damit ein linear-elastisches Verhalten der Verankerungen sicherzustellen.

7.2.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen

- (1) Nicht tragende Einbauten sowie deren Verankerungen und Unterkonstruktionen sind für die in Abschnitt 6.4 dieses Leitfadens angegebenen Bemessungskräfte nachzuweisen.
- (2) Beim Tragfähigkeitsnachweis nicht tragender Einbauten muss sichergestellt werden, dass sich Verbindungsmittel und Verankerungen linear-elastisch verhalten (siehe Erläuterungen).

- (3) Für den Nachweis oberirdischer Rohrleitungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gelten die Regelungen nach DIN EN 1998-4 Abschnitte 5.2.2 und 5.6.
- (4) Für den Nachweis eingeeerdeter Rohrleitungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gelten die Regelungen nach DIN EN 1998-4 Abschnitt 6.5.

7.3 Nachweis der Schadensbegrenzung

- (1) Der Nachweis der Schadensbegrenzung kann z.B. zur Gewährleistung der Betriebssicherheit geführt werden, wenn dies vom Betreiber der Anlage gewünscht ist.
- (2) Die Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit ($\gamma_I = 1,0$) für den Nachweis der Schadensbegrenzung ist vom Betreiber festzulegen. Der empfohlene Wert ist 10% in 10 Jahren, dies entspricht einer Referenz-Wiederkehrperiode von 95 Jahren.
- (3) Der Nachweis der Schadensbegrenzung ist linear elastisch zu führen. Das elastische Antwortspektrum muss die Bauwerksdämpfung in angemessener Weise berücksichtigen. Der in DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.4.3.2(2) eingeführte Abminderungsfaktor n ist im Geltungsbereich des Leitfadens nicht anzuwenden.

7.3.a Tragstrukturen von Anlagen

- (1) Für die baulichen Tragstrukturen der Anlagen ist der Nachweis der Schadensbegrenzung nach DIN EN 1998-1 Abschnitt 4.4.3 zu führen.

7.3.b Freistehende Behälter, Silos, Tanks, und Kolonnen

- (1) Für Silos ist der Nachweis der Schadensbegrenzung nach DIN EN 1998-4 Abschnitt 3.5.1 zu führen.
- (2) Für Behälter und Tanks ist der Nachweis der Schadensbegrenzung nach DIN EN 1998-4 Abschnitte 4.1.2 und 4.5.1 zu führen.
- (3) Für schlanke freistehende Anlagen wie Kolonnen und Schornsteine ist der Nachweis der Schadensbegrenzung nach DIN EN 1998-6 Abschnitt 4.9 zu führen.

7.3.c Nicht tragende Einbauten und Rohrleitungen

- (1) Nicht tragende Einbauten sowie deren Verankerungen und Unterkonstruktionen sind für die horizontale Ersatzkraft F_a nach Abschnitt 6.4 dieses Leitfadens nachzuweisen. Wird die Ersatzkraft F_a mittels Gleichung 6.5 der Erläuterungen berechnet, ist der Verhaltensbeiwert der Komponente $q_a = 1,0$ zu setzen (vgl. Abschnitt 7.3(3)).
- (2) Für den Nachweis der Schadensbegrenzung bei oberirdischen Rohrleitungen gelten die Regelungen nach DIN EN 1998-4 Abschnitt 5.2.1.
- (3) Für den Nachweis der Schadensbegrenzung bei eingeeerdeten Rohrleitungen gelten die Regelungen nach DIN EN 1998-4 Absätze 6.5, insbesondere Absatz (4)P.

8 Besondere Regeln

- (1) Für Betonbauten gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 5.
- (2) Für Stahlbauten gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 6.
- (3) Für Verbundbauten aus Stahl und Beton gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 7.
- (4) Für Holzbauten gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 8.
- (5) Für Mauerwerksbauten gelten die Regelungen der DIN EN 1998-1 Abschnitt 9.
- (6) Für Gründungen und Stützbauwerke gelten die Regelungen der DIN EN 1998-5.

9 Erdbebenschutzsysteme

- (1) Die folgenden Unterabschnitte umfassen in erster Linie grundlegende Prinzipien und methodische Angaben.
- (2) Grundsätzlich können für Erdbebenschutzsysteme von Bauwerken vier Lösungsansätze unterschieden werden: Ein Schutz kann durch eine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit, das Vorhalten einer ausreichenden Duktilität, den Einbau von Schwingungstilgern oder durch Basisisolierung erreicht werden. Diese einzelnen Ansätze sind in den Erläuterungen des Leitfadens genauer beschrieben.
- (3) Die Konzepte ausreichender Festigkeit und Steifigkeit sowie die dissipative Auslegung der zu bemessenden Struktur sind durch die Regelungen in DIN EN 1998-1 abgedeckt.
- (4) Die auf die Struktur einwirkende Schwingungsenergie kann durch den Einsatz passiver oder aktiver Feder-/Dämpfersysteme vermindert werden.
- (5) Für die Auslegung von Basisisolierung und zur Bemessung basisisolierter Bauwerke gilt DIN EN 1998-1 Abschnitt 10.

10 Beurteilung bestehender Anlagen

- (1) Die vorhandene Erdbebensicherheit von Anlagen hängt neben der korrekten erdbebengerechten Bemessung auch immer von der fehlerfreien Errichtung und dem aktuellen Anlagenzustand ab.
- (2) Es gelten die Regelungen der DIN EN 1998-3 („Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden“). Zur Übertragung dieser Regelungen auf Anlagen der Chemischen Industrie oder verwandter Industrie gelten darüber hinaus die folgenden Unterabschnitte.
- (3) Bestehende Anlagen, die Betriebsbereich oder Teil eines Betriebsbereichs (gemäß BImSchG §3 Abs. 5a) mit erweiterten Pflichten sind, sind bei baulichen Veränderungen oder Nutzungsänderungen sowie darüber hinaus im Rahmen der regelmäßigen Überprüfung des Sicherheitsberichtes nach 12. BImSchV auch auf

die Auswirkung von Erdbeben zu beurteilen. Zeigen sich dabei Defizite hinsichtlich der Erdbebensicherheit, ist die Anlage in angemessener Weise zu ertüchtigen (Abschnitt 10.2).

- (4) Bei Erreichen oder Überschreiten der in Anhang I Spalte 5 der 12. BImSchV (erweiterte Pflichten) genannten Mengenschwellen im Betriebsbereich sind die Auslegung, Errichtung, Betrieb und Wartung sicherheitsrelevanter Anlagenteile zu dokumentieren.

10.1 Zustandserfassung

- (1) Basis der Zustandserfassung einer Anlagenkonstruktion bezüglich ihrer seismischen Widerstandsfähigkeit sind

- Bauwerksakten und Bestandsstatik,
- Zeichnungen und Stücklisten der Anlagenkomponenten,
- einschlägige Normen und Richtlinien, auch aus damaliger Bauzeit,
- Vor-Ort-Untersuchungen des Bauwerks und der Anlagenkomponenten.

Die Zuverlässigkeit der Zustandserfassung steigt mit der Vollständigkeit der zugrunde gelegten Informationen.

- (2) Folgende Informationen sind der Beurteilung des Bauwerks zugrunde zu legen:

- Horizontales Aussteifungssystem im Hinblick auf die erdbebengerechten Entwurfskriterien,
- Art der Gründung,
- Vorliegende Bodenverhältnisse,
- Abmessungen des Bauwerks, Querschnittswerte der tragenden Bauteile sowie mechanische Eigenschaften
- Zustand der verwendeten Materialien (Korrosion, Werkstofffehler),
- Qualität der konstruktiven Durchbildung,
- Regelwerke, die der ursprünglichen Konstruktion des Bauwerks zugrunde lagen,
- Gegenwärtige oder geplante Nutzung des Bauwerks im Hinblick auf die Bedeutungskategorie,
- Betriebslasten, Füllzustände, Betriebstemperaturen, etc.
- Art und Ausmaß vorangegangener und vorhandener Schäden; ggf. auch Art und Ausmaß vorangegangener Sanierungsmaßnahmen.

- (3) Ziel der Zustandserfassung und der darauf folgenden Evaluierung ist die Lokalisierung stark gefährdeter Anlagenbereiche und die Identifizierung der größten

Risiken. Dazu kann der Evaluationsbogen in den Erläuterungen des Leitfadens verwendet werden.

- (4) Ergibt die Evaluierung, dass deutliche oder gravierende Mängel vorliegen, sind rechnerische Untersuchungen durchzuführen und das Bauwerk bzw. die Komponente ggf. zu ertüchtigen.

10.2 Ertüchtigung

- (1) Eventueller Handlungsbedarf zur Reduzierung der Gefährdung von Menschen und Umwelt ist unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zu ermitteln.
- (2) Bauliche Maßnahmen stehen im Vordergrund der Ertüchtigung. Sie haben das Ziel, die Standsicherheit der Anlage auf ein angemessenes Niveau zu erhöhen.
- (3) Für das ertüchtigte Bauwerk ist der Nachweis der Standsicherheit nach Abschnitt 7.2 dieses Leitfadens zu erbringen. Der Nachweis der Schadensbegrenzung nach Abschnitt 7.3 dieses Leitfadens kann durchgeführt werden, wenn dies vom Betreiber der Anlage gewünscht ist.
- (4) Bei den rechnerischen Nachweisen sind Unsicherheiten bei der Bestimmung des Ist-Zustands zu berücksichtigen, indem die Eigenschaften auf der Widerstandsseite durch Division durch einen Konfidenzbeiwert nach DIN EN 1998-3, Absatz 3.3.1(4) bzw. Absatz 3.5 (1) abgemindert werden.
- (5) Die Rechenmodelle können hinsichtlich der Steifigkeits- und Massenverhältnisse mit den Ergebnissen aus Eigenfrequenzmessungen kalibriert werden.
- (6) Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Lösung kann das Risiko für Personen und Umwelt auch durch betriebliche Maßnahmen reduziert werden, so dass sich die Notwendigkeit und der Umfang der baulichen Maßnahmen verändert.

11 Literaturangaben

Die relevante Literatur wird in den Erläuterungen des Leitfadens angegeben.