Schwächen statt Verstärken bei der Erdbebensanierung

Autor(en): **Bachmann, Hugo / Wenk, Thomas**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 3

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79863

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

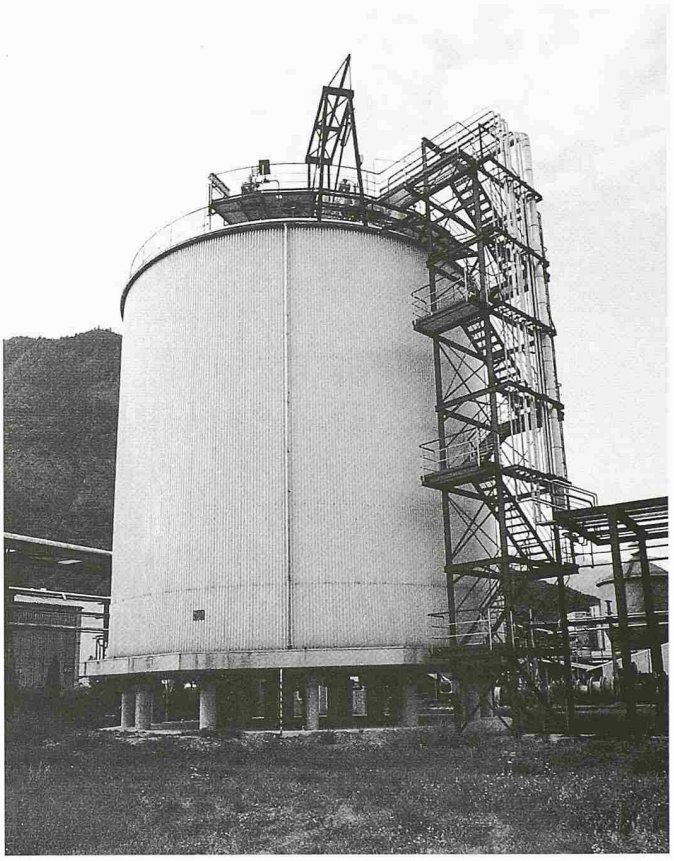
http://www.e-periodica.ch

Hugo Bachmann, Thomas Wenk, Zürich

Schwächen statt Verstärken bei der Erdbebensanierung

MG. Der Artikel ist der IBK-Publikation SP-007, der Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Edoardo Anderheggen, entnommen. Er wurde für diese Publikation leicht überarbeitet.

Bei der Erdbebensicherung von Bauwerken denken manche Bauingenieure immer noch statisch und monodirektional statt dynamisch und zyklisch, und die Erdbebensanierung bestehender Bauwerke wird mit einer Verstärkung des Tragwerks gleichgesetzt. Demgegenüber zeigt das nachfolgend beschriebene Beispiel eines Flüssiggas-Grosstanks, dass in bestimmten Fällen dynamische Überlegungen auch zu einer Schwächung des Tragwerks und gerade damit zu einer bedeutend besseren Lösung führen können.



1
Grosstank zur Lagerung von 1000 Tonnen Flüssiggas mit Treppen- und Leitungsturm

Über 90% der bestehenden Bauwerke in der Schweiz sind nicht oder nur nach veralteten Regeln für Erdbeben bemessen worden. Sie haben im Allgemeinen eine nicht näher bekannte, oft aber ungenügende Erdbebensicherheit. Darunter gibt es zahlreiche gefährliche Bauwerke, die schon bei einem mässig starken Erdbeben einstürzen würden. Besonders gefährlich können Bauwerke und Anlagen sein, die nicht nur selbst zerstört würden, sondern im Falle einer Zerstörung auch ein hohes Gefährdungspotential nach aussen, d.h. für die Umgebung und die Umwelt, aufwiesen. Dazu gehören gewisse Chemieanlagen. Es liegt deshalb im Interesse sowohl der Eigentümer als auch der Allgemeinheit, dass in einigen Fällen die Verantwortlichen mögliche Probleme erkannt und entsprechende Massnahmen eingeleitet haben.

Gefährliche Chemieanlagen

Im Rahmen der Risiko-Überprüfung einer bestehenden Chemieanlage zeigte sich, dass einige Objekte aus den 70er und 80er Jahren den heutigen Anforderungen an die Erdbebensicherheit nicht genügten. Dazu gehörte der zylindrische Grosstank zur Lagerung von bis zu 1000 Tonnen Flüssiggas gemäss Bild 1. Der Behälter aus Stahl hat einen Durchmesser von 15 m und eine Höhe von 16 m; er ist doppelwandig und enthält die Einrichtungen zur Abkühlung des Gases auf rund -30 °C. Der Behälter ruht auf einer Stahlbetonkonstruktion gemäss Bild 2, bestehend aus einer achteckigen und 0,5 m dicken Platte auf 26 rund 2,5 m hohen Stützen, die durch Bohrpfähle von rund 13 m Länge getragen werden. Zum Behälter gehört ein Treppen- und Leitungsturm aus einer Stahlkonstruktion mit den zum Betrieb des Tanks nötigen Zuleitungen.

Eingehende Untersuchungen der Erdbebensicherheit für das Bemessungsbeben der Norm SIA 160 [1] hatten gezeigt, dass im bestehenden Zustand die Stahlbetonstützen und die Pfähle vor allem durch horizontale Kräfte (Biegemomente und Querkräfte), aber auch durch das Kippmoment (Normalkräfte) krass überbeansprucht waren. Zudem ergab sich, dass die vorhandene konstruktive Ausbildung keine wesentliche Duktilität bot. Es musste damit gerechnet werden, dass bei einem Erdbeben die Stahlbetonkonstruktion versagen, der Stahlbehälter platzen und das Gas austreten würde, was verheerende Folgen für die Umgebung und die Umwelt hätte haben können.

Grundidee für die Erdbebensanierung

Zur Erdbebensanierung bestehender Bauwerke kommen als Massnahmen beim Tragwerk folgende Strategien in Betracht:

- Verstärkung zur Vergrösserung des Tragwiderstandes.
- Erhöhung der Duktilität zur Vergrösserung der Energiedissipation.
- Versteifung zur Verschiebung der massgebenden Eigenfrequenz in den hochfrequenten niedrigspektralen Bereich des Beschleunigungs-Antwortspektrums, um die Spektralwerte der Beschleunigung bzw. der wirksamen Erdbebenkräfte sowie die Verschiebungen und Verformungen zu reduzieren.
- Schwächung zur Verschiebung der massgebenden Eigenfrequenz in den niedrigfrequenten niedrigspektralen Bereich des Beschleunigungs-Antwortspektrums, um die Spektralwerte der Beschleunigung bzw. der wirksamen Erdbebenkräfte bei gleichzeitiger Vergrösserung der Verschiebungen und Verformungen zu reduzieren.

- Erhöhung der Dämpfung, um die Spektralwerte der Beschleunigung bzw. der wirksamen Erdbebenkräfte sowie die Verschiebungen und Verformungen zu reduzieren.

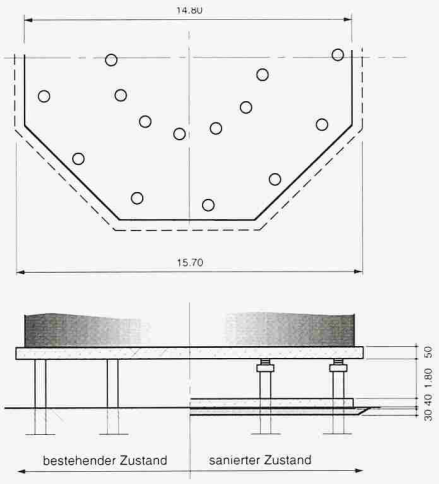
Manche Bauingenieure denken bei praktischen Fällen der Erdbebensanierung vor allem an eine Verstärkung des Tragwerks, um den Tragwiderstand zu vergrössern, weil sie die Erdbebeneinwirkung nur als Einwirkung von Kräften (Ersatzkraftverfahren) sehen. Dies entspricht einem «statischen Denken». Erdbeben bewirken aber rasche Hin- und Herbewegungen des Bodens und eine entsprechende dynamische Antwort der Bau- und Tragwerke, was ein «dynamisches Denken» erfordert.

Im Falle dieses Grosstanks hätte eine an sich mögliche Verstärkung des Tragwerks, z.B. durch zusätzliche geneigte Abstützungen oder Stahlbetontragwände und entsprechende Fundationen, die folgenden Nachteile gehabt:

- Die Grundfrequenz hätte immer noch im hochspektralen «Plateaubereich» des Beschleunigungs-Antwortspektrums gelegen, mit entsprechend hohen Erdbebenkräften.
- Es hätte keine Verminderung der Bruchgefahr beim Stahlbehälter (Platzen nach «Elephant footing» durch Beulen) erreicht werden können.

Demgegenüber bot das Konzept einer «schwimmenden Lagerung» durch den Einbau von speziellen, horizontal weichen und zugleich hochdämpfenden Gummilagern in die Stützen eine sehr viel bessere und kostengünstigere Lösung. Die angewandte Grundidee der Erdbebensanierung war somit die Schwächung des Tragwerks zur Verkleinerung der massgebenden ersten Eigenfrequenz, um den entsprechenden Spektralwert der Beschleunigung zu reduzieren. Mit dieser Frequenzverschiebung und bei gleichzeitiger erheblicher Erhöhung der Dämpfung gelang eine drastische Reduktion der wirksamen Erdbebenkräfte. Damit liess sich auch die Bruchgefahr beim Stahlbehälter eliminieren.

Phänomenologisch kann das Verhalten des schwimmend gelagerten Grosstanks im Sinne eines Grenzfalls folgendermassen umschrieben werden: Wenn sich der Boden horizontal rasch hin und her bewegt, bleiben dank der horizontal weichen Lagerung die bestehende Stahlbetonplatte und der Tank mit Inhalt infolge ihrer Massenträgheit mehr oder weniger etwa dort, wo sie vor dem Erdbeben schon waren. Die auf die Stützen einwirkenden horizontalen Kräfte bestehen nur noch aus den relativ kleinen Rückstellkräften in den Lagern.



2
Bestehender und sanierter Zustand, erreicht durch den Einbau von 26 Erdbebenlagern und einer Betonplatte

Ambient-Vibration-Versuche

Erfahrungsgemäss ist es oft schwierig, die dynamischen Eigenschaften wie Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfung eines Bauwerks auf rechnerische Weise zutreffend abzuschätzen. Das war auch hier der Fall, vor allem weil der Einfluss des relativ weichen Untergrunds recht unsicher war. Zur Eichung von Berechnungsmodellen benötigte man jedoch mindestens die Werte der Grundschwingungsform. Deshalb wurden Ambient-Vibration-Versuche durchgeführt. An insgesamt 40 über das Bauwerk verteilten Punkten, davon einer auf dem festen Terrain, wurden die von externen Quellen (Industrie, Verkehr) stammenden Schwingungen durch hochempfindliche Beschleunigungsgeber gemessen. Aus den Resultaten konnten die für den aktuellen Tankinhalt von 160 Tonnen Flüssiggas gültigen fünf ersten Eigenformen und zugehörigen Eigenfrequenzen zwischen 3,8 Hz und 6,1 Hz ermittelt werden. Diese Frequenzen charakterisieren das Schwingungsverhalten bei sehr kleinen Amplituden. Sie können als obere Grenzwerte für das dynamische Verhalten des Tanks bei Erdbebenanregung betrachtet werden, wo infolge zunehmender Rissebildung, Plastifizierungen usw. ein gewisser Steifigkeitsabfall zu erwarten ist. Die zu den Eigenformen gehörenden Dämpfungsmasse liessen sich bei diesem Tank nicht bestimmen. Bei einem ähnlichen Objekt in der Nähe war jedoch das Dämpfungsmass der Grundschwingungsform im Mittel zu etwa 2% gemessen worden, so dass für Rechenzwecke dieser Wert auch hier angenommen wurde. Dieses bei sehr kleinen Amplituden bestimmte Dämpfungsmass kann als unterer Grenzwert der bei Erdbebenanregung zu erwartenden Dämpfung gelten.

Einfluss des lokalen Standorts auf die Erdbebenanregung

Am Standort des Grosstanks war ein eiszeitliches, ursprünglich trogförmiges Tal zunächst mit Grundmoräne und später mit teilweise feinkörnigen Fluss- und Seeablagerungen von insgesamt 100 bis 200 m Mächtigkeit verfüllt worden. Die Scherwellengeschwindigkeit in Tiefen bis 40 m unter Terrain liegt im Bereich von 300 bis 400 m/s. Bereits in der Norm SIA 160 aus dem Jahre 1989 findet sich der folgende Hinweis: «Für Bauwerke auf weichen Böden aus schwach konsolidierten nacheiszeitlichen Ablagerungen ... sind bei Flachfundationen und schwimmenden Pfahlfundationen spezielle Untersuchungen zur Festlegung der Spektralwerte erforderlich.» Inzwischen ist das Wissen über den Einfluss lokaler Standortbedingungen gewachsen, und die Fachwelt ist sich einig, dass bei bedeutenderen Bauwerken der Einfluss des lokalen Standorts auf die Erdbebenanregung berücksichtigt werden sollte [2].

Ein entscheidender Faktor ist die Grundfrequenz des Baugrunds, die durch Messung der allgemeinen Bodenunruhe

An der Erdbebensanierung Beteiligte

Bauherr:
Lonza AG, Basel und Visp (R. Madöry und P. Gass)

Experte und Vorprojekt:
Prof. Dr. H. Bachmann, ETH Zürich

Lineare und nichtlineare dynamische Berechnungen:
T. Wenk, ETH Zürich

Ambient-Vibration-Versuche:
Empa Dübendorf (Dr. R. Cantieni)

Abklärung und Messungen Einfluss des Baugrundes:
Basler & Hofmann, Zürich (P. Zwicky), und Schweizerischer Erdbebendienst

Herstellung und Lieferung Erdbebenlager:
Alga S.p.A., Milano (Dr. A. Marioni)

Überwachung Abnahmeversuche Erdbebenlager:
ISMES, Bergamo (G. Bonacina)

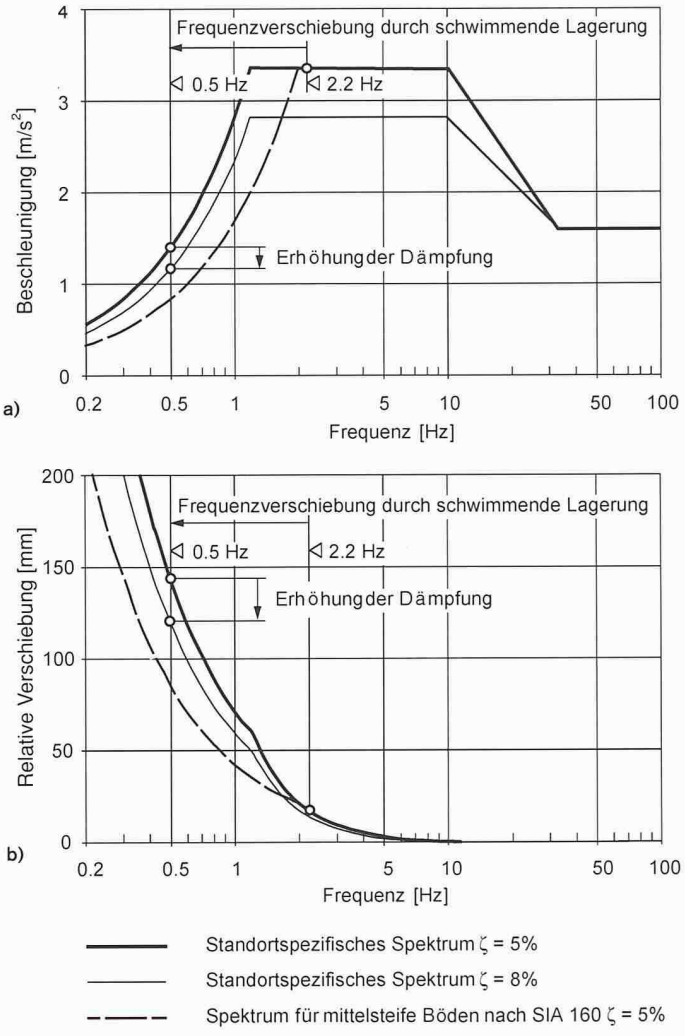
Ausführungsplanung und Bauüberwachung:
Ingenieurbüro KBM, Sitten (P. Missbauer)

Baumeisterarbeiten Bodenplatte:
Regotz + Furrer AG, Visp

Hebearbeiten:
Geniteam SA, Aclens (M. Corpataux)

Einbau der Erdbebenlager und spezielle Baumeisterarbeiten:
U. Imboden AG, Visp

nach der Nakamura-Methode abgeschätzt werden kann [4]. Gerade bei einer Sanierungsmassnahme durch Frequenzverschiebung muss sichergestellt sein, dass das sanierte Bauwerk nicht in Resonanz mit der Bodenbewegung kommt. Im vorliegenden Fall resultierte nach der Nakamura-Methode eine Resonanzfrequenz des Baugrunds von 1,5 Hz. Die Berechnung an einem Schubbalkenmodell des Bodens ergab einen ähnlichen Wert für die Grundfrequenz. Dementsprechend wurde das standortspezifische Beschleunigungs-Antwortspektrum aus dem in der Norm SIA 160 gegebenen Antwortspektrum für mittelsteife Böden und Zone 3b durch Verminderung der Eckfrequenz von 2 auf 1,2 Hz abgeleitet (Bild 3a). Der Amplifikationsfaktor der Beschleunigungen («Plateauwert») wurde entsprechend den Spektren der Norm SIA 160 unverändert beibehalten. Bild 3b zeigt die den Beschleunigungs-Antwortspektren entsprechenden Verschiebungs-Antwortspektren. Man erkennt, dass bei einer Frequenzverschiebung nach links die relativen Verschiebungen stark zunehmen.



3
Bemessungs-Antwortspektren.
a) Beschleunigungsspektren, b) Verschiebungsspektren

Erdbebenlager

Die Technologie der Erdbebenlager verschiedenster Arten und im Besonderen von geschichteten Gummilagern («multilayer elastomeric bearings») hat in letzter Zeit grosse Fortschritte gemacht. Bild 4 zeigt den hier verwendeten Typ. Geometrische Grössen wie Durchmesser, Höhe, Dicke der Gummischichten, Bewehrungsplatten usw. sowie die technologische Zusammensetzung der Gummimischung lassen sich in weiten Grenzen variieren. Damit können die Steifigkeiten und ein gewünschtes Hystereseverhalten mit einer entsprechenden äquivalenten viskosen Dämpfung den Bedürfnissen aus der dynamischen Berechnung angepasst werden.

Bild 5 zeigt das idealisierte Hysteresegesetz der Lager mit seinen charakteristischen Grössen. Im Rahmen einer Vorbemessung wird vorerst die Grundfläche eines Lagers so gewählt, dass die Pressungen infolge ständiger vertikaler Lasten, des Kippmoments aus einer linearen dynamischen Berechnung für das Bemessungsbeben sowie eventuell auch infolge der vertikalen Erdbebenanregung bestimmte, vom Lagerhersteller angegebene Werte (z.B. 6-8 N/mm²) nicht übersteigen. Die Höhe des Lagers bzw. die Summe der Dicken der Gummischichten ist durch das erforderliche Verhalten unter horizontalen Kräften H determiniert. Bei einer Schubverzerrung der Gummischichten von 100% muss die Sekantensteifigkeit k den am linearen Einmassenschwinger für das Bemessungsbeben ermittelten Grössen (Kraft $H = H_{max}$ und Verschiebung $x = x_{max}$) entsprechen.

Für eine nichtlineare dynamische Berechnung sind zusätzlich die Steifigkeiten k_1 und k_2 so anzunehmen, dass das resultierende äquivalente viskose Dämpfungsmass ζ gemäss [5] dem tatsächlichen Lagerverhalten möglichst gut entspricht:

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_d}{E_p}$$

E_d: Dissipierte Energie eines Zyklus
E_p: Potentielle Energie bei maximaler Verschiebung

Die dissipierte Energie eines Zyklus entspricht dem Flächeninhalt der Hysteresekurve.

Bemessungsbedingungen

Der Bemessung und den Nachweisen lagen grundsätzlich die Normen SIA 160 (Einwirkungen auf Tragwerke) und SIA 162 (Betonbauten) zugrunde. In Anbetracht von Bedeutung und Risiken des Bauwerks sollte dieses den Anforderungen der Bauwerksklasse III nach SIA 160 genügen und sich unter dem standortspezifischen Bemessungsbeben im Wesentlichen noch elastisch verhalten.

Im Weiteren wurden die folgenden Annahmen getroffen (K und C_d gemäss Norm SIA 160, λ_o gemäss [6]):

- Verformungsbeiwert K = 1: elastisches Verhalten.
- Bemessungsbeiwert $C_d = 1$: zusätzliche Sicherheit.
- Der Überfestigkeitsfaktor $\lambda_o \approx 1{,}25$ und der Widerstandsfaktor $\gamma_R = 1{,}2$ werden entweder direkt berücksichtigt (sofern auf unsicherer Seite) oder vernachlässigt (sofern auf sicherer Seite).
- Für die Dämpfung wurden bei den dynamischen Handberechnungen des Vorprojekts die folgenden Werte angenommen (ζ = äquivalentes viskoses Dämpfungsmass):
  - $\zeta = 5\%$ für die Berechnung des Istzustands (liegt mit für das Objekt ge-

schätzten ~2% und praktisch keinen dissipativen nichttragenden Elementen eher auf der unsicheren Seite)
- $\zeta = 5\%$ für die Berechnung des Neuzustandes (liegt mit $\zeta \geq 8\%$ für die Erdbebenlager und $\zeta = 2\%$ für die übrige Struktur eher auf der sicheren Seite).

Für weitere Grundlagen und das allgemeine Vorgehen wurden Angaben in [6] benützt.

Vorprojekt mittels dynamischer Handberechnungen

Im Rahmen des Vorprojekts mit dynamischen Handberechnungen liess sich der Tank mit genügender Genauigkeit als linearer Einmassenschwinger modellieren. Es war der Zustand des vollen Tanks mit 1000 Tonnen Flüssiggas massgebend. Dessen horizontale Grundfrequenz konnte durch eine einfache Umrechnung der Resultate der Ambient-Vibration-Versuche auf 2,2 Hz geschätzt werden. Zur Realisierung der Grundidee für die Erdbebensanierung wurde angestrebt, diese Frequenz auf rund 0,5 Hz zu senken (Bild 3). Die zur Frequenzverschiebung erforderlichen Erdbebenlager wurden am oberen Ende der Stützen und somit unmittelbar unter der bestehenden Stahlbetonplatte vorgesehen (Bild 2). Eine erste Bemessung aufgrund von Richtwerten ergab vorerst einen Lagerdurchmesser von 450 mm und eine Lagerhöhe (ohne externe Stahlplatten) von rund 200 mm; diese Werte konnten später auf 300 bzw. 165 mm vermindert werden.

Um die im bestehenden Zustand krass überbeanspruchten Betonstützen und Pfähle angemessen zu entlasten, genügte die Reduktion der am Stützenkopf angreifenden Erdbebenkräfte jedoch nicht. Es wurde daher vorgeschlagen, unterhalb der Lager eine mit den Stützen biegesteif zu verbindende neue Stahlbetonplatte einzubauen, um Folgendes zu erreichen:
- Verkleinerung des Hebelarms der horizontalen Lagerkräfte und Verteilung der Beanspruchungen durch Rahmenwirkung
- Schaffung einer praktisch starren horizontalen Verbindung zwischen den 26 Stützen, so dass diese unter Erdbeben keine relativen horizontalen Verschiebungen erfahren können (nur synchrone Verschiebungen)
- Übertragung der vertikalen Kräfte aus den provisorischen Abstützungen im Bauzustand mit hydraulischen Pressen auf die Pfähle und den Baugrund (siehe Abschnitt Bauvorgang).

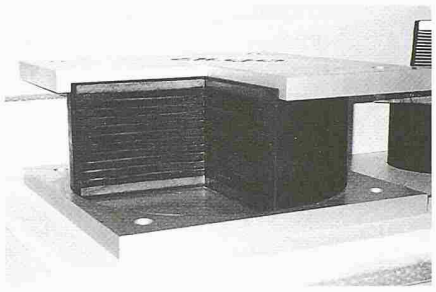
Die Höhenlage der neuen Stahlbetonplatte wurde vorerst rund einen Meter unterhalb der Erdbebenlager angenommen. Eine Optimierung im Rahmen der später für das Ausführungsprojekt durchgeführten dynamischen Berechnungen erlaubte dann eine tiefere Lage (Bild 2), was auch Vorteile für die Bauausführung und die Zugänglichkeit der Erdbebenlager mit sich brachte. Weitere Handberechnungen betrafen die folgenden Punkte:
- Biege- und Schubbeanspruchung der Stützen
- Vertikalkraft auf Randstützen aus Kippmoment
- Vertikalkraft auf Stützen durch vertikale Erdbebenanregung
- Durchstanzen Stützen-bestehende Betonplatte
- Vertikalkraft auf Randpfähle aus Rahmenwirkung der neuen Stahlbetonplatte
- Biege- und Schubverbindung von Stützen und neuer Stahlbetonplatte.

Wie sich später im Ausführungsprojekt zeigte, konnten mit den Handberechnungen des Vorprojekts alle massgebenden Beanspruchungen auf 10 bis 20% genau abgeschätzt werden.

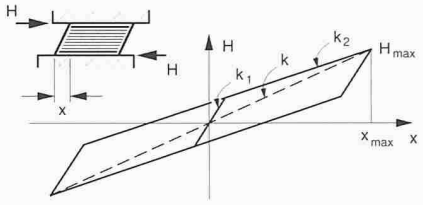
Lineare und nichtlineare dynamische Berechnungen

Die dynamischen Berechnungen für das Ausführungsprojekt an ebenen FE-Modellen (finite Elemente) des Gesamtsystems erfolgten mit dem Programm Abaqus. Dabei wurden wichtige Parameter wie Lagersteifigkeiten und -stoffgesetze, Dämpfung, Höhenlage der neuen Betonplatte, Berechnungsverfahren usw. systematisch variiert und soweit nötig optimiert. Wegen der Schlankheit des Tanks ist der relativ zur Tankwand bewegte Teil der Flüssigkeit klein. Zudem zeigte eine Abschätzung der Schwappfrequenz gemäss [3], dass diese nur etwa die Hälfte der neuen Bauwerksfrequenz von 0,5 Hz beträgt und somit keine Resonanzgefahr bestand. Daher wurde bei allen Berechnungen eine starre Flüssigkeit vorausgesetzt und somit das Hin- und Herschwappen derselben vernachlässigt.

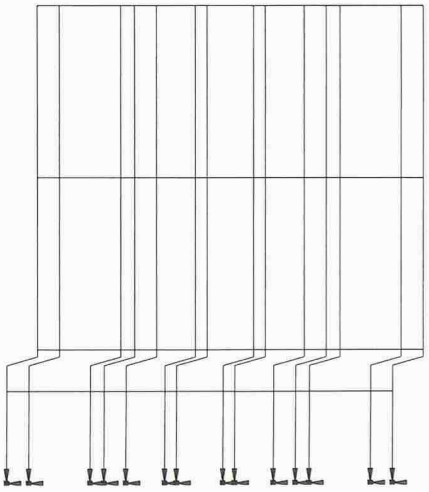
Vorerst wurde das FE-Modell für den bestehenden Zustand mit den Ergebnissen der Ambient-Vibration-Versuche für den fast leeren Tank kalibriert. Die Lage des Einspannhorizonts (feste Einspannung) der Pfähle im ziemlich weichen Baugrund ergab sich aus der Übereinstimmung der Grundfrequenzen von Modell und Messung. Dann folgte für den bestehenden Zustand mit vollem Tank eine lineare dynamische Berechnung mit dem Antwortspektrenverfahren und $\zeta = 2\%$, die die in den Handberechnungen festgestellte enorme Überbeanspruchung bestätigte. Eine lineare dynamische Berechnung mit dem Antwortspektrenverfahren für den Neuzustand mit den Erdbebenlagern und der neuen Betonplatte ($\zeta = 8\%$ für die erste Eigenform und $\zeta = 2\%$ für die höheren Eigenformen) zeigte die gewünschte beträchtliche Reduktion der Beanspruchungen. Die Modellierung der Lager erfolgte mit linearen, horizontalen und vertikalen Federelementen entsprechend der Sekantensteifigkeit. Weitere Berechnungen mit dem Antwortspektrenverfahren führten dann zu der auch bezüglich Bauausführung optimalen Höhenlage der Betonplatte. Bild 6 zeigt als Beispiel für die lineare FE-Berechnung die erste Eigenform des sanierten Tanks mit einer Frequenz von 0,5 Hz.



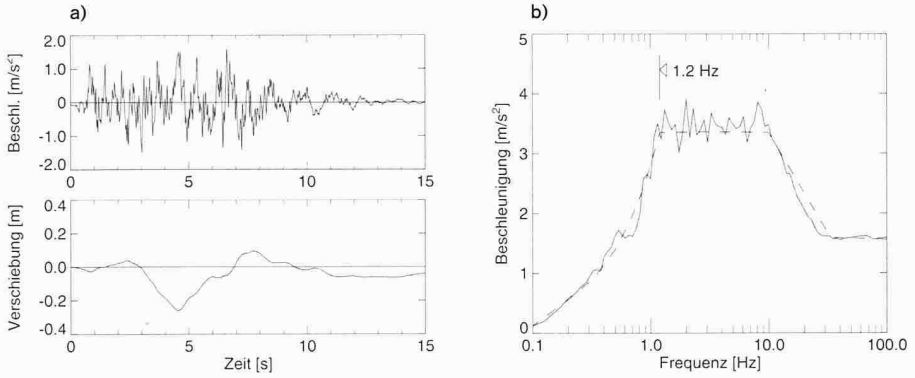
4
Geschichtetes Erdbeben-Gummilager



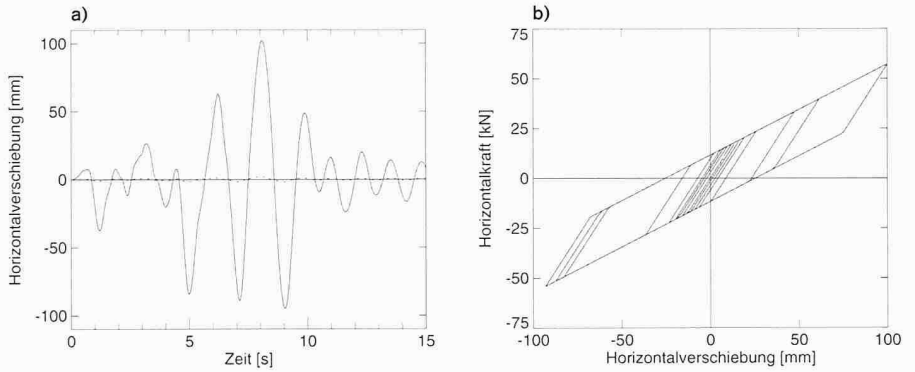
5
Idealisiertes Hysteresegesetz der Erdbeben-Gummilager. H: Horizontalkraft, x: Lagerverschiebung, k_1: Anfangssteifigkeit, k_2: Tangentensteifigkeit, k: Sekantensteifigkeit



6
Erste Eigenform des sanierten Tanks mit einer Frequenz von 0,5 Hz



7
a) Zeitverläufe der Bodenbewegung des künstlichen Erdbebens und
b) Antwortspektren der Beschleunigung für $\zeta = 5\%$



8
a) Zeitverlauf der horizontalen Relativverschiebungen oberhalb (ausgezogene Linie) und unterhalb (gestrichelte Linie) der Lager und
b) Kraft-Hysteresekurve eines Lagers

Schliesslich folgte für das optimierte System eine nichtlineare Berechnung mit Integration der Bewegungsdifferentialgleichungen im Zeitbereich. In horizontaler Richtung modellierte ein elastoplastisches Federelement mit kinematischer Verfestigung die Lager, um ein Verhalten gemäss dem bilinearen Hysteresegesetz (Bild 5) zu erreichen. In vertikaler Richtung modellierten lineare Federelemente die Lager. Die Dämpfung erfolgte direkt durch das Hystereseverhalten der Lagerelemente, ohne dass ein äquivalentes viskoses Dämpfungsmass angenommen werden musste. Ein künstlich generiertes Erdbeben, dessen Beschleunigungs-Antwortspektrum kompatibel zum standortspezifischen Bemessungsspektrum mit einer unteren Eckfrequenz von 1,2 Hz war, diente als Anregung. Bild 7 zeigt die Zeitverläufe der Bodenbewegung (Beschleunigung und Verschiebung) und die Antwortspektren. Bild 8a zeigt den Zeitverlauf der horizontalen Relativverschiebungen ober- und unterhalb der Lager. In Bild 8b ist eine typische Kraft-Verschiebungs-Hysteresekurve eines Lagers dargestellt. Der Maximalwert der horizontalen Lagerverschiebung von 100 mm in Bild 8b gegenüber 116 mm nach dem Antwortspektrenverfahren bestätigt, dass die vereinfachenden Annahmen der linearen Berechnungen bezüglich Steifigkeit und Dämpfung auf der sicheren Seite lagen. Auch bezüglich der Beanspruchung bekräftigte die nichtlineare dynamische Berechnung das günstige Verhalten des sanierten Tanks vollumfänglich.

Abnahmeversuche mit den Erdbebenlagern

Um die Eigenschaften der Erdbebenlager zu überprüfen, führte die Herstellerfirma extern überwachte Abnahmeversuche durch. Damit auch eine Prüfung über die Bemessungsgrössen hinaus und bis zum Bruch möglich war, wurden 2 zusätzliche und somit insgesamt 28 Lager hergestellt. Vorerst wurden sämtliche Lager in axialer Richtung mit dreimaligem Aufbringen der Bemessungs-Normalkraft geprüft. Anschliessend wurden an einem Paar von zufällig ausgewählten Lagern Zwillingsversuche wie folgt durchgeführt:

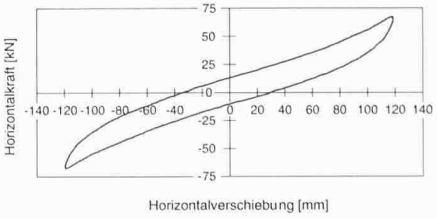
- Statisch-zyklische Schubversuche bei maximaler ständiger Normalkraft
- Dynamisch-zyklische Schubversuche mit 0,5 Hz bei drei verschiedenen Normalkraft-Stufen
- Statische Schubversuche bei maximaler Bemessungs-Normalkraft bis zum Bruch.

Bild 9 zeigt als Beispiel die Hysteresekurve aus den dynamisch-zyklischen Schubversuchen bei um 15% erhöhter maximaler ständiger Normalkraft nach drei Zyklen mit einer maximalen Verschiebung von ± 120 mm, was einer Schubverzerrung der Gummischichten von 115% entspricht. Die äquivalente viskose Dämpfung - entsprechend dem Flächeninhalt der Hysteresekurve - beträgt 11,3%. Der Vergleich mit dem in der nichtlinearen dynamischen Berechnung angenommenen Hysteresegesetz von Bild 8b ergibt eine sehr gute Übereinstimmung. Bei den Bruchversuchen wurden je drei Zyklen mit ± 150, ± 180 und ± 210 mm Verschiebung gefahren. Das Versagen stellte sich erst bei einer Verschiebung von 240 mm ein, was mehr als das Doppelte der maximalen Verschiebung unter dem Bemessungsbeben (102 mm) ist und einer Schubverzerrung der Gummischichten von 230% (!) entspricht. Bild 10 zeigt die enorme Verformungsfähigkeit solcher Erdbebenlager.

Bauvorgang

Bei der Ausführung der Erdbebensanierung wurden vorerst der Kiessandkoffer und die neue Stahlbetonplatte samt deren Verbindung zu den bestehenden Stahlbetonstützen erstellt. Nach dem Erhärten der Platte wurden jeweils vier im

9
Hysteresekurve von dynamischen Abnahmeversuchen mit den Erdbebenlagern



Grundriss verteilte Betonstützen gleichzeitig wie folgt behandelt:

- Einbau von zwei Stahlprofilstützen mit hydraulischen Pressen neben der Betonstütze, mit Steigerung des Pressendrucks bis zur Entlastung der Betonstütze (Extensometermessung)
- Herausschneiden eines 24 cm hohen Stücks am Kopf der Betonstütze
- Versetzen der Erdbebenlager und Belasten derselben mit Flachpressen bis zu der bei der Entlastung gemessenen Stützenkraft
- Ausbau der Stahlprofilstützen, Bewehren und Betonieren der Stützenköpfe.

Bild 11 zeigt einige Stützen mit den eingebauten Erdbebenlagern, die dann noch mit einer Brandschutzverkleidung versehen wurden.

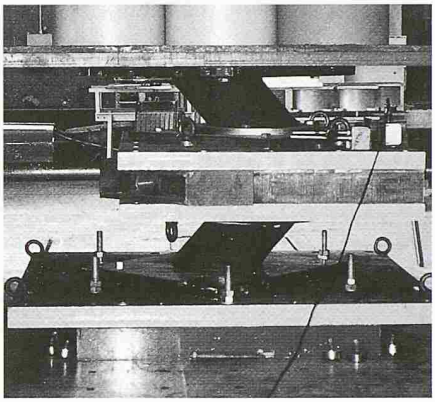
Treppen- und Leitungsturm

Die schwimmende Lagerung des Grosstanks führt im Falle eines Erdbebens zu nur noch kleinen einwirkenden Kräften, aber zu beträchtlichen Relativverschiebungen zur Umgebung. Deshalb wurden auch der Treppen- und Leitungsturm und die Leitungen (Bild 1) inklusive Befestigungen rechnerisch und konstruktiv überprüft und so gestaltet, dass ein allseitiger Spielraum von mindestens 200 mm und somit ein weitgehend freies Schwingen aller Teile ohne Beeinträchtigung von Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit möglich ist.

Folgerungen

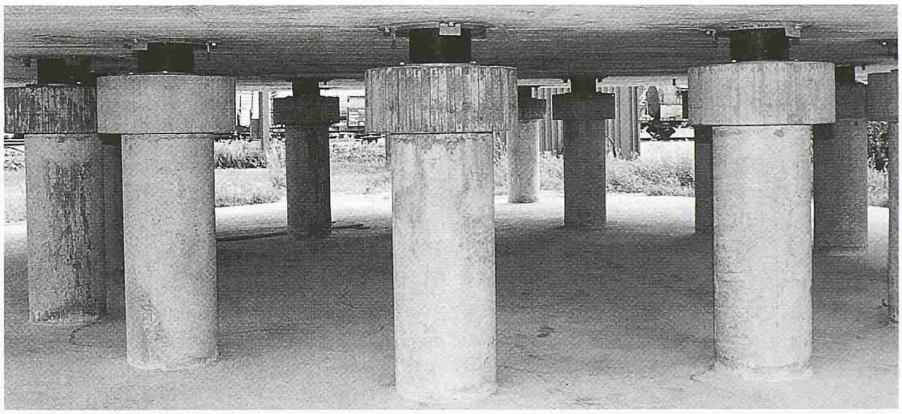
Bei der Erdbebensanierung bestehender Bauwerke ist stets sorgfältig zu prüfen, welche von oft mehreren möglichen Strategien zweckmässig ist. Entsprechend der dynamischen Antwort der Bauwerke ist ein «dynamisches Denken» des Bauingenieurs erforderlich. Das meist gewohnte und viel geübte «statische Denken» führt oft zu Fehlleistungen. Je nach den Gegebenheiten bringt eine gezielte Schwächung anstelle einer Verstärkung grosse Vorteile. Die Schwächung kann durch den Einbau von speziellen Erdbebenlagern erfolgen, der eine Frequenzverschiebung des Bauwerks in den niedrigspektralen Bereich des Beschleunigungs-Antwortspektrums der Erdbebeneinwirkung und damit eine drastische Reduktion der Erdbebenkräfte bewirkt.

Adresse der Verfasser:
Hugo Bachmann, Prof. Dr. sc. techn., *Thomas Wenk*, dipl. Bauing. ETH, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich



10
Verformung zweier Erdbebenlager beim statischen Bruchversuch

11
Ansicht von Stützen mit Erdbebenlagern (oben) und neuer Stahlbetonplatte (unten) nach der Erdbebensanierung



Literatur

[1]
Norm SIA 160: Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein (SIA), Zürich 1989

[2]
Koller M.G.: Strategien zur Erdbebensicherung bestehender Bauwerke unter Berücksichtigung des Standorteinflusses. In «Erdbebensicherung bestehender Bauwerke und aktuelle Fragen der Baudynamik», Referate der D-A-CH-Tagung 25./26. September 1997. SGEB/SIA-Dokumentation D 0145, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich

[3]
Eurocode 8 - Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen. Europäische Vornorm ENV 1998-4. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1998

[4]
Wenk T., Lacave C., Peter K.: Adana-Ceyhan, Turquie, séisme du 27 juin 1998. Ingénieurs et architectes suisses, Bulletin No. 21, 7 octobre 1998. Auch erschienen als Sonderdruck Nr. 0021, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, November 1998

[5]
Bachmann H. et al.: Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines. 2nd edition, Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin, 1997

[6]
Bachmann H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin, 1995