

Schwingungsversuche am BOTA-Gebäude des KKW Beznau

Autor(en): **Zwicky, Peter / Tinic, Sener / Langer, Wenzel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 15

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77084>

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.

Sicherheit und Risiko

Schwingungsversuche am BOTA-Gebäude des KKW Beznau

Die Auslegungsanforderungen an die Gebäude und Ausrüstungen von Kernkraftwerken verlangen umfangreiche dynamische Modellrechnungen, insbesondere zum Nachweis der Erdbebensicherheit. Die Zuverlässigkeit der Modellannahmen kann in den seltensten Fällen durch das Gebäudeverhalten während den zugrundegelegten Auslegungslastfällen bestätigt werden. Mit den am Borwassertankgebäude in Beznau durchgeführten Schwingungsversuchen wurden erstmals für eine schweizerische Anlage experimentelle Grundlagen zur Validierung, bzw. Verbesserung der dynamischen Rechenmodelle erarbeitet.

Die Bauwerke und die für die Sicherheit wichtigen Ausrüstungen von Kernkraftwerken werden grundsätzlich

VON PETER ZWICKY,
ZÜRICH,
SENER TINIC UND
WENZEL LANGER,
BADEN

nebst den vorwiegend statisch wirkenden Lasten auch auf verschiedenartige dynamische Lastfälle ausgelegt. Zu diesem Zwecke werden umfangreiche dynamische Modellrechnungen durchgeführt. Für die Analyse des Erdbebenverhaltens werden Rechenmodelle erstellt, die das Schwingungsverhalten der aus dem Baugrund über das Fundament angeregten Gebäude wiedergeben sollen. Zur Modellierung sind Vereinfachungen vorzunehmen und Annahmen zu treffen, die zwar beträchtlichen Einfluss auf die Rechenergebnisse und somit auf die Auslegung haben, die aber in den seltensten Fällen am ausgeführten Bauwerk bestätigt werden können. Es besteht damit grundsätzlich ein Bedürfnis, die Modelle und Rechenmethoden an der Wirklichkeit zu messen und dadurch zu validieren bzw. zu ver-

bessern. Mit dieser Zielsetzung laufen weltweit Forschungsprojekte (z.B. BRD, Taiwan, Japan) bei welchen Gebäude oder Gebäudemodelle künstlich oder durch Erdbeben zu messbaren Schwingungen angeregt werden.

Im folgenden werden die bisher einzigen Schwingungsversuche an einem KKW-Gebäude in der Schweiz beschrieben. Diese Versuche am Borwassertank(BOTA)-Gebäude in Beznau wurden von einer Arbeitsgruppe, bestehend aus den Initianten der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG sowie Vertretern des Ingenieurbüros Basler & Hofmann und der ETH Zürich, geplant und geleitet.

Das Kernkraftwerk Beznau besteht aus zwei weitgehend identischen Anlagen mit je 350 MW Leistung. Beznau I steht seit Dezember 1969 und Beznau II seit Oktober 1971, abgesehen von den geplanten Werkabstellungen, rund um die Uhr in Betrieb. Gemäss Atomgesetz sind die für die Sicherheit massgebenden Systeme laufend – im notwendigen und zumutbaren Ausmass – dem Stand der Technik anzupassen. Eine solche grössere Anpassung wird gegenwärtig mit dem Nachrüstprojekt NANO vollzogen. Das im Jahre 1984/85 neu erstellte BOTA-Gebäude (Bild 1) kann als Teilprojekt von NANO betrachtet werden.

Zielsetzung

Die Schwingungsversuche hatten zum Ziel, die heute für dynamische Gebäudeanalysen allgemein angewandten Rechenmodelle zu validieren. Dazu sollte das Gebäude auf dem höchstmöglichen

Anregungsniveau untersucht werden, so dass die erzwungenen Beanspruchungen für ein Auslegungserdbeben möglichst repräsentativ seien. Eingeschränkt war aber die Anregungsstärke durch die Forderungen, dass weder das BOTA-Gebäude noch die darin enthaltenen Ausrüstungen (insbesondere die Stahltanks) beschädigt würden und dass der Betrieb der Anlagen KKB I und II in keiner Weise beeinträchtigt würde.

Aus den Schwingungsversuchen sollten die Eigenfrequenzen, Modalformen und modalen Dämpfungen der Gebäude / Baugrund-Interaktionsschwingungen und der massgebenden Gebäudeschwingungen bestimmt werden. Diese gemessenen modalen Kenngrössen waren mit den Ergebnissen von Modellrechnungen zu vergleichen, und die Unterschiede waren zu interpretieren.

Gebäude und Baugrund

Das BOTA-Gebäude ist eine quaderförmige, fensterlose Stahlbetonstruktur und ist 4,4 m tief im dichtgelagerten alluvialen Kies eingebettet. Ab etwa 16 m Tiefe geht der Baugrund in Fels über. Die Hauptabmessungen des Gebäudes betragen 26,1 m (Länge) x 13,5 m (Breite) x 26,1 m (Höhe). Das Gebäude ist durch eine 0,7 m starke Querwand symmetrisch geteilt.

In jeder Gebäudehälfte steht ein grosser zylindrischer Stahltank auf der Decke über dem Kellergeschoss. Die Tanks sind 17,5 m hoch, messen 10,6 m im Durchmesser und fassen 1500 m³ bo-riertes Wasser. Die gesamte Gebäudemasse bei vollen Tanks beträgt 9'300 t.

Vorausrechnungen

Vorausrechnungen des Gebäudeschwingungsverhaltens während der Versuche wurden unter verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt. Sie lieferten wichtige Grundlagen zur Planung der Versuche, insbesondere zur Festlegung des zulässigen Anregungsniveaus und der Anforderungen an den Versuchsaufbau. Zudem wurde mit den Vorausrechnungen die Vergleichsbasis für die angestrebte Modellvalidation geschaffen. Die verwendeten Gebäude-Baugrund-Modelle sind im Bild 2 dargestellt. Sie entsprechen den am häufig-

Bisherige Artikel dieser Reihe sind erschienen in «Schweizer Ingenieur und Architekt»

Heft 15/88, Seiten 415–428
Heft 18/88, Seiten 505–512
Heft 35/88, Seiten 963–965
Heft 39/88, Seiten 1069–1075
Heft 4/89, Seiten 67–73
Heft 8/89, Seiten 208–214
Heft 10/89, Seiten 259–264

sten verwendeten Modellierungsarten für Gebäude-Baugrund-Interaktionsanalysen.

Das relativ einfache dreidimensionale Balkenmodell wurde aus dem ursprünglich für die Erdberechnung verwendeten Modell abgeleitet. In diesem Modell wurde der Baugrund mit Federn und Dämpferelementen für jeden der sechs Bewegungsfreiheitsgrade abgebildet. Die entsprechenden Modelldaten wurden aus den dehnungsabhängigen Baugrundeigenschaften Schubmodul und Materialdämpfung ermittelt, die für die massgebenden Bodenschichten mittels umfangreicher Feld- und Laborversuche bestimmt worden waren. Die während der Schwingungsversuche erwarteten Dehnungen im Baugrund waren geringer als beim Auslegungserdbeben, was beim Festlegen der Modelldaten zu berücksichtigen war. Auch die konzentrierten Wassermassen an den Modellteilen für die Stahlbehälter wurden den Verhältnissen während der Versuche angepasst.

Mit dem zum Vergleich für die Anregung in Querrichtung verwendeten Finite-Element-Modell wurden insbesondere die Bereiche des Fundaments und des Baugrunds etwas detaillierter abgebildet. Zumindest in zweidimensionaler Näherung konnte damit die im Balkenmodell nur vereinfacht erfasste Einbettung und die seitliche Energieabstrahlung im Baugrund in bestmöglicher Weise repräsentiert werden.

Mit diesen Modellen wurden die modalen Kennwerte und die Gebäudeantwort auf die Versuchsanregung berechnet. Die Eigenfrequenzen, Modalformen und modalen Dämpfungen sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Beschreibung der Versuche

Versuchsvorbereitung

Die Anforderungen bezüglich Art und Stärke der Anregung, Anzahl und Verteilung der Messinstrumente, Datenerfassung und Auswertung wurden aus der Zielsetzung abgeleitet und in einer Spezifikation als Ausschreibungsgrundlage zusammengestellt. Erste Hinweise über die zu erwartenden Gebäudeschwingungen ergaben sich aus den Vorausrechnungen und aus vorgängig durchgeführten Schwingungsmessungen am BOTA-Gebäude ohne künstliche Anregungen (Hintergrundrauschen: «Ambient Vibration») und infolge der Sprengung des ehemaligen Stauwehrs, ca. 400 m vom BOTA-Gebäude entfernt. Aus diesen Messungen waren die massgebenden Eigenfrequen-

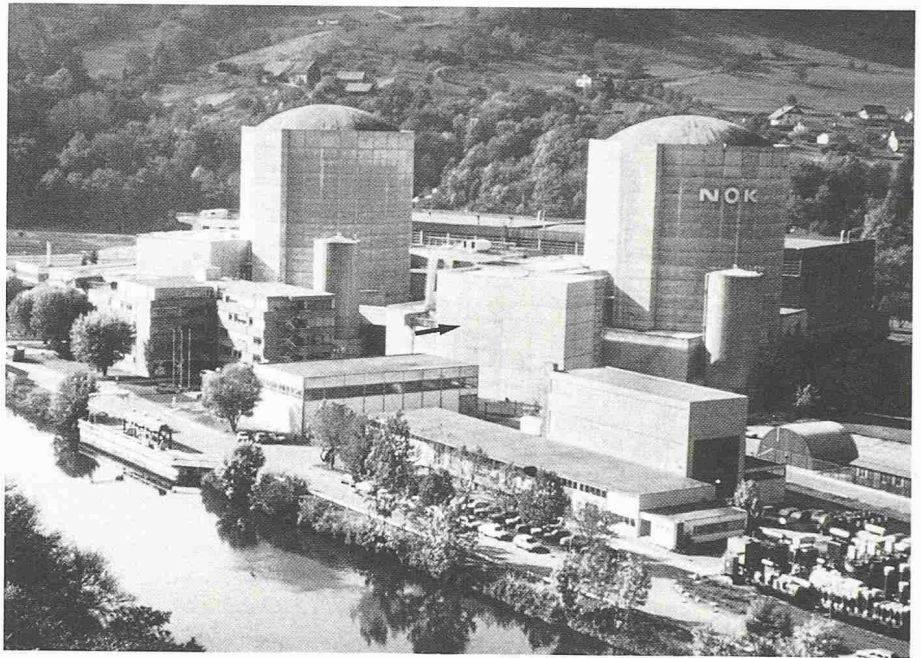


Bild 1. Ansicht des KKW Beznau mit Borwassertankgebäude (Pfeil)

zen bei sehr schwacher Anregung bekannt. Insbesondere zur Bestimmung der modalen Dämpfungen der Gebäude / Baugrund-Interaktionsschwingungen wurde aber eine deutlich stärkere Gebäudeanregung angestrebt. Dies war nur durch «Forced Vibration Tests» mit einem leistungsfähigen Unwuchterreger (Shaker) oder mit grossen servo-hydraulischen Massenbeschleunigern zu erreichen.

Versuchsdurchführung

Mit der Durchführung und Auswertung der Schwingungsversuche wurde das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF, Darmstadt) beauftragt. Die Versuche liefen während rund zwei Wochen im November 1985.

Als Anregungssystem wurde auf dem Dach des BOTA-Gebäudes ein Shaker installiert (Bild 3). Dieser konnte das

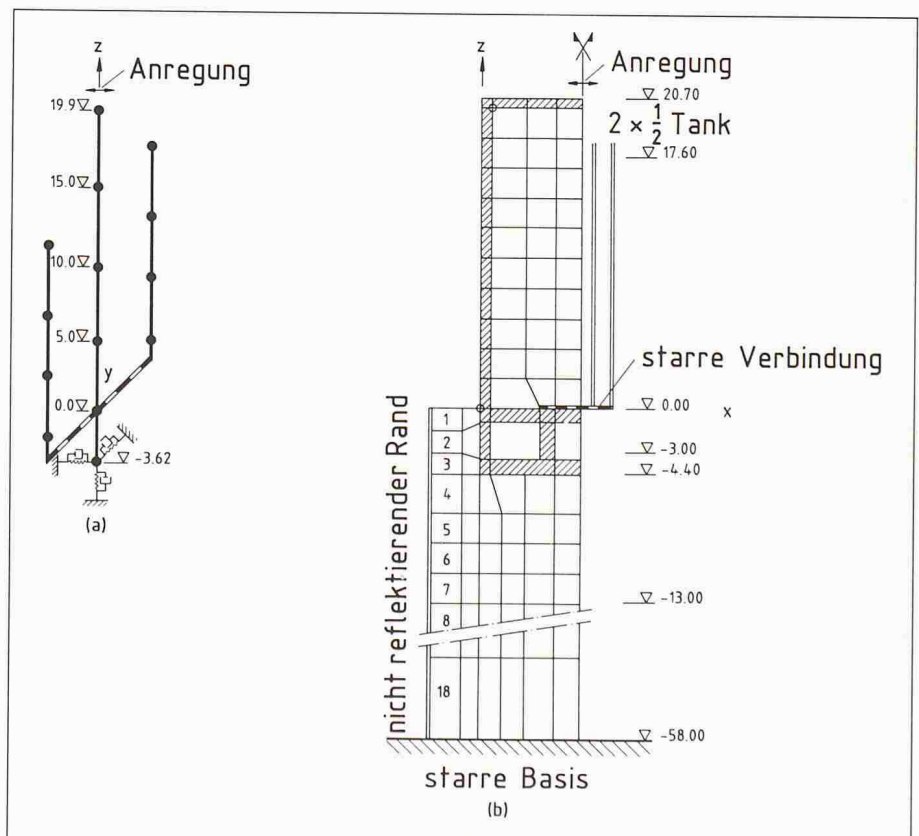


Bild 2. Modelle für die Vorausrechnungen; a) dreidimensionales Balkenmodell, b) zweidimensionales FE-Modell

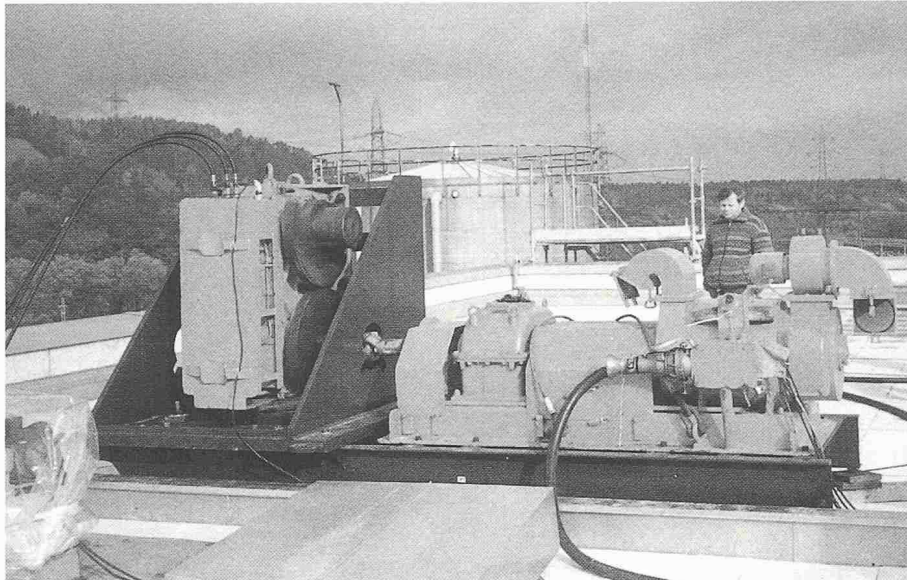


Bild 3. Unwuchterreger (Shaker) auf dem Dach des BOTA-Gebäudes

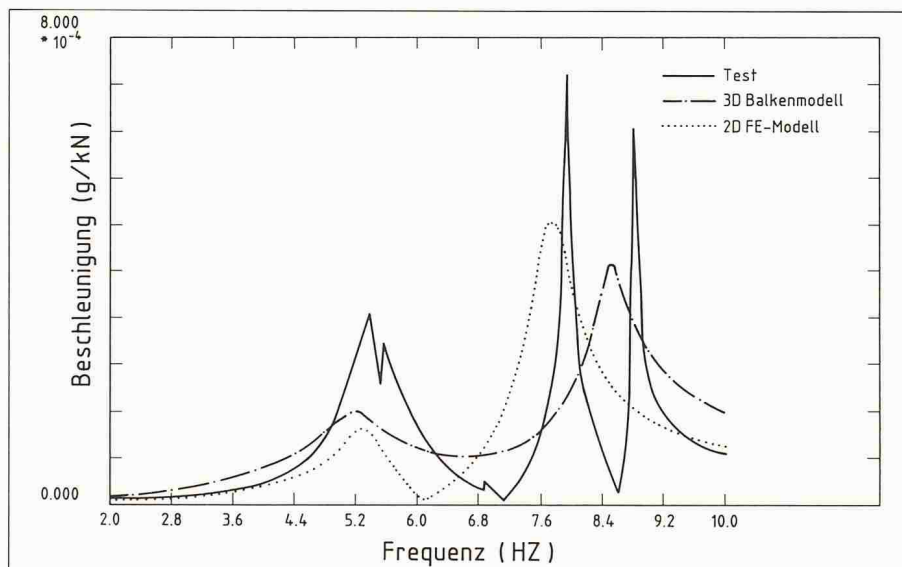


Bild 4. Vergleich der gemessenen mit den berechneten Übertragungsfunktionen: Querbeschleunigung auf dem Dach infolge harmonischer Anregung in Querrichtung

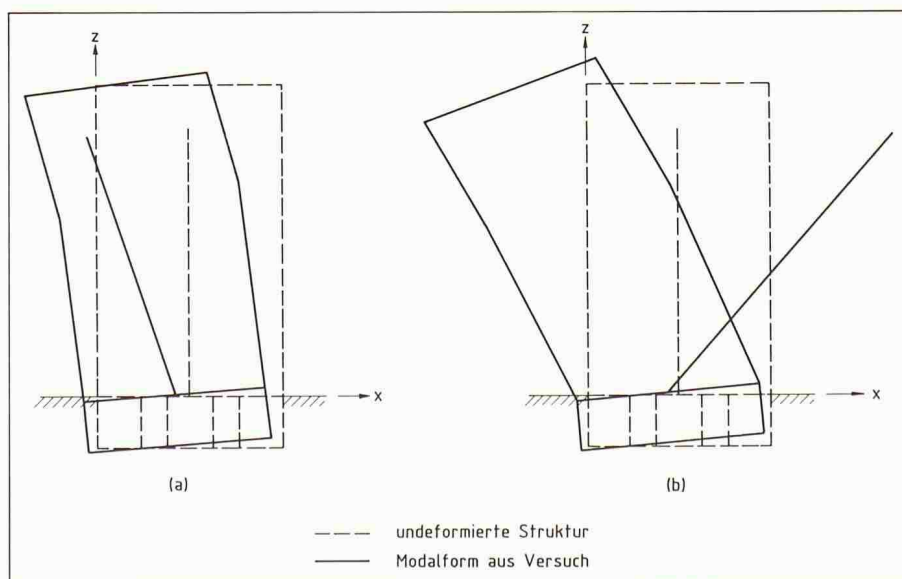


Bild 5. Zwei massgebende der experimentell bestimmten Eigenschwingungsformen: a) Kippschwingung in Querrichtung, $f = 5,35$ Hz, b) gegenphasige Biegung Gebäudetanks in Querrichtung, $f = 7,91$ Hz/8,80 Hz

Gebäude im Frequenzbereich von 3 bis 15 Hz mit Kräften bis zu 150 kN anregen. Die Anregung erfolgte in vielen Versuchsläufen in allen drei Gebäudehaupttrichtungen: quer, längs und vertikal. Die Anregungsfrequenz wurde in kleinen Schritten verändert und immer so lange konstant gehalten, bis eine stationäre, harmonische Schwingung registriert werden konnte. Ergänzend wurden auch Versuchsläufe mit kontinuierlich gesteigerter oder reduzierter Anregungsfrequenz («sine sweeps») gefahren. Die Anregungskraft konnte durch die Unwuchtmassse reguliert werden.

Die Messung der Gebäudeantwort erfolgte durch piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. An 12 repräsentativen Messpunkten am Gebäude und an den Tanks wurden insgesamt 23 orthogonale Bewegungskomponenten simultan erfasst.

Die Registriergeräte waren in einem neben dem Gebäude aufgestellten Messwagen untergebracht. Sie ermöglichten die laufende Überwachung aller Messkanäle und die direkte Speicherung der Signale auf ein Magnetband.

Auswertung der Messdaten

Die erzwungenen Gebäudeschwingungen waren gut spürbar, insbesondere auf dem Dach und an den Tanks im Gebäudeinneren. Teilweise wurden auch geräuschintensive lokale Kontaktresonanzen von Gitterrosten oder Geländern angeregt. Am Gebäude wurden Beschleunigungen bis zu 0,05 g, an den Tanks bis zu 0,10 g gemessen. Die angeregten Schwingungen waren in der Stärke der Wirkung eines mittelstarken Erdbebens vergleichbar.

Die Auswertung beim LBF erfolgte auf einer Genrad-Anlage mit Standardprogrammen für Messsignal-Analysen. Vorerst wurden für alle Messkanäle Übertragungsfunktionen (Beschleunigung/Anregungskraft als Funktion der Frequenz) bestimmt. Ein Beispiel ist in Bild 4 dargestellt. Dann wurden aus den Übertragungsfunktionen aller Testläufe und Messkanäle die Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen und modalen Dämpfungswerte berechnet.

Insgesamt konnten aus den Versuchen 13 Schwingungsformen des Gesamtsystems Gebäude-Tanks-Baugrund identifiziert werden. Die entsprechenden Eigenfrequenzen und Dämpfungswerte sind in der Tabelle 1 im Vergleich mit den Werten der Vorausrechnungen zusammengestellt.

In Bild 5 sind zwei massgebende, experimentell identifizierte Eigenschwingungsformen dargestellt: Die Kippschwingung des Gebäudes in Querrichtung mit gleichphasiger Bewegung der

Tanks und die Gebäudebiegung in Querrichtung mit gegenphasiger Biegung der Tanks.

Resultatvergleiche und Interpretation

Ein erster direkter Vergleich der Messergebnisse mit den Vorausrechnungen erfolgte durch vergleichende Betrachtung von repräsentativen Übertragungsfunktionen. Als Beispiel zeigt das Bild 4 die durch harmonische Anregung in Querrichtung erzeugte gleichgerichtete Beschleunigung auf dem Dach, als Funktion der Anregungsfrequenz. Das im Versuch registrierte Verhalten ist geprägt durch die drei Resonanzspitzen bei 5,3 Hz, 7,9 Hz und 8,8 Hz. Demgegenüber wurden in den Modellrechnungen nur zwei Eigenfrequenzen festgestellt: Die erste stimmt mit der gemessenen von 5,3 Hz gut überein, daneben lieferte aber jede Berechnung nur noch eine weitere Resonanzstelle im Frequenzbereich zwischen 7,5 Hz und 9 Hz. Die Resonanzen waren in den Modellrechnungen generell weniger ausgeprägt als im Versuch. Für die Interpretation dieser Beobachtungen sind die aus den Übertragungsfunktionen abgeleiteten modalen Kenngrößen, die in der Tabelle 1 zusammengestellt sind, zu betrachten.

Für die *Kippschwingungen* des Gebäudes in Quer- und Längsrichtung stimmten die vorausgerechneten Eigenfrequenzen recht gut mit den gemessenen überein. Trotzdem wurde im Frequenzbereich um 5 Hz eine stärkere Amplifikation als erwartet festgestellt (vgl. Bild 4). Dies liegt darin begründet, dass die experimentell bestimmte Eigenschwingungsform mehr Biegeanteil enthält und dass die Dämpfung im Versuch etwas geringer war.

Die *Vertikalschwingung* des Gebäudes konnte zwar messbar angeregt werden, die entsprechenden Bewegungen waren jedoch infolge der grossen Dämpfung sehr schwach. Eigenfrequenz und Dämpfung liegen deutlich tiefer als in der Vorausrechnung mit dem Balkenmodell. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass im Versuch die Anteile der vertikalen Deformationen in der Tragstruktur des Gebäudes ausgeprägter waren als im Rechenmodell, wo vor allem der Baugrund deformiert wurde (vertikale Starrkörperbewegung).

Sowohl für die *Torsionsschwingung* des Gebäudes im Baugrund als auch für die *Biegeschwingung der Tanks* konnten die

Modalform		Eigenfrequenz (Hz)			Modale Dämpfung (%)		
		Versuch	Berechnung		Versuch	Berechnung	
			BM	FE		BM	FE
Kippung quer längs	(x)	5,35	5,2	5,35	5,0	7,1	5,3
	(y)	6,23	6,1	–	5,2	8,8	–
Vertikal Torsion	(z)	7,80	10,6	–	17,0	69,0	–
	(z-z)	12,45	13,8	–	2,7	7,0	–
Tankbiegung	(x)	7,27	7,1	–	0,5	3,3	–
	(y)	7,27	7,4	–	0,5	2,0	–
Gegenphasige Biegung	(x)	7,91/8,80 (2 Modes)	8,5	7,7	0,5/0,7	2,9	3,9
Gebäude-Tanks	(y)	8,21–9,76 (5 Modes)	8,9	–	0,6–1,3	6,2	–

Tabelle 1. Vergleich der Eigenfrequenzen und der modalen Dämpfungsfaktoren aus Versuch und Berechnung

(BM: Balkenmodell/FE: Finite-Element-Modell, nur für Querrichtung x verwendet)

aufgrund der Vorausrechnung erwarteten Eigenfrequenzen im Versuch bestätigt werden. Die gemessene Dämpfung war auch bei diesen Schwingungen geringer als angenommen.

Die am schwierigsten interpretierbaren Unterschiede zwischen Versuch und Vorausrechnung liegen im Frequenzbereich zwischen 7,5 Hz und 10 Hz. Die *gegenphasigen Biegeschwingungen* (Tanks schwingen gegenläufig zum Gebäude) sind im Versuch massgebender in Erscheinung getreten als in den Vorausrechnungen. Aus Bild 4 ist ersichtlich, dass für die Querrichtung der vorausgerechnete Resonanzbereich im Versuch in zwei stark betonte Spitzen aufgeteilt ist, deren Frequenzen um rund 10 % auseinanderliegen. In der Längsrichtung hat der Versuch sogar fünf Eigenfrequenzen aufgezeigt, die durch gegenphasige Biegung zwischen Gebäude und Tanks gekennzeichnet sind. Die Erklärung dieser Beobachtung könnte im Mitschwingen von Teilstrukturen liegen, die weder im Rechenmodell noch in der Instrumentierung ausreichend erfasst wurden. Als mögliche Teilstrukturen stehen die grossfeldrigen Wandscheiben im Vordergrund. Die Plattenschwingungen der Aussenwände und der Mitteltrennwand haben Grundfrequenzen um 9 Hz und könnten sich im Versuch mit den gegenphasigen Biegeschwingungen des Gesamtgebäudes überlagert haben.

Eigenschwingungen des Gebäude-Baugrund-Systems anzuregen. Die Gebäudebeschleunigungen waren gut messbar und entsprechen der Wirkung eines Erdbebens mittlerer Stärke.

Die ausgewerteten Messungen erlauben die Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Rechenmodelle:

Sowohl das Balkenmodell als auch das FE-Modell haben die Frequenzen der massgebenden Gebäudeschwingungen (Kippen, gegenphasige Biegung) gut wiedergegeben. Die Dämpfung wurde aber mit beiden Modellen überschätzt. Zudem konnte das komplexe Schwingungsverhalten im Frequenzbereich 7,5 Hz bis 10 Hz mit den verwendeten Modellen nur grob angenähert erfasst werden. Diese Gebäudeschwingungen können nur mit aufwendigen Modellen mit wesentlich mehr Freiheitsgraden (z.B. mit dreidimensionalen Schalenmodellen) realistischer berechnet werden.

Die Versuchsergebnisse sind zwar nicht vorbehaltlos auf das Gebäudeverhalten bei starken Erdbeben übertragbar. Sie bilden aber doch eine solide Grundlage zur Erhärtung bzw. Verbesserung der Modelle für zukünftige Berechnungen.

Lehren aus den Versuchen

Mit den Shakerversuchen am BOTA-Gebäude ist es gelungen, die für das Erdbebenverhalten massgebenden

Adresse des Verfassers: Peter Zwicky, dipl. Bauing. ETH, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer SIA/ASIC AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich; Sener Tinic, dipl. Bauing. TU, und Wenzel Langer, dipl. Bauing. TU, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Parkstrasse 23, 5400 Baden.