

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 8 (1968)

Artikel: Dynamisches Verhalten bei Wind und Erdbeben

Autor: Sfintesco, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-8711>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

IIIc

Dynamisches Verhalten bei Wind und Erdbeben

D. SFINTESCO

Directeur des Recherches du CTICM, Puteaux (France)

Einleitung

Die Entwicklung beim Bau von Hochhäusern, die Tendenz zu immer schlankeren Formen, die Fortschritte in der Baustofftechnik sowie bei Bauverfahren und endlich die stetig wachsende Forderung, wirtschaftlicher und rationeller zu bauen, bewirkten eine beachtliche Intensivierung der theoretischen und experimentellen Forschung mit den Ziel:

die Beanspruchungen der Bauwerke genauer zu erfassen und deren Verhalten genauer zu ermitteln, und zwar durch möglichst wirklichkeitsnahe Berücksichtigung von Einflüssen, die bisher durch «Sicherheits»- oder «Unwissens»-Faktoren erfaßt wurden;

Konstruktionsformen, Berechnungsmethoden und Herstellungsverfahren zu entwickeln, um die funktionellen Eigenschaften und den Wirkungsgrad im Bauwesen zu verbessern;

ein vernünftiges Gleichmaß an Sicherheit und Wirtschaftlichkeit auf Grund von modernen wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen und einer wissenschaftlichen Beurteilung der Risiken zu erhalten.

Während für statische Belastungen die empirischen Annahmen aus den Anfängen der Baukunst weitgehend durch wissenschaftlich fundierte Untersuchungen ersetzt wurden, wird der Einfluß dynamischer Belastungen auf die Bauten, insbesondere aus Wind und Erdbeben, auch heute noch nur sehr grob und ungenau durch die Einführung mehr oder weniger willkürlicher Werte oder Faktoren in die üblichen statischen Berechnungen berücksichtigt.

Einige Probleme bei den dynamischen Lastannahmen infolge Wind und Erdbeben und ihre Auswirkungen auf Bauwerke im allgemeinen sowie auf Stahlskeletthochbauten im besonderen waren inzwischen Gegenstand bedeutender theoretischer und experimenteller Forschungen. Andere Fragen sind erst unvollkommen gelöst.

In der vorliegenden Einführung werden die wesentlichen Punkte nach dem augenblicklichen Stand der Erkenntnisse und die aus der Forschung gewonnenen wichtigsten Ergebnisse genannt, anschließend die Probleme angedeutet, die einer Lösung oder Vertiefung bedürfen, um damit den Kongreß über laufende Arbeiten und neue Forschungsvorschläge aus diesem Bereich zu informieren.

Windlasten

Obgleich die Berücksichtigung der Windbelastung bei der Bemessung der Bauwerke bereits von Galilei und Newton vorgesehen war, hat man tatsächlich erst gegen Ende des letzten Jahrhunderts damit begonnen, und zwar als die Einflüsse aus der Windbelastung auf die immer schlankeren und leichteren Hochbauten nicht mehr vernachlässigt werden konnten. Die Bedeutung der Windbelastung wuchs daher parallel zur Entwicklung des Stahlbaues.

Außerdem entdeckten in dieser Zeit zwei Pioniere des Stahlbaues – B. Baker in Großbritannien und G. Eiffel in Frankreich – durch ihr Erkennen und Gefühl für das Verhalten von Baukonstruktionen zwei wesentliche Aspekte für die Bestimmung der Windlasten auf Bauwerke: Baker bewies, durch sehr einfache unmittelbare Versuche, daß die Gesamtbelastung auf große Flächen kleiner war als die örtlich maximal gemessene, während Eiffel durch direkte Beobachtungen an dem «300-Meter-Turm» feststellte, daß die Maximalwerte der Gesamtverschiebung einer mittleren Windstärke und nicht nur kurz dauernden Windstößen entsprachen.

Inzwischen konnte man aus theoretischen Studien, Versuchen im Windkanal und direkten Beobachtungen genauere Kenntnisse über die verschiedenen zu berücksichtigenden Parameter erwerben, wie zum Beispiel Variation der Geschwindigkeit mit der Höhe, Einfluß der Bodenrauheit, Spektrum der Windlasten, Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten von Windböen und einer mittleren Windgeschwindigkeit über einen bestimmten Zeitabschnitt, Verhältnis von schneller zu langsamer Änderung der Windgeschwindigkeiten, Größe und Verteilung von Druck und Sog auf die äußeren und inneren Flächen eines Gebäudes im Verhältnis zu den Anfallwinkeln und etwa vorhandenen Öffnungen, Wirkung von Windschutz usw.

Der erste internationale Kongreß im Jahre 1963 zu diesem Thema zeigte, daß die Kenntnisse über Windwirkungen noch unvollkommen und darüber hinaus mit Fehlern infolge mangelhafter Beobachtungen und unzuverlässiger Messungen behaftet sind.

Für die Berechnung der Konstruktionen ist die Unsicherheit bei Annahme der Windgeschwindigkeit, besonders im Hinblick auf die Lage des Bauwerks – die meist eine andere ist als die der entsprechenden Wetterstation – sowie der Einfluß der Umgebung und weiterer lokaler Faktoren, zu beachten. Wegen dieser Einflüsse wäre eine übertrieben genaue Berechnung trügerisch und sinnlos.

Man muß jedoch abschätzen, innerhalb welcher Grenzen ein bestimmter Wind in den Haupttraggliedern des Skeletts eines mehrgeschossigen Bauwerkes dynamische Belastungen verursachen kann.

Das normale Windlastspektrum weist verhältnismäßig langsam variierende Schwankungen auf. Darauf überlagern sich schnelle, im allgemeinen sehr unregelmäßige Änderungen mit einer besonders in den bodennahen Turbulenz-zonen willkürlichen und sehr unbeständigen Verteilung. Die Windwirkung muß deshalb unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden.

Bei Hochhäusern ist für die Gesamtwirkung auf das Bauwerk das erstgenannte, normale Lastspektrum maßgebend; es erzeugt in den tragenden Elementen des Skeletts schwellende Belastungen, die nur dann zu Wechsellasten werden, wenn das ganze Bauwerk zu schwingen beginnt. Gemäßigter Rhythmus der Belastungsänderung und Trägheit des geschlossenen Bauwerks bewirken ein statisches Verhalten den damit verbundenen Windlasten gegenüber.

Die zweite mögliche Wirkung lokalisierter und fortwährend veränderlicher Windkräfte ist hauptsächlich bei den mittelbar oder unmittelbar betroffenen Baugliedern zu beachten, wo diese in der Regel die Hauptbelastung darstellen. Jedoch können auch für diese Bauglieder dynamische Folgen, insbesondere Gefahren der Resonanz infolge Unregelmäßigkeiten in der Schwingweite und in Windrichtung, sehr begrenzt sein.

Die von Baker und Eiffel erkannten wichtigen Aspekte wurden in den amtlichen Verordnungen lange ignoriert. Eine Abminderung der Winddrücke auf große Flächen ist in klarer Form augenblicklich in den neuesten Vorschriften vorgesehen. Die Erkenntnisse von Eiffel schienen bis in die letzte Zeit vollkommen aus der Sicht verloren, während sie jetzt in der vorgesehenen dynamischen Berechnung der Bauwerke Berücksichtigung finden.

Es ist jedoch noch nicht eindeutig und unabhängig von willkürlichen Hypothesen festgestellt worden, innerhalb welcher Grenzen dynamische Belastungen infolge Wind die Gesamtbeanspruchung mehrgeschossiger Skelettbauten beeinflussen. Dazu wird man nur durch Versuche an ausgeführten Bauwerken gelangen.

Erdbebenlasten

Das Bestreben, erdbebensichere Bauten in den diesen Naturereignissen ausgesetzten Gebieten zu errichten, ist so alt wie das Erinnerungsvermögen des Menschen. Man ist deshalb auch zu einer auf Erfahrung gegründeten Entwicklung der Bauformen und -verfahren gekommen.

Obwohl Erdbebenstöße einen gewaltsamen und oft katastrophalen Charakter haben, sind die Beobachtungen über diese unvorhersehbaren und nicht nachahmbaren Naturereignisse in den meisten Fällen unzureichend, um nachträglich eine vollständige Analyse ihrer Folgen in Abhängigkeit der genauen Bewegungen, die sie verursachten, zu erlauben.

Um das Verhalten der Bauwerke zu bestimmen und Berechnungsmethoden festzulegen, mußte man sich deshalb vornehmlich auf theoretische Untersuchungen sowie Vergleichsrechnungen stützen, die zwangsläufig auf vereinfachenden Hypothesen beruhen.

Ein Erdbebenstoß löst Bewegungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus, deren Richtung, Größe, Dauer und Aufeinanderfolge sehr unregelmäßig sind. Die so erzeugte Bewegung verläuft auf einer nicht vorausschaubaren räumlichen Bahn, die jedoch jeweils in die Komponenten nach den 3 Hauptachsen zerlegt werden kann. Es ist üblich, die senkrechte Komponente bei der Berechnung zu vernachlässigen, da sie als gering angesehen werden kann gegenüber den auf das Stahlskelett normalerweise wirkenden senkrechten Lasten. Diese Vereinfachung ist in der Regel gerechtfertigt, doch können Ausnahmen möglich sein.

Die in den Berechnungen zu berücksichtigende Größe der Erdbebenstöße wird nach geographischen Gebieten entsprechend dem größten dort aufgetretenen Erdbeben festgesetzt, was durch deren katastrophalen Charakter gerechtfertigt erscheint. Dieses Maß wurde inzwischen aus Mangel an wissenschaftlicheren Methoden mittels Skalen festgesetzt, die sich auf subjektive Beobachtungen und den Umfang der festgestellten Schäden beziehen. Letztere geben übrigens meist die einzigen genauen Auskünfte über das Erdbeben.

G. W. Housner hat inzwischen eine Methode empfohlen, die im Prinzip von M. A. Biot vorgeschlagen wurde und darin besteht, mögliche Erdstöße an Hand der von Seismographen gelieferten Aufzeichnungen zu bestimmen.

Unter den genannten Voraussetzungen sind bei der Anwendung theoretischer Berechnungsmethoden die verwendeten Angaben und zugrunde liegenden eingeführten Hypothesen mit größter Sorgfalt zu prüfen, um etwaige unrichtige Ergebnisse zu vermeiden.

Erdbebenstöße zeigen einige grundsätzliche Gegensätze gegenüber den Einwirkungen des Windes im Hinblick auf die damit verbundene Belastung der Bauwerke. Sie sind eindeutig und ausschließlich dynamischer Art. Da die Stöße jeweils durch die Grundfläche in das Bauwerk eingeleitet werden, betreffen sie dieses außerdem stets in seiner Gesamtheit. Erdbebenlasten wirken nicht als äußere Kräfte auf das Bauwerk, sondern als innere Trägheitswiderstände des Bauwerks in bezug auf die Bewegungen des Bodens.

Daraus folgt, daß die Massenträgheit des Bauwerks, die sich den dynamischen Einwirkungen des Windes widersetzt und dadurch deren Wirkung beträchtlich vermindert, im Falle eines Erdbebenstoßes umgekehrt wirkt und die

dynamischen Einwirkungen ungünstig beeinflußt. Darum ist totes Gewicht bei Bauwerken in den Erdbebenzonen möglichst zu vermeiden.

Damit ist zum großen Teil erklärt, warum die Vorteile der Stahlbauweise in erdbebengefährdeten Gebieten trotz der allgemeinen Entwicklung zu immer leichteren Bauwerken nicht verloren gegangen sind, obwohl ihr Verhalten gegenüber Wind damit neue Probleme hervorruft.

Dynamische Reaktion des Bauwerks

Der Begriff des Reaktionsspektrums

Die dynamische Reaktion eines Bauwerks ist direkt abhängig von den statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauwerkes, dem Verlauf der Erregung und den Eigenschaften des übertragenden Bodens.

In den ersten Studien über dynamische Einwirkungen von Erdbeben berücksichtigte man die konstanten harmonischen Schwingungen. Diese von K. S. Zavriev und A. G. Nazarov vorgeschlagene vereinfachte Hypothese sollte dazu dienen, eine Resonanz von Eigenfrequenz des Bauwerkes und Erdbebenperiode zu verhindern.

Durch den von M. A. Biot vorgeschlagenen und inzwischen besonders von G. W. Housner weiterentwickelten Begriff des Reaktionsspektrums wurden wirklichkeitsnähere Hypothesen möglich gemacht, die alle Unregelmäßigkeit der bei Erdbebenstößen möglichen Bewegungen berücksichtigen.

Das Reaktionsspektrum spiegelt die relativen Verschiebungen, die relativen Geschwindigkeiten oder die absoluten Beschleunigungen des Systems wider, als Funktion seiner Eigenschwingungsperiode und der ihm aufgezwungenen Erregung. Es wird mit Hilfe eines extrem vereinfachten Systems mit einem einzigen Freiheitsgrad bestimmt, kann jedoch auch auf Systeme mit mehreren Freiheitsgraden erstreckt werden entweder durch Einführung der vollständigen Integralausdrücke der Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Trägheitskräfte und Querkräfte für die verschiedenen möglichen Schwingungsarten oder, in einfacherer Weise, mit Hilfe eines Gleichwertigkeitsfaktors, der das Verhältnis der reduzierten zur wirklichen Masse darstellt. So erhält man ein gleichwertiges Spektrum für das betrachtete Bauwerk.

Dieses Spektrum kann für jede Art der Erregung, gleichwohl ob periodisch oder nicht periodisch, durch Modellversuche, rechnerisch mittels direkter Integration oder auch durch elektrische Analogie bestimmt werden. Das Spektrum ist ein ausgezeichnetes Hilfsmittel für die dynamische Untersuchung der Bauwerke, denn es liefert für jeden Rhythmus und Verlauf einer Erregung unmittelbar die Werte der Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Es dient deshalb zur einwandfreien Ermittlung des für das Bauwerk erforderlichen Maßes an Widerstand und Dehnbarkeit.

Einfluß der Massenverteilung

Da die dynamische Reaktion auf Erdbebenstöße proportional ist zur Massenträgheit des Bauwerkes, hat die Massenverteilung eine augenscheinliche Bedeutung.

Bei einem symmetrischen Gebäude spielt nur die senkrechte Verteilung der Massen eine Rolle bei der Bestimmung des seismischen Koeffizienten als Grundlage für die Berechnung. Es ist eine regelmäßige Verteilung der Massen anzustreben, wobei die Hauptmassen so tief wie möglich anzuordnen sind, indem man die Konzentration größerer Massen (Schwimmbecken, Vorrattanks, schwere Anlagen) in höheren Geschossen vermeidet. In jedem Falle ist es vorteilhaft, den Schwerpunkt des Gebäudes so weit wie möglich nach unten zu legen.

Infolge Trägheit exzentrischer Massen in unsymmetrischen Bauwerken können bei Erdbebenstößen oder Windeinwirkung unter Umständen beachtliche Torsionsmomente entstehen.

Solche Wirkungen sind immer dann zu befürchten, wenn Gebäudeschwerpunkt und Torsionsmittelpunkt nicht zusammenfallen. In solchen Fällen ist deren Berücksichtigung in Entwurf und Berechnung unbedingt erforderlich.

Dämpfung der dynamischen Beanspruchungen

Die Dämpfung dynamischer Beanspruchungen durch Energievernichtung ist eine wesentliche Eigenschaft des Verhaltens reeller Systeme. Der Ursprung der in das Gebäude eingebrachten Energie – dynamische Wirkungen infolge von Wind oder Erdbebenstößen – ist gleichgültig, doch muß diese Energie vom Bauwerk vollständig aufgenommen werden können, anderenfalls entstehen größere bleibende Verformungen oder noch bedeutendere Schäden.

In jedem reellen System geht die aus einer dynamischen Belastung, zum Beispiel Erdbebenstoß, stammende Energie teilweise und zeitweilig über in kinetische Massenenergie sowie in elastische Verformungsenergie der Bauglieder; die Energie muß schließlich jedoch vollkommen durch innere Reibungen, gegebenenfalls durch Plastizierung aufgezehrt werden, soweit sie nicht durch Wechselwirkungen zwischen Gebäude und Erdboden letzterem wieder zugeführt wird.

Jede größere dynamische Belastung würde nachweislich weit höhere Momente und elastische Verschiebungen verursachen, als normalerweise ertragen werden können, sobald keine plastische Verformungsmöglichkeiten gegeben sind.

Die Bedeutung der Energieverzehrung durch Verformungsarbeit beim dynamischen Verhalten eines Stahlskeletts beliebiger Höhe und Schlankheit ist durch einige kürzlich erfolgte Studien (von G. W. Housner und G. V. Berg) über das

nichtlineare Verhalten von Systemen mit einem oder mehreren Freiheitsgraden aufgezeigt worden.

Diese Studien befassen sich besonders eingehend mit der fundamentalen Eigenschaft der Energievernichtung beim Verhalten von Bauwerken gegenüber dynamischen Belastungen. Die größte Schwierigkeit besteht in dem notwendigen Erkennen der wirklichen Eigenschaften des Bauwerkes.

Ist die dem Bauwerk zugeführte Energie vorgegeben, so muß diese jederzeit erkennbar sein, aufgeteilt in Massenbewegungen, innere Reibungen sowie elastische und plastische Verformungsarbeit.

Falls ein Trägersystem nur begrenzte Möglichkeiten zur Energievernichtung durch Verformungsarbeit besitzt, kann es leicht zu übermäßigen Beanspruchungen kommen, die eine unwirtschaftliche Bemessung erfordern. Es ist deshalb vorteilhaft, Bauwerke so zu gestalten, daß ein großer Anteil der Energie nicht allein durch normale Dämpfung, sondern auch durch plastische Verformungen aufgenommen wird, ohne daß bereits ein Versagen eintritt, ausgenommen bei besonders starken Belastungen, wo mit Sicherheit plastische Verformungen auftreten, die zwar nicht zur Katastrophe führen, jedoch zu begrenzten Störungen Anlaß geben können.

Dadurch erklärt sich das oft festgestellte gute Tragverhalten scheinbar zu schwacher Bauten, die jedoch eine große Kapazität zur Energieaufnahme besitzen.

Die Untersuchungen im nichtlinearen Bereich, welche bereits gute Hinweise für eine vernünftige Verteilung der Steifigkeiten liefern können, zeigen, daß in einem normal gestalteten Skelett plastische Verformungen vorzugsweise in den Riegeln (Deckenträgern) auftreten. Eine Verstärkung dieser Tragelemente hat eine Verlagerung dieses Vorgangs auf die Stützen zur Folge.

Es ist selbstverständlich, daß bei allen Dämpfungsvorgängen keine Beschränkungen derart vorgesehen sind, wie bei den gegenwärtig gebräuchlichen Berechnungsverfahren; sämtliche Bestandteile des Gebäudes – gleichwohl ob sie als planmäßig tragend oder nicht tragend bezeichnet werden – beteiligen sich an der Dämpfung der dynamischen Erregung.

Einfluß der Steifigkeit, Abmessungen und Form des Gebäudes

Das dynamische Verhalten eines Gebäudes gegenüber den ihm auferlegten Belastungen hängt in erster Linie von dessen Steifigkeit und Abmessungsverhältnissen ab.

Im Prinzip ist als Grenzfall ein vollkommen starres Gebäude wie ein mit dem Baugrund zusammenhängendes Kontinuum anzusehen. In diesem Falle bestimmen sich die Belastungen infolge von Erdbebenstößen und Winddruck durch einfache Zerlegung der Kräfte ohne irgendwelche Abminderungen. Besitzt das Bauwerk jedoch ein bestimmtes Formänderungsvermögen, wird ein

entsprechender Energieanteil gespeichert, der anschließend frei wird, was in der Wirkung einer Phasenverschiebung für einen bestimmten Belastungsanteil gleichkommt. Dadurch wird im allgemeinen der Maximalwert der wirklichen Beanspruchungen reduziert. Bei einem schlanken und elastischen Bauwerk, das mehreren aufeinanderfolgenden Belastungszyklen ausgesetzt ist, können sich die Beanspruchungen jedoch beträchtlich vergrößern.

Die Höhe des Bauwerks geht direkt oder indirekt in die statische Berechnung der Schnittlasten ein, ihr Einfluß wird durch den Einfluß der Schlankheit jedoch weit überdeckt, sobald es sich darum handelt, die Dämpfung der dynamischen Beanspruchung zu bestimmen. Nur der sogenannte «Peitschenschlag-effekt» auf die obersten Geschosse scheint sich mit der Höhe des Bauwerks zu vergrößern.

Durch das Bauen von zunehmend schlankeren und weniger steifen Gebäuden ergeben sich immer neue Probleme, sowohl für deren Widerstand gegenüber Erdbebenbeanspruchung als auch für das Verhalten gegenüber Windbelastungen. Gebäude mit einer relativ großen Eigenschwingungsperiode sind weniger empfindlich gegenüber kurzfristigen Schwankungen; unter massiver Windeinwirkung können jedoch bedeutende Schwingungsamplituden auftreten. Es ist außerdem möglich, daß ein plötzliches Aufhören dieser massiven Windeinwirkung die gleiche Wirkung haben kann wie die wieder freiwerdende Energie.

Größere Unstetigkeiten in der allgemeinen Form des Bauwerks und seiner Struktur sollten in Erdbebenzonen sorgfältigst vermieden werden, da sich diese auf den dynamischen Widerhall des Gebäudes ungünstig auswirken und größere Schäden an der betreffenden Stelle verursachen könnten.

Gebäude in unsymmetrischen oder zusammengesetzten Formen mit Grundrissen in *L*-, *V*-, *T*-, Kreuz- oder ähnlicher Form besitzen durch die große gegenseitige Versteifungswirkung der verschiedenen Gebäudeteile im allgemeinen eine gute Gesamtstabilität gegenüber Windbelastung. Gegenüber Erdbebenwirkungen können bei solchen Gebäuden durch das Zusammenfügen von zwei oder mehreren nebeneinanderliegenden Körpern verschiedener Steifigkeit schwierige mit der Massenträgheit zusammenhängende Probleme auftreten. Ihr Verhalten gegenüber Erdbebenwirkungen ist deshalb schwer zu bestimmen.

Wenn es nicht möglich ist, zum Beispiel durch funktionelle Notwendigkeiten oder den Wunsch des Bauherrn, eine solche Gebäudeform zu vermeiden, muß der planende Ingenieur in jedem besonderen Falle Art und Umfang der Beanspruchungen in den Kontaktebenen der einzelnen Gebäudeblöcke aus deren individuellem Dämpfungsvermögen gegenüber den vorgesehenen dynamischen Belastungen ermitteln und die Verbindungen entsprechend gestalten. Als beste Lösung sollten darin getrennte und genügend voneinander entfernte Baukörper errichtet werden, damit diese unabhängig voneinander schwingen können. Wenn dies nicht möglich ist, sind die Verbindungen so zu bemessen‘

daß die einzelnen Gebäudeblöcke gezwungen werden, wie ein einziger Körper zu schwingen.

Einfluß des Skelettsystems und Deckentyps

Die bisher gewonnenen Erfahrungen mit Gebäuden, die Erdbebenstößen ausgesetzt waren, betrafen meist klassische Skelettbauten mit biegesteifen Knotenpunkten, aber auch solche, deren seitliche Stabilität durch ebene fachwerkartige Windverbände gesichert ist. Die Vorteile des ersten Systems gegenüber dem zweiten bei Erdbebenstößen sind augenscheinlich, obgleich hierüber keine besonderen Untersuchungen vorliegen. Hingegen sind die beiden genannten Systeme betreffend Widerstandsfähigkeit gegen Wind gleichwertig in ihrer Brauchbarkeit.

Stahlskelette mit Kastenquerschnittsform, die bei einigen höchst bemerkenswerten in jüngster Zeit ausgeführten oder im Bau befindlichen Hochhäusern zur Anwendung kamen, sind ohne Zweifel die am wirtschaftlichsten und widerstandsfähigsten Stahlskelett-Typen gegen dynamische Windbelastung. Sie sind es vermutlich auch gegenüber den Erdbebenwirkungen. Selbstverständlich müssen mit diesem neuen Bauwerktyp, dem ein Spezialthema auf dem Kongreß gewidmet ist, noch praktische Erfahrungen gemacht werden.

Die Beschaffenheit der Decken beeinflusst die allgemeine Stabilität der Konstruktion durch die mehr oder weniger wirksame Membranwirkung, je nach ihrer eigenen Steifigkeit.

Sie hat jedoch keinen wesentlichen Einfluß auf die seitliche Stabilität des Skeletts, die hauptsächlich von den Steifigkeiten der Stützen und ihrer Verbindungen mit den Riegeln abhängt.

Massive Decken bewirken jedoch eine beachtliche Dämpfung der Schwingungen, indem die Beschleunigungen verzögert und die Schwingungsperioden verlängert werden. Ihr Vorhandensein hat deshalb günstige Folgen für das Verhalten des Gebäudes gegenüber Windwirkungen. Die Trägheitswirkungen der in jedem Geschoß befindlichen Deckenmassen während eines Erdbebens stehen jedoch dem entgegen, was in Erdbebenzonen anzustreben ist. Es scheint deshalb so, daß man in erdbebengefährdeten Zonen die leichteren Metalldecken bevorzugen sollte, allerdings unter der Bedingung, daß eine gute Verbindung zwischen allen wesentlichen Teilen des Skeletts das Verhalten des Bauwerks als ein Kontinuum gewährleistet.

Einfluß der planmäßig nicht mittragenden Elemente

Die Vernachlässigung vorhandener sogenannter «nicht mittragender» Elemente, wie zum Beispiel Mauern und Zwischenwände, wie sie meist bei den Festigkeitsberechnungen mehrgeschossiger Stahlskelettbauten erfolgt, muß

heute kritisch beurteilt werden. Daß man gerade jetzt diese immer leichter werdenden Elemente berücksichtigen will, mag deshalb überraschen, zumal diese meist mit dem Skelett nur schwach verbunden und gelegentlich sogar versetzbar angeordnet sind, während sie vernachlässigt wurden, als sie durch ihre massive Beschaffenheit einen größeren Einfluß auf die Gesamtsteifigkeit des Gebäudes hatten. Diese Bestrebungen rechtfertigen sich jedoch durch das Suchen nach neuen Möglichkeiten zur Erhöhung der Festigkeit von Bauten sowie durch die Ergebnisse kürzlich durchgeführter Versuche an bestehenden Gebäuden.

Zum Beispiel haben die von J. W. Bouwkamp durchgeführten Messungen an einem Stahlskelettbau in den einzelnen Bauzuständen gezeigt, daß selbst so schwache Elemente wie Verglasungen einen beachtlichen Einfluß auf die Dämpfungscharakteristik eines Bauwerks für horizontale Belastungen haben können, indem sie dessen Eigenschwingungsperiode verändern. Dies bestätigt die Ansichten von S. Mackey und des Verfassers, daß bei modernen Stahlskelettbauten die Glasfassade eine erste Abwehr gegen dynamische Windeinwirkungen bilden.

Man muß sich in jedem Falle darüber klar sein, daß sich ein reelles dynamisch belastetes Bauwerk völlig anders verhält als ein linearer Schwingungskörper oder ein mehr oder weniger vereinfachtes Ersatzsystem, das der Berechnung zugrundegelegt wird.

Das Gesamtverhalten des Bauwerks in der Praxis zeigt, daß selbst bei starken Erdbeben die nicht mittragenden Elemente eine maßgebende Rolle bei der Dämpfung der dem Bauwerk auferlegten Schwingungen spielen, indem sie einen bedeutenden Teil der hineingesteckten Energie während der ersten Phase des Widerhalls aufnehmen, soweit es sich um relativ kleine Schwingweiten handelt.

In der zweiten Phase, die mit größeren Amplituden verbunden ist, werden diese Elemente mehr oder weniger beschädigt, besitzen jedoch immer noch einen nicht unwesentlichen Einfluß durch Verringerung der Bewegungen und Vernichtung der Schwingungsenergie. Nur oberhalb einer sehr großen Schwingweite ist diese Wirkung nicht mehr vorhanden, so daß dann die Plastizitätsreserven des Skeletts voll mobilisiert werden, welche nach H. J. Degenkolb eine zweite Abwehrfront bilden.

Die gemischte Bauweise

Anstelle des Windverbandes der Stahlskelette treten manchmal Windscheiben aus Stahlbeton oder aus massiven vorgefertigten Elementen.

Die Wirkung dynamischer Belastungen auf derartige Systeme ist noch nicht in zufriedenstellender Weise geprüft worden, und zwar weder in bezug auf die Folgerungen aus dem unterschiedlichen Widerhallsverhalten der steifen Scheiben und unverstrebten Gebäudeteile noch auf die Verbindungen zwischen massiven Elementen und Stahlskelett. Das Interesse an dieser Bauweise läßt Untersuchungen in dieser Richtung gerechtfertigt erscheinen, wobei im besonderen

die Folgen der nur geringen Verformungsmöglichkeit der windverstrehten Flächen erfaßt werden sollten.

Für jede Höhenlage ist die horizontale Verteilung der senkrechten Elemente einer Konstruktion proportional zur Steifigkeit dieser Elemente. Ein starres Element aus Material geringer spezifischer Widerstandsfähigkeit als dasjenige der anderen Elemente kann tatsächlich zu einer schwachen Stelle der Konstruktion werden; bei Belastungen infolge seiner Steifigkeit kann der zur Aufnahme dieser Belastungen nötige Widerstand fehlen. Das haben die bei verschiedenen Erdbeben festgestellten Schäden gezeigt.

In manchen Ländern ist es üblich, die seitliche Stabilität durch einen zentralen Kern aus Stahlbeton zu gewährleisten; das Stahlskelett hat dann nur die senkrechten Lasten aufzunehmen. Untersuchungen über die wirtschaftlichen Beweggründe oder Überlegungen zum Brandschutz, die solche Lösungen rechtfertigen könnten, sind nicht Gegenstand dieses Berichtes; immerhin würde eine genauere Ermittlung der tatsächlichen Windbelastung ein wirtschaftlicheres Bemessen des Stahlskeletts erlauben und damit die Fälle einer gemischten Bauweise begrenzen.

Bei Gebäuden in erdbebengefährdeten Gebieten kann das stark unterschiedliche Verhalten des massiven und des metallischen Teils des Gebäudes gegenüber dynamischen Belastungen zu sehr beträchtlichen Beanspruchungen in den Kontaktebenen zwischen diesen beiden Teilen des Systems führen und dadurch Schäden in den Verbindungen zwischen Stahlskelett und Betonkern verursachen.

Die technische Literatur enthält unseres Wissens keine ausreichenden praktischen Erfahrungen über das Verhalten derartiger Bauwerke bei Erdbeben; eine genaue theoretische Berechnung ihres Verhaltens erweist sich als sehr schwierig.

Das Verhalten der Werkstoffe und einzelner Bauteile

Die wesentlichen Eigenschaften des Werkstoffes Stahl

Als die wichtigsten erforderlichen Eigenschaften des Werkstoffes im Hinblick auf das Verhalten der Skelette gegen dynamische Belastungen infolge Wind oder Erdbeben sind die nachfolgenden zu nennen:

Elastizität und Dehnbarkeit, notwendige Eigenschaften, um eine elastische Formänderung und eine elasto-plastische Anpassung als Voraussetzungen für eine genügende Energiespeicherung zu ermöglichen;

genügender Widerstand gegen Wechselbelastungen mit Spannungen gleicher Größenordnung und entgegengesetzter Richtung und infolgedessen gleicher Widerstand gegen Zug- und Druckbeanspruchung;

genügender Widerstand gegen Wechselbelastungen mit nur wenigen Lastspielen.

Baustahl besitzt sämtliche dieser Eigenschaften und eignet sich deshalb besonders gut für die Herstellung von Skeletten, die dynamischen Wirkungen infolge Wind und Erdbeben ausgesetzt sind.

Untersuchungen zur Bestimmung der Dauerfestigkeit von Stahl wurden zwar für die verschiedensten Stahlsorten durchgeführt, jedoch hauptsächlich unter den Gesichtspunkten der Wirkungen einer großen Zahl von Lastspielen. Neuere, jedoch weniger umfangreiche Ermittlungen über das Verhalten bei nur geringen Lastspielzahlen können nicht als hinreichend angesehen werden, besonders für den elasto-plastischen Bereich. Jedoch gerade hierin liegt ein grundsätzliches Problem bei der seismischen Berechnung von Stahlskeletten.

Andererseits scheint es so, vorbehaltlich eines eventuellen Gegenbeweises, daß der Dauerfestigkeitsnachweis trotz der sich wiederholenden und umkehrbaren Belastungen nicht maßgebend wird bei der Bemessung der tragenden Elemente normalgestalteter Stahlskelette für Geschoßbauten, namentlich wegen der geringen damit verbundenen effektiven Spannungen.

Ein solches Kriterium sollte man jedoch für diejenigen Bauglieder in Betracht ziehen, die vorwiegend veränderlichen Windbelastungen unterliegen und entsprechend bemessen sind, zum Beispiel tragende Fassadenelemente oder Diagonalen in Windverbänden.

Das Verhalten der Träger und Stützen

Es wurde bereits auf das nichtlineare Verhalten der Riegel (Deckenträger) normalgestalteter Stahlskelette von Geschoßbauten hingewiesen. Untersuchungen hierüber haben demnach eine vorrangige Bedeutung.

Dieses Problem ist ohne experimentelle Bestätigung nicht vollständig zu lösen, jedoch sind hierüber bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Am aufschlußreichsten und den vorliegenden Bedingungen am nächsten kommt ohne Zweifel der Bericht von E. P. Popov, der gezeigt hat, daß das Tragverhalten eines solchen Elementes bestimmt ist durch das örtliche Ausbeulen der Flansche nach einer bestimmten Zahl von Lastspielen, die von den jedesmal dabei erreichten maximalen Spannungen abhängt. Es scheint in der Tat, daß bei den hier behandelten Belastungsarten die Vorsichtsmaßregeln gegen das Ausbeulen der Flansche von einer größeren Bedeutung sind als die Dauerfestigkeit des Materials; dieses Ausbeulen wird begünstigt, sobald bei einem vorausgegangenen Lastspiel eine bleibende Verformung auftreten konnte.

Die Anhäufung von Verformungen, für eine wirtschaftliche Bemessung sonst sehr erwünscht, kann hier ein begrenzendes Maß für die Energieaufnahme bilden.

Die Horizontalverschiebung mehrgeschossiger Rahmen mit biegesteifen Knotenpunkten infolge waagrechtter Belastungen ist abhängig von der Steifig-

keit der Stützen und ihrer Anschlüsse in den Knoten. Da diese Horizontalverschiebung das Verhalten des Gebäudes gegenüber dynamischen Belastungen maßgeblich beeinflußt, ist deren Bedeutung augenscheinlich. Gleichzeitig auf Druck und Biegung beanspruchte Bauglieder ähneln in ihrem Tragverhalten dem der Träger, aber deren Kapazität zur Aufnahme von Schwingungsenergie hängt weitgehend von der ihr auferlegten Drucklast ab.

Das Verhalten der Verbindungen

Ein Rahmenskelett besteht aus miteinander verbundenen Elementen. Es ist deshalb notwendig, daß man das Verhalten der Verbindungen genau studiert. Bei Trägern und Stützen mit konstantem Querschnitt stellen die Verbindungen Kontinuitätsunterbrechungen dar, deshalb verlangt ihr Verhalten gegenüber dynamischen Belastungen besondere Beachtung. Eine theoretische Untersuchung erweist sich als sehr kompliziert, sowohl wegen der verwickelten Formen, die eine genaue Verfolgung des Kraftflusses erschweren, als auch durch die verschiedenen verwendeten Verbindungsmittel, wie Schweißnähte, Schrauben, Nieten mit ihren besonderen Eigenschaften und sekundären Spannungen, die sie erzeugen können.

Auch hier bieten die Versuche von E.P. Popov mit verschiedenen geschweißten und verschraubten Verbindungstypen und Dehnungen bis zu 1,5% beziehungsweise 2% unter Wechsellasten eindeutige und wichtige Ergebnisse als Grundlage zur Untersuchung des Verhaltens reeller Konstruktionen. Sie ermöglichen eine bessere Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse, wenn man deren Ergebnisse in die vereinfachten Systeme einführt, welche als Grundlage für die theoretischen Studien dienen.

Diese Versuche bestätigen für alle untersuchten Verbindungstypen ein sehr gutes Tragverhalten, das sich widerspiegelt in einer Hysteresiskurve von bemerkenswerter Stabilität, womit bewiesen ist, daß die Energieaufnahme oberhalb einer bestimmten Lastspielzahl konstant ist.

Diese Versuche müssen noch ergänzt und ausgewertet werden, aber man kann bereits jetzt daraus schließen, daß für dynamisch beanspruchte Stahlskelette die üblichen einwandfrei konstruierten, geschweißten oder geschraubten Verbindungen genügen und keine Notwendigkeit besteht, komplizierte und unnötige Sonderlösungen vorzusehen, die sich unter Umständen sogar als ungünstig erweisen könnten.

Erfahrungen bei verschiedenen Erdbeben haben gezeigt, daß Schäden in den Verbindungen durch fehlerhafte Anordnungen verursacht wurden. Zum Beispiel sind konstruktive Lösungen zu vermeiden, die größere Unstetigkeiten bei der Spannungsverteilung im Querschnitt oder übermäßige Spannungsanhäufungen verursachen können und damit den Widerstand der Verbindung gegenüber Wechselbeanspruchung im elasto-plastischen Bereich verringern.

Aus Sicherheitsgründen sind die Verbindungen in jedem Falle so zu konstruieren und auszuführen, daß sie nicht vor den angeschlossenen Elementen versagen.

Das Verhalten von Stahlskelett und Gesamtbauwerk

Wirkungen infolge von Wind

Durch umfangreiche Modelluntersuchungen im Windkanal konnten die Kenntnisse über die Druckverteilung auf die Fassaden der Gebäude sowie bestimmte örtliche auf eine gegebene Windgeschwindigkeit bezogene Einwirkungen vertieft werden. Die mögliche Anwendung der aerodynamischen Gesetze auf dieses besondere Problem hat sich bestätigt. In modernen Windkanälen kann man bestimmte Umgebungsverhältnisse eines einzelnen zu erforschenden Gebäudes wiedergeben, um für die Untersuchungen ein möglichst wirklichkeitsgetreues Abbild der tatsächlichen Turbulenzbedingungen zu erhalten.

Messungen an vorhandenen Gebäuden zeigten jedoch bedeutende Unterschiede in Größe und Verteilung des Druckes im Vergleich zu den Ergebnissen der entsprechenden Modellversuche, weshalb die Notwendigkeit besteht, die Forschung in Windkanälen in dieser Richtung weiter zu vervollständigen. Solche in der Vergangenheit ungenügend ausgeführten Messungen werden augenblicklich besonders von C. W. Newberry unternommen.

Diese Forschungen betreffen jedoch nur den ersten Teil der hier zu behandelnden Frage. Der zweite Teil, das wirkliche Verhalten von Bauwerken, kann nicht an Modellen untersucht werden, da man die Eigenheiten der Reaktion der wirklichen Gebäude nicht naturgetreu wiedergeben kann.

Nur direkte Messungen an derartigen Gebäuden können eine gültige Antwort auf die verschiedenen sie betreffenden Fragen geben. Mit Ausnahme von einigen vor längerer Zeit durchgeführten Untersuchungen ist dieses Gebiet bis heute unerforscht geblieben.

Bemerkenswerte Untersuchungen wurden in Kanada durch R. Crawford und H. S. Ward an einem 18stöckigen Stahlskelettbau durchgeführt, und zwar mit Hilfe elektromagnetischer Seismographen und Magnetbandaufnahmen der Schwingungen infolge von Windeinwirkung. Obgleich mit diesen Messungen lediglich die auf mathematischem Wege erhaltenen Ergebnisse über die Eigenfrequenzen überprüft werden sollten und die Ergebnisse wegen des vorhandenen zentralen Betonkerns im Stahlskelett sowie massiver Deckenscheiben auf die vorliegenden Verhältnisse nicht unbedingt übertragbar sind, haben sich dabei dennoch einige interessante Beobachtungen ergeben.

Es hat sich gezeigt, daß hohe Windbelastungen dazu neigen, Schwingungen erster Ordnung zu verursachen, während kleine Windkräfte vorzugsweise Schwingungen höherer Ordnung erregen.

Der Verfasser findet, daß dieses Ergebnis unseren Kenntnissen über das Windlastspektrum gut entspricht.

Wirkungen infolge von Erdbeben

Die exakte Ermittlung des dynamischen Verhaltens eines reellen Bauwerks ist praktisch unmöglich. Dieses Verhalten wird durch die Eigenfrequenzen gemäß den verschiedenen Schwingungsformen der Konstruktion bestimmt und darüber hinaus durch die Dämpfungswirkung gemäß den technologischen Eigenheiten beeinflußt.

Die genaue Berechnung der Eigenfrequenzen eines Systems mit n Freiheitsgraden, wobei die Festlegung der Ordinaten für alle Schwingungsformen vorausgesetzt wird, steht für den Praktiker außer Diskussion. Schon für das einfache System, Träger auf zwei Stützen, beträgt $n = \infty$.

Nun besteht die Möglichkeit sich auf «gleichwertige» vereinfachte Systeme zu beziehen, die ein ähnliches Verhalten aufweisen. Eine solche Vereinfachung kann erzielt werden durch die Konzentration der Massen des Systems in gewissen Punkten und der Annahme der Belastungen in diesen Punkten wirkend. Selbstverständlich verlangt die Wahl eines vereinfachten Systems einen sicheren Sinn für das reelle Verhalten der Konstruktion, um eine genügend naturgetreue Wiedergabe zu gewährleisten.

Näherungsverfahren, die mit einer genügenden Genauigkeit die Grundfrequenz der ersten Schwingungsform liefern, wurden von Dunkerley und von Rayleigh entwickelt. Das Verfahren von Rayleigh beruht auf dem Prinzip der Erhaltung der Energie und wird vorzugsweise mit den durch J.A. Blume und M. Ifrim vorgeschlagenen Vereinfachungen angewandt. Zu beachten ist, daß das Verfahren von Dunkerley stets zu kleine Werte, jenes von Rayleigh hingegen zu große Werte liefert, so daß sich die genauen Werte durch die Anwendung beider Verfahren eingrenzen lassen. Ausgehend von der Verschiebungsmatrix hat S.A. Bernstein eine «Spektralfunktion» aufgestellt, die erlaubt, zwei Werte zu ermitteln, die die gesuchte Frequenz abgrenzen. Endlich erlaubt das klassisch gewordene Iterationsverfahren von Vianello-Stodola, ausgehend von einer passend gewählten Verformung, die Verformung des Systems durch schrittweise Näherung bis auf die gewünschte Genauigkeit zu bestimmen.

Die dabei erreichte Genauigkeit in der Berechnung der Eigenfrequenz bezieht sich allerdings nur auf das angenommene vereinfachte System. Daher versuchten verschiedene Forscher auf Grund von Versuchsergebnissen oder von theoretischen Erwägungen die Eigenfrequenzen der Bauwerke direkt durch empirische Formeln auszudrücken.

Die von T. Taniguchi beziehungsweise durch den U.S. Coast and Geodetic Survey und von E. Rosenblueth vorgeschlagenen Formeln geben den Wert der Eigenfrequenz für die erste Schwingungsform in Abhängigkeit der Anzahl

Stockwerke an. Diejenigen von I. L. Korchinski, von F. P. Ulrich und D. S. Carder und von M. Takeuchi nehmen Bezug auf die Höhe der Bauwerke, während die Formel des Joint Committee ASCE-SEA, bekannt unter dem Namen «Formel von San Francisco», ebenfalls von der Höhe, jedoch bezogen auf die Quadratwurzel der Breite des Gebäudes in Richtung der angenommenen Schwingungen, abhängig ist.

Durch Anwendung der allgemeinen Schwingungstheorie und des Prinzips von d'Alembert und durch Einführung einiger vereinfachender Hypothesen (Massen in jedem Geschoß als Massenpunkte wirkend, Träger unendlich steif) hat M. G. Salvadori eine Formel aufgestellt, die die Eigenfrequenzen für alle Schwingungsformen eines mehrgeschossigen Bauwerkes gibt. Eine ähnliche Formel wurde auch von R. G. Merritt und G. W. Housner vorgeschlagen.

Ausgehend vom Erdbebenspektrum und von den Eigenfrequenzen des Gebäudes, wurden bedeutende Forschungen unternommen – insbesondere mit Hilfe von Simulatoren –, um die verschiedenen Aspekte des dynamischen Verhaltens der Bauwerke abzuklären.

Verschiedene Methoden wurden entwickelt, wobei die Typen der zu verwendenden vereinfachten Modelle und die Bedingungen des Verhaltens im nichtlinearen Bereich unterschiedliche Annahmen getroffen wurden. Unter diesen Methoden ist die von N. M. Newmark vorgeschlagene eine der allgemeinsten.

Außer den bereits erwähnten Versuchsforschungen, die das Verhalten von Einzelelementen und ihrer Verbindungen betrafen, wurden besonders in Japan und den USA Versuche an ganzen Gebäuden unternommen, wobei die Erregung durch in verschiedenen Höhenlagen eingebaute Pulsatoren erzeugt wurde. Die so gewonnenen Resultate betreffen in erster Linie die Ermittlung der Eigenfrequenzen der reellen Bauwerke. Durch ihre Anzahl haben sie bereits einen gewissen statistischen Wert.

Bei einigen Versuchen – beschränkt in Anzahl und im Ausmaß – wurde sogar versucht, mit Hilfe von Explosionen Bodenstöße zu erzeugen.

Diese Forschungen, so nützlich sie sein mögen, können jedoch nicht die bis jetzt noch fehlenden Beobachtungen an Gebäuden während eines Erdbebens ersetzen.

Lehren aus der praktischen Erfahrung

Wind

Die im Laufe der Jahrhunderte gewonnene praktische Erfahrung diente als einzige Nachweisquelle für die Gestaltung und Bemessung der Bauten. Um die Kühnheit und die Sicherheit anzugleichen, mußte man wie beim Artillerieschießen vorgehen, indem man zuerst ein wenig diesseits und dann ein wenig jenseits der Widerstandsgrenze zielte.

Noch heute bildet die Praxis die letzten Endes gültige Informationsquelle, um die Berechnungshypothesen und die Gültigkeit der Ausführungen zu bestätigen oder zu entkräften. Die lehrreichsten Fälle sind dann auch jene Fälle, die zu Beschädigungen oder sogar zu Unfällen führen.

Die Angaben, die man so über die Gesamtstabilität der Stahlskeletthochhäuser sammeln kann, sind jedoch gering, weil kein Fall eines Einsturzes oder bedeutenden Schadenfalles durch Wind bei dieser Art von Bauwerken bekannt ist. Das ist der Beweis, daß die gegenwärtige Berechnungsweise auf der sicheren Seite liegt. Aber um wieviel?

Die wissenschaftlichen Mittel, über die man heute verfügt, sollten ein «oberhalb der Widerstandsgrenze Zielen» überflüssig machen und erlauben, die Sicherheitsspanne zu verringern, falls die Untersuchungen zeigen sollten, daß sie übertrieben ist.

Erdbeben

Trotz den zahlreichen unternommenen theoretischen Untersuchungen, die die wichtigsten Aspekte des Problems aufgedeckt haben, wird die Sicherheit gegenüber Erdbeben noch weitgehend auf empirische Erwägungen gestützt, einmal wegen der ungenügenden Kenntnis über die Belastungen und der Komplexität des dynamischen Widerstands des Bauwerkes, aber auch wegen der Unmöglichkeit, infolge mangelnder Angaben, ein genaues Verhältnis zwischen Ursache und Wirkung für die meisten bekannten Erdbeben aufzustellen.

Immerhin konnte aus der Untersuchung verschiedener Erdbebenwirkungen gefolgert werden, daß die Sicherheit der Bauten nicht allein in den konventionellen Berechnungen steckt, sondern auch in der Gestaltung und in der Ausführung der Bauwerke.

Eine wesentliche Bedingung, um ein gutes Verhalten des Gebäudes bei Erdbeben zu gewährleisten, besteht darin, alle seine Grundelemente gut untereinander zu verbinden. Diese Feststellung konnte in allen untersuchten Fällen gemacht werden, insbesondere bei Gebäuden, die den Bedingungen der Berechnungen nicht genügten, aber trotzdem gut standhielten. Der Verfasser konnte diese Feststellung anlässlich des katastrophalen Erdbebens in Bukarest, dessen Zeuge er im Jahre 1940 war und dessen Folgen er zu untersuchen hatte, machen. Obwohl bei den Berechnungen eine solche Beanspruchung nicht berücksichtigt worden war, erlitt kein Stahlskelettbau nennenswerte Schäden.

Einige Erdbeben, die sich in der letzten Zeit ereignet haben, waren Gegenstand genauerer Studien. Dabei wurde insbesondere das spezifische Verhalten der Gebäude in Abhängigkeit der Bauart, des angewandten Baustoffes und der Ausführungsbedingungen untersucht. Wenn auch diese Studien keine Auskunft geben können über den dynamischen Widerstand eines Gebäudes bei einer gegebenen Beanspruchung, so bieten sie zum mindesten wertvolle Angaben über die Gestaltung und die angemessene Ausführung von Gebäuden in Erdbebenzonen.

Berechnung und Dimensionierung

Einfluß des Windes:

Kritische Betrachtung der gegenwärtigen Berechnungsweise

Jede Berechnung setzt sich aus zwei sich ergänzenden Teilen zusammen: Bestimmung der Belastungen und Nachweis des Tragwerkes für diese Belastungen. Nachstehend werden wir sehen, wie sich diese beiden Punkte bei der Berechnung mehrgeschossiger Stahlskelettbauten unter Windeinwirkung verhalten.

Eine kritische Betrachtung der Bestimmungen in den einzelnen Ländern zeigt, daß diese Grundlagen häufig einen mehr oder weniger willkürlichen Charakter aufweisen. Folglich fehlt ihnen eine genaue wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlage, die für eine rationelle Bemessung unerläßlich ist. Solange man nicht über genügend gesicherte Angaben über die Einwirkungen des Windes verfügt, kann keine auf eine Verbesserung der Sicherheit hinzielende Berechnungsmethode ihr Ziel vollkommen erreichen. Diese Angaben sollten sich auf genaue Wahrscheinlichkeitskriterien stützen und auf internationaler Ebene vereinheitlicht werden.

Es ist zwar möglich, daß die eine oder andere dieser Hypothesen praktisch gerechtfertigt ist, aber es gibt keinen unwiderlegbaren Beweis der Richtigkeit einer solchen Berechnung.

Trotz den in den Grundlagen und in den Berechnungsmethoden vorhandenen Lücken hat man sich bei den neuesten Vorschriften bemüht, die Fortschritte in den Kenntnissen der Aerodynamik und der Wetterkunde nutzbar zu machen.

Auf diese Weise sind die Begriffe des «normalen Windes» und des «außerordentlichen Windes» geschaffen worden, die, wenn sie wirklich bestimmten Wahrscheinlichkeiten entsprächen, einen beachtlichen Schritt vorwärts bilden würden.

Die unregelmäßige Verteilung des Windes auf große Flächen findet ihren Ausdruck in einem Abminderungsfaktor, der Funktion der Abmessungen der betroffenen Fläche ist.

Schließlich stellen die schnellen Druckschwankungen eine dynamische Aktion dar, welche in den üblichen statischen Berechnungen der betreffenden Elemente durch einen Erhöhungsfaktor berücksichtigt wird. Gewisse Vorschriften haben kürzlich die Anwendung dieses Faktors auf die Berechnung der Gesamtstabilität mehrgeschossiger Gebäude erstreckt. Jedoch scheint die Richtigkeit dieser Maßnahme nicht bewiesen worden zu sein.

Auf jeden Fall ist der dynamische Erhöhungsfaktor nur auf Mittelwerte der Drücke, die einer bestimmten Zeitspanne entsprechen, anzuwenden.

*Einfluß der Erdbeben:
Kritische Betrachtung der Berechnungsgrundlagen*

Im Falle mehrgeschossiger Bauten bestehen keine Schwierigkeiten bei der Festsetzung der ständigen Lasten und der Verkehrslasten. Die Festsetzung der Windeinwirkung, obgleich noch mit Unzulänglichkeiten behaftet, sollte gelöst werden können, vorausgesetzt, daß man die erforderlichen Forschungen durchführt. Für Erdbeben hingegen ist es im Hinblick auf ihren Ursprung und ihre Zufälligkeit zumindest in der augenblicklichen Lage der Kenntnisse schwierig, genaue Auskünfte zu erlangen, die klar die Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung herausbringen und einen genügenden statistischen Wert haben, um die wirklichen Verhältnisse möglichst genau in die Vorschriften einkleiden zu können.

Es muß bemerkt werden, daß die Berechnung mit Hilfe eines seismischen Faktors durchgeführt wird, der allen vorhandenen Elementen Rechnung tragen sollte (Stärkegrad der Erdbeben, Beschaffenheit des Bodens, gegenseitige Wirkung zwischen Boden und Bauwerk, Massenverteilung usw.), aber dessen Wert in der Tat ziemlich willkürlich und fragwürdig ist. Die allgemeine Gestaltung des Skeletts, der Verbindungen und im gleichen Maße die Beschaffenheit und die Art der Verbindung der nichttragenden Elemente stellen dabei weitere Parameter dar, die bei der Festlegung des seismischen Faktors nicht in Betracht gezogen werden, die aber auf das Verhalten der Bauten einen beträchtlichen Einfluß ausüben.

Einführung wahrscheinlichkeitstheoretischer Begriffe

Für die dynamische Berechnung einer Konstruktion müssen sowohl die Eigenheiten der Erregung als auch diejenigen der Konstruktion, deren dynamischer Widerhall ja dadurch bestimmt wird, bekannt sein.

Der im wesentlichen ungewisse Charakter der Parameter, welche die tellurischen und äolischen Phänomene bestimmen und die Verflechtung der Faktoren, die das Verhalten der Bauwerke gegenüber den Wirkungen dieser Phänomene beeinflussen, führen notwendigerweise auf die Wahrscheinlichkeitsmethoden für die dynamische Berechnung der Bauwerke. Man stellt jedoch fest, daß dieses Gebiet gegenüber der jetzt allgemeinen Tendenz zur Berechnung der Bauten mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsmethoden im Verzug ist.

Die Erklärung liegt zweifellos in der Unzulänglichkeit der unentbehrlichen statistischen Angaben über die Belastungen und in der Schwierigkeit, ein so verwickeltes Problem, wie es das dynamische Verhalten der Bauwerke darstellt, statistisch genügend eng einzugrenzen. Für solche Fälle bieten die Wahrscheinlichkeitsmethoden das einzige Mittel, um eine ausreichende Annäherung an die Wirklichkeit zu erreichen. Im übrigen erlauben die statistisch-mathematischen Methoden in einem gewissen Umfang mangelhafte Angaben auszugleichen,

falls von einer angemessenen Anzahl sorgfältig ausgewählter Angaben ausgegangen wird.

Die Hauptaufgabe des Ingenieurs besteht auch hier in der Erzielung einer ausreichenden Sicherheit unter Beachtung der Gebote der Wirtschaftlichkeit. Um diese gegensätzlichen Erwägungen miteinander zu vereinbaren, ist es nötig, eine Beziehung zwischen den wahrscheinlichkeitsmäßig festgesetzten Belastungen und dem Verhalten des Bauwerkes zu finden, unter Bezugnahme auf ein bestimmtes Kriterium des Versagens. Das Endziel ist, einen Sicherheitsgrad zu erreichen, der der Art der Belastungen und den für diese Bauten annehmbaren Risiken entspricht.

Bemerkenswerte Beiträge zur Lösung dieses Problems bei seismischen Belastungen stammen besonders von E. Rosenblueth, M. F. Barstein, V. V. Bolotine, N. M. Newmark und H. Tajimi. Ähnliche Ansätze wurden von A. G. Davenport bei Windbeanspruchung aufskizziert.

Jedoch ist das Problem von einer Lösung noch weit entfernt, solange keine geeigneten statistischen Angaben vorliegen, die für die Aufstellung einer gültigen Grundlage erforderlich sind.

Sicherheitsgrade

Eine auf Wahrscheinlichkeitserwägungen beruhende Berechnung muß gegenüber jeder Kategorie von Risiken zu einem genau bestimmten Sicherheitsgrad führen, der mit Rücksicht auf die Wahrscheinlichkeit ihres Vorkommens und auf die Bedeutung ihrer möglichen Folgen festzulegen ist.

Für die hier behandelten Gebäude können die Risiken schematisch in vier Kategorien eingeteilt werden:

Unangenehme Empfindung für die Personen, die sich im Innern des Gebäudes aufhalten,

Kleinere Störungen, die begrenzte Schäden in den sekundären, nichttragenden Elementen hervorrufen,

Bedeutende Schäden in den sekundären, nichttragenden Elementen sowie kleinere Schäden im Haupttragwerk, die aber praktisch zu keinen Verletzungen von Personen führen,

Bedeutende Schäden im Haupttragwerk, die zu einem Teil- oder Totaleinsturz infolge statischer oder dynamischer Instabilität, durch plastisches Versagen oder durch Ermüdungserscheinungen führen und damit auch Verletzungen von Personen verursachen können.

Die Berechnung auf Wind muß für die verhältnismäßig häufig auftretenden Normalwinde gegen alle Risiken schützen, wobei aber die Wahrnehmung von durch ausnahmsweise starken Wind hervorgerufenen Bewegungen zuzulassen ist.

Bei Erdbeben, die bedeutend seltener als Wind auftreten und die schon durch ihre Definition und durch ihr Wesen den Charakter des Unvorhersehbaren

haben, ist es zulässig, geringe Schäden zu tolerieren, falls die erreichte Intensität im Vergleich mit der für diese Erdbebenzone festgelegten gering ist, und bedeutendere Schäden, falls ein verhältnismäßig stärkeres Erdbeben stattfindet. Die Festlegung des Risikos ist auf Grund einer wirtschaftlichen Studie – etwa im Sinne eines Versicherungsvertrages – durchzuführen, wobei dieses oder jenes Risiko eher als ein erhöhter Baupreis anzunehmen oder auszuschließen ist. Es handelt sich also um wirtschaftliche Erwägungen, die auf technische Tatsachen begründet sind.

Für die vorgesehenen, vermutlichen Belastungen soll dabei das Risiko von Menschenverlusten durch Einsturz stets ausgeschlossen werden.

Forschungen zur Erweiterung der heutigen Kenntnisse

Einfluß der Windeinwirkung

Die Gesamtwindeinwirkung auf Hochbauten wird in der gegenwärtigen Praxis nach ungenügend bestätigten Hypothesen bestimmt. Die Durchführung von Beobachtungen – Messung der Verschiebungen, Beschleunigungen und Spannungen mit gleichzeitiger Aufnahme der Geschwindigkeiten und der Richtung des Windes – an reellen Bauwerken ist unerläßlich, um das wirkliche Verhältnis sowohl zwischen ihren Größen als auch zwischen ihren Spektren genau festzustellen. Die Forschung müßte statistischen Charakter annehmen durch Erstreckung über einen ausreichenden Zeitabschnitt und Ausdehnung über mehrere Bauten verschiedener Charakteristik. Dadurch wird eine ausreichende Grundlage für die Aufstellung von Vorschriften geschaffen und zugleich die Anwendbarkeit eines dynamischen Koeffizienten auf das Gesamtverhalten des Bauwerkes geprüft.

Besondere Aufmerksamkeit muß der Empfindlichkeit des Gesamtbaues gegenüber Windböen eingeräumt werden, um die Empfindlichkeitsschwelle in Funktion der Dauer festzustellen und die Berechtigung von Reduktionsfaktoren für große Flächen zu prüfen.

Durch direkte Messungen an reellen Bauwerken soll die Beziehung zwischen der Dauer der Böenwirkungen und ihrer möglichen Folgen auf die Bauwerke besser ermittelt werden. Diese Beziehung ist noch sehr mangelhaft bekannt und wird daher in den gegenwärtigen Berechnungsregeln ungenügend berücksichtigt.

Örtliche Windeinwirkungen können bei Fassaden zu Druck- und Sogwirkungen führen, die ein Vielfaches des Grundwertes des dynamischen Druckes erreichen können.

Eine Studie anhand von Windkanalversuchen, verbunden mit Messungen an reellen Bauten, könnte zum Gegenstand eine systematische Analyse der örtlichen Drücke in den am meisten belasteten Teilen der Fassaden des Bauwerkes unter Berücksichtigung der Form dieser letzteren haben. Günstige Formen

sowohl für den Gesamtbau, als auch für die Ausbildung der Kanten, könnten so empfohlen werden.

Einfluß der Erdbeben

Wenn trotz aller auf diesem Gebiet unternommenen Forschungen Bauwerke, die den Erdbeben standhalten sollten, immer noch nach weitgehend willkürlichen Kriterien ausgeführt werden, so liegt der Hauptgrund ohne Zweifel am Fehlen von Angaben über die bis heute verzeichneten Erdbeben. Mit wenigen Ausnahmen liegen keine Meßangaben vor, die erlauben, die bei den verschiedenen Erdbeben festgestellten Schäden gültig auszulegen. Jedoch allein eine direkte Gegenüberstellung bekannter Belastungen und ihrer Auswirkungen könnte schlußkräftig sein.

Der zufällige Charakter der tellurischen Ereignisse erlaubt keine systematische Beobachtung, da diese davon abhängen würde, daß am Ort des nächsten Erdbebens zufälligerweise Registrierapparate aufgestellt sind.

Einrichtungen mit einer geeigneten Instrumentierung zur Registrierung von Erdbebenstößen und gleichzeitig des dynamischen Widerhalls der Bauwerke wurden kürzlich in einigen Bauwerken in Los Angeles, San Francisco, Mexico City und Tokio aufgestellt. Trotz der relativ hohen Kosten – gemessen an der Wahrscheinlichkeit, am gewählten Ort ein Erdbeben zu verzeichnen – scheint es denkbar, durch internationale Vereinbarungen ein wirkliches Beobachtungsnetz zu schaffen, indem man eine größere Anzahl von Stahlskelettbauten in besonders gefährdeten Gegenden mit solchen Einrichtungen ausrüstet. Die Aussicht, in einem vernünftigen Zeitraum die noch fehlenden Auskünfte über den dynamischen Widerhall der reellen Gebäude bei einem Erdbeben zu erhalten, würde bedeutend größer sein. Ein Teil der vorgesehenen Instrumentierung könnte übrigens auch für die Beobachtung der Windwirkungen an denselben Gebäuden dienen.

Ohne auf die Durchführung einer solchen bedeutenden – aber keineswegs utopischen – Aktion zu warten, könnte man schon jetzt versuchen, die vorhandenen Auskünfte in größerem Maßstabe auszuwerten. Gewisse, kürzlich verzeichnete Erdbeben waren Gegenstand aufschlußreicher Studien, trotz mangelnder Registrierung der entsprechenden Erdbebenstöße. Eine allgemeine Studie, die eine große Anzahl von Beobachtungen enthält, würde sicherlich praktische und sehr nützliche Aufschlüsse erlauben.

Eine Gesamtuntersuchung aller während oder nach den Erdbeben gemachten Feststellungen ist deshalb wünschenswert.

Vervollkommnung der Berechnungsmethoden

Die dynamischen Berechnungsmethoden der Bauwerke erfuhren im Laufe der letzten Jahre eine bemerkenswerte Entwicklung im Sinne einer genaueren

Analyse der betreffenden Vorgänge. Wegen der vereinfachten Hypothesen, die diese Methoden heranziehen müssen, ist diese Genauigkeit jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus vernachlässigen diese Methoden gewisse Parameter, deren Einfluß immerhin bedeutend ist, oder sie berücksichtigen sie in ungenügender Weise.

Die Berechnungsmethoden müssen mit Hilfe von aus Analogiesimulationen gewonnenen Erkenntnissen und unter weitgehender Ausnützung der durch Digitalrechner angebotenen Möglichkeiten entwickelt werden. Die Forschungen auf Hybrid-Rechenanlagen, welche erlauben, sich auf jedes beliebige wirklich registrierte oder fiktive «nach Maß» geschaffene Erdbeben zu beziehen sowie alle gewünschten, richtig definierten Parameter in Betracht zu ziehen, zeigen interessante Ergebnisse.

Für praktische Anwendungen müssen die Berechnungsmethoden jedoch nach wie vor in einfachen Formen ausgedrückt werden, damit sie den praktischen Anforderungen genügen können.

Natürlich muß jede so aufgebaute Art der Berechnung weitgehend den direkten Beobachtungen an reellen Gebäuden gegenübergestellt werden, weil diese letzten Endes eine unbestreitbare Informationsquelle darstellen.

Ausnützung der Widerstandsreserven im nichtlinearen Bereich

Trotz der Bedeutung der Energieaufnahme, die sich unterhalb der Widerstandsgrenze der Stahlskelette im nichtlinearen Bereich vollzieht, ist das Verhalten der Stockwerkrahmen unter zyklischen Belastungen im nichtlinearen Bereich bisher nicht durch Versuche untersucht worden. Solche Studien sollten unter anderem unternommen werden, um die Höhe der Energieaufnahme in Abhängigkeit von der Höhe der Beanspruchungen zu überprüfen, die Auswirkungen aufeinanderfolgender plastischer Verformungen bei Lastwechseln zu ermitteln und die eventuellen Verfestigungsvorgänge, die einen Einfluß auf den Widerstand haben können, festzustellen.

Die Ergebnisse dieser Forschungen sollten eine Grundlage für die Berücksichtigung dieser bedeutenden Sicherheitsreserve in den Vorschriften der seismischen Berechnung der Bauwerke liefern.

Übrigens enthalten diese Vorschriften – selbst nach dem heutigen Stand der Kenntnisse – in dieser Hinsicht einen schweren Fehler, denn der seismische Faktor berücksichtigt nicht in zufriedenstellender Weise die jeder Bauweise entsprechende und charakteristische Fähigkeit der Energieaufnahme. Die Vorschriften müssen – nach G. V. Berg – jedoch die Fähigkeit der Energieaufnahme «belohnen» und das Fehlen dieser Eigenschaft «bestrafen».

Eine experimentelle Forschung könnte in Versuchsanstalten an mit verschiedenen Arten von Füllungen und Verkleidungen versehenen Stahlrahmen

unternommen werden, um deren Einfluß auf das Verhalten gegenüber dynamischen Belastungen festzustellen.

Verbindungen

Obgleich es anerkannt und durch Versuche bewiesen ist, daß im Stahlbau jede gut erdachte, normal gestaltete und ausgeführte Verbindung fähig ist, dynamische Belastungen im Verhältnis zum Widerstand des Skeletts ohne Schaden zu ertragen, scheint es zweckmäßig, eingehendere systematische Studien vorzunehmen, um für jeden Verbindungstyp die charakteristischen Widerstandsgrenzen zu erforschen, eine Klassifizierung aufzustellen und sogar neue, den Anforderungen besser entsprechende Typen zu entwickeln.

Diese Studien sollten alle gebräuchlichen Verbindungsmittel und -verfahren berücksichtigen. Dünnwandige Teile von mäßigen Ausmaßen und dickwandige Teile von großen Ausmaßen sollten getrennt betrachtet werden.

Eine besondere Forschung sollte dem spezifischen Verhalten der hochfesten Schraubenverbindungen gewidmet werden, ein Verfahren, das sich in voller Entwicklung befindet und dessen gutes Verhalten gegen Lockerwerden für andere Belastungsfälle bereits erwiesen ist.

Eigenschaften des Werkstoffes und der Bauglieder

Die verlangten Haupteigenschaften des Metalls für diesen Typ von Belastungen – Dehnbarkeit, Widerstand gegenüber Wechselbelastungen bei kleiner Anzahl von Lastspielen und für gewisse Elemente Dauerfestigkeit – sind an normalen Baustählen schon viel untersucht worden.

Die Verwendung neuer Stahlsorten mit höheren mechanischen Eigenschaften, die bei Stahlskelettbauten begonnen hat, führt dazu, daß Forschungen unternommen werden, um festzustellen, in welchem Maße diese Eigenschaften in den neuen Stahlsorten anzutreffen sind.

Die Stabilitätsfälle, die im elasto-plastischen Bereich unter der Einwirkung von Schwell- oder Wechsellasten entstehen können, waren schon Gegenstand von Studien. Diese scheinen jedoch das Thema im Hinblick auf das Verhalten der Skelette nicht erschöpft zu haben. Dies betrifft insbesondere den Einfluß der Höhe der statischen Beanspruchung der Stützen durch senkrechte Lasten auf den Widerstand dieser letzteren gegenüber den transversalen dynamischen Wirkungen.

Schlußfolgerung

Die komplexen Probleme im Zusammenhang mit den dynamischen Belastungen und ihren Einwirkungen auf die Stahlskeletthochbauten wurden erst

in neuerer Zeit gestellt. Die modernen Mittel der Forschung haben jedoch den Forschern erlaubt, bereits zu einer vertieften Kenntnis der damit verbundenen Vorgänge zu gelangen.

Dieses umfangreiche Gebiet benötigt aber noch bedeutende zusätzliche Informationen, insbesondere über die Grundlagen der Wirkungen des Windes und der Erdbeben sowie über das wirkliche Verhalten der reellen Bauwerke mit all ihren unterschiedlichen konstruktiven und technologischen Eigenheiten, die schwer durch eine einfache Formulierung zu erfassen sind.

Die allgemeine Orientierung der künftigen Forschung muß auf eine bessere Annäherung an die Wirklichkeit zielen zum Nutzen der Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit und des Fortschritts im Bauwesen.