

Einfluss baulicher Konzepte auf den Widerstand gegen Erdbeben

Autor(en): **Studer, Jost A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 23

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79254>

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.

Jost A. Studer, Zürich

Einfluss baulicher Konzepte auf den Widerstand gegen Erdbeben

Beobachtungen bei Erdbeben zeigen immer wieder, dass sich bestimmte Bauformen und Baumaterialien unter Erdbebenbelastung widerstandsfähiger als andere erweisen. Der nachfolgende Beitrag stellt die Erfahrung und Kenntnisse bezüglich erdbebengerechtem Bauwerksaufbau zusammen.

Die Erfahrung beim grossen Hanshin-Erdbeben vom 17. Januar 1995 (Kobe, Japan) zeigte erneut, dass grundsätzlich mittels moderner Dimensionierungsmethoden Bauwerke praktisch beliebiger Form und unterschiedlicher Materialien gegen Erdbebenlasten ausgelegt werden können. Trotzdem sind Bauten, welche die Grundsätze erdbebengerechter Bauweise berücksichtigen, wegen der auch heute noch weitgehend nicht genügend genau erfassbaren Grösse der lokalen Erdbebenbelastung wesentlich widerstandsfähiger als Bauwerke, die diese Grundsätze nicht berücksichtigen. Der nachfolgende Beitrag soll Baufachleuten, die nicht auf Erdbeben spezialisiert sind, ermöglichen, bei der Projektierung eines Gebäudes bereits durch ein erdbebengerechtes Konzept eine minimale Erdbebensicherheit zu erreichen bzw. bei der Beurteilung älterer Bausubstanzen die Erdbebensicherheit abzuschätzen. Die Erläuterungen sind generell gültig. Das Abschätzen der Widerstandskraft aufgrund von Beobachtungen allein beschränkt sich jedoch auf Bauten, die nicht mittels moderner Bemessungsmethoden auf Erdbeben ausgelegt worden sind. In den Industrieländern sind solche Bauten vorwiegend ältere Bauten (vor etwa 1970 erstellt) und eher in ländlichen Gegenden liegend. In Entwicklungsländern sind auch heute noch im allgemeinen nur moderne internationale Hotel- und Bürobauteile und die wichtigsten Regierungsbauteile nach moderneren Grundsätzen des Erdbebeningenieurwesens ausgelegt.

Ursachen für Schäden

Bauten

Schäden an Bauten entstehen durch erdbebeninduzierte Untergrunddeformationen oder Bauwerkschwingungen.

Untergrunddeformationen sind erdbebeninduzierte Setzungen oder Rutschungen. In wassergesättigten, locker gelagerten Feinsanden können durch die Bebenerschütterungen Porenwasserüberdrücke induziert werden, die zu einem vollständigen Festigkeitsverlust des Untergrunds führen können (Bodenverflüssigung). Damit können auch in relativ flachem Gelände bedeutende Untergrundverschiebungen auftreten. Bauten können so auch auf vorgängig stabilem Untergrund kippen (Bilder 1 und 2) oder vergrabene Bauwerke können aufschwimmen. Durch die Untergrunddeformationen können Bauten derart in Mitleidenschaft gezogen werden, dass ihre Gebrauchstauglichkeit oder gar Sicherheit nicht mehr gewährleistet ist.

Jedes Bauwerk und Bauteil kann zu Schwingungen angeregt werden. Das Schwingungsverhalten hängt wesentlich vom Tragsystem ab. Aber auch nichttragende Elemente können das Schwingverhalten, dessen Art zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit wesentlich ist, beeinflussen.

Lifelines

Die städtische Lebensweise ist stark von sogenannten Lifelines, d.h. Infrastrukturbauteilen für Energieversorgung, Telekommunikation, Verkehr, Wasserver- und -entsorgung abhängig. Einerseits handelt es sich hier um normale Hoch- und Tiefbauten, andererseits um linienförmige Versorgungsstränge, die Bereiche unterschiedlicher Topographie und Geologie durchqueren. Werden solche Lifelines an einer Stelle unterbrochen, so kann, wenn nicht-redundante Systeme vorhanden sind, das entsprechende System ganz ausfallen.



1

Wirkung einer Bodenverflüssigung auf Bauten mit üblicher Fundation (Niigata 1964). Die Bauten sind ohne eigentliche strukturelle Schäden wie Schiffe «gekentert». Vergrabene Bauten werden bei solchen Verhältnissen aufschwimmen. Ein infolge Erdbebenwirkung «verflüssigter» Untergrund gewinnt innerhalb weniger Minuten nach dem Beben seine ursprüngliche Festigkeit zurück



2

Untergrunddeformationen infolge Bodenverflüssigung im Hafen von Kobe (17. Januar 1995). Während die Lagerbauten und Brücken dank genügend ausgebildeter Pfahlfundationen nur beschränkte Schäden aufwiesen, erlitten die Hafentore infolge ungenügender Fundation starke Schäden. Der Hafen fiel für mehrere Monate aus



4

Intakte Bauten dank Pfahlfundationen bei Setzungen von 0,8 m infolge Bodenverflüssigung (Rokko Island, Kobe Japan 1995)

3

Typische Nahfeld-Bodenbewegungen bei Erdbeben unterschiedlicher Magnitude (Streuungen sind sehr gross von Beben zu Beben und Standort zu Standort)

Erdbeben	Magnitude	a_{max} (g)	Dauer (s)	v_{max} (cm/s)	d_{max} (cm)
El Centro 1940	6.7	0.36	12	37	20
S. Fernando 1971	6.4	1.25	10	113	37
Managua 1972	6.2	0.38	10	38	15
Ancona 1972	4.9	0.61	4	9.5	1
Northridge 1994	6.7	0.9 - 1.82	12	102	53
Kobe 1995	7.2	0.87	15	40	45

Beobachtung der Situation	Gefährdung bei Erdbeben	Massnahmen
Fels:		
- Sehr steile Felswand aus brüchigem Kalkstein, Sandstein usw. Steine abgebrochen und nur wenig durch Vegetation überwuchert	hoch Die Gefährdung ist besonders hoch, wenn auch ohne Erdbeben ein leichter Stein-schlag vorhanden ist.	als Bauzone vermeiden
- steile Felswände, kompakt	gering	-
Lockergestein:		
- Rutschgebiet erkennbar durch schiefgestellte Bäume. Sackungen im Terrain	hoch	als Bauzone vermeiden
- Gleichmässig geneigtes Gelände bewachsen mit Wald oder Büschen	gering	-

Beobachtung der Situation	Gefährdung bei Erdbeben	Massnahmen
- Bauten befinden sich in einem Rutschgebiet		
• Die Rutschungen betragen bis wenige mm/Jahr. Dies ist aus den Beobachtungen von Rissen in Mauern und Wänden von Gebäuden erkennbar.	hoch	als Bauzone ungünstig; keine wichtigen Bauten darauf erstellen
• Die Rutschungen betragen mehr als wenige mm/Jahr	sehr hoch	als Bauzone vermeiden
- Bauten befinden sich in gleichmässig leicht geneigtem Terrain. Keine Anzeichen für Rutschungen erkennbar.	gering	-

5

Gefährdung durch oberhalb der Bauten gelegene Hänge (oben) und der Bauwerke in Hanglagen (unten)

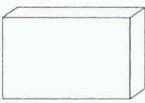
Beobachtung der Situation	Gefährdung bei Erdbeben	Massnahmen
- Natürlich oder künstlich aufgefüllte mäandrierende Flussläufe. Grundwasserspiegel hoch.	mittel bis hoch	als Bauzone für wichtige Bauten vermeiden oder entsprechende Tieffundationen notwendig
- Schwemmland, Verlandungszonen von Seen, Deltas. Grundwasserspiegel hoch.	mittel bis hoch	

6

Gefährdung durch Bodenbewegungen im Flachland infolge schlechten Baugrunds

7

Ausgewählte Bauformen und deren Verhalten unter Erdbebenbelastung

Bauform	Vorkommen	Probleme	Gefährdung bei Erdbeben	Abhilfe
	schmale Hochhausplatte Appartement- und Bürohäuser	grosse Kippmomente grosse Auslenkungen führen zu Schäden an nichttragenden Bauteilen	gross	Änderung der Abmessungen steife Ausbildungen, um Auslegungen und Schäden an nichttragenden Elementen zu reduzieren
	grossflächige Lagerhallen Einkaufszentren	grosse Kräfte in Dachkonstruktion	mittel	Gebäude mittels «seismischer Fugen» unterteilen
	Reihenhaussiedlung	grosser Widerstandsunterschied in zwei Achsen	gering bis mittel	Gebäude mittels «seismischer Fugen» unterteilen

Abmessungen

Während bei Hochbauten und dem grösseren Teil der Tiefbauten (Brücken, unterirdische Bahnhöfe, Strassentunnels, oberirdische Leitungssysteme) Schäden sowohl von Bodendeformationen und/oder Bauwerkschwingungen herrühren können, sind Schäden an unterirdischen Leitungssystemen primär auf Untergrunddeformationen zurückzuführen.

Lokale dynamische Bodenbewegung

Die lokal vorhandene dynamische Bodenbewegung bzw. -deformation ist die eigentliche Bauwerkbelastung. Sie ist nicht nur von der Stärke und der Entfernung des Erdbebens, sondern auch wesentlich von der lokalen Geologie und Topographie abhängig. Bei der Beurteilung wichtiger Bauten ist deshalb dem letzteren vermehrt Aufmerksamkeit zu schenken. Weiche Lockergesteinsschichten wie Tone und Auffüllungen (jeglicher Materialart) sind ungünstige Untergrundverhältnisse und verstärken im allgemeinen die Erdbebenbelastung.

Dies hat sich wiederum beim Grossen Hanshin-Erdbeben 1995 gezeigt, bei dem das Hauptschadengebiet weitgehend mit den alluvialen Lockergesteinsüberdeckungen, und nicht dem felsigen Untergrund, an den Hängen des Rokkogebirges, zusammenfiel, obwohl beide Untergrundzonen im engsten Nahbereich der Verwerfung liegen. Neuere Untersuchungen zeigten, dass z. B. in der Schweiz der Einfluss der lokalen Geologie auf die Bebenintensität in der gleichen Grösse liegt wie sie durch die unterschiedliche seismische Gefährdung gegeben ist. Die lokalen Untergrundverhältnisse sind in Zukunft deshalb unbedingt stärker zu beachten.

Die Dauer der starken Erschütterung ist bei starken Erdbeben bedeutend länger als bei schwachen. Sie ist wichtig für Resonanzanfahrungen und für Festigkeitsverluste («low-cycle-fatigue», Bodenverflüssigung) verantwortlich.

Typische Bodenbewegungen bei Erdbeben unterschiedlicher Stärken sind illustrativ in Bild 3 zusammengestellt. Sie geben Hinweise darauf, welche Lasten und Deformationen bei einem Erdbeben im Nahfeld auf Bauten einwirken. Die Streuung ist stets beträchtlich und hängt stark von den lokalen Verhältnissen ab.

Beurteilung der Widerstandskraft durch Beobachtungen, Massnahmen

Wie dargestellt, stammen die Schäden an Bauten infolge Erdbeben aus Untergrundversagen (Verschiebungen) und exzessi-

ven Bauwerkschwingungen. Bei der Beurteilung der Widerstandskraft sind deshalb beide möglichen Schadenursachen zu beachten. Es ist möglich, die beiden Ursachen weitgehend getrennt zu untersuchen.

Permanente Bodenverschiebungen

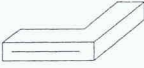
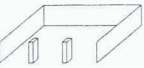
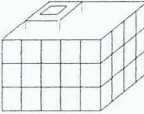

Bodenverschiebungen wie erdbebeninduzierte Setzungen, Rutschungen usw. sind z.T. auf die Wirkung von Trägheitskräften des Erdbebens und z.T. auf erdbebeninduzierte Festigkeitsverluste zurückzuführen. Durch Trägheitskräfte ausgelöste Deformationen entstehen im Verlauf der stärksten Bebenerschütterungen und beschränken sich im allgemeinen auf steilere Lockergesteinshänge oder Felswände. Hingegen entstehen Rutschungen und Bodendeformationen infolge Festigkeitsverlust durch Porenwasserdruckanstieg im allgemeinen am Bebenende, z.T. auch einige Minuten danach. Solche Rutschungen und Bodendeformationen sind auch in relativ flachem Gelände möglich, sie beschränken sich aber meist auf bereits vorgängig aktive Rutschgebiete (z. B. Flynzonen).

In Gebieten mit locker gelagertem, wassergesättigtem sandigem Untergrund können weitreichende Bodenverflüssigungen auftreten. Solche Gebiete sind z.B. Verlandungszonen, Aufschüttungen in alten Flussläufen oder Hafengebieten. Eine erdbebengerechte Foundation, z.B. mittels Tiefenverdichtung des Untergrunds oder Pfahlfundationen auf tragfähigen Untergrund, ist unabdingbar. Mit modernen Untersuchungsmethoden der Bodendynamik können heute bodenverflüssigungsanfällige Gebiete relativ zuverlässig identifiziert werden. Es bestehen heute anerkannte Korrelationen mit verbreiteten Untersuchungstechniken wie z. B. mit SPT-Werten. Beim Grossen Hanshin-Beben zeigten pfahlfundierte Bauten auf den künstlich geschütteten Inseln Port und Rokko Island nur beschränkt Schäden auf, obwohl sich die Oberfläche der Inseln infolge der Bodenverflüssigung um 0,3 bis 1 m setzte (Bild 4).

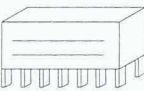
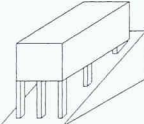
Beschränkte Bodendeformationen können durch entsprechend ausgebildete Fundationen aufgenommen werden. So sollten in seismisch aktiven Gebieten Einzelfundamente mittels Riegeln miteinander verbunden werden.

In Hanglagen können Bauten durch hangaufwärts ausgelöste Ereignisse (Felsstürze, Lawinen usw.) oder durch Rutschungen und Sackungen Schäden erleiden. Die Gefährdung kann gemäss Bild 5 abgeschätzt werden.

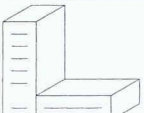
Bauten im Flachland sind im allgemeinen nur durch Bodendeformationen gefährdet, wenn sie auf schlechtem Bau-

Bauform	Vorkommen	Probleme	Gefährdung bei Erdbeben	Abhilfe
	Gebäude an Strassenecken	Torsion infolge Formgestaltung Spannungskonzentration in der Ecke	in Eckpartien hoch	in zwei Einzelgebäude trennen
	eingeschossige Geschäfte mit Schaufensterfront Busterminals	Torsion, infolge unterschiedlicher Steifigkeitsverteilung	hoch	Versteifen der offenen Wandpartie geschlossene Wände als nichttragend ausbilden
	Lagerhäuser mit exzentrischer Anordnung der Liftanlagen	Torsion, infolge asymmetrisch steifem Kern	hoch	steifer Kern von übrigem Tragsystem abtrennen symmetrische Anordnung wählen
	Lagergebäude für Schuttgüter	Torsion, infolge stark unterschiedlicher Massenverteilung	hoch	spezielle, ingenieurmässige Auslegung unumgänglich

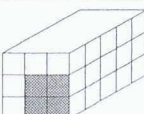
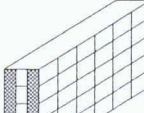

Grundrisse

Bauform	Vorkommen	Probleme	Gefährdung bei Erdbeben	Abhilfe
	Bürohäuser mit Parkfeldern Geschäftshäuser mit grossen Schaufensterfronten	grosse Steifigkeitsunterschiede im Erdgeschoss «soft story»	hoch bis sehr hoch	Aussteifung des Erdgeschosses
	Bauten an Hanglage ohne Nutzung der Untergeschosse	wie oben, aber verstärkt Steifigkeitsunterschiede auch über Grundfläche des Erdgeschosses	sehr hoch	dieser Typ ist stets zu vermeiden

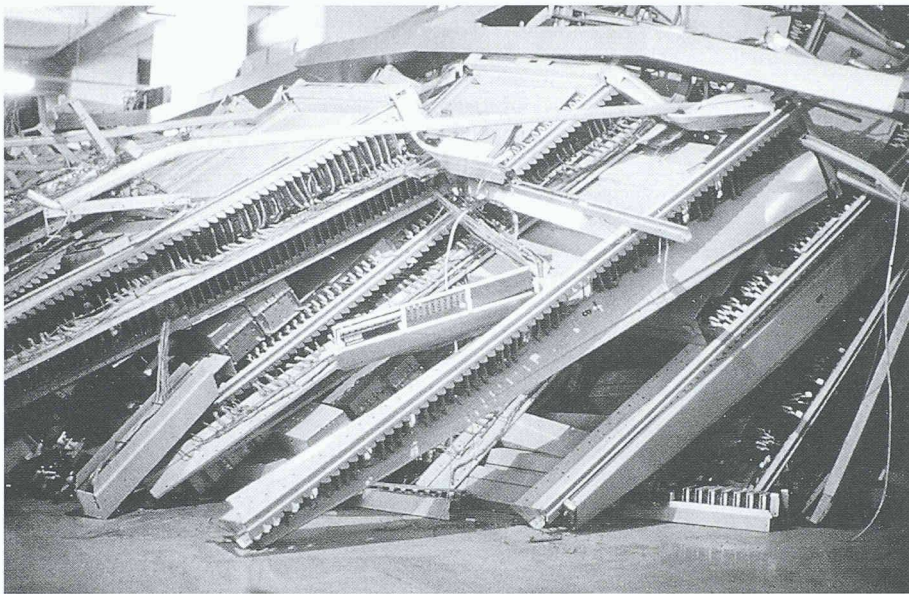
Vertikaler Querschnitt

Bauform	Vorkommen	Probleme	Gefährdung bei Erdbeben	Abhilfe
	Bürohaus und Lagergebäude kombiniert	unterschiedliches Schwingverhalten von hohem und niedrigem Gebäude Kontaktstelle besitzt Spannungskonzentration	mittel bis hoch, je nach Unterschied Gebäudehöhe	Gebäudeteile trennen «seismische Fugen» genügend stark ausbilden

Unterschiedliche Bauhöhen

Bauform	typisches Verhalten/Vorkommen	Probleme	Gefährdung bei Erdbeben	Abhilfe
	Lager-/Bürogebäude in Rahmenbauweise Öffnungen teilweise geschlossen	unterschiedliche Steifigkeiten	mittel bis hoch	Füllungen abtrennen oder nichttragend ausbilden
	Bürohäuser mit zentralem Gang	unterschiedliches Deformationsverhalten von Schubwänden und Mittelteil	hoch bis sehr hoch	möglichst vermeiden sorgfältige Dimensionierung und konstruktive Gestaltung (Armierungsführung)
	Schubwände mit Rahmentragwerk	extrem asymmetrische Steifigkeitsverteilung	sehr hoch	zu vermeiden

Unterschiedliche Tragsysteme



8

Telefonzentrale Mexiko-City nach dem Mexiko-Beben vom 19. 9. 1985 ($M = 8,1$)

grund fundiert sind oder/und eher schwer und/oder hoch gebaut sind. Hinweise auf schlechten Baugrund finden sich in Bild 6.

Die Baugrundverhältnisse und die Lage des Grundwassers lassen sich durch einen Geologen mittels Baggerschlitz oder Bohrung relativ einfach bestimmen.

Schwingungen

Die Erschütterungen des Erdbebens regen das Bauwerk als Ganzes und die einzelnen Bauelemente zu Schwingungen an. Die Beanspruchung ist bei den grössten Schwingungsamplituden am grössten. Die stärkste Beanspruchung eines Bauwerks entsteht dann, wenn das Beben durch Frequenzgehalt und Dauer den Untergrund in seinen Eigenfrequenzen anregen kann und die Eigenfrequenzen des Bauwerks weitgehend mit den Eigenfrequenzen des Untergrunds übereinstimmen. Deshalb werden niedrige Bauwerke (hohe Eigenfrequenzen) auf steifem Baugrund (hohe Eigenfrequenzen) im allgemeinen stärker beansprucht als hohe Bauwerke (tiefe Eigenfrequenzen) auf dem gleichen Baugrund. Hohe Bauwerke sind demnach vor allem auf weichem, tiefgründigem Baugrund gefährdet.

Wesentlich ist, dass sich das Bauwerk unter der Schwingungsbelastung duktil verhält, d.h. dass durch plastische Defor-

mationen Energie vernichtet wird und ein sprödes Festigkeitsversagen vermieden werden kann. Baustoffe wie Stahl und Holz verhalten sich von Natur aus weitgehend duktil, während Beton und Backstein ein sprödes Verhalten zeigen. Durch eine entsprechende Ausbildung der Armierung kann auch Beton zu duktilem Verhalten gezwungen werden.

Die Widerstandskraft sogenannter «Non-engineered-structures» beruht weitgehend auf dem Gebäudelayout und einer geeigneten Wahl der Baustoffe (kein sprödes Verhalten) und deren konstruktiver Ausbildung (Hinweise auf günstige und ungünstige Layouts gibt Bild 7).

Ein Bauwerk ist von Natur aus zur Aufnahme von vertikalen Lasten konzipiert. Seine Widerstandsfähigkeit ist jedoch im allgemeinen ohne besondere Massnahmen auf Horizontal- und Torsionslasten kaum ausgelegt. Die Erdbebensicherheit eines Bauwerks wird deshalb durch Vermeiden von extremen Horizontal- und Torsionslasten erhöht. Im weiteren gilt es, Überlastungen einzelner Bauelemente und Bauwerkteile möglichst zu verhindern. Dies kann weitgehend durch eine entsprechende Gestaltung in Grund- und Aufriss erreicht werden. Durch eine geeignete Materialwahl und konstruktive Ausbildung der Bauelemente wird er-

reicht, dass die entsprechenden Lasten aufgenommen werden und sich das Gesamtbauwerk duktil verhält.

Eigenschaften von erdbebengerechten Bauten

Ein erdbebengerecht erstelltes Bauwerk zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- beschränkte Abmessungen
- weitgehende Symmetrie in Grund- und Aufriss
- günstige Formen in Grund- und Aufriss (z.B. keine einspringenden Ecken)
- weitgehende Homogenität in Steifigkeit und Massenverteilung der Bauelemente in Grund- und Aufriss
- möglichst homogene Wahl bei den Baumaterialien
- möglichst duktile Baumaterialien

Nichttragende Elemente eines Gebäudes und Installationen

Nichttragende Elemente wie Zwischenwände, Abtrennungen und Fassadenelemente können namentlich in der Anfangsphase eines Erdbebens das Schwingverhalten wesentlich beeinflussen. Sie übernehmen einen Teil der Lasten und wirken deshalb versteifend auf das Gesamtbauwerk. Dadurch kann sich die Belastung infolge Verschiebung der Eigenfrequenzen wesentlich ändern, als dies auf Grund der Beurteilung des reinen Tragsystems allein angenommen werden kann.

Installationen, Einbauten usw. werden ebenfalls zu Schwingungen angeregt. Da in einem Gebäude Erschütterungen mit steigender Höhe über Terrain stärker angeregt werden, können solche Einbauten namentlich in oberen Stockwerken losgerissen werden und umkippen. Dabei kann ohne strukturelle Schäden am eigentlichen Bauwerk eine grosse Schadenhöhe erreicht werden (Bild 8). Oft können solche Schäden durch konstruktive Massnahmen, wie gutes Befestigen an der Tragstruktur, ohne eigentlichen Mehraufwand vermieden werden.

Adresse des Verfassers:

Jost A. Studer, Dr. sc. techn., dipl. Bauing.
ETH/SIA/ASIC, Thujastrasse 4, 8038 Zürich