

Das grosse Hanshin-Erdbeben vom 17. Januar 1995

Journal Article**Author(s):**

Koller, Martin G.; Studer, Jost A.; [Wenk, Thomas](#) 

Publication date:

1995-03-09

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006395955>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Schweizer Ingenieur und Architekt 113(11)

Martin G. Koller, Carouge, Jost A. Studer, Thomas Wenk, Zürich

Das Grosse Hanshin-Erdbeben vom 17. Januar 1995

Das Grosse Hanshin-Erdbeben vom 17. Januar 1995 stellt das folgenschwerste Beben der letzten 50 Jahre in Japan dar und hat die Industriestadt Kobe ins Herz getroffen. Es forderte 5380 Tote und 27 000 Verletzte. 107 000 Häuser (entspricht etwa 30% aller Gebäude) wurden zum Teil stark beschädigt, davon stürzten etwa 20 000, in erster Linie Holzhäuser, ein. Ein Erkundungsteam der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGEB) innerhalb des SIA weilte eine Woche im Schadengebiet und konnte dort wertvolle Beobachtungen machen.

Die Erkundungsmision der drei beauftragten Experten verfolgte die folgenden Ziele:

- einen Schadenüberblick, namentlich bei modernen Bauten, als Grundlage zur Beurteilung der Zuverlässigkeit heutiger Erdbebenauslegung und Normen zu erarbeiten
- Kontakte für nachfolgende vertiefte Untersuchungen und Abklärungen zu knüpfen.

Die Mission erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Katastrophenhilfekorps (SKH). Weitere finanzielle Unterstützung leisteten das Schweizerische Komitee der Internationalen Dekade zur

Reduktion der Naturgefahren (IDNDR) sowie das Nationale Forschungsprogramm (NFP) 31.

Schadenübersicht

Kobe – Industriestadt und wichtigster Hafen Japans – zählt 1.5 Mio. Einwohner. Der industrielle Aufschwung begann nach dem grossen Kanto-Beben von 1923, als ein Teil der Industrie aus Sicherheitsgründen aus der Gegend von Tokio nach Kobe übersiedelte. Im Zweiten Weltkrieg wurde Kobe fast völlig zerstört. Die Nachkriegszeit bis Anfang der siebziger Jahre zeichnet sich durch eine starke Bautätigkeit aus. Viele Neubauten dokumentieren eine rege Bautätigkeit in den achtziger und neunziger Jahren. Die Bausubstanz darf deshalb als weitgehend jung bezeichnet werden.

Die nachfolgende Schadenübersicht basiert auf japanischen Zeitungsangaben. Die durch die japanische Meteorological Agency ermittelten Intensitäten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die hohe Zahl der Toten und Verletzten wäre sicher noch wesentlich höher ausgefallen, wenn das Beben nicht um 05.46 Lokalzeit, sondern nur wenige Stunden später während der Stosszeit mit den überfüllten Vorortzügen und Hochstrassen erfolgt wäre. Das lokale Bahnnetz mit sehr dichten Zugfolgen und das Hochleistungsstrassennetz wurden weitgehend zer-

stört. Dies führte zu einem immensen Verkehrschaos durch den Privatverkehr, der die Rettungs- und Aufräumarbeiten stark behinderte. Die Behörden setzten deshalb ihren Schwerpunkt in der – mindestens provisorischen – Wiederherstellung von Eisenbahnlinien und Verkehrswegen. Bis allerdings das Eisenbahnnetz wieder durchgehend befahrbar ist, werden Monate vergehen.

Beim Beben fiel die Strom-, Wasser- und Gasversorgung in der Agglomeration Kobe praktisch vollständig aus. Erstaunlich rasch konnten bereits nach sechs Tagen alle Gebäude – mit Ausnahme von 40 000 Haushalten in instabilen und zerstörten Bauten – wieder ans Stromnetz angeschlossen werden. Auch die Wasserzufuhr funktionierte behelfsmässig in den weniger beschädigten Quartieren bereits etwa 14 Tage nach dem Ereignis wieder. Der Ausfall der Wasserleitungen verunmöglichte die Bekämpfung der über 350 Brandherde, namentlich in den Wohngebieten mit Holzhäusern. Diese waren zum Teil nach zwei Tagen noch nicht gelöscht. Bereits nach drei Tagen war Kobe durch eine Vielzahl von Satelliten-Telefonanschlüssen mit der Aussenwelt verbunden, die jedermann kostenlos benutzen konnte. Dies ist eine grundsätzlich andere Doktrin als die in der Schweiz vorgesehene Massnahme, bei einer Grosskatastrophe private Telefonanschlüsse zu sperren.

Wenn auch in den japanischen Medien das Anlaufen der Rettungsarbeiten unmit-

Intensität		
japanische Skala	MSK	
7	XI	im Hauptschadengebiet von Kobe
6	VIII...X	im grössten Teil von Kobe, in Sumoto und im Norden von Awaji
5	VI...VII	in Kyoto, Hikon, Toyooka
4	V...VI	in Osaka, Nara, Maizuru, Wakayama und Himeji

Tabelle 1.
Beobachtete Intensitäten des Grossen Hanshin-Erdbebens vom 17.1.1995

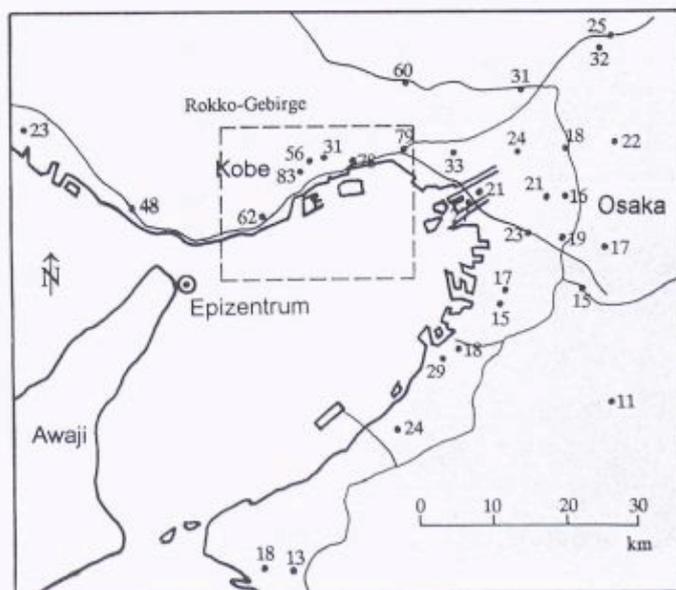


Bild 1.
Gerundete horizontale Spitzenbodenbeschleunigungen

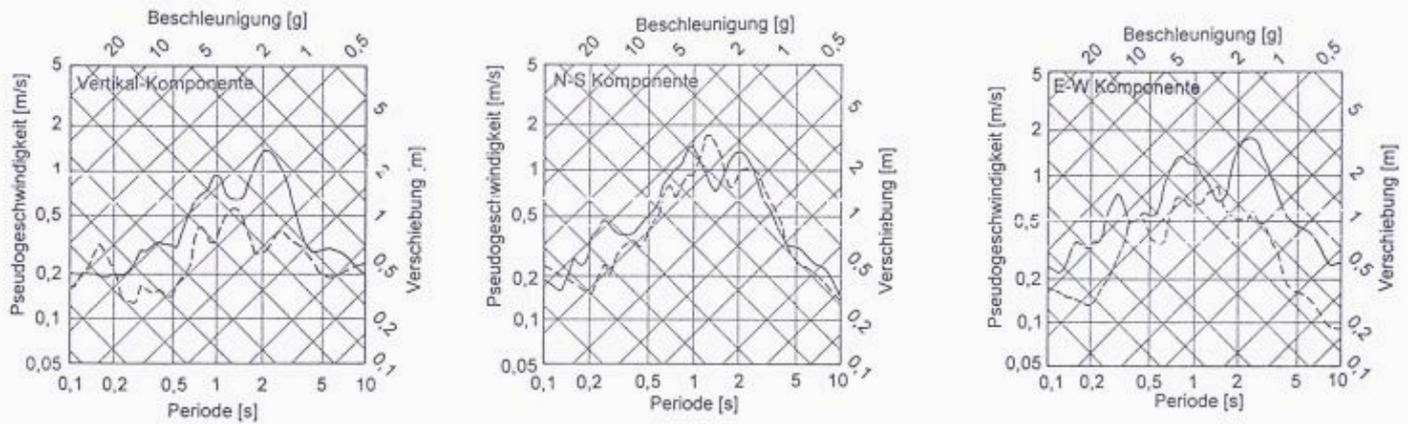


Bild 2.
Antwortspektrum 5% Dämpfung (Geo Research Institute, Osaka).

— = «Kobe Motoyama»;
- - - = «Kobe University»

telbar nach dem Beben als zu langsam und unkoordiniert kritisiert wurde, darf festgehalten werden, dass die Aufräumarbeiten aussergewöhnlich rasch und effizient vorangetrieben werden.

Seismologische Aspekte

Die Hafenstadt Kobe und ihre Vororte bilden einen langen Streifen, eingebettet zwischen der Meeresbucht von Osaka und dem zur Küste parallel verlaufenden Rokko-Gebirge (Bild 1). Ein Schnitt quer zur Küstenlinie zeigt, dass die äussersten bergseitigen Quartiere auf Granit gebaut sind; in einem überwiegenden mittleren Bereich besteht der Untergrund aus «mittelsteifen» alluvialen Ablagerungen – im wesentlichen ein Kiessand mit einer Scherwellengeschwindigkeit von etwa 350 m/s in Oberflächennähe. Die Mächtigkeit dieser Ablagerungen

geringen nimmt zur Küste hin zu und erreicht dort Werte von einigen hundert Metern. Ein Küstenstreifen von mehreren hundert Metern Breite sowie zwei vorgelagerte, dicht bebaute künstliche Inseln bestehen aus Aufschüttungen.

Das Epizentrum des Grossen Hanshin-Bebens mit einer Magnitude von $M_1 = 7.2$ liegt zwischen der Insel Awaji und dem Festland. Die Herdtiefe beträgt 13 km. Ein oberflächennaher Scherbruch («strike-slip») hat sich bis nach Kobe und längs der Stadt auf einer Länge von 40 km ausgebildet – wahrscheinlich in Form zweier wenige Sekunden auseinanderliegender Bruchvorgänge.

In entgegengesetzter Richtung hat sich der Bruch entlang der Nordwestküste der Insel Awaji über etwa 10 km fortgebildet und dabei auf 9 km Länge die Oberfläche erreicht. Der Spannungsabfall in der Bruchfläche ist zwar noch nicht zuverlässig ermittelt, doch dürfte er ausgesprochen hoch

gewesen sein; provisorische Werte von über 100 bar wurden schon genannt.

In Bild 1 sind die maximalen Werte der horizontalen Bodenbeschleunigungen eingetragen, die entweder direkt gemessen oder aus Geschwindigkeitsmessungen errechnet wurden. Im alluvialen Bereich sind an verschiedenen Orten Werte bis über 80% g horizontal zu verzeichnen, was einmal mehr unterstreicht, dass auch auf Lockergestein so hohe Werte möglich sind.

Was den Raum Kobe anbetrifft, so sind bisher nur zwei Seismogramme des Hauptbebens öffentlich zugänglich. Es handelt sich um Geschwindigkeitsmessungen in den Stationen «Kobe University» auf Fels und «Kobe Motoyama» auf Alluvium, wobei letztere leider bei 400 mm/s gesättigt wurde. Trotzdem liessen sich aus den ungesättigten Teilen Akzelerogramme und wenigstens näherungsweise Antwortspektren errechnen (Bild 2). Einmal mehr wurde damit widerlegt, dass die maximal auftretenden Beschleunigungswerte in den Antwortspektren auf mittelsteifen alluvialen Böden höchstens gleich gross oder gar kleiner seien als die maximalen Werte auf Fels. Im weiteren fällt auf, dass für einen «strike-slip»-Mechanismus ausgesprochen hohe vertikale Bodenbeschleunigungen aufgetreten sind, was sich mit der unmittelbaren Herdnähe erklären lässt.

Das auffälligste – und bisher noch nicht wirklich verstandene – Merkmal dieses Bebens ist, dass die Hauptschadenszone einen rund 30 Kilometer langen und nur ein bis zwei Kilometer breiten Streifen darstellt (Bild 3). Die bergseitige Begrenzung folgt zwar teilweise, aber keinesfalls überall der Grenze zwischen Granit und Alluvium, und meerseitig liegen die Bereiche künstlicher Aufschüttungen im wesentlichen ausserhalb der Hauptschadenszone. Ungünstige lokale Untergrundeinflüsse scheinen deshalb auf den ersten Blick keine vorherr-

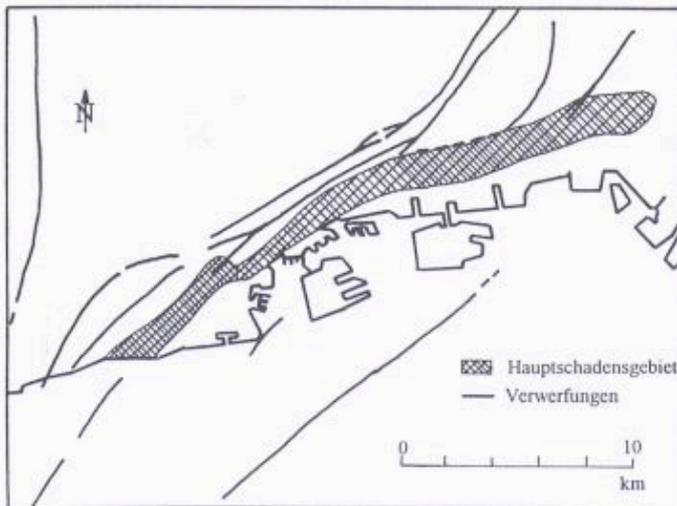


Bild 3.
Hauptschadensgebiet Grossraum Kobe



Bild 4. Setzungen infolge Bodenverflüssigung auf Port-Island

schende Rolle gespielt zu haben, was zahlreiche Experten dazu verleitet hat, die schmale Hauptschadenszone als Abbild der unmittelbar unter ihr liegenden Bruchfläche zu erklären.

Allein, diese Interpretation hält einer genaueren Prüfung nicht stand. Wäre die Bruchfläche des Bebens tatsächlich überall unterhalb der Hauptschadenszone verlaufen, so hätten sich die Stationen «Kobe University» ($a_{\max} = 31\%$ g in Bild 1) und «Kobe Motoyama» ($a_{\max} = 78\%$ g in Bild 1), soweit aus den verfügbaren Karten hervorgeht, auf den einander gegenüberliegenden Seiten der Bruchfläche befunden. Die Polarisierung der horizontalen Bodenbewegungen ist aber an beiden Orten dieselbe, was für dieselbe Seite spricht. Auch die Lokalisierung der zahlreichen Nachbeben, deren Hypozentren gewöhnlich in und vor allem am Rand der Hauptbruchfläche liegen, widerspricht der erwähnten Hypothese: Der Bruch dürfte sich vielmehr entlang den in Bild 3 gezeichneten, bekannten Verwerfungssegmenten und damit längs dem nordwestlichen Stadtrand ausgebildet haben. Die schmale Hauptschadenszone müsste damit doch überwiegend auf Standorteinflüsse zurückzuführen sein. Weshalb aber zeigten dann die Bereiche der Aufschüttungen nicht die grössten Schäden, wie dies gewöhnlich zu beobachten ist?

Auf den ersten Blick ist man versucht, starke nichtlineare Effekte in den Aufschüttungen zur Erklärung beizuziehen. Doch hat sich auch bei schwachen Aftershocks gezeigt - die Universität Kyoto hat



Bild 5. Umfangreiche horizontale und vertikale Bodenverschiebungen infolge Versagen der Hafenanlagen auf Port-Island

nach dem Hauptbeben mehrere Messgeräte installiert -, dass die spektralen Beschleunigungen innerhalb des Hauptschadengebietes insbesondere im Bereich von 2 Hz deutlich höher ausfielen als auf den Aufschüttungen: Erklärt etwa eine Koinzidenz der Standort- und der Gebäude-Eigenfrequenzen das schmale Band der Hauptschadenszone? Eine abgesicherte Erklärung wird erst mit Hilfe tiefergehender Untersuchungen zu finden sein.

Geotechnische Aspekte

Der Grossteil der baugrundinduzierten Schäden wurde auf den kiessandigen Alluvionen in der Küstennähe, den künstlichen Aufschüttungen im Hafen und den künstlichen Inseln beobachtet. In grossen Bereichen der Hafenanlagen und auf den künstlichen Inseln konnten grosse vertikale und horizontale Bodenverschiebungen beobachtet werden. Diese wurden durch die weitläufige Bodenverflüssigung ausgelöst. Die Oberfläche der künstlichen Inseln setzte sich grossflächig zwischen 0.3 m und 1 m. Hafenanlagen versagten auf weite Strecken, was zu horizontalen Deformationen von mehreren Metern und zu lokalen Setzungen bis zu drei Metern führte. Bilder umgekippter Wohnbauten und aufgeschwommener unterirdischer Tanks, wie sie von Nijagata (1964) bekannt sind, konnten jedoch dank den Fortschritten der Fundamentstechnik nicht beobachtet werden. Die Schäden an Bauten sind deshalb erstaunlich ge-

ring. So blieb das Spital auf Port-Island, das auf 60 m langen Pfählen fundiert sein soll, funktionstüchtig. Geringes Schiefstellen oder Aufschwimmen konnte nur bei wenigen Bauten, meist weniger wichtigen, beobachtet werden.

Das infolge der Bodenverflüssigung ausgespülte Material zeigt die typische Korngrößenverteilung eines schlechtabgestuften homogenen Feinsandes. Das ausgespülte Material überdeckte grosse Flächen mit einer mehrere Zentimeter dicken Schicht. Die Strassen und Plätze mussten im folgenden wie bei Schneefall geräumt werden.

Auf der künstlichen Insel Port-Island verläuft eine aufgeständerte Hafenbahn. Deutlich ist in Bild 4 die grosse Setzung (knapp 1 m) der Umgebung eines Pfeilers zu erkennen. Pfeiler und Überbau der Hafenbahn und Bauwerke im Hintergrund zeigten keine Schäden, weil sie tief fundiert sind. Bild 5 zeigt eine der vielen beschädigten Hafenanlagen. Die horizontalen Deformationen betragen mehrere Meter. Die etwas zurückgesetzten, tief fundierten Gebäude sind weitgehend unbeschädigt.

Im Stadtgebiet gibt es drei grössere Strassen- und zwei grössere Eisenbahntunnel. Zwei Strassen- und ein Eisenbahntunnel von je etwa 7 km Länge unterqueren das Rokko-Gebirge senkrecht zur Küste; der Tunnel der Schnellbahn Shinkansen (Länge zweimal 15 km) verläuft parallel zur Küste im Rokko-Gebirge. Während die Strassentunnel nach japanischen Angaben offenbar keine Schäden erlitten haben, soll

im Innern des Shinkansentunnels an einer Stelle, vermutlich in der Nähe der Verwerfung, die Tunnelauskleidung leicht beschädigt sein.

Industrieanlagen

Die meisten Industrieanlagen Kobes befinden sich in Küstennähe und damit im Bereich der Aufschüttungen. Die wesentlichsten Schäden ergaben sich aus den grossen Bodendeformationen; direkte Schäden infolge der Erdbebenbeschleunigungen als solche waren nur wenige zu sehen.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind die Schäden an den Hafen- und Industrieanlagen als verheerend zu bezeichnen, dies insbesondere, wenn auch die umfassenden Produktionsausfälle berücksichtigt werden, die sich über viele Monate hinziehen werden. Aus dem Blickwinkel von Umweltschutz und Sicherheit hingegen haben sich die meisten Lager und Anlagen zufriedenstellend verhalten. Zwar meldete die «Japan Times» vom 5.2.95, 40 % von Kobes 415 Tanklager für Erdölprodukte seien beschädigt worden. Doch handelte es sich hierbei in der Mehrzahl um von Auge kaum feststellbare bleibende Verformungen und geringfügige Schrägstellungen, die nur in Einzelfällen spektakuläre Ausmassen annahmen (Bild 6). Es gelang den Autoren jedenfalls nicht, auch nur einen einzigen Tank zu finden, der infolge der Erdbebeneerschütterung kollabiert wäre oder das typische Schadenbild eines «Elephantenfusses» aufgewiesen hätte. Trotzdem ist wohl als grosses Glück zu bezeichnen, dass in den Industrieanlagen, im Gegensatz zu den

Wohnzonen, kein einziges nennenswertes Feuer ausgebrochen ist.

Den Autoren kam ein einziger ernsthafter Zwischenfall zu Ohren: ein Leck eines Ventils in einer Leitung für toxisches Gas, was eine Evakuierung der Bevölkerung im Umkreis weniger Kilometer notwendig machte. Im weiteren waren da und dort Risse in Sohle und Wänden von Auffangbecken von Tanklagern zu beobachten (Bild 7), die sich aber nicht auswirkten, da keine Lecks in Tanks entstanden sind.

Im allgemeinen war es erwartungsgemäss unmöglich, Zutritt zu den Industriearäumen zu erhalten; Beobachtungen erfolgten gewöhnlich von aussen. Eine Ausnahme bildete die Nihon Oil (Kobe Depot), deren Direktor die Autoren persönlich durch sein Tankareal führte und bereitwillig Auskunft erteilte. Dieser Besuch hatte sich über einen hohen Beamten der Stadtverwaltung organisieren lassen und war dem Goodwill zu verdanken, den der Einsatz der Schweizer Rettungskette geschaffen hatte.

Über ein Dutzend unverankerte, das heisst auf der Fundamentplatte frei aufliegende grosse zylindrische Tanklager der Nihon Oil mit Durchmessern bis 25 m sind über zahlreiche, ausschliesslich oberirdische Rohrleitungen miteinander und mit der Abfüllstation auf der Hafemole verbunden. Obwohl diese Mole sich fast fünf Meter meerwärts verschoben hatte, war keine einzige Leitung gerissen – eine einzige Fuge war leicht undicht. Zu beachten ist, dass das ganze Rohrleitungssystem mit unzähligen Verschiebungskompensatoren bestückt war. Strom- wie Wasserversorgung, deren Leitungen sich alle im Boden befanden,

wurden beide infolge von Leitungsbrüchen unterbrochen. Da das Areal keine Notstromgruppe aufwies, hätte deshalb keine Chance bestanden, ein ausbrechendes Feuer mit eigenen Mitteln wirksam zu bekämpfen.

Wasserkraftwerke erlitten nach japanischen Angaben auf dem Festland keine Schäden, während auf der Insel Awaji ein Damm kleinere Schäden erlitten haben soll. Detaillierte Angaben waren bis zur Abreise am 1. Februar nicht zu erhalten. 10 (Totalkapazität 1.6 MW) von total 36 Einheiten von Wärmekraftwerken wurden beschädigt. Am 23. Januar nachmittags konnten 7 davon bereits wieder in Betrieb genommen werden. Kernkraftwerke waren im näheren Umkreis von Kobe keine vorhanden.

Brücken

Der spektakulärste Brückeneinsturz dieses Erdbebens war sicher das seitliche Umkippen des Hanshin-Expressways auf einer Länge von ungefähr 500 m. Die etwas über 20 m breite Autobahn wird als Hochstrasse in einer Höhe von rund 10 m über mehrere Kilometer durch das Stadtgebiet von Kobe geführt. Die typische Spannweite der auf Einzelstützen mit Hammerkopf gelagerten Mehrfeldträger beträgt 35 m. Beim umgekippten Teil konnten die Schadenmechanismen nicht mehr genau inspiziert werden, da die Abbrucharbeiten schon weit fortgeschritten waren. Dagegen wiesen sehr viele praktisch gleich gebaute Stützen in den anschliessenden, nicht eingestürzten Teilen der Hochstrasse Schädigungen auf, die von wenigen Betonabplatzungen bis knapp zum Einsturz reichten.

Ein typisches Schadenbild infolge hoher Biege- und Normalkraftbeanspruchung am Stützenfuss (rund 1 m über dem darunterliegenden Pfahlbankett) zeigt Bild 8. Es handelt sich um eine runde Stahlbetonstütze mit 3.10 m Durchmesser der gleichen Bauart wie im seitlich umgekippten Teil der Brücke. Vermutlich entspricht dieses Bild auch dem Anfangsstadium der Schädigung, wie sie sich dort abgespielt hat. Die Vertikalbewehrung besteht aus zwei bis drei Lagen Stäbe Durchmesser 35 mm im Abstand von etwa 10 cm. Einige dieser Vertikalstäbe sind beim Stumpfschweisstoss entzweigerissen, wie in der Mitte des Bildes 8 sichtbar ist. Andere Vertikalstäbe sind auf Druck ausgeknickt. Ringförmige Bügel mit Durchmesser 16 mm sind im Abstand 30 cm angeordnet. Bei einem derart grossen Stützendurchmesser von 3.10 m und einer entsprechend geringen Bügelkrümmung wird deren Umschnürungswirkung jedoch ungenügend. Dies führt zu einem relativ spröden Bruchverhalten der Stützen mit wenig

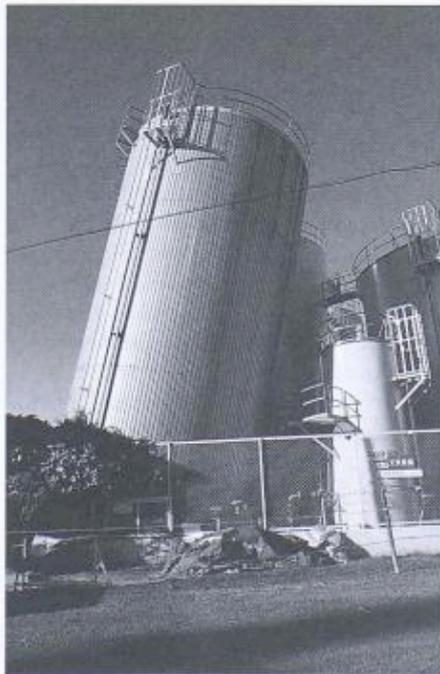


Bild 7.
Behelfsmässig mit Sandsäcken abgedichteter Riss im Auffangbecken eines Tanklagers

Bild 6.
Infolge Bodenverflüssigung seitlich gekippter Tank. Tank blieb ohne Leck

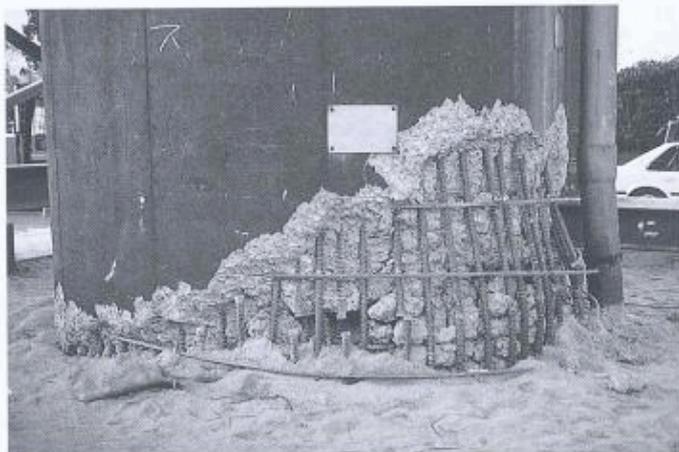


Bild 8.
Abgebrochene und
ausgeknickte Beweh-
rung am Fuss einer
runden Stütze des
Hanshin-Expressways

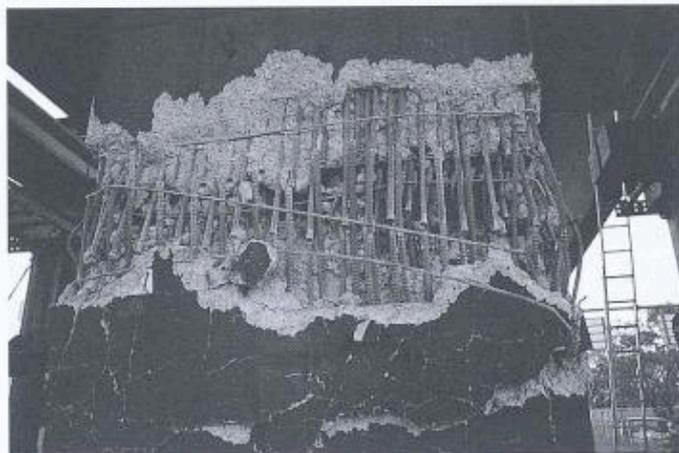


Bild 10.
Abgebrochene
Stumpfschweiss-
stösse der vertikalen
Bewehrung (Detail
aus Bild 9)



Bild 9.
Bruchzone auf mittlerer Höhe einer Stütze des
Hanshin-Expressways

Reserven gegenüber einer momentanen Beanspruchungsspitze während des Erdbebens. Um ein günstigeres, duktileres Stützenverhalten zu erreichen, müsste eine wirksamere Verbügelung vorgesehen und die Schweissnähte ausserhalb der plasti-

schen Gelenkzone am Stützenfuss verschoben werden.

Einige massive, rechteckige Brückenstützen der gleichen Hochstrasse wiesen auf mittlerer Höhe ein praktisch horizontales Band mit Betonabplatzungen auf (Bild 9).

Eine Detailaufnahme dieses Bereichs erklärt, warum die Schwachstelle gerade hier aufgetreten ist und nicht am höher beanspruchten Stützenfuss: Fast alle Vertikalstäbe sind wieder bei den Stumpfschweisstößen gebrochen (Bild 10). Zwar sind zwei gegenseitig versetzte Niveaus der Stösse zu erkennen, doch der Abstand beträgt nur etwa zehnmals den Durchmesser der Vertikalbewehrung. Als Umschnürringbewehrung sind einzig rechteckige Umfassungsbügel über die gesamte Breite des Stützenquerschnitts in der ersten und dritten Lage zu erkennen. Eine zusätzliche Stabilisierungsbewehrung fehlt.

Ähnliche rotationssymmetrische Schadenbilder auf mittlerer Höhe konnten auch bei einer Reihe von runden Stahlbeton- und Stahlstützen beobachtet werden. Das Ende der inneren Vertikalbewehrungslage bei den Stahlbetonstützen bzw. die Abstufung der Wandstärke der zylindrischen Stahlstützen dürften für das Auftreten der Schäden auf dieser Höhe verantwortlich sein. Die Rotationssymmetrie der Schäden lässt einen ungewöhnlich starken Einfluss der Vertikalbeschleunigung vermuten. Ebenfalls für diese Hypothese sprechen die grossen gemessenen Spektralwerte der Vertikalbeschleunigung von über 1 g bei hohen Frequenzen (ausgezogene Linie in Bild 2, links).



Bild 11.
Absturz des Trägers einer Verbundbrücke

Der Absturz des Trägers bei zu kurzen Auflagerbereichen ist ein bekannter Schadenmechanismus von Balkenbrücken, der auch hier wieder einige Male aufgetreten ist. Bild 11 zeigt den Absturz einer gekrümmten Verbundbrücke im Bereich eines Verzweigungsbauwerkes des Hanshin-Expressways. In Bild 12 wäre der obere Träger fast vom zweistöckigen Brückenjoch hinuntergefallen. Eine relativ breite Auflagerbank hat Schlimmeres verhindert. Immerhin sind oberer und unterer Träger über mehrere Felder von den Lagern auf die Brückenjoch gestürzt.

Bei einer dreifeldrigen Eisenbahnbrücke hielt das besondere Horizontalkraftlager auf Seite des Widerlagers mit fester Lagerung der Erdbebenbeanspruchung nicht stand (Bild 13). Die Ankerplatte ist ausgerissen, ein Absturz des Trägers vom Widerlager konnte vermutlich durch einen Anprall auf das gegenüberliegende, bewegliche Widerlager verhindert werden.

Zur Bauzeit vieler eingestürzter Brücken in den Jahren 1950 bis 1970, in diese Periode fällt auch der Hanshin-Expressway, schrieben die japanischen Brückennormen lediglich einen seismischen Koeffizienten von, je nach Bodenverhältnissen, 15 bis 35% g vor. Für den Nachweis der Erdbebensicherheit durften die zulässigen Spannungen gegenüber den Nachweisen für Eigengewicht und Nutzlasten um bis zu 80% erhöht werden. Verglichen mit den während des Erdbebens gemessenen Bodenbeschleunigungswerten (Bild 2) sind die damaligen Annahmen eindeutig zu gering. Erst Anfang der achtziger Jahre wurden moderne Erdbebenbestimmungen mit duktilen Konzepten und höheren Einwirkungswerten eingeführt.



Bild 12.
Beinahe-Absturz des oberen Brückenträgers



Bild 13.
Aus der Verankerung gerissenes Horizontalkraftlager einer Eisenbahnbrücke

Holzhäuser

Niedrige Holzhäuser gelten in der Fachwelt als weitgehend erdbebensicher. In Kobe aber traten die grossen Verluste an Menschenleben in den engen Wohnquartieren mit Holzhäusern auf. Für diese traditionellen Bauten sind bis zu zwei Stockwerken keine ingenieurmässigen Nachweise der Erdbebensicherheit erforderlich. Es zeigte sich, dass viele dieser Bauten infolge typischer «soft-story»-Effekte strassenweise umkippten oder das Erdgeschoss einfach einknickte.

An einigen Neubauten konnte die Bauweise näher untersucht werden. Es zeigte

sich, dass sie keine oder nur ungenügende Querverstrebungen aufweisen. Die seitliche Steifigkeit wurde meistens durch Vernageln von Putzplatten auf einen Lattenrost an den Aussenwänden erzielt. Diese Versteifung genügte bei relativ kleinen Erdbeben und liess sich im folgenden auch leicht reparieren. Bei einem starken Beben zerbrechen diese Platten aber spröde, und der Bau verliert weitgehend seine horizontale Steifigkeit. Die traditionelle japanische Bauweise besitzt praktisch keine aussteifenden Innenwände. Zudem waren in Kobe in vielen Häusern im Erdgeschoss Läden und Handwerkerräume untergebracht. Beides unterstützte die «soft-story»-Effekte. Aus



klimatischen Gründen waren auf dem Dach meist 5 bis 10 cm Sandschicht als Unterlage für die relativ schweren Ziegel (Taifun-Schutz) vorhanden, was sich ebenfalls ungünstig auswirkte.

Bild 14 zeigt typische Schadenmerkmale eines Holzbaus. Das Gebäude ist infolge eines «soft-story»-Effekts etwa 1,5 m nach links gekippt. Deutlich erkennbar ist das wenig versteifte Untergeschoss. Auf der rechten Seite ist eine 1,5 m bis 2 m breite Wand als Versteifung vorhanden. Die aufgenagelte Wandplatte ist im Erdgeschoss vollständig, im Obergeschoss teilweise abgebrochen. Als Versteifung bleibt nur noch der nicht diagonal versteifte Lattenrost übrig.

Hochbauten aus Beton und Stahl

Sehr eindrücklich war, dass immer wieder dicht nebeneinander ältere Bauten eingestürzt, während neue Bauten praktisch ohne Schäden blieben (Bilder 15, 17 und 18).



Bild 14.
Nach links gekipptes Holzhaus («soft-story»-Effekt)

Bild 15.
Gebäude der Stadtverwaltung mit Mittelgeschosseinsturz

Bild 16.
Umgestürzte Büromöbel in Gebäude von Bild 15





Bild 17.
Geschäftshaus mit Mittelgeschosseinsturz



Bild 18.
Eingestürztes älteres Gebäude lehnt sich an unbeschädigten Neubau

Hierzu hat sicher die wesentliche Verschärfung der japanischen Erdbebenbestimmungen für Hochbauten im Jahre 1981 beigetragen. So ist zum Beispiel der flache Bau der Stadtverwaltung von Kobe aus dem Jahre 1957 im drittobersten Stockwerk eingestürzt (im Vordergrund von Bild 15), dagegen blieb das 1989 eingeweihte Hochhaus der Stadtverwaltung voll funktionstüchtig, inklusive Lift (im Hintergrund von Bild 15). Neben den Baunormen spielte hier das unterschiedliche Schwingungsverhalten der beiden Bauwerke eine wichtige Rolle. Der steifere Flachbau war viel empfindlicher auf die relativ hochfrequente Bodenbewegung. Einen Einblick in ein Grossraumbüro des Flachbaus unmittelbar unterhalb des eingestürzten Stockwerkes bietet Bild 16. Neben dem allgemeinen Durcheinander fiel auf, dass das Tragwerk hier nur wenige Risse aufwies. Die Schäden blieben praktisch auf das darüberliegende, eingestürzte Stockwerk begrenzt.

Der Einsturz eines einzelnen Stockwerkes, sei es des Erdgeschosses oder eines Geschosses auf mittlerer Höhe, war der charakteristische Schadenmechanismus mehrgeschossiger Skelettbauten. Betroffen waren vor allem Geschäftshäuser (Bild 17), aber auch einzelne Wohnbauten und ein Spital. Der obere, eingestürzte Teil wies dabei eine auffallend geringe horizontale Verschiebung auf. Wenn der Einsturz im Erdgeschoss stattfand, war dies in vielen Fällen auf grosse Öffnungen und entsprechend reduzierte Steifigkeiten in diesem Geschoss, sogenannte «soft-story»-Effekte, zurückzuführen. Zur abschliessenden Erklärung der vielen Mittelgeschosseinstürze

sind vertiefte Untersuchungen notwendig. Folgende Gründe könnten diesen Einsturztyp möglicherweise verursacht haben:

- Starker Steifigkeits- und Tragwiderstandssprung durch Abstufung der Stützenabmessungen unterhalb des eingestürzten Stockwerkes.
- Abrupter Übergang von Verbundstützen auf reinen Stahlbetonquerschnitt ohne Walzprofil auf Höhe des gleichen Stockwerkes.
- Diskontinuität in der Aussteifungswirkung sekundärer Elemente wie nichttragende Wände.
- Ungünstiges Zusammenwirken von horizontaler und vertikaler Anregung.

Schlussfolgerungen

Basierend auf den Beobachtungen der Erkundungsmission können die Schlussfolgerungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die grosse Zahl der Toten und Verletzten ist auf die fehlende Erdbebensicherheit der traditionellen Holzbauten zurückzuführen.
- Bauten, die den neusten japanischen Erdbebennormen entsprechen, haben das Erdbeben mit verhältnismässig wenig Schäden überstanden.
- Durch entsprechend ausgebildete Fundationen können Schäden auch in Gebieten mit ausgedehnter Bodenverflüssigung begrenzt werden.
- Die grossen Schäden an den älteren Bauten sind in erster Linie auf ein zu geringes Bemessungsbeben, wie die gemessenen

Beschleunigungswerte zeigten, und auf veraltete Bemessungskonzepte zurückzuführen.

- Das Ausmass solcher Katastrophen lässt sich mittelfristig nur verringern, wenn auch bestehende Bauten verstärkt werden.

Adressen der Verfasser:

Dr. Martin G. Koller, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, 21 rue J. Grosseclin, 1227 Carouge,
Dr. Jost A. Studer, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Studer Engineering, Steinwiesstrasse 30, 8032 Zürich,
Thomas Weuk, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 8093 Zürich.