

# Erdbebenschäden bei Yogyakarta, Indonesien – Felderkundung der DGEB im Juli 2006 –

Franz-Hermann Schlüter, Wolfgang Brüstle,  
*SMP Ingenieure im Bauwesen Karlsruhe, LGRB im Regierungspräsidium Freiburg,*  
Philippe Renault, Tom Swain  
*RWTH Aachen, Bauhaus Universität Weimar*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Nach dem schweren Erdbeben vom 27.05.2006 bei Yogyakarta wurde im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik e.V. (DGEB) eine Felderkundung durchgeführt, um Schäden zu untersuchen und ggf. Rückschlüsse und Empfehlungen hinsichtlich erdbebensicherer Bauweise in Deutschland und Europa ziehen zu können. Hierüber wird berichtet. Weitergehende Informationen sowie zahlreiche Schadensbilder sind dem DGEB-Bericht (siehe Schriftenverzeichnis) zu entnehmen.

## 1. EINLEITUNG

Am 27. Mai 2006 ereignete sich ein katastrophales Erdbeben bei Yogyakarta in Zentraljava, Indonesien. Als Folge des Bebens starben ca. 6.000 Personen, 39.000 Personen wurden verletzt und 600.000 Personen wurden obdachlos. Mehr als 127.000 Gebäude wurden zerstört und zusätzlich 451.000 Gebäude beschädigt. Der Sachschaden wird mit insgesamt 3,1 Milliarden US-Dollar angegeben (Quelle: United States Geological Survey, USGS).

Die Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik e.V. (DGEB) hat auf Einladung der Gadjah-Mada-Universität Yogyakarta (UGM) ein Team von vier Experten zusammengestellt, um die Erdbebenschäden in Yogyakarta und Umgebung zu untersuchen. Das DGEB-Team bestand aus Dipl.-Ing. Philippe Renault, Aachen, Dr.-Ing. Franz-Hermann Schlüter, Karlsruhe und Dipl.-Ing. Tom Swain, Weimar (Erdbeben-Ingenieurwesen) sowie Dr. Wolfgang Brüstle, Freiburg (Seismologie).

Die Ziele der Erkundungsreise des DGEB-Teams waren:

- visuelle Inspektion der Gebäudeschäden in traditionellen und modernen Gebäuden
- Klassifikation der Schäden und Identifikation von Schadensmustern
- Studium der speziellen Effekte von starker Bodenbewegung
- Diskussion der Schadensarten und Schadensgrade in Bezug auf lokale Konstruktionspraktiken
- Einschätzung der Resttragfähigkeit geschädigter Gebäude und Retrofitting-Möglichkeiten
- Rückschlüsse und Empfehlungen hinsichtlich erdbebensicherer Bauweise in Deutschland und Europa
- Präsentation der europäischen/deutschen Erdbebenbaunormen

Die Untersuchungen wurden 4 Wochen nach dem Beben in der Zeit von 1.07. bis 12.07.2006 durchgeführt. Erste Aufräumarbeiten waren bereits durchgeführt, so dass das Schadensausmaß und mögliche Ursachen gut zu erkennen waren.

## 2. SEISMOLOGISCHE ASPEKTE

Das Beben von Yogyakarta ist eines von vier katastrophalen Erdbebenereignissen in Indonesien im Zeitraum von nur 19 Monaten. Das Erdbeben hat folgende Kenndaten (nach USGS):

- Magnitude:  $M_w=6.3$
- Zeit: 26. Mai 2006 um 22:53:58 (UTC),  
27. Mai 2006 um 5:53:58 AM (Lokalzeit)
- Epizentrum: 7.962 deg S, 110.458 deg E
- Tiefe: 10 km (fixiert)
- Region: JAVA, INDONESIA
- Entfernungen: 20 km SSE von Yogyakarta, Java, Indonesia, 455 km ESE von Jakarta, Java, Indonesia

Die Maximalintensität wurde durch das DGEb-Team mit IX auf der EMS-Skala eingestuft. Das Erdbeben war fast auf der gesamten Insel Java und auch in Bali noch spürbar. Der seismologische Schütterradius betrug ca. 400 - 500 km. Ein Schadensbeben mit Intensitäten von VIII oder höher hat es in den vergangenen 50 Jahren in bzw. bei Yogyakarta nicht gegeben.

Die Erdbebenstatistik verzeichnet im Mittel ca. ein Beben der Stärke  $M_w=5.0$  und größer pro Jahr mit Epizentrum im Gebiet von Yogyakarta. Die Mehrzahl dieser Beben ereignet sich allerdings in der subduzierten Platte unter Yogyakarta in einer Tiefe von ca. 100-150 km und ist damit in Yogyakarta in der Regel ohne Schadensfolge bzw. nur spürbar. Die globale Erdbebengefährdungseinschätzung nach Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) verzeichnet in Yogyakarta einen Maximalbeschleunigungswert (PGA) von etwa 2.0 bis 2.2  $m/s^2$  für eine 10% Eintritts-/Überschreitungswahrscheinlichkeit in 50 Jahren (475 Jahre Wiederkehrperiode). Die nationale indonesische Erdbebenzonenkarte (SNI Indonesia) stuft Yogyakarta in Zone 3 ein und ordnet dieser eine Grundbeschleunigung von 0,15 g (ebenfalls PGA mit 500 Jahre Wiederkehrperiode) zu, welche je nach Bodenklasse („hart“, „mittel“, „weich“) von 0,18g über 0,23g auf 0,30g erhöht wird.

Gemessene Bodenbeschleunigungen beim Erdbeben bei Yogyakarta am 27.5.2006 aus dem Schadensgebiet sind dem DGEb-Team nicht bekannt geworden (Stand 12.7.2006). Eine grobe Abschätzung mittels Masse und Abmessungen eines beim Erdbeben umgestürzten massiven Bücherschranks ergab einen Beschleunigungswert von mindestens etwa 2.5  $m/s^2$  im Zentrum der Stadt Yogyakarta.

## 3. SCHADENSAUSMASS

Als Folge des Erdbebens von Yogyakarta/Zentraljava vom 27.5.2006 starben fast 6.000 Menschen; die Schäden werden auf 3,1 Milliarden US\$ geschätzt. Der private Wohnungsbau (meist 1 bis 2-stöckige Wohnhäuser, von denen 154.000 eingestürzt und weitere 260.000 geschädigt sind) hat mit über 50% den größten Anteil am Gesamtschaden. Es müssen mehr Häuser wieder aufgebaut werden als nach der Tsunami-Katastrophe in Aceh. Weiterhin stark betroffen mit ca. 30% des Gesamtschadens sind mittelständische

und kleine Unternehmen, in denen über 650.000 Menschen arbeiten. Im Gesundheits- und Bildungssektor sind ca. 5% des Gesamtschadens zu verzeichnen. Die Infrastruktur war wenig betroffen, kleinere Setzungen und Verrückungen an Brückenbauwerken verursachten kaum Probleme.

Die Verluste konzentrieren sich vor allem auf die Distrikte Bantul (Provinz Yogyakarta) und Klaten (Provinz Mitteljava), die zusammen 70 % des Gesamtschadens erlitten. Weiterhin stark betroffen sind die Stadt Yogyakarta und andere Distrikte in der Provinz Yogyakarta (siehe Abbildung 1). Java gehört zu den am dichtesten besiedelten Regionen der Welt. In den betroffenen Gebieten leben ca. 4,5 Millionen Menschen, davon wurden ca. 1 Million Menschen von dem Beben so schwer betroffen, dass sie fremder Hilfe bedurften oder noch bedürfen.

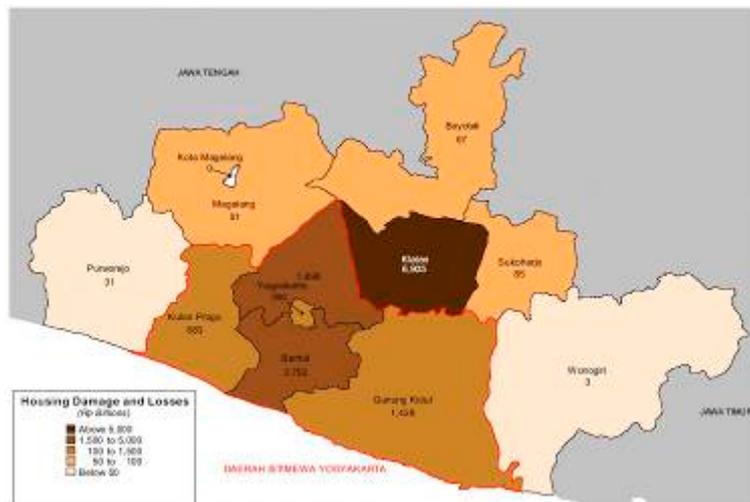


Abbildung 1: Betroffene Distrikte, Schäden am Wohnbaubestand (Quelle: Joint Assessment Team of BAPPENAS, local government of Yogyakarta, Central Java and international partners)

## 4. FELDERKUNDUNGEN UND BEWERTUNG

### 4.1 ALLGEMEINE ANMERKUNGEN

Die Erkundung erstreckte sich sowohl auf das Stadtgebiet von Yogyakarta als auch auf die umliegenden dörflichen Gebiete. Das Schadensausmaß war recht unterschiedlich. Viele Häuser einfacher Bauart waren stark geschädigt oder komplett eingestürzt, insbesondere in den dörflichen Gegenden südlich der Stadt Yogyakarta (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Mauerwerksbauten mit mangelnder konstruktiver Ausbildung und unzureichenden Materialeigenschaften. Insbesondere war die Festigkeit von Steinen und Mörtel teilweise sehr schlecht, so dass schon weniger intensive Erschütterungen ein Auseinanderfallen der Wände bewirkt hätten. Überwiegend hatten diese Häuser auch keine Geschossdecken, die über Scheibenwirkung die aussteifenden Wände verbinden und für eine bessere räumliche Stabilität sorgen. Vielmehr war in der Regel die Dachkonstruktion, bestehend aus Holz- oder Stahlbindern, einfach auf das Mauerwerk aufgelegt. Ein lastverteilender und aussteifender Ringbalken war meistens nicht vorhanden.



Abbildung 2: Verwüstung von einfachen Gebäuden in Imogiri



Abbildung 3: Schubriss in einer noch stehenden Mauerwerkswand

Wenngleich im Stadtgebiet von Yogyakarta selbst auch einige Häuser einfacher Bauart komplett eingestürzt sind, haben hier die meisten Bauwerke das Erdbeben ohne große strukturelle Schäden überstanden. Die in der Stadt vorgefundenen Mauerwerksbauten waren überwiegend qualitativ besser als auf dem Land. Offensichtlich wurden hier bessere Materialien verwendet. Dies belegt, dass die Bauweise und Qualität der Ausführung sowie der Materialien sehr entscheidend für die Widerstandsfähigkeit eines Bauwerks im Erdbebenfall sind.

Bei den größeren Bauwerken, die in der Regel ingenieurmäßig ausgelegt sind, traten nur sehr wenige, allerdings spektakuläre Schadensfälle auf. Hierbei handelte es sich fast ausschließlich um Stahlbetonkonstruktionen, bei denen die aussteifenden Rahmen im Erdgeschoß versagt haben (Soft-Story-Versagen). Die Untersuchungen vor Ort haben ergeben, dass hier insbesondere die für den Lastabtrag wichtigen Stützen und Riegel eine für Erdbebenbeanspruchung ungeeignete konstruktive Ausbildung aufwiesen. Wirksame Umschnürungsbügel waren kaum vorhanden, die Materialfestigkeiten des Betons waren offenbar unzureichend (Abbildung 4 und Abbildung 5). Auch spielte die ungünstige Verteilung von Massen und Steifigkeiten im Grundriss bei einem der eingestürzten Gebäude eine wichtige Rolle.



Abbildung 4: Stahlbetonstütze ohne wirksame Umschnürung



Abbildung 5: Schlechte Betonqualität in den Stützen

Die gravierenden Schäden an den betreffenden Gebäuden hätten mit nur geringem Aufwand verhindert werden können, wenn die konstruktive Ausbildung erdbebengerecht erfolgt wäre. In unmittelbarer Nachbarschaft der stark geschädigten Bauwerke befinden

sind fast identische Gebäude, die das Erdbeben ohne größere Schäden oder gar Einsturz überstanden haben. Vermutlich lagen hier bessere Verhältnisse bei Material und Ausführung vor. Kleinräumige Unterschiede in den Untergrundverhältnissen waren dabei nicht anzunehmen und waren somit nicht ursächlich.

## 4.2 ERDBEBENSCHÄDEN AN SCHULGEBÄUDEN

Allein im Distrikt Bantul wurden 236 von 1082 Schulen, also ca. 22% aller Schulen, als zerstört gemeldet (37% schwer beschädigt, 25% leicht beschädigt). Einige der geschädigten Schulen wurden zusammen mit Mitarbeitern der UGM begutachtet und stellten sich als interessante Untersuchungsobjekte heraus, da hierin Bezug auf Grundriss und Abmessungen sehr ähnliche Gebäude in unterschiedlichen Bauweisen ausgeführt wurden.

Die vom Erkundungsteam besichtigten Schulen waren ausnahmslos längliche, einstöckige Gebäude und in der Konstruktionsweise in vieler Hinsicht vergleichbar mit den typischen Wohnbauten. Zusätzlich zu den zwei üblichen Mauerwerksbauweisen traten hier jedoch auch Beispiele mit stark ausgebildeten Stahlbetonrahmen auf. Insgesamt wurden für Schulen während der DGEB-Erkundung drei Bauweisen vorgefunden:

- Reines Mauerwerk aus Vollziegeln, Wanddicke 22 cm dick.
- Mauerwerk aus Vollziegeln eingefasst in leichte Stahlbetonelemente, Wände und Stahlbetonelemente ca. 11 cm dick.
- Stark ausgebildete Stahlbetonrahmen (Querschnitte ca. 20 x 30 cm) mit ausfachenden Wänden (Wanddicke nicht bestimmt)

Die Schulen aus reinem Mauerwerk zeigten ein leicht verbessertes Verhalten (Beispiele in Abbildung 6 bis Abbildung 8) im Vergleich zu den Wohnhäusern derselben Bauweise, was auf eine gründlichere Ausführung und Qualität schließen lässt. Es waren starke Schädigungen (Diagonale und vertikale Risse, Schubversagen von „kurzen Stützen“) bis hin zur Schäden mit Abrissnotwendigkeit festzustellen, jedoch nur lokal begrenzte Einstürze.

Die Strukturen aus eingefasstem Mauerwerk (Abbildung 9 bis Abbildung 11) zeigten dagegen die gleichen Mängel wie die Wohnbauten dieser Bauweise und waren häufig eingestürzt. Gar keine bzw. minimale Schäden wiesen die Gebäude in solider Stahlbetonrahmenbauweise auf. Ein problematischer Aspekt der Schulen ist die längliche Bauweise mit zu wenig aussteifenden Querwänden.

Die vorgefundenen Dachtragwerke der Schulen waren ausnahmslos fachmännisch konstruierte Sparrendachkonstruktionen aus Holz mit raumüberspannenden zug- und druckfesten Dachbindern. Horizontalkräfte aus der Eigenlast der Dächer waren daher nicht zu befürchten. Auch in Längsrichtung gab es aussteifende Diagonalbalken. Eine Aussteifung in horizontaler Ebene, die ein schubsteifes Verhalten der Dachebene erzeugen würde, existierte nicht. Ob diese Aufgabe eventuell durch Windrispen übernommen wurde, war nicht festzustellen.



Abbildung 6: Seitenansicht Schule Kemangsono, stark geschädigt



Abbildung 7: Geschädigte Mauerwerkstützen eines Gebäudes der Schule Jejeran



Abbildung 8: Innenraum des geschädigten Gebäudes aus Mauerwerk der Schule Jejeran



Abbildung 9: Zerstörtes Gebäude in Mischbauweise Mauerwerk/Stahlbeton der Schule



Abbildung 10: Beispiel für schlechte Betonqualität; Schule Jejeran



Abbildung 11: Ungenügende Verankerungen der Stahlbetonstützen

### 4.3 INGENIEURMÄSSIG AUSGELEGTE GEBÄUDE AM BEISPIEL DES STIE-KER-GEBÄUDES 1

Im südlichen Stadtbezirk von Yogyakarta an der *Parangtritis Road* liegt der Universitätskampus des *Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Kerjasama* (STIE-KER), eine gemeinsame Hochschule für Ökonomie. Hier sind mehrere Gebäude vom Erdbeben in Mitleidenschaft gezogen. Das Tragwerk des 5-geschossigen STIE-KER-Gebäudes 1 besteht aus zwei- und dreidimensionalen Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfüllungen, die teils mit Fensteröffnungen unterschiedlicher Größen versehen sind (Abbildung 12 bis Abbildung 15). Treppenhäuser oder Fahrstuhlschächte sind nicht speziell für die Aussteifung ausgebildet (Abbildung 13). Demnach erfolgte die räumliche Aussteifung gegen Horizontalkräfte allein über die Rahmenwirkung in Kombination mit den Mauerwerksausfachungen.



Abbildung 12: Tragwerk aus Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachung



Abbildung 13: Innenhof mit Treppenhäuser ohne spezielle aussteifende Funktion



Abbildung 14: Einsturz durch Versagen der Stahlbetonrahmen im Erdgeschoß; Gelenkausbildung in Deckenebene



Abbildung 15: Das unterste Stockwerk ist zu größten Teil begraben; Gelenkausbildung bei den Stützen im EG

Bei Bauwerken, die durch Stahlbetonrahmen ausgesteift sind, bilden sich bei Erdbebenbeanspruchung in den kritischen Zonen Fließgelenke aus, in denen der Energieverzehr stattfindet. Diese kritischen Zonen sind in der Regel die Enden der Stäbe, d.h. der Stützen und Riegel. Beim vorliegenden Objekt sind die Stützen des Erdgeschosses sowohl in die Gründung als auch in die Riegel der ersten Deckenebene eingespannt. Fließgelenke sind daher sowohl am Fußpunkt als auch in Deckenebene zu erkennen (Abbildung 16 bis Abbildung 23). Diese kritischen Zonen sind im betreffenden Fall jedoch konstruktiv völlig unzureichend ausgebildet. Zur Erreichung einer ausreichen-

den Duktilität ist eine kräftige Umschnürung mittels Bügel notwendig. Damit die Bügel nach dem Abplatzen der Betondeckung, was kaum zu verhindern ist, nicht ihre umschnürende Wirkung verlieren, müssen sie mit einem ausreichend langen Hacken unter 135° im Kernbeton geschlossen werden. An keiner der Stützen wurde dies festgestellt. Vielmehr erfolgte die Schließung der Bügel nur mit einem knappen 90°-Hacken. Auch der Abstand und der Durchmesser der Bügel sind für die Beanspruchung unzureichend (Abbildung 17).

Die Längsbewehrung in den vertikalen Traggliedern scheint für die Abmessungen angemessen. Vielfach besteht sie jedoch aus glattem Stabstahl, der gegenüber geripptem Bewehrungsstahl Nachteile hinsichtlich der Verbundwirkung aufweist. Hierdurch wird das Ausknicken leichter möglich und der Umschnürungsbewehrung kommt noch mehr Bedeutung zu.



Abbildung 16: Gelenkausbildung und Versagen einer Stahlbetonstütze am Fußpunkt



Abbildung 17: Ursache des Versagens – zu wenig und nicht richtig geschlossene Umschnürungsbügel

Das beobachtete Schadensbild der Stützen lässt darauf schließen, dass auch die Betonqualität nicht ausreichend ist. In den kritischen Bereichen ist er regelrecht „zerbröselst“. Die Betontrümmerstücke sind relativ kleinteilig, was auf die schlechte Qualität schließen lässt. Ferner sind in einigen Bereichen der Betonstruktur Kiesnester bzw. unzureichende Verdichtung zu erkennen. Dies deutet auf Verarbeitungsfehler hin. Möglicherweise war auch die verwendete Betonrezeptur nicht gut geeignet oder aber der Beton hat sich beim Einbringen entmischt bzw. war bereits angesteift (Abbildung 18 und Abbildung 19).



Abbildung 18: Schlechte Betonqualität in einem Unterzug



Abbildung 19: Schlechte Betonqualität der Stahlbetondecke

Die Bewehrungsführung in den Verbindungen zwischen Stützen und Riegeln ist für die Beanspruchungen bei Erdbeben nicht fachgerecht. Die Verankerung der horizontalen Riegelbewehrung bindet nur mit einem Endhacken in die Stützen ein (Abbildung 20 bis Abbildung 23). Hier wäre eine kraftschlüssige Endverankerung, wie sie beispielsweise in der neuen DIN 4149 oder im EC 8 angegeben werden, notwendig gewesen. Auch die vertikale Stützenbewehrung in den kritischen Bereichen ist nicht immer durchlaufend sondern wird vielmehr gestoßen (Abbildung 22). Hierdurch bilden sich an den Stabenden Gelenke aus, in denen keine Kräfte mehr übertragen werden können. Bei Wechselbeanspruchung fällt bereits nach dem ersten Belastungszyklus der Widerstand sehr stark ab. Das Bauteilverhalten bei der gewählten konstruktiven Ausbildung muss daher als spröde bezeichnet werden, nicht als duktil. Energieverzehr ist praktisch nicht möglich. Große Zerstörungen sind die Folge.



Abbildung 20: Ausbildung von Gelenken und Versatz der Rahmenstütze unterhalb der Decke über Erdgeschoß



Abbildung 21: Detail des Anschlusses Stütze-Riegel; Riegelbewehrung nicht ausreichend verankert



Abbildung 22: Detail des Anschlusses Stütze-Riegel; vertikale Bewehrung nicht durchlaufend



Abbildung 23: Versagen der Rahmenstütze unterhalb der Deckenebene - Versatz

In den Gebäuden des STIE-KER-Kampus findet man an vielen Stellen umgestürzte und herabgefallene Bauteile, die nicht zur tragenden Konstruktion gehören. Dies sind insbesondere abgehängte Decken und sonstige Verkleidungen. In Abbildung 24 erkennt man die Gefährdung von Personen, die von solchen herabstürzenden Bauteilen ausgehen kann. Auch wird hierdurch die Fluchtmöglichkeit nach einem Erdbeben stark beeinträchtigt.

Die Dachkonstruktion des STIE-KER Gebäudes 1 hat der Erdbebenbeanspruchung standgehalten. Sie besteht im Wesentlichen aus Stahlfachwerkträgern mit relativ kleinen Spannweiten. Dachziegel sind in großer Zahl herabgestürzt. Es lässt sich jedoch keine Systematik zu Dachneigung oder Ausrichtung erkennen. Teilweise sind Dachziegel auf steilen Dächern ohne jegliche Befestigung liegen geblieben, während sie von flacheren Dächern heruntergefallen sind. Hätten sich Personen in der unmittelbaren Nähe der Gebäude aufgehalten bzw. wären aus dem Gebäude herausgelaufen, wären sie von den herabstürzenden Trümmern verletzt oder gar erschlagen worden (Abbildung 25).



Abbildung 24: Herabgestürzte Sekundärbauteile wie abgehängte Decke



Abbildung 25: Dachdeckung ist zum großen Teil heruntergefallen

## 5. ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG

Aus den in Yogyakarta untersuchten vier gravierenden Schadensfällen bei Stahlbetonbauten ist zu schließen, dass auch bei ingenieurmäßig ausgelegten modernen Bauwerken auf Details der Ausführung großer Wert zu legen ist. Die Regeln der deutschen Erdbebenbaunorm DIN4149 und des europäischen Eurocode 8 sind geeignet, ein in Yogyakarta beobachtetes Soft-Story-Versagen zu verhindern. Besonderes Augenmerk ist auch auf erdbebengerechte Befestigung von sogenannten nicht-tragenden Bauteilen zu legen. Herabfallende Sekundärbauteile, wie z.B. Verkleidungen können Personen gefährden oder notwendige Fluchtwege versperren.

Erdbeben ähnlicher Magnitude sind in Deutschland insgesamt zwar nicht zu erwarten, in Teilen jedoch auch nicht völlig ausgeschlossen. Die in Indonesien vorgefundenen Mauerwerksbauten im Hauptschadensgebiet südlich von Yogyakarta sind in Konstruktion, Material und Zustand nicht mit denen in Deutschland vergleichbar. Auch bei älteren und einfacheren Gebäuden in Deutschland ist in der Regel durch konstruktive Elemente, Qualität der Baustoffe sowie Art der Ausführung ein wesentlich höherer Widerstand bei Beanspruchung durch Erdbeben gegeben, als dies in Indonesien der Fall war. Ein vergleichbares Schadensbild wäre in Deutschland somit nicht zu befürchten.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

Brüstle, W., Renault, P., Schlüter, F.-H., Swain, T., 2007. DGEB Erkundungsreise 01.07.-12.07.2006 – Erdbebenschäden bei Yogyakarta, Indonesien. DGEB-Publikation Nr. 14, Aachen 2007 (ISBN: 3-930108-10-0)