

Erfahrungen bei der Erdbeben-Überprüfung und -Ertüchtigung von Mauerwerksbauten im Iran

Jost A. Studer¹, Thomas Wenk² und Thomas M. Weber¹

¹Studer Engineering, Zürich

²Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, Zürich

1 EINFÜHRUNG

Im Rahmen des "Bam Earthquake Emergency Reconstruction Project" nach dem verheerenden Bam Erdbeben 2003 stellte die Weltbank dem Staat Iran einen grösseren Kredit zur Rehabilitation der Infrastruktur zur Verfügung (Naeim et al., 2005). Darunter auch einen Kredit für eine Pilotstudie zur Verbesserung der Erdbebensicherheit von 10 Infrastrukturkomplexen in der Provinz Kerman. Es handelt sich um Spitäler, Telekommunikationsbauten, Fernsehen-, Radio-, administrative Bauten der Gas- und Wasserversorgung sowie Feuerwehr- und Polizeibauten. Die einzelnen Bauten in den Komplexen sind bezüglich Erdbebensicherheit zu beurteilen. Sie werden in drei Gruppen eingeteilt: keine Ertüchtigung ist notwendig, eine Ertüchtigung ist möglich sowie Abriss und Neubau. Ausgewählte Bauten sind zu ertüchtigen und die Ausführung ist zu überwachen.

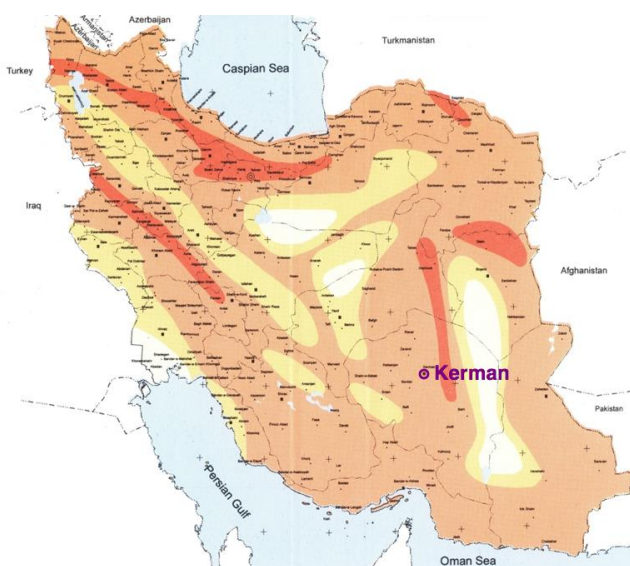


Abb. 1: Erdbebenzonenkarte von Iran mit Bemessungswerten der horizontalen Bodenbeschleunigung von 0,20 g (weisse Zone), 0,25 g (gelbe Zone), 0,30 g (orange Zone) und 0,35 g (rote Zone) (Standard No. 2008, 2007).

2 ERDBEBENGEFÄHRDUNG

Der Iran gehört zu den Ländern mit der höchsten Erdbebengefährdung in der Welt. Die Erdbebenzonenkarte der iranischen Erdbebennorm für Gebäude (Standard No. 2008, 2007) teilt das Land in vier Zonen mit Bemessungswerten der horizontalen Bodenbeschleunigung von 0,20 g, 0,25 g, 0,30 g und 0,35 g ein. Die Provinzhauptstadt Kerman liegt in der zweithöchsten Zone mit einer Beschleunigung von 0,30 g (orange Zone in Abb. 1). Unter Berücksichtigung des Bedeutungsfaktors von 1,4 für Lifeline-Gebäude ergibt sich eine maximale horizontale Spektralbeschleunigung von $11,5 \text{ m/s}^2$ für die in Kerman typischen sandigen Böden und für elastisches Tragwerksverhalten.

3 TYPISCHE BAUSTRUKTUREN

Die Komplexe bestehen aus mehreren Bauten unterschiedlicher Bautypen, wie mehrheitlich aus Mauerwerksbauten, Stahlrahmen mit Verband und Mauerwerksausfachung. Ein Telekommunikationsgebäude ist ein armierter Betonrahmenbau mit einzelnen Schubwänden und eine Polizeistation ist ein Plattenbau sowjetischen Typs.

Spitalbauten, die wir hier betrachten, sind weitgehend ein- bis zweistöckige Mauerwerksbauten. Die Mauerwerksbauten, auch bei wichtigen Objekten, unterscheiden sich in Layout, in Qualität der Baumaterialien wie auch in der handwerklichen Ausführung wesentlich von dem, was wir in der Schweiz gewohnt sind. Namentlich sind einzelne Spitalkomplexe eine Anhäufung von einzelnen Bauten, die um einen Erstbau im Laufe der Zeit, je nach Bedürfnissen, an die vorhergehenden Gebäude angebaut sind. So entstand ein Gewirr von Korridoren, Räumen und Freiflächen in einem ein- bis zweistöckigem Gebäudekomplex. Die Bauten sind zum Teil ohne seismische Fugen mit unterschiedlichen Raumhöhen aneinandergelbaut oder auch Wände einfach an bestehende Bau-

substanz gestossen. Ein typisches Beispiel zeigt das Shafa-Spital in Kerman (Abb. 2).

Wir haben es im Allgemeinen mit einer sehr schlechten Bausubstanz zu tun. Das fällt nicht sofort auf, da die Aussenmauern mit einem gut unterhaltenen Blendmauerwerk abgedeckt sind und innen die Mauern verputzt und gestrichen sind. Der Zustand der Bauten erscheint optisch einwandfrei, wie z.B. die Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman (Abb. 3). Die Untersuchung zeigte, dass der oberflächlich homogen wirkende Bau aus 5 Einzelbauten unterschiedlicher Raumhöhen und Bauperioden besteht (Abb. 4).

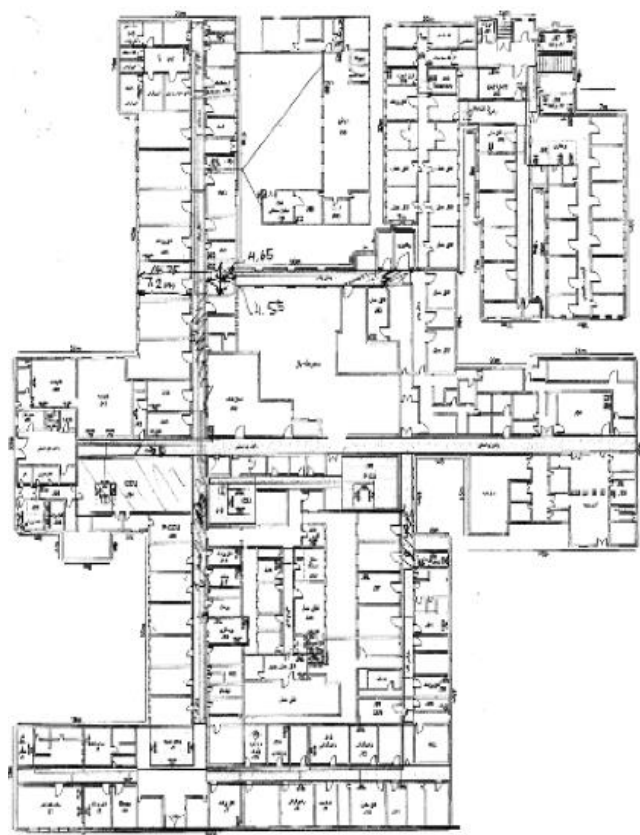


Abb. 2: Grundriss des Hauptbaus des Shafa-Spitals in Kerman. Der gesamte Komplex besteht aus einer Anhäufung aneinandergestossener Bauten unterschiedlicher Baujahre und Raumhöhen.

4 ZUSTANDSERFASSUNG

Der wahre Zustand des Mauerwerks und die Stabilität eines Baues muss durch umfangreiche Sondierungen ermittelt werden. Mittels Bohrungen wird die Dicke von Mauern und Decken sowie durch Entfernung von Putz und Blendmauerwerk die Verbindungen der Mauerwerkswände mit dem Dach und mit der Fundation untersucht (Abb. 5 und Abb. 6). Dabei stellte sich heraus, dass bei den untersuchten Spitälern ausschliessliche gemauerte Gewölbedecken (in Farsi:

Taghe-Zarbi) ausgeführt wurden, wie in Abb. 7 schematisch dargestellt. Solche Decken zeigen bei einem Erdbebenereignis ein sehr schlechtes Verhalten, und ein Einsturz ist wahrscheinlich. Die Mauerwerkswände besitzen meist sehr einfache Fundationen aus kalkstabilisiertem Lehm Boden mit einer Untermauer aus adoben Mauersteinen (Abb. 6). Zum Teil sind überhaupt keine Fundamente vorhanden und das Mauerwerk steht direkt auf dem gewachsenen Untergrund. Einzelfundamente sind nicht miteinander verbunden, z.B. die Fundamente der Stützen des Bahonar-Spitals in Kerman in Abb. 3.



Abb. 3: Aussenansicht der Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman

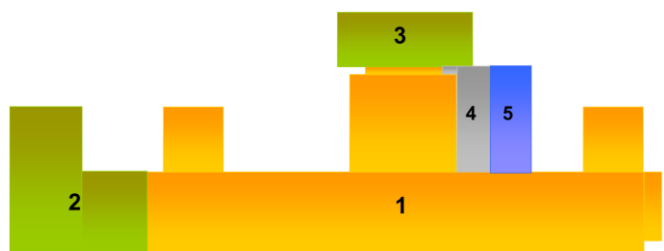


Abb. 4: Grundriss der Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman, bestehend aus den fünf Bauten 1 bis 5 mit unterschiedlichen Raumhöhen, z.T. auch innerhalb des einzelnen Baus.

Im Allgemeinen sind keine Baupläne vorhanden, wie auch die Lage der einzelnen Bauten im Komplex auf Plänen nicht dokumentiert ist. Bei älteren Bauten ist das auch in der Schweiz zum Teil der Fall. Erstaunlich war aber, dass für die Erweiterung der Chirurgie-Abteilung des Bahonar-Spitals, die erst vor 2 Jahren fertig gestellt wurde, weder Pläne noch irgendeine Baudokumentation vorhanden waren. Dabei waren die Baumassnahmen von einem Ingenieurbüro geleitet worden.



Abb. 5: Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman: Wand-Deckenanschluss, Gewölbedecke mit nicht verzahnter Trennwand.



Abb. 6: Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman: Wandgründung ohne betoniertem Foundation, Gründung besteht aus kalkstabilisiertem Boden und einer Untermauer aus adobem Mauerwerk.

Es galt deshalb in einem ersten Schritt, die Fixpunkte (Ecken, Aussentüren, grössere Fenster, Geschosshöhen, Dachkanten etc.) einzelner Bauten zu vermessen und planmässig festzulegen und dann durch Zeichner in diesem Fixpunktgerüst die Innenwände und Wandstärken zu ermitteln. Damit entstanden Architekturpläne, die als Basis für die Festlegung der Orte von Sondierungen dienten.

Mittels der Resultate der Sondierungen konnten dann die Ingenieurpläne, die die Tragkonstruktion beinhalten, erstellt werden. Es zeigte sich, dass diese Arbeit aufwendiger als vorgesehen war und mehrfach wiederholt werden musste, um die genauen Verhältnisse abzubilden.

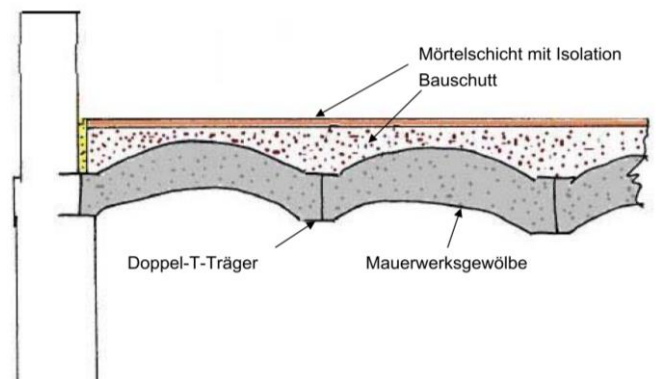


Abb. 7: Schematischer Aufbau einer Gewölbedecke (in Farsi: Taghe-Zarbi).

Mauerwerksuntersuchungen zur Bestimmung der Festigkeit und Steifigkeit wurden in situ durchgeführt, wie in Abb. 8 und 9 für Verbundmessungen dargestellt. Ziegel- und Mörtelfestigkeit wurden separat bestimmt. Die Materialkennwerte streuen zum Teil erheblich und ergeben im Allgemeinen niedrige Festigkeitswerte.

5 NORMATIVE GRUNDLAGEN

Der Iran hat seit über 20 Jahren Erdbebennormen für neue Gebäude. Heute gültig ist die kürzlich revidierte dritte Ausgabe der Erdbebennorm (Standard No. 2008, 2007). Während für Tragwerke aus Stahl oder Stahlbeton ähnliche Bestimmungen für Berechnung und Bemessung gelten wie in anderen modernen Erdbebennormen, beschränken sich die Vorschriften für Mauerwerksbauten auf die Einhaltung konstruktiver und konzeptioneller Regeln. Rechnerische Nachweise werden für Mauerwerksbauten keine verlangt. Erlaubt sind Gebäude aus Mauerwerk mit höchstens zwei Geschossen mit einer Geschosshöhe von höchstens je 4 m. Neben Regularitätskriterien im Grundriss und im Aufriss gelten Mindestwerte für die Wandflächen relativ zur Gebäudefläche und Maximalwerte für die Grösse von Wandöffnungen. Unter Anderem sind Ringbalken aus Stahlbeton auf Niveau der Geschosdecken und des Daches vorgeschrieben und bei zweigeschossigen Bauten sind Stahlbetonstützen mit minimalen Querschnittsabmessungen von 0,2 m x 0,2 m an den Rändern der Mauerwerkswände sowie mindestens alle 5 m vorzusehen.

Für die Überprüfung bestehender Bauten existieren keine Erdbebennormen. Kürzlich sind zu der Problematik der bestehenden Bauten zwei ausführliche Berichte erschienen, die als "Guidelines" bezeichnet werden. Die Guideline No. 360 (2007) *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* ist praktisch eine Übersetzung des FEMA-Berichts *Prestandard and Commentary for the Seis-*

mic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356, 2000) mit Ausnahme des 7. Kapitels über Mauerwerk, das durch ein eigenständiges iranisches Kapitel ersetzt worden ist. Während in der Guideline No. 360 (2007) das Mauerwerkskapitel noch basierend auf dem Bemessungskonzept der zulässigen Spannungen verfasst ist, wurde in der Guideline No. 376 (2007) *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Unreinforced Masonry Buildings* auf die heute üblichen Grenzzustandsbetrachtungen umgestellt. Hinzugekommen sind ferner Checklisten mit qualitativen Kriterien für die Überprüfung von bestehenden Mauerwerksbauten.



Abb. 8: Orthopädie-Abteilung des Bahonar-Spitals in Kerman: Festigkeitsversuch an Mauerwerkswand.



Abb. 9: Detailansicht des Festigkeitsversuchs in der Mauerwerkswand von Abb. 8.

6 TRAGWERKSANALYSE

Während bei Stahl- und Stahlbetonrahmenbauten das Tragwerk oft mittels moderner Finite-Elemente-Programme, z.B. ETABS und SAP2000, analysiert wird, ist dies bei Mauerwerksbauten nicht immer sinnvoll. Zu unklar sind die Verhältnisse für ein zutreffendes Tragwerksmodell. Grösstenteils fehlt eine

Verzahnung der Mauern untereinander und mit dem Dach. Meistens fehlt sowohl eine Diaphragma-Wirkung der Geschossdecken und als auch eine eigentliche Foundation. Materialkennwerte streuen stark und haben vorwiegend sehr niedrige Werte. In europäischen Verhältnisse würden solche Bauten bereits aufgrund dieses Zustandes ersetzt. Iranische Bauherren und Ingenieure versuchen solche Bauten zu sanieren.

Als pragmatische Lösung für die Erdbebenüberprüfung wurden die bereits vorhandenen Checklisten mit qualitativen Kriterien für bestehende Mauerwerksbauten aus der Guideline No. 376 (2007) verwendet und durch fünf einfache quantitative Kriterien ergänzt. Diese wurden aus dem sich teilweise widersprechenden iranischen Regelwerk aus unterschiedlichen Normen und Richtlinien speziell für die Überprüfung von Gebäuden aus Mauerwerk im Rahmen des Bam-Projekts zusammengestellt.

Im Einzelnen handelt es sich um die folgenden fünf Kriterien:

– Wandflächenanteil

Die gesamte Querschnittsfläche aller Wände zusammen muss bei einstöckigen Gebäude mindestens 4% der Gebäudegrundfläche betragen. Bei zweistöckigen Gebäuden gilt 6% fürs Erdgeschoss und 4% fürs Obergeschoss.

– Wandschlankheit

Das Kriterium der Wandschlankheit erfordert ein Verhältnis von Wanddicke zu Wandhöhe von mindestens 1/10 bei seitlich nicht gehaltenen Wänden bzw. 1/15 bei seitlich gehaltenen Wänden. Die Wandhöhe muss ≤ 4 m und die Wandlänge ≤ 5 m oder ≤ 30 -fache der Wanddicke sein.

– Querbeanspruchung

Die Biegebeanspruchung unter einer quer zur Wand wirkenden horizontalen Beschleunigung wird nachgewiesen.

– Schubbeanspruchung

Beim Kriterium der Schubbeanspruchung handelt es sich um ein vereinfachtes Ersatzkraftverfahren, bei der jede Wand für sich allein betrachtet wird. Der Schubwiderstand der Wand wird aus Versuchen am Bauwerk bestimmt (Abb. 9).

– Stockwerkschiefstellung

Die Kontrolle der Stockwerkschiefstellung ist ein einfaches Kriterium der Gebrauchstauglichkeit, das insbesondere zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit von Lifeline-Gebäuden nach einem Erdbeben wichtig ist. Unter der Wirkung der gegenüber dem Tragsicherheitsnachweis auf die Hälfte reduzierten Erdbebeneinwirkung darf eine Stockwerkschiefstellung von 0,1% nicht überschritten werden.

Diese fünf quantitativen Kriterien werden für jede Mauerwerkswand eines Gebäudes separat nachgewiesen. Die Berechnungen erfolgen mittels Tabellenkalkulation und als Ergebnis wird je ein Erfüllungsfaktor analog dem Vorgehen gemäss Merkblatt SIA 2018 (2004) bestimmt. Je nach Grössenordnung der erhaltenen Erfüllungsfaktoren werden entweder zusätzliche verfeinerte Berechnungen erforderlich oder es kann direkt die Massnahmenempfehlung bezüglich der Notwendigkeit einer Erdbebenertüchtigung formuliert werden.

Mit dieser Methodik bestehend aus Checklisten und den fünf erwähnten Kriterien kann die Erdbebensicherheit von Mauerwerksbauten sowohl rechnerisch als auch konstruktiv und konzeptionell mit vertretbarem Aufwand überprüft werden. In der Regel werden so keine aufwändigen Finite-Elemente-Berechnungen erforderlich.

7 ERTÜCHTIGUNG

Ob solche Bauwerke wie oben beschrieben überhaupt mit vertretbarem Aufwand ertüchtigt werden können, hängt weitgehend vom Layout und den Resultaten der Bauwerksinspektion ab. Eine kostengünstige Alternative ist zum Beispiel das Herabsetzen des Baues in eine tiefere Bedeutungskategorie, z.B. die Umnutzung von bisherigen Operationsräumen zu neu Lagerräumen. Dazu sind meist nur wenige bauliche Massnahmen notwendig. Bei einer eigentlichen Ertüchtigung ist primär auf eine Verbesserung der Integrität des Daches bzw. der Decken und der Verbindung zwischen Dach, Wänden und Foundation zu achten. Komplexe Bauten, wie z.B. der Hauptbau des Shafa-Spitals in Kerman, sollten in einzelne unabhängig schwingende Gebäudeteile aufgeteilt werden.



Abb. 10: Verstärkung einer Gewölbedecke durch Einschweissen eines Stahl-Verbandes.

Eine weit verbreitete Ertüchtigungsmethode im Iran ist die Aussteifung von Gewölbedecken durch Verbände (Abb. 10 und 11). Der Vorteil dieser Methode ist, dass das Deckengewicht nur unwesentlich verändert wird. Aus Sicht der Autoren erzeugt ein solcher Verband meist eine zu geringe Versteifung der Decke. Ferner ist aus konstruktiver Sicht ungünstig, dass alle Schweissarbeiten über Kopf bei beschränkten Platzverhältnissen auszuführen sind, so dass die Qualität der Schweissverbindungen in der Regel leidet. Eine effizientere Lösung ist der Ersatz des Bauschuttes in der Decke (siehe Abb. 7) durch eine bewehrte Betonschicht.

Die Mauerwerkswände können durch Aufkleben von Geweben oder Lamellen ertüchtigt werden. Einzelne Mauerwerkswände können durch Stahlbetonwände ersetzt werden.

8 DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Weltbank für die Finanzierung des Projektes. Weiterer Dank gilt Jürg Hammer (DRM Switzerland AG) sowie Javad Najafi und seinem Team (RADYAB, Tehran) für die Zusammenarbeit im Projekt.



Abb. 11: Verstärkung einer Gewölbedecke durch Einschweissen eines Stahl-Verbandes, Detailansicht der Schweissverbindungen.

9 LITERATUR

FEMA 356 (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C.

Guideline No. 360 (2007), Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Iranian building codes and standards, Ministry of Housing and Urban Development (in Farsi).

Guideline No. 376 (2007), Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Unreinforced Masonry Buildings, Iranian building codes and standards, Ministry of Housing and Urban Development (in Farsi).

Naeim F. et al. (2005), 2003 Bam, Iran, Earthquake Reconnaissance Report, Earthquake Spectra, Special Issue I, Vol. 21, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA.

SIA 2018 (2004), Überprüfung von Gebäuden bezüglich Erdbeben, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

Standard No. 2008 (2007), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Iranian building codes and standards, Ministry of Housing and Urban Development, 3rd edition.