

SCHWIMMENDE LAGERUNG



01



02

Kürzlich wurde das 1943 in Dienst genommene, stark erdbebengefährdete Hauptgebäude der Berufsfeuerwehr Basel-Stadt auf spezielle Gummi-Erdbebenlager gestellt. Dabei kam das Prinzip der Erdbebenertüchtigung eines bestehenden Gebäudes mit in vertikaler Richtung steifen, in horizontaler Richtung relativ weichen Lagern erstmals nördlich der Alpen zur Anwendung.

In der Region Basel ist mit schweren Erdbeben zu rechnen. Deutschland und Frankreich driften – plattentektonisch betrachtet – entlang dem Rheintalgraben auseinander, und an dessen oberem Ende entladen sich periodisch in der Erdkruste aufgestaute mechanische Spannungen. Im Jahr 250 nach Christus wurde die römische Stadt Augusta Raurica (heute Kaiseraugst) durch ein schweres Erdbeben weitgehend zerstört. Ähnlich erging es 1356 der mittelalterlichen Stadt Basel. Ein solches Erdbeben von etwa der Magnitude 7 würde heute gemäss Schätzungen bis über tausend Tote, ein Vielfaches an Schwerverletzten und bis zu 100 Milliarden Franken Schäden an Gebäuden und deren Inhalten bewirken.

Eines der wichtigen gefährdeten Bauwerke, das Hauptgebäude der Berufsfeuerwehr Basel-Stadt, ist im Grundriss 44 m lang und 15 m breit und weist im Erdgeschoss eine Einstellhalle für die Feuerwehrfahrzeuge mit je elf Toren in beiden längsseitigen Fassaden auf (Bilder 1 und 3). Darüber liegen drei Obergeschosse mit Schlaf- und andern Räumen für die Feuerwehrleute. Das Gebäude wurde während des Zweiten Weltkriegs als Stahlbetonbau erstellt und 1943 bezogen. Damals war man weit davon entfernt, bei der Gestaltung von Bauwerken die Erdbebengefahr zu berücksichtigen. In Kriegszeiten war es viel naheliegender, das Gefährdungspotenzial von Brandbomben zu begrenzen, weshalb für das geneigte Dach anstatt einer Holzkonstruktion eine Betonplatte gewählt wurde.

Das Feuerwehrgebäude Basel gehört in die Bauwerksklasse III gemäss SIA-Norm 261, das heisst zu den Lifeline-Bauten, die für eine erfolgreiche Katastrophenbewältigung entscheidend sind. Im ursprünglichen Zustand hätten die dünnen Stahlbetonstützen der Einstellhalle bereits bei einem relativ schwachen Erdbeben versagt. Der rechnerische Erfüllungsfaktor gemäss SIA 2018 betrug 0.18. Das Haus wäre aller Voraussicht nach eingestürzt, und es hätte kein Feuerwehrfahrzeug mehr ausfahren können. Die zuständigen Behörden erkannten dies bereits Anfang der 1990er-Jahre, sodass eine Erdbebenertüchtigung ins Auge gefasst wurde. Wegen Finanzrestriktionen erfolgte die Realisierung erst 2007.

KONVENTIONELLE VERSTÄRKUNG NICHT GEEIGNET

Wie meist üblich, wurde vorerst eine konventionelle Verstärkung für die normgemässen horizontalen Erdbebenkräfte in Betracht gezogen. Eine solche wäre jedoch mit erheblichen Nachteilen verbunden gewesen. In beide Längsfassaden hätten Wände aus Stahlbeton mit aufwendiger Verstärkung der Foundation eingefügt werden müssen. Dadurch wären mindestens zwei Tore pro längsseitige Fassade weggefallen, mit entsprechenden Einschränkungen bei der weiteren Nutzung der Fahrzeughalle. Auch die Obergeschosse hätten mit erheblichem Aufwand verstärkt werden müssen. Die Ertüchtigung wäre nicht nur verhältnismässig teuer geworden, sie hätte auch längere Betriebsunterbrüche und entsprechende Provisorien für die Feuerwehr erfordert. Deshalb schlug der von der Basler Regierung zugezogene Experte 1996 die jetzt realisierte «schwimmende Lagerung» vor. Sie benötigte nur bauliche Eingriffe im Untergeschoss und an den Stirnseiten des Gebäudes. Es ergaben sich keine Nutzungseinschränkungen, und alle notwendigen Arbeiten konnten bei laufendem Betrieb ausgeführt werden. Die resultierende Erdbebensicherheit ist höher und die Schadenanfälligkeit geringer als bei konventioneller Verstärkung.

01 Das Hauptgebäude der Berufsfeuerwehr in Basel; längsseitige Fassade mit Toren

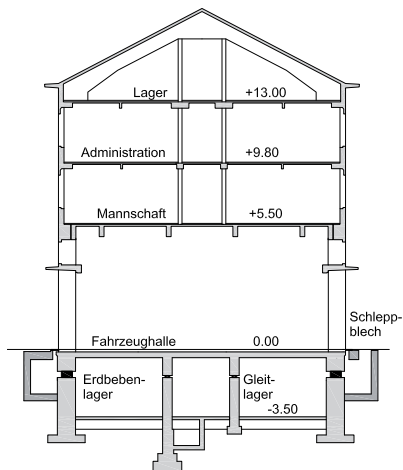
(Bilder: Andreas Zachmann/Hugo Bachmann)

02 Einbau eines Erdbebenlagers mit Flachpresse (unter dem Lager) und Spreizbewehrung

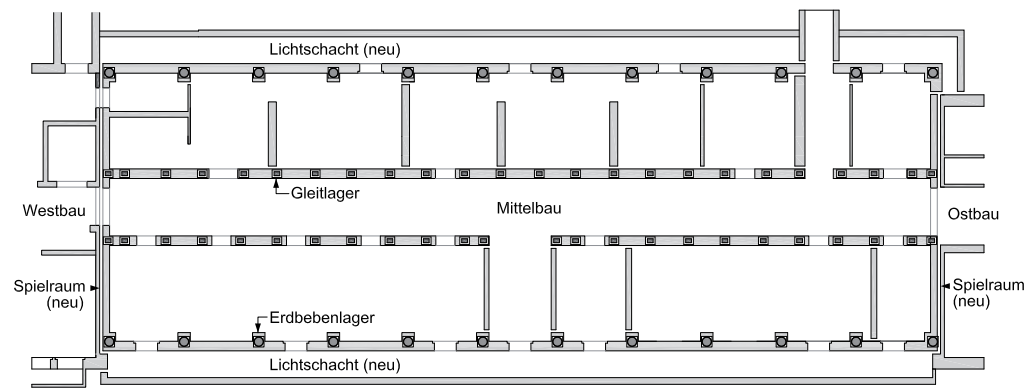
03 Horizontalschnitt Kellergeschoss und Querschnitt mit Erdbebenlagern und Gleitlagern, Mst. 1:500

04 Erdbebenlager im Kellergeschoss mit horizontal durchgeschnittenen Aussenwänden

05 Gleitlager im Kellergeschoss auf den horizontal durchgeschnittenen Innenwänden



03



04



05

DAS KONZEPT

Das Konzept der schwimmenden Lagerung beruht auf der Idee «verweichen anstatt verstärken». Das Kernstück bilden die in vertikaler Richtung steifen, in horizontaler Richtung jedoch relativ weichen Erdbebenlager aus bewehrtem Gummi (Bild 2). Im Kellergeschoss wurden sämtliche Aussen- und Innenwände in horizontaler Richtung durchgeschnitten und das rund 4000 t schwere Gebäude auf die Erdbebenlager und auf Gleitlager gestellt (Bild 3). Die Erdbebenlager wurden entlang den Längsfassaden jeweils dort eingebaut, wo darüber die Stützen der Fahrzeughalle stehen (Bild 4). Die Gleitlager sind unter dem stützenfreien Innenbereich angeordnet und tragen die dortigen Lasten aus der Decke mit den Feuerwehrfahrzeugen auf die Zwischenwände des Kellergeschosses ab (Bild 5). Die Funktionsweise der schwimmenden Lagerung lässt sich anschaulich beschreiben: Wenn sich bei einem Erdbeben der Boden hin und her bewegt, werden die Verschiebungen näherungsweise weich aufgefangen, und das Gebäude oberhalb der Lager bleibt etwa in seiner ursprünglichen Position. Es entstehen zwar grosse, jedoch nur sehr langsame Schwingungen, die keine wesentlichen Schäden und schon gar nicht einen Einsturz bewirken können. Damit beim etappenweisen Einbau der Erdbebenlager keine Einsenkungen des Überbaus entstanden, wurde deren Zusammendrückung infolge der ständigen Last (ca. 2.5 mm) mittels Flachpressen kompensiert (Vorspannung, Bild 2). Die Pressen wurden anschliessend mit rasch erhärtendem Zementmörtel injiziert und verblieben im Bauwerk.

DYNAMISCHE BERECHNUNG UND BEMESSUNG

Der dynamischen Bemessung wurden die Anforderungen gemäss Zone 3a nach SIA 261 und ein eigens entwickeltes standortspezifisches Bemessungs-Antwortspektrum der Beschleunigung und der entsprechenden Verschiebungen zugrunde gelegt. Dieses berücksichtigt die am Standort vorherrschende Bodenfrequenz von ca. 0.7 Hz, was einer Periode von 1.4 s entspricht. Das Gebäude bzw. die Steifigkeit der Lager (Sekantensteifigkeit bei voller Auslenkung von 12 cm) wurde auf eine Eigenfrequenz von 0.3 Hz entsprechend einer



06



07



08

06 Dynamische Testversuche an zwei Erdbebenlagern im Labor der Herstellerfirma

07 Schleppblech über dem Spielraum am Fuss der Längsfassaden

08 Flexible Leitungsstücke bei den Spielräumen

AN DER ERTÜCHTIGUNG BETEILIGTE

Bauherrschaft: Baudepartement des Kantons Basel-Stadt

Bauingenieur: Andreas Zachmann, dipl. Ing. ETH/SIA, Basel

Experte: Prof. Dr. Hugo Bachmann, Dübendorf

Hersteller Erdbebenlager: FIP Industriale S.p.A., Padova (I)

Bauunternehmer: Huber Straub AG, Basel; Betoncoupe AG, Basel

Periode von 3.3s ausgelegt (Tiefabstimmung). Dadurch und mit einem äquivalenten viskosen Dämpfungsmass von 10% bis 12% konnten die gegenüber dem ursprünglichen Zustand auf den Oberbau einwirkenden rechnerischen Kräfte auf rund einen Zehntel reduziert werden. Dem entspricht eine Zunahme der (kraftbasierten) Erdbebensicherheit um etwa den Faktor 10.

Die dynamische Vorbemessung wurde «von Hand» an einem linearen Einmassenschwinger durchgeführt. Die Ausführungsberechnungen im Zeitverlauf mittels spektrumkompatibler Erdbeben erfolgten an einem nichtlinearen Zweimassenschwinger (Masse der Bodenplatte über dem Kellergeschoss ca. 1000 t, Masse der drei Stockwerke über der Fahrzeughalle ca. 3000 t). Dabei wurde für die Lager ein aus Versuchen abgeleitetes, leicht idealisiertes Hysteresegesetz berücksichtigt. Im Vergleich zur Vorbemessung ergaben sich bei den maximalen Verschiebungen und den Kräften keine wesentlichen Unterschiede.

DYNAMISCHE LAGERTESTS

Die 24 Erdbebenlager des Feuerwehrgebäudes (Bilder 2 und 3) haben einen Durchmesser von 50cm und eine Höhe zwischen den stählernen Fuss- und Kopfplatten von 28 cm. Sie bestehen aus einer speziellen Naturkautschukmischung und einvulkanisierten dünnen Stahlplatten, die das Ausquetschen des Gummis unter der ständigen Last des Gebäudegewichts verhindern.

Bei der Herstellerfirma wurden 26 Lager bestellt, damit an zwei zufällig ausgewählten Exemplaren umfangreiche Abnahmetests auf der Grundlage einschlägiger Euronormen durchgeführt werden konnten (Bild 6). Die statisch-zyklischen und die dynamischen Versuche in verschiedenen Frequenzen entsprachen simulierten Erdbebenbeanspruchungen und zeigten die gewünschten Lagereigenschaften (Steifigkeiten und Dämpfung) innerhalb der tolerierten Abweichungen. Selbst bei wesentlich grösseren als den geforderten Verformungen traten keine Schäden auf.

SPIELRÄUME UND FLEXIBLE LEITUNGEN

Damit sich der Boden und mit ihm auch die bisher an den Stirnseiten angebauten Nachbargebäude gegenüber dem Hauptgebäude frei bewegen können, mussten rund um das Gebäude herum Lücken als Spielräume geschaffen werden. Für das Bemessungsbeben betragen die rechnerischen Verschiebungen rund 12cm. Die Nachbargebäude, die ebenfalls durch die Feuerwehr genutzt werden, wurden durch Versetzen entsprechender Wände um 15 cm bis 18 cm gekürzt, um zusätzlichen Verformungen durch Eigenschwingungen Rechnung zu tragen. Bei stärkeren Erdbeben sind die zu erwartenden Verschiebungen grösser, und das Hauptgebäude könnte mit den Nachbargebäuden kollidieren. Da jedoch die Decken der verschiedenen Gebäude auf gleicher Höhe liegen, würden keine Stützen getroffen, sodass auch in diesem Fall keine Einsturzgefahr bestünde. Die Nachbargebäude wurden durch eine konventionelle Verstärkung ertüchtigt.

Die hohlen Spielräume wurden in den Fassaden und den Dachflächen durch weiche Abdeckungen abgeschlossen. Am Fuss der Längsfassaden wurden die Spielräume durch tragfähige Schleppbleche für die Ein- und Ausfahrt der Feuerwehrfahrzeuge überbrückt (Bild 7). Zu-dem mussten sämtliche Leitungen für Wasser, Abwasser, Heizung, Elektrizitätsversorgung, Kommunikation etc. beim Übergang zum schwimmend gelagerten Gebäude durch den Einbau von leicht verformbaren Leitungsstücken flexibel gestaltet werden (Bild 8).

Hugo Bachmann, Prof. em. ETH, Dr. sc. techn., Dr. h. c., dipl. Bauing. ETH/SIA, Dübendorf, hu.ma.bachmann@emeritus.ethz.ch

Andreas Zachmann, dipl. Bauing. ETH/SIA, ZPF Ingenieure AG, Basel, a.zachmann@zpfingag.ch