Erdbebensicherheit von Brücken in der Schweiz

Projekt-Nr./STUDER
Zürich, 03.03.00
erdbebensicherheit_00 03 03.doc

Inhaltsverzeichnis Seite

3. ERDBEBENSICHERHEIT VON BRÜCKEN IN DER SCHWEIZ 1

3.1 EINLEITUNG 1
3.2 SCHÄDEN AN BRÜCKEN BEI ERDBEBEN. ERFAHRUNGEN 2
3.3 DIMENSIONIERUNG AUF ERDBEBENLASTEN 2
3.3.1 Grundsätze zur Erdbebensicherung von Brücken 2
3.3.2 Analysemethoden 4
3.3.3 Normen im Bereich der Erdbebensicherung von Brücken 5
3.3.3.1 Allgemeines 5
3.3.3.2 SIA-Norm 160 6
3.3.3.3 Eurocode 8 7
3.3.3.4 AASHTO-Normen 9
3.4 GRUNDSÄTZE ZUR KONSTRUKTIVEN AUSBILDUNG 11
3.4.1 Prinzipien 11
3.4.2 Ausbildung der plastischen Gelenke 11
3.4.3 Massnahmen bei Auflagern 12
3.5 LITERATUR 12
3.6 ANHANG 13

3. Erdbebensicherheit von Brücken in der Schweiz

Dr. Jost A. Studer, STUDER ENGINEERING, 8038 Zürich

3.1 Einleitung

Schadenerdbeben sind selten auftretende Extremereignisse, die gleichzeitig grosse geographische Gebiete erfassen. Moderne Staaten mit ihrer immer vielfältigeren und komplexer werdenden Infrastruktur werden zunehmend verletzlicher bezüglich solcher Ereignisse. Grosse Erdbeben können die Entwicklung von Regionen, ja von Staaten, um Jahre oder sogar Jahrzehnte zurückwerfen.

Die Schweiz gehört zu den Gebieten mittlerer seismischer Aktivität. Bei uns sind Ereignisse wie die Erdbeben von Kobe 1995 mit mehr als 150 Milliarden US$ Schaden oder der Türkei 1999 mit mehr als 50 Milliarden US$ Schaden möglich, nur treten sie seltener auf.

Das stärkste Erdbeben nördlich der Alpen ereignete sich 1356 im Raum Basel. Es war praktisch in der ganzen Schweiz spürbar. Es führte zu massiven Schäden an der Bausubstanz im Umkreis von 200 Kilometern. In einer „als wenn Studie“ kam die Schweizer Rückversicherung zum Schluss, dass unter heutigen Verhältnissen mit Schäden an Bauten zwischen 30 und 60 Milliarden Schweizer Franken zu rechnen wäre. Der Gesamtschaden würde dabei etwa dreimal so gross sein. Je nach Tageszeit wäre mit über tausend Toten zu rechnen.

Wegen der grossen Wiederkehrperioden sind Schadenbeben im Bewusstsein der Bevölkerung und der Behörden wenig verankert. Die Erdbebengefährdung wird noch heute in der Schweiz weitgehend unterschätzt. In den Baunormen werden Erdbebenlasten erst seit der SIA Norm 160 von 1989 nach modernen Gesichtspunkten erfasst. In den SIA Normen vor 1970 waren Erdbeben überhaupt nicht erwähnt. Nach dem Erdbebenschwarm 1964 im Raume Sarnen wurden erstmals Horizontalkräfte zur Berücksichtigung der Erdbebenlasten eingeführt, welche nach heutigen Erkenntnissen jedoch völlig ungenügend waren. Deshalb ist 90 bis 95% der heutigen Bausubstanz nicht auf Erdbeben ausgelegt, d.h. deren Erdbebensicherheit ist unbekannt, z.T. ungenügend. Das gilt auch für Brücken. In einer kürzlich durchgeführten Studie des Amtes für Hochbauten des Kanton Aargaus und der ETH Zürich ergab sich, dass 20% der Bausubstanz der staatlichen Bauten im Kanton Aargau auf Erdbeben saniert werden muss.

Bei einem Schadenbeben ist deshalb bis in ferne Zukunft mit grossen Schäden zu rechnen. Deshalb ist besonders wichtig, dass sich Rettungs- und Wiederaufbaumassnahmen auf ein weitgehend intaktes Transportsystem abstützen können. Brücken sind wichtige Bauten, da bei deren Beschädigung sie meist nur mit grösserem Aufwand oder überhaupt nicht umfahren werden können.

Während erfahrungsgemäss bei Neubauten eine angemessene Erdbebensicherheit ohne nennenswerte Mehrkosten erreicht werden kann, ist das bei bestehenden Bauten unter Umständen sehr kostspielig oder aus finanziellen Gründen kaum zu rechtfertigen. Dies gilt auch bei Brücken.

3.2 Schäden an Brücken bei Erdbeben. Erfahrungen.

Nach Erdbebenereignissen sind durch Forschungsteams Schäden an Brücken gut dokumentiert worden. Es zeigen sich stets ähnliche Schadensbilder.

Die möglichen Schäden an Brücken bei Erdbebeneinwirkung können folgendermassen nach dem Schadensort gegliedert werden:

- Schäden an Widerlagern
- Schäden an Lagern
- Schäden an Brückenstützen
- Schäden am Brückenträger bzw. Absturz des Brückenträgers.

Diese Schadenstypen sind in der Tabelle 3.1 mit der Häufigkeit ihres Auftretens, dem Vorkommen bei verschiedenen Brückentypen und den möglichen Ursachen dargestellt. Die Verweise auf Abbildungen in der Tabelle beziehen sich auf typische Schadensbilder, welche im Anhang zu finden sind.

3.3 Dimensionierung auf Erdbebenlasten

3.3.1 Grundsätze zur Erdbebensicherung von Brücken

Massnahmen zur Erdbebensicherung von Brücken haben nicht zum Zweck, eine Brückenkonstruktion so zu entwerfen, dass sie ein Erdbeben ohne Schaden übersteht. Vielmehr sollen sie den Einsturz der Brücke vermeiden und die verursachten Schäden in Grenzen halten.

Zur Erdbebensicherung sind Bauten robust zu gestalten. Darunter versteht man, dass sich das Bauwerk wenig empfindlich auf Abweichungen bezüglich Lastannahmen, Ausführungsungenauigkeiten und Alterungs- und Abnützungseffekte verhält. Diese allgemeine Forderung ist bei Erdbebensicherung besonders wichtig, da die Erdbebenanregung sehr stark vom Erdbeben selbst und den lokalen Baugrundverhältnissen abhängt. Diese Einflüsse lassen sich im allgemeinen nur sehr angenähert ermitteln.

Die wichtigsten Massnahmen zur Erdbebensicherung von Brücken sind die, welche einen Absturz des Brückenträgers vom Widerlager oder vom Auflager vermeiden. Diese Gefahr des Absturzes ist bei Brücken mit Abschnittslängen zwischen benachbarten Fugen von mehr als ca. 100m besonders gross.

Im allgemeinen bewegen sich die Bodenpunkte längs der Brückenachse wegen wandernden Erdbebenwellen nicht synchron. Unter Umständen können sie sich in entgegengesetzter Richtung bewegen. Dies hat zur Folge, dass die minimal benötigten Auflagerlängen erheblich gross sein können, denn zusätzlich zu diesen vom Erdbeben verursachten Verschiebungen müssen die Verformungsverschiebungen von Stützen und die Mindestauflagerlängen, um die Auflagerkräfte noch übertragen zu können, berücksichtigt werden.

Das Anstreben eines duktilen Verhaltens der Brücke unter der Erdbebeneinwirkung ist sehr wichtig, besonders für starke Erdbeben. Dieses Verhalten erlaubt die Dissipation eines grossen Teils der Energie mittels den entstehenden plastischen Gelenken.

Die Ausbildung der plastischen Gelenke wird dabei nicht im Brückenträger erwünscht, sondern am Stützenkopf bzw. -fuss. Dies erfordert eine Kapazitätsbemessung, welche sicherstellt, dass

Schadensort	*Schaden*	*Häufigkeit*	*Vorkommen*	*Ursachen*
Widerlager	- Setzung der Hinterfüllung des Widerlagers	sehr oft	alle Typen, meistens bei Zufahrtsdämmen	- Setzungen, Sackungen und Rutschungen bei Dämmen - Pfahlfundierte Widerlager, Damm auf setzungsempfindlichen Untergrund
	- Exzessive Setzungen und Verschiebungen	selten, vom Untergrund abhängig	alle Brückentypen	- Bodenverflüssigung im Fundationsbereich
Lager	- Beschädigung bis vollständige Zerstörung *[Abbildung 3.1]*	Häufig	alle Lagertypen	- Zu grosse horizontale Relativverschiebungen zwischen Brückenträger und Auflagerbank
Brückenstützen	- Leichte Schäden bis Zerstörung (führt zu Kippen, Absacken etc.) *[Abbildungen 3.2, 3.3]*	häufig	bei allen Brückentypen	Bei Betonpfeilern: - Steifigkeitssprung im Querschnitt - Sprung im Armierungsgehalt - Mangelhafte Bügelarmierung führt zu unzureichender Duktilität Bei Stahlpfeilern: - Geringe Beulsteifigkeit
	- Verkanten und Verkippen	selten	bei allen Brückentypen	- Fundationsversagen infolge Rutschung, Bodenverflüssigung
Brückenträger	- Absturz *[Abbildungen 3.4, 3.5, 3.6]*	häufig	- Einfache Balken - Widerlager bzw. Gerbergelenke von Durchlaufträgern	- Zu kurze Auflagerbereiche - Versagen wegen exzessiven Deformationen infolge Fundationsversagen bei Auflager oder Pfeiler - Versagen des Pfeilers
	- Trägerversagen *[Abbildungen 3.7, 3.8]*	Selten	- alle Typen	- Meist infolge Stützenversagen bei Durchlaufträgern - Erdbebeninduzierte Torsionsbelastung bei gekrümmten Brücken - Absturz einzelner Elemente und Folgeversagen der anschliessenden Elemente

Tabelle 3.1: Typische Schäden an Brücken infolge Erdbebeneinwirkung

sich die plastischen Gelenke nur an den gewünschten Orten ausbilden können. Die restlichen Bauwerksteile sollen elastisch bleiben.

Die Anwendung der Methode der Kapazitätsbemessung ergibt ein „gutmütiges“ Verhalten des Tragwerks unter Erdbebenbelastung, denn der sich ergebende Mechanismus bei der Ausbildung der plastischen Gelenke kann geschickt gewählt und erzwungen werden.

Bei einer konventionellen Bemessung dagegen ist das Verhalten der Brücke während einem Erdbeben meistens nicht bekannt. Plastifizierungen sind überall möglich, und der plastische Mechanismus ist zufällig. Häufig ergeben sich in solchen Fällen Sprödbrüche bei Stützen, was in der Folge zum Einsturz des Trägers führt. All dies ergibt im Falle einer konventionellen Bemessung einen tieferen Schutzgrad gegen Einsturz als bei einer Kapazitätsbemessung.

Ein Versagen des Trägers infolge Überbelastung bei Erdbebeneinwirkung ist selten. Meistens genügt die Bemessung des Trägers aufgrund der erwarteten statischen Lasten, um auch eine ausreichende Sicherheit gegen Erdbeben zu erzielen. Hingegen sind die Stützen, Lager und Auflager bezüglich Erdbebeneinwirkung sorgfältig auszubilden.

Das Erdbebenverhalten einer Brücke hängt wesentlich von ihrer Lagerungsart ab:
Bei einer schwimmenden Lagerung (Brücke an beiden Widerlagern beweglich gelagert) ergibt sich in Längsrichtung und im allgemeinen auch in Querrichtung ein relativ einfaches dynamisches System, welches zur Bemessung von Stützen und Lagern als Einmassenschwinger modelliert werden kann. Die Eigenfrequenz f dieses Einmassenschwingers beträgt

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

mit der Gesamtsteifigkeit k der Stützen und der Gesamtmasse m des Brückenträgers im entsprechenden Brückenabschnitt. Mit Kenntnis dieser Eigenfrequenz folgt die horizontale Beschleunigung a_h aus dem elastischen Antwortspektrum und folglich auch die (totale) elastische Ersatzkraft. Diese kann auf die verschiedenen Stützen verteilt werden. Schliesslich werden aufgrund dieser Ersatzkraft Stützen, Lager und Fundamente bemessen.

Bei einer festen Lagerung (Brücke an mindestens einem Widerlager unverschieblich gelagert) ist keine einfache Modellbildung des dynamischen Systems mehr möglich. Allgemein ist es nicht zweckmässig oder kaum möglich, die festen Lager für grosse Erdbebenkräfte zu bemessen. Oft wird deshalb die Zerstörung dieser anfänglich festen Lager bei einer starken Erdbebenbeanspruchung in Kauf genommen, so dass sich das System nach der Zerstörung dieser Lager ähnlich wie ein System mit schwimmender Lagerung und eventuellen Reibungslagern verhält. Aus diesen Gründen ist es ratsam zu prüfen, ob nicht von Anfang an eine schwimmende Lagerung anstelle einer festen Lagerung möglich ist.

3.3.2 Analysemethoden

Die in der Praxis angewandten Methoden zur Berechnung des Erdbebenverhaltens von Brücken sind einerseits das Ersatzkraftverfahren und andererseits das Antwortspektrenverfahren.

Beim Ersatzkraftverfahren werden aufgrund der dynamischen Belastung des Erdbebens statische Erdbebenersatzkräfte berechnet, welche auf die Brücke wirken. Der anschliessende Sicherheitsnachweis geschieht unter Berücksichtigung dieser Erdbebenkräfte mit gewöhnlichen statischen Methoden.

Ein wichtiger Nachteil des Ersatzkraftverfahrens ist, dass damit nur die Grundfrequenz der Brücke berücksichtigt werden kann. Bei Brücken mit einer einigermassen homogenen Massen- und

Steifigkeitsverteilung ist dieses Verfahren genügend, weil in solchen Fällen die erste Eigenschwingungsform tatsächlich gegenüber den höheren Eigenschwingungsformen dominierend ist. In anderen Fällen wird jedoch der Einfluss der höheren Eigenfrequenzen zu gross, so dass diese nicht vernachlässigt werden dürfen.

Das Standardverfahren zur Berücksichtigung der höheren Frequenzen ist das Antwortspektrenverfahren. Dieses Verfahren geht von der Lösung des Eigenwertproblems

$$\left[k - \omega^2 \cdot m\right] \cdot v = 0$$

aus, wobei k die Steifigkeitsmatrix, m die Massenmatrix, v der Verschiebungsvektor und ω die Kreisfrequenz darstellen. Die Lösung der obigen Gleichung führt zu n Lösungen, ω_1 bis ω_n, mit den entsprechenden n Eigenschwingungsformen. Um schliesslich die massgebenden Verschiebungs- oder Belastungsgrössen für die Brückenkonstruktion zu erhalten, werden die entsprechenden Werte der verschiedenen Eigenschwingungsformen mit Superpositionsgesetzen überlagert.

Eine weitere Möglichkeit zur Analyse des Verhaltens einer Brücke ist, direkt von der Bewegungsdifferentialgleichung

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -ma_g$$

auszugehen. Dabei stellen m, c bzw. k die Massenmatrix, Dämpfungsmatrix bzw. Steifigkeitsmatrix der Brücke, v den Verschiebungsvektor der Brücke und a_g den Bodenbeschleunigungsvektor dar. Die analytische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung ist im allgemeinen nicht möglich. Es müssen numerische Methoden, welche die Gleichung in inkrementellen Zeitschritten lösen, benutzt werden.

3.3.3 Normen im Bereich der Erdbebensicherung von Brücken

3.3.3.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden die Grundsätze der Berechnungen von Brücken mit Hilfe von unterschiedlichen Normenwerken wie die Schweizerische SIA-Norm 160 (von 1989), der Eurocode 8 und die amerikanischen AASHTO-Normen aufgezeigt und miteinander verglichen.

Allgemein streben diese Normenwerke nicht eine Brückenkonstruktion an, welche ein Erdbeben ohne jeglichen Schaden überstehen. Vielmehr wird versucht, eine Brücke so zu dimensionieren, dass unter der Einwirkung des Bemessungsbebens einerseits die Brücke nicht zusammenstürzt und andererseits der entstandene Schaden in Grenzen gehalten wird.

Der zulässige Schaden hängt dabei von der Bedeutung der Brücke ab. Einer Brücke wird eine bestimmte Bedeutung zugeteilt, indem sowohl Sicherheitsaspekte (z.B. Brücke als „lifeline“) als auch wirtschaftliche Überlegungen (z.B. schwierige Reparaturmöglichkeiten nach einem Erdbeben) berücksichtigt werden.

Die Analysemethoden, welche in den verschiedenen Normen erwähnt werden, wurden im Abschnitt 3.3.2 vorgestellt. Die Standardanalysemethode in diesen Normen ist dabei nicht einheitlich. Die SIA-Norm wie auch die AASHTO-Norm bezeichnen das verfahren mit statischen Ersatzkräften als Standardverfahren, während im Eurocode 8 eine Analyse nach dem Antwortspektrenverfahren das Standardvorgehen ist.

3.3.3.2 SIA-Norm 160

Prinzipien

Die Zielsetzung des Erdbebenabschnitts 4 19 aus der SIA-Norm 160 ist, ein Bauwerk so zu dimensionieren, dass die Schäden am Bauwerk infolge des Bemessungsbebens bestimmte Normschäden nicht überschreiten.

Bauwerksklassen

Es wird zwischen drei Bauwerksklassen (BWK I bis BWK III) unterschieden, welche ein Bauwerk je nach dessen Bedeutung und Gefährdung für Mensch und Umwelt klassieren:
Zur Bauwerksklasse I werden Brücken gezählt, welche nach einem Erdbeben von untergeordneter Bedeutung sind. Führen diese Brücken jedoch über Verkehrswege mit einer erheblichen Bedeutung, dann werden sie der Bauwerksklasse II zugeordnet. Zur selben Bauwerksklasse II gehören auch Brücken, welche selber eine erhebliche Bedeutung nach einem Erdbeben haben. Die Bauwerksklasse III umfasst schliesslich Brücken, welche als lebenswichtig eingestuft werden (sogenannte „lifelines“). Zu dieser Klasse gehören beispielsweise Brücken, welche die einzige Verbindung zu einem Tal oder einer wichtigen Industriezone darstellen oder welche eine Verkehrsachse oberster Priorität queren.

Nebst dieser Einteilung, welche vor allem Sicherheitsaspekte berücksichtigt, kann eine Brücke aus wirtschaftlichen Gründen in höhere oder niedrige Klassen eingeteilt werden. Letzteres ist aber nur möglich, wenn dadurch weder Menschen noch die Umwelt gefährdet werden.

Analysemethoden

Ähnlich wie bei Gebäuden darf auch bei Brücken das Ersatzkraftverfahren angewendet werden, sofern nicht höhere Eigenschwingungsformen massgeblich angeregt werden. Ansonsten ist ein verfeinertes Rechenverfahren (wie das Antwortspektrenverfahren) anzuwenden.

Die Beanspruchungen werden an einem elastischen Tragwerksmodell ermittelt. Dabei können bei Brücken der BWK I und II plastische Umlagerungen von bis zu 25% der elastischen ermittelten Beanspruchungen berücksichtigt werden.

Die totale horizontale Erdbebenersatzkraft Q_{acc} kann nach SIA 160 Ziffer 4 19 506 nach der Formel

$$Q_{acc} = \frac{a_h}{g} \cdot C_k \cdot (G_m + \Sigma\psi_{acc} \cdot Q_r)$$

berechnet werden. Dabei ist a_h die horizontale Beschleunigung, g die Erdbeschleunigung und C_k ein Konstruktionsbeiwert.
Diese totale Erdbebenkraft kann anschliessend proportional zur Masse der konkret untersuchten Bauteile verteilt werden.

Die horizontale Beschleunigung a_h wird aufgrund von elastischen Bemessungsspektren (SIA 160 Figur 27) ermittelt, welche sowohl die Grundfrequenz f_0 der Brücke als auch die verschiedenen Erdbebenzonen berücksichtigen.

Der Konstruktionsbeiwert C_k berücksichtigt den Einfluss von plastischen Verformungen und die wahrscheinlichen Werte der Festigkeiten, im Gegensatz zu den eingesetzten Rechenwerten. C_k wird berechnet aus

$$C_k = \frac{1}{K} \cdot C_d ,$$

wobei K ein Verformungsbeiwert in Abhängigkeit der Bauwerksklasse ist und C_d die wahrscheinlichen Festigkeiten der Baumaterialien (im Gegensatz zu den eingesetzten Rechenwerten) berücksichtigt. C_d beträgt 0.65 nach SIA 160 Ziffer 4 19 73.

Analog kann auch eine vertikale Ersatzkraft ermittelt werden, wobei für die vertikale Beschleunigung 2/3 der horizontalen Beschleunigung eingesetzt wird. Die Einwirkungen aus horizontaler und vertikaler Beschleunigung werden in der Regel nicht überlagert und werden getrennt behandelt.

Nachweise

Der erforderliche Nachweis der Erdbebenbeanspruchung nach SIA 160 umfasst einen Tragsicherheits- und einen Gebrauchstauglichkeitsnachweis.

Die Beurteilung der Tragsicherheit ist unterschiedlich für die drei Bauwerksklassen BWK I bis BWK III.

Bei Brücken der Klasse BWK I genügt der Nachweis, dass der Brückenträger nicht vom Lager abstürzen kann. Dabei muss als Bedingung eine minimale Länge des Auflagers eingehalten werden. Allfällige lokale Schäden werden zugelassen.

Zusätzlich ist bei Brücken der Bauwerksklasse II die Tragsicherheit fester Lager in Brückenlängsrichtung nachzuweisen, sofern die obengenannten Bedingungen nicht eingehalten werden und keine für dynamische Kräfte bemessenen Vorrichtungen die Verschiebungen begrenzen. Lokale Schäden wie eine Zerstörung der Lager und der Fahrbahnübergänge werden zugelassen, jedoch ist die Tragsicherheit von erheblich beanspruchten Bauteilen, wie Stützen, nachzuweisen.

Schliesslich ist bei Brücken der Bauwerksklasse III sowohl die Tragsicherheit der Lager als auch anderer erheblich beanspruchter Bauteile erforderlich.

Der Nachweis der Gebrauchtauglichkeit wird mit den gleichen Einwirkungen und Rechenverfahren wie für den Nachweis der Tragsicherheit geführt. Dabei sind bei Brücken der Bauwerksklasse III die Lager und Fahrbahnübergänge entsprechend den ermittelten Verschiebungen des Trägers auszubilden.

3.3.3.3 Eurocode 8

Prinzipien

Das Bemessungsprinzip des EC 8 ist, eine Brücke mit wichtiger Verbindungsfunktion so zu bemessen, dass unter der Einwirkung des Bemessungsbebens diese Brücke mit einer gewissen Zuverlässigkeit ihre Funktion weiterhin erfüllen kann.

Die Anforderungen an eine Brücke sind derart, dass ein Zusammenbruch wie auch ein zu grosser Schaden infolge dem Bemessungsbeben vermieden werden soll. Dies wird erreicht, indem

entweder ein duktiles oder ein weitgehend elastisches Verhalten der Brücke unter dem Bemessungsbeben angestrebt wird.

Das duktile Verhalten ist in Regionen mit einer mittleren bis hohen Seismizität empfohlen, wobei sich sowohl die gesamte Brückenstruktur als auch lokale Teile derselben (plastische Gelenke) duktil verhalten sollen.
Ein weitgehend elastisches Verhalten kann in Regionen mit niedriger Seismizität angestrebt werden. In diesem Fall soll die Brücke so konzipiert werden, dass potentielle plastische Gelenke leicht zugänglich für Reparaturarbeiten sind.

Bauwerksklassen

Die angestrebte Zuverlässigkeit, mit der eine Brücke ihre Funktion erfüllen soll, ist je nach Bedeutung der Brücke unterschiedlich. Dies wird mittels einem Bedeutungsfaktor γ_I in die Berechnungen miteinbezogen. Der Faktor γ_I beträgt 1.0 für eine Brücke mittlerer Bedeutung, was in bezug auf ein Erdbebenereignis einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren entspricht. Für Nutzungszeiten von 50 bzw. 100 Jahren heisst dies eine Übertretungswahrscheinlichkeit von 10% bzw. 19% bezüglich dem Bemessungsbeben. Diese angegebenen Werte werden durch die allgemeine Fassung des EC 8 vorgeschlagen, können aber von den einzelnen Ländern, in denen der Eurocode gilt, angepasst werden.

Nebst dieser mittleren Bedeutung einer Brücke wird weiter unterschieden zwischen Brücken mit einer höheren bzw. tieferen Bedeutung. Die entsprechenden Werte für γ_I betragen 1.3 bzw. 0.7, was eine tiefere bzw. höhere Übertretungswahrscheinlichkeit des Bemessungsbebens bedeutet.
Die Einteilung der Brücken in die verschiedenen Klassen geschieht ähnlich der SIA 160, indem sowohl Sicherheitsaspekte als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

Analysemethoden

Das eigentliche Standardverfahren beim Eurocode 8 ist das Antwortspektrenverfahren, im Unterschied zu den beiden anderen vorgestellten Normenwerken. Ausser der Grundschwingungsform werden also auch höhere Eigenschwingungsformen der Brücke berücksichtigt. Die eigentliche Analyse ist aber linear.

Um trotzdem den Einfluss von plastischen Gelenken zu berücksichtigen, wird ein Verhaltensfaktor q (ähnlich dem Konstruktionsbeiwert K der SIA 160) eingeführt.

In der Analyse werden diejenigen Eigenschwingungsformen berücksichtigt, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Antwort der Struktur bei Erdbebenanregung haben. Als Kriterium wird verlangt, dass die Summe der berücksichtigten modalen Massen mindestens 90% der Gesamtmasse der Brücke sein soll.

Wenn das Erdbebenverhalten im wesentlichen nur von der Grundschwingungsform der Brücke abhängt, können aber auch im Rahmen des Eurocode 8 Verfahren verwendet werden, welche nur die Grundfrequenz berücksichtigen und äquivalente statische Erdbebenkräfte (Ersatzkräfte) einführen.

Die Ermittlung der massgebenden Erdbebenbeschleunigung geschieht analog der SIA-Norm 160 mit einem elastischen Bemessungsspektrum, welches die horizontale Beschleunigung in Abhängigkeit der Schwingungsperiode der Brücke und dem Bodentyp angibt. Zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Bodentyps entlang der Brückenachse kann ein gewichtetes Antwortspektrum benutzt werden.

Die Vertikalbeschleunigung wird mit einem Reduktionsfaktor berechnet, welcher eine Funktion der Schwingungsperiode ist.

Nachweise

Auch im Eurocode 8 werden minimale Auflagerlängen definiert, welche sowohl von der Geometrie der Brücke als auch von den erwarteten relativen Verschiebungen von Brückenträger und Auflager abhängen.

Diese Verschiebungen können abgeschätzt werden, indem direkt von den Antwortspektren für die Geschwindigkeiten und Verschiebungen ausgegangen wird.

3.3.3.4 AASHTO-Normen

Prinzipien

Das Hauptziel der Bemessung nach amerikanischen Normen ist, eine Brückenstruktur zu entwerfen, welche unter Erdbebenbelastung zwar beschädigt werden, aber nicht zusammenstürzen darf. Ausserdem soll es möglich sein, die Brücke schnell wieder benutzbar zu machen, was leicht zugängliche und reparierbare Schadenstellen erfordert.

Bauwerksklassen

Die Brücken werden in vier verschiedene Erdbebenklassen (A bis D) unterteilt. Die Klasse für eine bestimmte Brücke ergibt sich einerseits aus der Bedeutung derselben (es wird zwischen den zwei Bedeutungsstufen I und II unterschieden) und andererseits aus der Grösse der erwarteten Erdbebenbeschleunigung.

Analysemethoden

Als Berechnungsverfahren für die Erdbebenkräfte kann das Ersatzkraftverfahren angewandt werden, sofern die Massenverteilung der Brücke homogen ist und sich die Steifigkeiten von angrenzenden Brückenteilen um nicht mehr als 25% unterscheiden. Dadurch kann der Einfluss von höheren Eigenschwingungsformen vernachlässigt werden. Anderenfalls müssen komplexere Analysemethoden verwendet werden, welche auch die höheren Eigenschwingungsformen berücksichtigen.

Der seismische Koeffizient C_s zur Berechnung der statischen Ersatzkräfte beträgt

$$C_s = 1.2 \cdot \frac{A \cdot S}{T^{2/3}}$$

mit dem Beschleunigungskoeffizienten A, dem Amplifikationsfaktor S zur Berücksichtigung des Bodentyps und der Grundperiode T der Brücke in der untersuchten Richtung.

Die gleiche Analyse gilt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung der Brücke, wobei jeweils die Periode T in der entsprechenden Richtung ermittelt werden muss *(Abbildung 3.9)*.

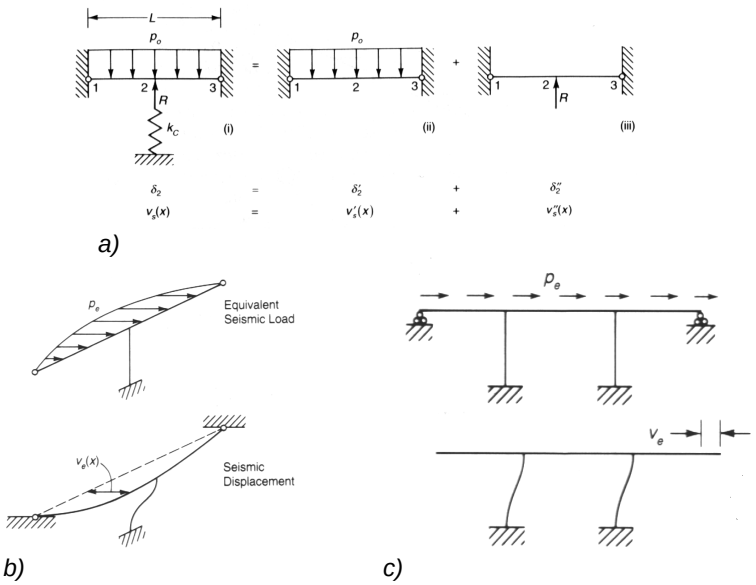


Abbildung 3.9: Statische Systeme eines Brückenabschnitts, a) in vertikaler Richtung, b) in Querrichtung, c) in Längsrichtung

Um die Gleichzeitigkeit der Kräfte in den verschiedenen Richtungen zu erfassen, werden diese orthogonal zueinander stehenden Kräfte wie folgt durch zwei verschiedene Lastfälle kombiniert:

- *Lastfall 1:* 100% der Erdbebenkraft in Längsrichtung und 30% der Erdbebenkraft in Querrichtung
- *Lastfall 2:* 100% der Erdbebenkraft in Querrichtung und 30% der Erdbebenkraft in Längsrichtung.

Die Querkräfte und die Momente in den Stützen werden berechnet, indem am Stützenfuss bzw. -kopf plastische Momente angenommen werden. Dies geschieht mit einer Gleichgewichtsbetrachtung beim plastischen Fliessen dieser Gelenke mit Berücksichtigung der Erdbebenkräfte *(Abbildung 3.10)*.

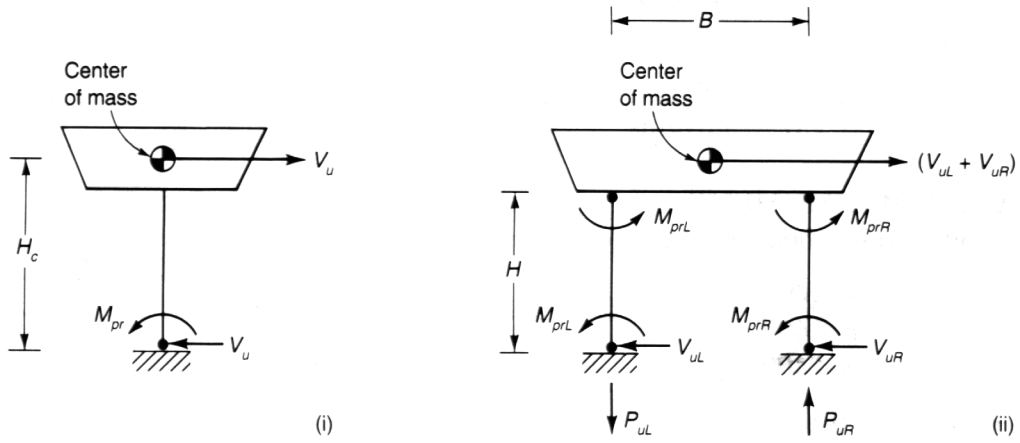


Abbildung 3.10: Plastische Momente an Stützenkopf bzw. -fuss

Nachweise

Zur Vermeidung des Absturzes des Brückenträgers von den Widerlagern werden minimale Auflagerlängen definiert, welche die Erdbebenklasse der Brücke, die Länge des Trägers und die mittlere Höhe der Stützen berücksichtigen. Die Auflagerlänge darf zudem nicht kleiner als die berechnete elastische Verschiebung des Brückenträgers sein.

Diese Anforderungen müssen auch von Brücken erfüllt werden, die als einfache Balken ausgebildet sind. Eine detailliertere Erdbebenanalyse ist dann für solche Brücken allerdings nicht erforderlich.

3.4 Grundsätze zur konstruktiven Ausbildung

3.4.1 Prinzipien

In Abschnitt 3.3.1 wurde erwähnt, dass grundsätzlich ein duktiles Verhalten der Brücke bei der Erdbebenanregung angestrebt wird. Dies erfordert ein genügendes Rotationsvermögen der sich bildenden plastischen Gelenke.

Die Ausbildung der plastischen Gelenke soll nur an den gewünschten Orten möglich sein, wobei die restlichen Bauwerksteile elastisch bleiben sollen. Um dies zu erreichen, ist eine Kapazitätsbemessung notwendig.

Bei einer Kapazitätsbemessung sollen also die elastisch bleibenden Teile nicht nur auf die berechneten Schnittkräfte aus der Erdbebeneinwirkung bemessen werden, sondern derart, dass die maximal möglichen Schnittkräfte, welche sich beim Ausbilden der plastischen Gelenke ergeben (die Widerstände bei Überfestigkeit), aufgenommen werden können. Dies gilt besonders auch für die Bemessung der Fundamente.

3.4.2 Ausbildung der plastischen Gelenke

In plastischen Gelenken ist eine gute Stahlqualität mit hoher Duktilität erforderlich, um das erforderliche Rotationsvermögen zu erreichen.

Die zyklische Be- und Entlastung der Längsbewehrung kann das Ausknicken dieser Bewehrung bewirken. Um dies zu verhindern, soll die Längsbewehrung von Bügeln mit kleinem gegenseitigem Abstand umschnürt und jeder Stab von einem Bügel umfasst werden (ausser bei kleinen Abständen der Längsbewehrung). *(Abbildung 3.11)*.

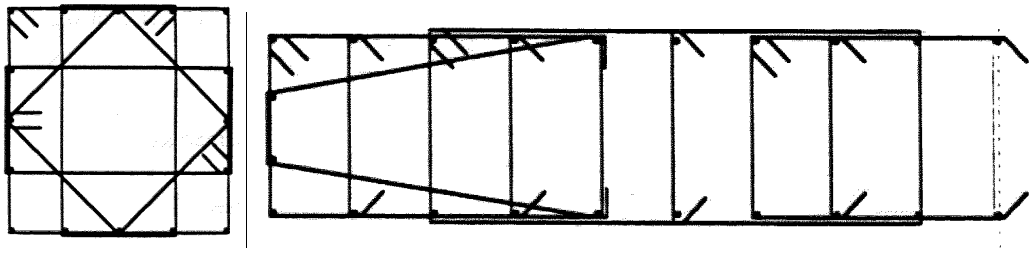


Abbildung 3.11: Beispiele von Bewehrungsführungen bei plastischen Gelenken [3]

Diese Bügel erfüllen nebst der Funktion der Stabilisierung der Längsbewehrung auch die des Umschnüren des Betons, was wegen dem sich ergebenden dreidimensionalen Spannungszustand eine Erhöhung der Betonfestigkeit bedeutet.

3.4.3 Massnahmen bei Auflagern

Im Bereich von Widerlagern und Auflagern können besondere konstruktive Massnahmen vorgesehen werden. Nebst weichen Blei-Gummi-Lagern zur Schwingungsisolierung eher kleinerer Brücken können bei den Widerlagern auch verschiedene Stossdämpfer oder Puffer angeordnet werden. Bei solchen Lösungen ist allerdings immer eine sorgfältige dynamische Berechnung durchzuführen, denn die abzuleitenden Kräfte können erheblich gross werden und erfordern entsprechend massive Widerlager.
Ähnliche Überlegungen gelten auch für eventuelle Schubnocken über Stützen oder bei Widerlagern, zur Begrenzung der relativen Verschiebungen und damit als Absturzsicherungen.

3.5 Literatur

- [1] *„SIA Norm 160“*, Ausgabe 1989; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- [2] Bachmann H. (1995). *„Erdbebensicherung von Bauwerken“*, Birkhäuser Verlag, Basel.
- [3] *„Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures”*, October 1994; ENV 1998-1-1, European Committee for Standardisation, Brussels.
- [4] Williams A. (1995). *„Seismic design of buildings and bridges”*, California Engineering Press cop. 1995, San Jose.

3.6 Anhang



Abbildung 3.1: Schaden am Auflagerbereich einer Eisenbahnbrücke, Alaska Erdbeben, 1964



Abbildung 3.2: Versagen einer Stütze beim Northridge Erdbeben 1994



Abbildung 3.3: Einsturz von Betonstützen (zweistöckiges Bauwerk), Loma Prieta 1989



Abbildung 3.4: Absturz Brückenträger, S.F.-Oakland Bay-Bridge, 1989



Abbildung 3.5: Einsturz des oberen Brückenträgers in Loma Prieta CA, 1989



Abbildung 3.6: Absturz von Brückenträgern nach Erdbeben 1964, Japan



Abbildung 3.7: Einsturz einer Brücke in der North San Fernando Valley, Northridge Erdbeben 1994



Abbildung 3.8: Einsturz von Brückenträgern nach Erdbeben 1976, Guatemala