

Bewertungssystem für Brücken unter seismischer Belastung

Philippe Renault

Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen

Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen

Tel.: ++49-241-8025091, Fax: ++49-241-8022303, e-Mail: renault@lbb.rwth-aachen.de

ZUSAMMENFASSUNG: Die Sicherheit von Brückenbauwerken nach einem Erdbeben ist für die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Die Erdbebengefährdung von Brücken einzuschätzen, stellt wegen der großen Anzahl bestehender Brückenbauwerke unterschiedlichen Typs und Alters eine komplexe und mit hohen Kosten verbundene Aufgabe dar. In diesem Beitrag wird als Lösungsansatz ein systematisches Verfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit des Brückenbestandes vorgestellt. Zunächst wird die zu beurteilende Brücke durch Zuordnung eines Brückentyps klassifiziert. Anschließend wird die strukturelle Bedeutung der Brücke eingeschätzt und das seismische Standortrisiko bestimmt. Basierend auf diesen Informationen wird die Erdbebensicherheit durch eine dreistufige Untersuchung beurteilt. Das systematische Vorgehen erlaubt eine problemorientierte Analyse mit minimalem Zeit- und Kostenaufwand. Die praktische Anwendung des in ein neu entwickeltes Bewertungssystem mit Anbindung an die bundesweit eingesetzte Brückendatenbank SIB-Bauwerke integrierten Verfahrens wird am Beispiel einer Brücke im Kölner Raum demonstriert.

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. In Deutschland sind Schadenbeben wegen ihrer großen Wiederkehrperiode im Bewusstsein der Bevölkerung und der Behörden wenig verankert. Erdbebeningenieure und Seismologen dagegen warnen bereits seit einigen Jahren, dass auch in Deutschland große Erdbebenkatastrophen möglich sind, wie es die Vergangenheit bereits gezeigt hat.

Die Bauwerke in Deutschland sind größtenteils sehr viel schlechter gegenüber Erdbeben ausgelegt als in anderen europäischen Ländern (wie z.B. in der Schweiz, Frankreich und Griechenland), die sich bereits früh mit der Erdbebengefährdung auseinandergesetzt haben. Dort gibt es schon seit einigen Jahrzehnten moderne Erdbebennormen, insbesondere auch für Brückenbauwerke. In Deutschland jedoch werden erst seit Einführung der DIN 4149 im Jahr 1981 übliche Hochbauten in deutschen Erdbebengebieten seismisch bemessen. Aufgrund der Altersstruktur der

Bauwerke weisen deshalb über 90% der Bauwerke in Deutschland eine unbekannte und oft ungenügende Erdbebensicherheit auf.

Eine der Hauptursachen für eine hohe Anzahl von Todesfällen nach einem Erdbeben ist, dass Rettungsmaßnahmen nur unzulänglich oder verzögert durchgeführt werden können. Im Katastrophenfall sind strategisch wichtige Straßen häufig infolge beschädigter oder eingestürzter Brücken nicht passierbar und Rettungskräfte können ihre Einsatzorte nicht erreichen (Abbildung 1). Es besteht daher die Notwendigkeit, die Erdbebensicherheit vorhandener Brücken zu beurteilen, um ihre Funktionalität im Falle eines Erdbebens zu gewährleisten und somit die Sekundärschäden zu minimieren.



Abbildung 1: Brückeneinsturz nach dem San Fernando Erdbeben 1971 (Nielson, 2003)

Die in jüngster Vergangenheit aufgetretenen Schadenbeben in der Türkei und in Griechenland haben auch in Deutschland zu einer höheren Sensibilisierung gegenüber der Gefahr durch Erdbeben geführt. Weiterhin hat die bevorstehende Einführung des Eurocode 8 - Teil 2 (2004) für Brücken die Frage aufgeworfen, ob die bestehenden Brücken die gestiegenen Anforderungen der neuen Normengeneration erfüllen.

Brückenbauwerke sind wichtige Bestandteile der Verkehrsinfrastruktur, deren Funktionsfähigkeit im Erdbebenfall zur Sicherstellung von Rettungswegen und zur Vermeidung von langen Umleitungen gewährleistet sein muss. Nach einem Erdbeben ist es ebenfalls besonders wichtig, dass sich eingeleitete Wiederaufbaumaßnahmen auf ein weitgehend intaktes Transportsystem abstützen können. Die Leistungsfähigkeit des deutschen Straßennetzes ist eng mit der Sicherheit und Dauerhaftigkeit der darin vorhandenen Brückenbauwerke verknüpft. Im Netz der Bundesfernstraßen mit seinen Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Bestandswert \approx 175 Mrd. Euro) befinden sich derzeit rund 37.000 Brückenbauwerke mit einem Bestandswert von \approx 40 Mrd. Euro und einer Brückenfläche von 26,37 Mio. m² (Stand: 31.12.2002). Darüber hinaus beträgt der Brückenbestand in Landes- bzw. Staatsstraßen in der Baulast der Länder ca. 23.000 Stück mit einer Fläche von über 4,6 Mio. m².

Die meisten Brücken (ca. 70%) wurden in Spannbetonbauart errichtet, etwa 30% sind Stahlbeton- (18%), Stahlverbund- (4%) sowie Stahl-/Stein-/Holzbrücken (8%) (Abbildung 2). Die verausgabten Mittel für ihre Erhaltung (bauliche Unterhaltung + Instandsetzung + Erneuerung bzw. Ersatz) beliefen sich im Jahre 2002 auf 294 Mio. Euro zzgl. 56 Mio. Euro Zukunftsinvestitionsprogramm-Mittel (Metzler 2004).

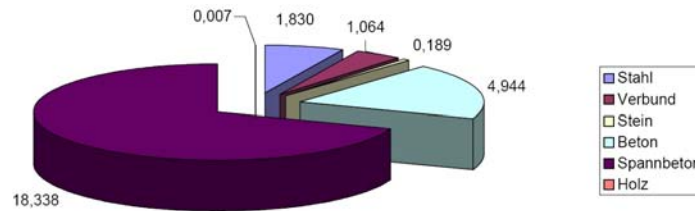


Abbildung 2: Bestand nach Brückenfläche [Mio. m²] und Bauarten an Bundesfernstraßen (Stand: 31.12.2002) (BAST, 2003)

In Anbetracht der großen Anzahl an Bauwerken ist die ausführliche Beurteilung der Erdbebensicherheit des kompletten Bestands mit hohen Kosten verbunden. 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. Eine Beurteilung der Erdbebensicherheit ist daher aus volkswirtschaftlicher Sicht von großer Bedeutung und verlangt nach Methoden, die mit geringem Aufwand eingesetzt werden können, um möglichst schnell und effizient zu einem Ergebnis zu kommen.

2. SEISMISCHES VULNERABILITÄTS-UNTERSUCHUNGSKONZEPT

2.1 ALLGEMEINES

Zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Brücken ist es notwendig, grundlegende Eingangsdaten zusammenzustellen. Im Allgemeinen sollten die der konstruktiven Beurteilung zugrunde liegenden Daten folgende Punkte abdecken:

- Identifikation des konstruktiven Systems und Überprüfung des Bestandes. Diese Informationen sollten entweder durch Vor-Ort Untersuchungen oder aus Originalbauplänen gewonnen werden. Im letzteren Fall sollten auch Informationen über mögliche konstruktive Veränderungen oder aufgetretene Schäden seit der Errichtung der Brücke eingeholt werden.
- Identifikation der Art des Fundamentes und der Bodenverhältnisse.
- Informationen über die wichtigsten Abmessungen und Querschnitteeigenschaften der Bauteile, die mechanischen Eigenschaften und den Zustand der beteiligten Werkstoffe.
- Informationen über erkennbare Werkstofffehler und über unzureichende konstruktive Detaillösungen.
- Art und Ausmaß früherer und gegenwärtiger konstruktiver Schäden und die dazugehörigen Sanierungsmaßnahmen aus den Prüfberichten.
- Informationen über die seismischen Auslegungskriterien, die dem Originalentwurf evtl. zugrunde liegen.

Allerdings ist üblicherweise der Kenntnisstand über das konkret zu untersuchende Bauwerk nur sehr dürftig. Daher ist, in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Zeit, die Grundidee der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise eine Untersuchung mit unterschiedlich genauen Berechnungsmethoden durchzuführen, da eine detaillierte Neuberechnung aller betroffener Einzelbauwerke nicht zweckmäßig ist.

2.2 ÜBERBLICK

In Anbetracht des Zeitfaktors und der Menge an zu untersuchenden Bauwerken wird daher im Rahmen des hier vorgestellten Bewertungsverfahrens folgende Herangehensweise vorgeschlagen:

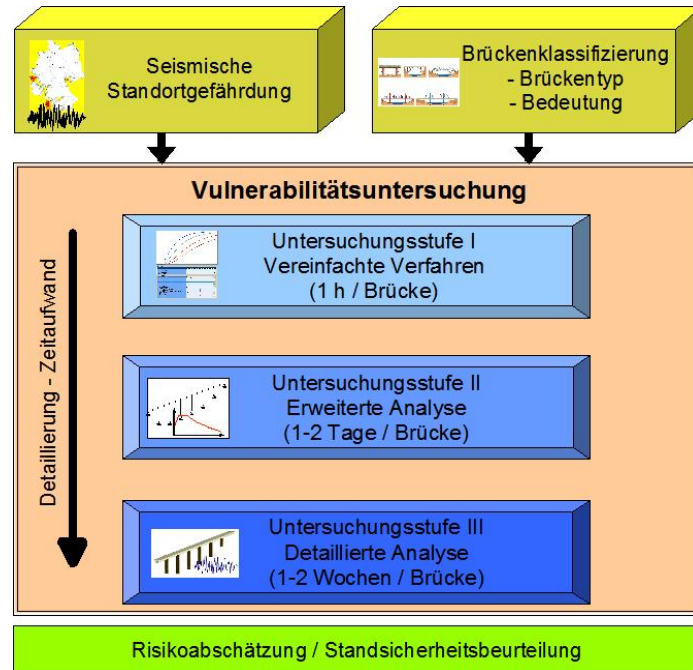


Abbildung 3: Bausteine des dreistufigen Untersuchungskonzeptes

Der erste Schritt besteht in der Klassifizierung der Brücke, bei der die zu beurteilende Brücke einem Brückentyp (Platten-/Balkenbrücke, Rahmenbrücke, Bogenbrücke, Schrägseilbrücke, Hängebrücke, Fachwerkträgerbrücke) zugeordnet wird. Nach der Klassifizierung wird die infrastrukturelle Bedeutung der Brücke beurteilt und das seismische Standortrisiko bestimmt. Auf Grundlage dieser Informationen wird die Erdbebensicherheit durch die dreistufige Untersuchung ermittelt.

In der ersten Untersuchungsstufe wird die Erdbebensicherheit der Brücke anhand von Fragilitätskurven beurteilt, die den Zusammenhang zwischen spektraler Beschleunigung und der Eintrittswahrscheinlichkeit eines definierten Schadenszustandes beschreiben.

Zusätzlich wird für jeden Brückentyp ein umfangreiches Bewertungssystem zur Verfügung gestellt, mit dem die individuellen konstruktiven Merkmale der untersuchten Brücke berücksichtigt werden können. Es handelt sich hierbei um einen so genannten „Schnelltest“, der für die verschiedenen Brückenklassen entworfen worden ist. Das Ergebnis der ersten Untersuchungsstufe ist eine erste Abschätzung der Erdbebengefährdung und die Identifikation von Schwachstellen der Brücke in Bezug auf Erdbebenlasten. Die Untersuchung kann mit geringem Zeitaufwand durchgeführt werden und dient als Entscheidungsgrundlage für die Notwendigkeit der Durchführung weiterer Untersuchungsschritte. Auf diese erste Untersuchungsstufe wurde bei der Entwicklung besonderen Wert gelegt, da sich erfahrungsgemäß in der Praxis aufgrund der Zeit und Datenlage darauf beschränkt wird.

Die zweite Untersuchungsstufe beinhaltet eine rechnerische Untersuchung der Brücke mit einem einfachen linearen Rechenmodell des Gesamtsystems nach dem multimodalen Antwortspektrenverfahren. Dieses ist beim Eurocode 8 das eigentliche Standardverfahren und berücksichtigt im Gegensatz zu vereinfachten Verfahren auch höhere Eigenschwingungsformen. Dieses Verfahren ist aufgrund der Einzigartigkeit und dem meistens vorhandenen komplexen Schwingungsverhalten bei Brücken angebracht. Konstruktive Details werden in dem Modell hierbei noch nicht erfasst. Die erforderlichen Spektren sollten hierbei in Abhängigkeit der geografischen Lage wahlweise nach DIN 4149 oder Eurocode 8 ermittelt werden. Das entwickelte Bewertungssystem unterstützt den Anwender hierbei durch eine automatische Generierung von Antwortspektren und synthetischen Zeitverläufen. Die notwendigen Eingabeparameter für das Rechenmodell sind von dem Benutzer in Abhängigkeit vom Brückentyp in das System einzugeben. Im Anschluss wird daraus mittels bereitgestellter brückentypabhängiger Schablonen weitgehend automatisch ein Rechenmodell generiert. Um den Zeitaufwand zu minimieren, liest das System die notwendigen Geometrie-, Material- und Querschnittsparameter so weit wie möglich direkt aus der bundesweit eingesetzten Bauwerksdatenbank SIB-Bauwerke (BAST, 2005) aus, so dass der Eingabeaufwand für den Benutzer gering ist. Die fehlenden Daten sind durch eine Sichtung und detaillierte Auswertung aller vorhandenen Planungsunterlagen der Brücke zu ermitteln. Eine zusätzliche Brückenbegehung kann nicht-vorhandene Unterlagen ersetzen. Das Ergebnis der zweiten Untersuchungsstufe ist die Überprüfung der Erdbebensicherheit auf Grundlage der berechneten Schnittgrößen und Verformungen. Diese Untersuchungsstufe ist in der Regel ausreichend, um eine zuverlässige Aussage über die Standsicherheit der Brücke im Erdbebenfall machen zu können.

Die dritte Untersuchungsstufe beinhaltet eine ausführliche Auswertung aller Brückenunterlagen, eine Brückeninspektion mit Schwingungsmessung und eine detaillierte dreidimensionale Zeitverlaufsrechnung unter Berücksichtigung physikalisch und geometrisch nichtlinearer Effekte. Um mögliche Versagensmechanismen und Schwachstellen zu ermitteln, muss das Rechenmodell alle kritischen Stellen und konstruktiven Details beinhalten, die in den vorhergehenden Untersuchungsstufen identifiziert wurden. Die Zeitverlaufsrechnung des Modells erfolgt in dieser Untersuchungsstufe mit synthetischen Beschleunigungszeitverläufen, die aus den Antwortspektren der zweiten Stufe generiert wurden. Alternativ können auch eventuell vorhandene aufgezeichnete Beschleunigungszeitverläufe verwendet werden. Eine automatische Erzeugung eines Computermodells ist in dieser Stufe nicht möglich, da alle individuellen Merkmale der untersuchten Brücke abgebildet werden sollten. Obwohl die Berechnungszeit beträchtlich verlängert wird, bietet dieser Ansatz die Möglichkeit detaillierte Ergebnisse zu erhalten und lokale Effekte zu analysieren. Folglich ist aus wirtschaftlichen Gründen eine Untersuchung in der dritten Stufe auf kritische Brückenbauwerke beschränkt, deren Erdbebensicherheit ohne Ausnutzung nichtlinearer Reserven nicht nachgewiesen werden kann.

Im Rahmen der dritten Untersuchungsstufe sind Schwingungsmessungen vorgesehen, um eine Überprüfung und Kalibrierung des numerischen Modells vorzunehmen. Der für die Systemidentifikation und das Model-Updating benutzte Algorithmus ist Bestandteil der Implementierungen zur automatischen Durchführung der Untersuchungsstufen.

Die Boden-Bauwerk Interaktion wird in der zweiten und dritten Untersuchungsstufe näherungsweise über Ersatzsysteme berücksichtigt. Die Interaktion ist insbesondere im Falle kurzer Pfeiler und bei Vorhandensein von weichen Sedimentschichten in

Ufernähe nicht vernachlässigbar. Wenn die notwendigen Ressourcen vorhanden sind, kann die Boden-Bauwerk Interaktion in der dritten Untersuchungsstufe mit einem Ansatz nach der Randelementmethode (Renault, 2005) genauer abgebildet werden.

Die Beurteilung der Erdbebensicherheit einer Brücke wird durch das beschriebene dreistufige Untersuchungskonzept problemorientiert mit dem Ziel einer Aufwand- und Kostenminimierung durchgeführt. Das entwickelte Bewertungssystem soll hierbei den Benutzer bei der Wahl der erforderlichen Untersuchungsebene durch ein systematisches Vorgehen unterstützen. Die aufgenommenen Daten und Ergebnisse werden auf einem zentralen Datenbankserver abgelegt, so dass auch zukünftige Einflüsse wie lebensdauerbedingte Schädigungen oder Sanierungsmaßnahmen nachträglich berücksichtigt werden können. Durch den modularen Aufbau des Bewertungssystems ist gewährleistet, dass der Benutzer in der Lage ist, neue Brückenklassen zu definieren und zusätzliche Analysemethoden für die neu geschaffenen Brückenklassen in einfacher Weise zu integrieren.

3. ANWENDUGNSBEISPIEL

Die praktische Anwendung des Beurteilungskonzeptes wird zuerst am Beispiel einer der bekanntesten Hängebrücken demonstriert. Die Rodenkirchener Brücke in Köln wurde aufgrund ihrer besonderen Bauweise ausgewählt, die sie weltweit einzigartig macht. Sie besitzt drei Haupttraggabel und einen nachträglich eingebauten zweiten Überbau. Obwohl diese Brücke aufgrund ihrer Komplexität und besonderen Bauweise nicht in das Schema der ersten und zweiten Untersuchungsstufe passt, soll hier dennoch gezeigt werden, dass das Verfahren auch für derartige Sonderbauwerke zufriedenstellende Ergebnisse liefert, die durch die individuelle Analyse in der dritten Untersuchungsstufe bestätigt werden. Da der seismische Nachweis von Hängebrücken weder im Eurocode 8 noch in der überarbeiteten DIN 4149 geregelt wird, wurden für die durchgeführten Untersuchungen nur die Einwirkungsdefinitionen aus diesen Normen übernommen.

3.1 BAUWERKSBESCHREIBUNG

Die Rheinbrücke Rodenkirchen in Köln (Abbildung 4) ist Bestandteil der Autobahn A4 von Aachen nach Görlitz. Die Brücke hat eine Gesamtlänge von 567 m, und die Länge der Hauptöffnung beträgt 378 m. Sie wurde im Jahre 1940 erbaut, 1945 zerstört und 1954 wiederaufgebaut. Im Jahre 1990 wurde die Brücke um eine zweite Fahrbahn erweitert. Die Gesamtbreite des Überbaus beträgt nun 52,8 m. Die Pylone haben eine Höhe von 59,7 m. Der Überbau ist jeweils durch 51 Hänger an die drei Hauptkabel gehängt. An den Widerlagern und an den Pylonen ist die Brücke über Pendellager aufgelagert. Der Hauptbaustoff der ursprünglichen Brücke ist S235, und die Verbreiterung erfolgte mit S355.



Abbildung 4: Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen

3.2 STANDORTGEFÄHRDUNG

Aufgrund der Lage der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen (mittlere Entfernung zum Kalker-Sprung-System, Beckenrand) wurde eine detaillierte Untersuchung der Standort-gefährdung in Kooperation mit der Abteilung Erdbebengeologie der Universität zu Köln durchgeführt.

Für die Berechnung der Standorteffekte der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen wurde der geologische Untergrund bis zu einer Tiefe von 1.200 m modelliert. Aufgrund der großen Erstreckung der Rodenkirchener Brücke war es notwendig, für die rechts- und linksrheinischen Stropfeiler und Widerlager unterschiedliche Bodenprofile zu verwenden. Das Resultat der Berechnungen der seismischen Antwort für Anregungen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von 10%, 5% und 2% in 50 Jahren waren entsprechende Bodenantwortspektren. Die Abbildung 5 zeigt als Beispiel die Bodenantwortspektren (Median aus 200 Berechnungen) der vier Bodenprofile für eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren und das zum Standort gehörige horizontale Normspektrum nach DIN 4149. Der Standort Rodenkirchen liegt in der geologischen Untergrundklasse T mit Baugrundklasse C und der Erdbebenzone 1. Für die Brücke wurde die höchste Bedeutungskategorie angenommen. Die Spektren des Standortes Rodenkirchen für eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren liegen aufgrund der großen Sedimentmächtigkeit und der damit verbundenen hohen Dämpfung der Bodenbewegung durch die Lockersedimente unter den zugehörigen Spektren der DIN 4149. Ebenfalls wurde ein „worst case“-Szenario untersucht. Als Quelle für das „worst case“-Szenario wurde die südliche Fortsetzung des Kalker Sprungs für den Standort Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen verwendet. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass im ungünstigsten Fall die gesamte zur Verfügung stehende Störungsfläche gleich der Herdfläche der Modellbeben ist. Es ergibt sich somit für die südliche Fortsetzung des Kalker Sprungs ein Modellbeben mit einer Magnitude (M_w) von 7.0 in einer Entfernung von ca. 1,3 km zum Standort. Aus den Antwortspektren wurden anschließend für die dritte Untersuchungsstufe synthetische Beschleunigungszeitverläufe generiert.

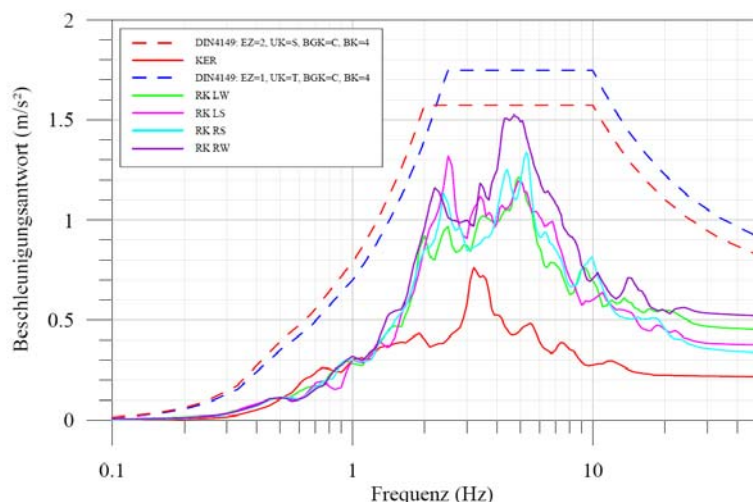


Abbildung 5: Antwortspektren (Median) für eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren und die Spektren der DIN 4149 für die Standorte Kerpen (KER) und Rodenkirchen (links Widerlager (RK LW), linker Stropfeiler (RK LS), rechter Stropfeiler (RK RS) und rechtes Widerlager (RK RW), EZ=Erdbebenzone, UK=Untergrundklasse, BGK=Baugrundklasse, BK=Bedeutungskategorie)

3.3 ERGEBNISSE IN UNTERSUCHUNGSSTUFE I

In der ersten Untersuchungsstufe wurde anhand der vorliegenden Angaben die Fragilitätskurve für Hängebrücken ausgewertet. Zusätzlich wurde das Bewertungssystem auf die Brücke angewandt, um das Ergebnis aus den Fragilitätskurven zu bestätigen. Die Auswertung der Fragilitätskurven für die Hängebrücke (Abbildung 6) ergab, dass auch für die höchste Spektralbeschleunigung ($S_a = 0,84 \text{ m/s}^2$) für Beben mit einer Wiederkehrperiode von 2475 Jahren mit keinen größeren Schäden zu rechnen ist (99% Wahrscheinlichkeit für keinen Schaden). Für eine Auswertung der Fragilitätskurven mit der nach DIN 4149 anzusetzenden Spektralbeschleunigung für den Standort Rodenkirchen ist ein Wert von $S_a = 0,65 \text{ m/s}^2$ anzusetzen.

Das Bewertungssystem lieferte für die Rodenkirchener Brücke einen Prioritätsindex von $P = 0,51$ (mittlere Priorität bei $P = 0 - 1$). Dieser Index ist auf die Lage in der Erdbebenzone 1 und die Anfälligkeit der Widerlager zurückzuführen. Der Bedeutungsbeiwert wurde mit Hilfe des Bewertungssystems zu $I = 0,71$ ermittelt, was einer hohen Bedeutung nach Eurocode 8 - Teil 2 entspricht ($\gamma_I = 1,3$).

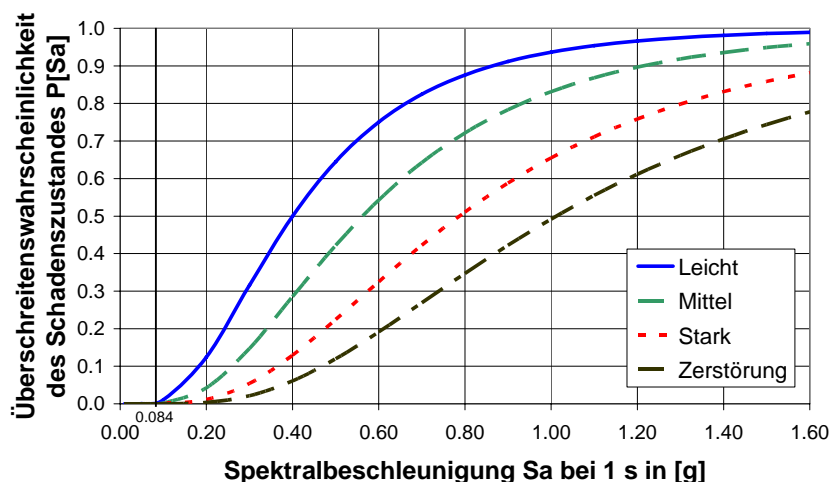


Abbildung 6: Fragilitätskurven für die Rodenkirchener Brücke

3.4 ERGEBNISSE IN UNTERSUCHUNGSSTUFE II

In der zweiten Stufe erfolgten die Untersuchungen unter Ansatz der links- und rechtsrheinischen Antwortspektren für die drei angegebenen Wiederkehrperioden. Die errechneten Beanspruchungsgrößen wurden mit den im Bewertungssystem definierten Schädigungsindikatoren bewertet. Tabelle 1 fasst exemplarisch die Ergebnisse der durchgeführten Vergleichsrechnungen für eine Wiederkehrperiode von 2475 Jahren zusammen. Zum einen sind die Schädigungsindikatoren für eine in allen Fußpunkten synchronen Anregung (SPRS) und eine für die vier Fußpunkte unterschiedlichen Anregung (MPRS) einander gegenübergestellt, zum anderen wird der Einfluss der Boden-Bauwerk Interaktion aufgezeigt.

Der Vergleich zwischen einfacher und multipler Anregung mit standortspezifischen Spektren zeigt, dass die Verschiebungen an den Auflagern infolge einer unkorrelierten Anregung geringer sind. Dagegen sind die kraftabhängigen Indikatoren bei einer unkorrelierten Fußpunktanregung deutlich höher.

Eine Idealisierung durch Einspannung der Brückenpfeiler berücksichtigt nicht die Nachgiebigkeit des Bodens. Aufgrund der Vernachlässigung der Boden-Bauwerk Interaktion (BBI) werden relative Verschiebungen und Verdrehungen zwischen Fundament und Boden nicht mit einbezogen. Durch die Abbildung des Bodens wird eine realistischere Darstellung der Gründungseigenschaften der Brücke erreicht. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, werden unter Berücksichtigung der BBI die Verschiebungen im System um bis zu 8% größer. Die Indikatoren für die Spannungen und die Stabilität der Pylone in Höhe der Fahrbahn sind ebenfalls unter Berücksichtigung der BBI erhöht. Aufgrund dieser Ergebnisse zeigt sich, dass auf eine Berücksichtigung der Boden-Bauwerk Interaktion bei dieser Brücke nicht verzichtet werden kann.

Tabelle 1: Vergleich zwischen SPRS-/MPRS-Analyse aus standortspezifischen Spektren mit einer Wiederkehrperiode von 2475 Jahren und Berechnung mit und ohne Boden-Bauwerk Interaktion

Indikator	SPRS	MPRS	MPRS/SPRS	ohne BBI	mit BBI	mit BBI/ ohne BBI
$I_{Tü}$	0,108	0,101	0,942	0,101	0,102	1,002
I_T	0,242	0,232	0,959	0,232	0,232	1,002
$I_{A.Widerl.}$	0,150	0,067	0,444	0,067	0,070	1,050
$I_{A.Pylon}$	0,275	0,125	0,455	0,125	0,135	1,080
I_{Vh}	0,034	0,015	0,455	0,015	0,016	1,080
I_{Vv}	0,460	0,686	1,490	0,686	0,715	1,042
I_{IT}	0,242	0,232	0,959	0,232	0,232	1,002
$I_{L.Widerl.}$	0,147	0,174	1,183	0,174	0,176	1,010
$I_{L.Pylon}$	0,352	0,372	1,057	0,372	0,373	1,001
$I_{L.va.Widerl.}$	0,162	0,192	1,183	0,192	0,194	1,010
$I_{L.va.Pylon}$	0,319	0,337	1,057	0,337	0,337	1,001
I_{Pc}	0,694	0,734	1,057	0,734	0,754	1,027
I_{Ps}	0,578	0,621	1,074	0,621	0,641	1,032
$I_{Pq,y}$	0,004	0,005	1,255	0,005	0,003	0,639
$I_{Pq,x}$	0,127	0,153	1,204	0,153	0,163	1,067
$I_{Seilspan.}$	0,642	0,642	1,000	0,642	0,641	0,998

Exemplarisch sind die Schadensindikatoren für die vertikale Verschiebung der Überbaumitte (I_V), einen Anprall des Brückenüberbaus an die Widerlager/Pylone (I_A) (Dehnfugenbreite: 40 cm) und einen Trägerabsturz (I_T) dargestellt (Abbildung 7). Des Weiteren sind die Indikatoren für ein Pylonversagen (I_{Pc} , I_{Ps}) und die Überprüfungen der Pylonspannungen ($I_{P\cdot}$) am Pylonfuß und auf Höhe des Anschlusses an die Fahrbahnplatte dargestellt. Die Ergebnisse für die untersuchten Indikatoren blieben für alle Wiederkehrperioden deutlich unter den zulässigen Grenzwerten. Lediglich für das „worst case“ Szenario überschreitet die Durchbiegung der Fahrbahnplatte (I_{Vv}) den empfohlenen Grenzwert. Auch der etwas schwächer ausgeführte neuere Pylon hat sich als standsicher erwiesen.

Eine ausführliche Beschreibung aller Schadensindikatoren und die Berechnungsalgorithmem zu ihrer Bestimmung ist in Renault (2007) zu finden.

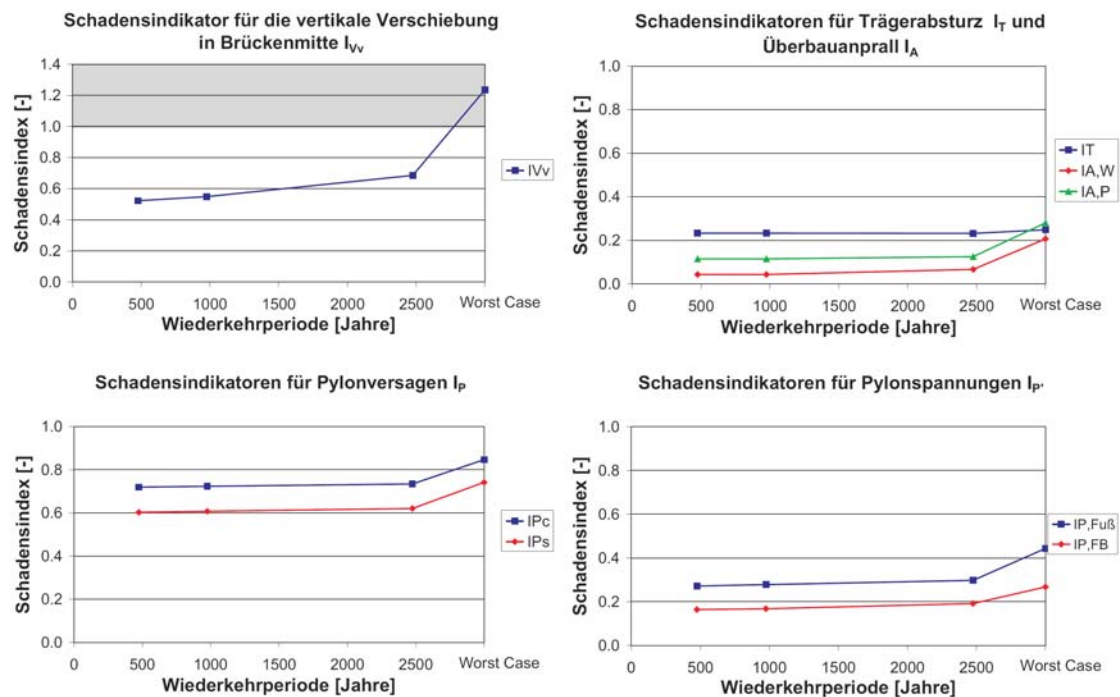


Abbildung 7: Ergebnisse in der Untersuchungsstufe II

3.5 ERGEBNISSE IN UNTERSUCHUNGSSTUFE III

Obwohl es nach Durchführung der Stufe II keine gravierenden Hinweise auf eine Erdbebengefährdung der Rodenkirchener Brücke gab, wurde eine ausführliche Analyse in der dritten Stufe angesetzt. Dies geschah zum einen zu Demonstrationszwecken für außergewöhnliche Bauwerke und zum Anderen, weil das Tragverhalten von Hängebrücken wie auch Schrägseilbrücken nur durch ein dreidimensionales Rechenmodell realitätsnah erfasst werden kann.

Mittels der für die dritte Untersuchungsstufe bestimmten standortspezifischen Beschleunigungszeitverläufe wurden je Konfiguration drei nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt. Die Auswertung der einzelnen Schadensindikatoren bestätigt die Aussage aus der zweiten Untersuchungsstufe, dass die Rodenkirchener Brücke für die untersuchten Wiederkehrperioden standsicher ist. In Abbildung 8 sind zum Vergleich mit der zweiten Untersuchungsstufe die korrespondierenden Schädigungsindikatoren aus der dritten Untersuchungsstufe dargestellt. Auch wenn sich die Werte tendenziell vergrößert haben, so liegen sie dennoch im unkritischen Bereich.

Lediglich die Auswertung des Indikators für ein Pylonversagen (I_{pc}) des alten Pylons der Reihe B überschreitet den zulässigen Grenzwerten für das sehr unwahrscheinliche „worst case“ Szenario. Dies ist dadurch begründet, dass der mittlere Pylon infolge der Lasten aus beiden Fahrbahnen fast doppelt so hoch belastet ist wie die beiden äußeren Pylone.

Aufgrund der verschmierten Abbildung der drei Pylone war dieses Verhalten in der zweiten Untersuchungsstufe nicht ersichtlich, da dort keine diskrete Abbildung der einzelnen Pylone stattgefunden hat.

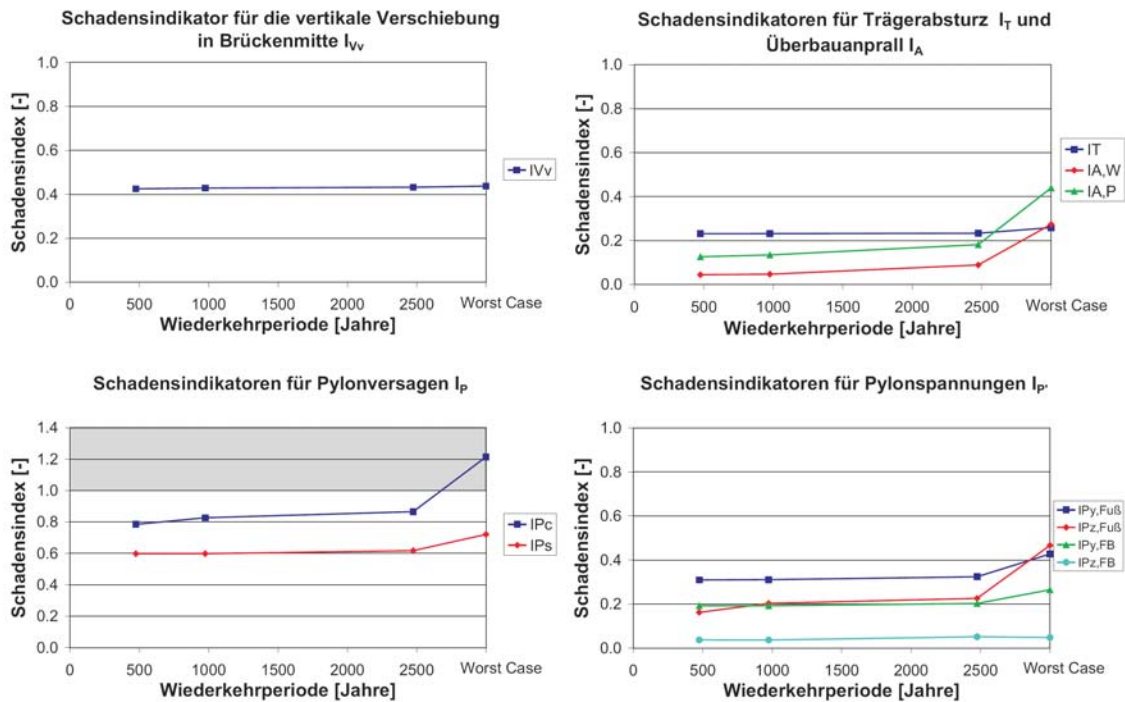


Abbildung 8: Ergebnisse in der Untersuchungsstufe III

3.6 ABSCHLIEßENDE BEURTEILUNG

Die Untersuchung der Rodenkirchener Autobahnbrücke hat gezeigt, dass die Brücke auch bei einem stärkeren Beben nicht schadensanfällig ist. Dies ist u.a. dadurch zu begründen, dass Hängebrücken sich wie Pendel im Erdbebenfall verhalten und sich somit der Erdbebenbelastung entziehen. Des Weiteren begünstigen die relativ weichen und filigranen Überbaukonstruktionen größere Verformungswege, die durch die Verbindungsmittel abgefangen werden müssen. Abschließend ist anzumerken, dass das Verfahren der ersten Stufe sowie das ebene Rechenmodell trotz der Vereinfachungen gute Ergebnisse geliefert haben, und diese durch die dritte Untersuchungsstufe bestätigt wurden.

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN

In diesem Beitrag wurde ein neu entwickeltes Untersuchungskonzept für bestehende Brückenbauwerke und die Integration des Konzeptes in ein Bewertungssystem mit Datenbankfunktion vorgestellt. Das vorgeschlagene Untersuchungskonzept basiert auf einem systematischen dreistufigen Verfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit und versetzt den Bauwerksbetreiber in die Lage einen Überblick über den Zustand der Brückenbauwerke im Erdbebenfall zu bekommen.

Des Weiteren lässt sich daraus die Notwendigkeit der Durchführung von Maßnahmen zur Bauwerkserhaltung und Nachrüstung ermitteln. Jeder mit der Bauwerkserhaltung betraute Ingenieur sollte mittels des entwickelten Bewertungssystems in der Lage sein, die Gefährdung und Erdbebensicherheit der Brückenbauwerke schnell abzuschätzen und langfristige Planungen für den

Erdbebenfall, unter Berücksichtigung der Dringlichkeit der Bearbeitung einzelner Bauwerke und der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, durchzuführen.

Bisherige Vulnerabilitätsbewertungsverfahren basieren auf Schnellbewertungsverfahren, die unzureichend sind, um darauf aufbauend Entscheidungen zu treffen. In einem Forschungsprojekt (Meskouris u.a., 2006) wurden daher bereits existierende Verfahren zur Schnellbewertung der seismischen Vulnerabilität miteinander verglichen und daraus ein umfassendes neues Bewertungssystem entwickelt. In Ergänzung zum vereinfachten Bewertungsverfahren wurden für die zweite und dritte Untersuchungsstufe Schädigungsindikatoren für Brücken unter Erdbebenbelastung entwickelt und für eine systematische Untersuchung mit Hilfe des Antwortspektrenverfahrens und transienten Analysen aufbereitet. Zur Durchführung der programmunterstützten Auswertung der Erdbebensicherheit werden durch das Bewertungssystem vorgefertigte Schablonen für alle definierten Brückenklassen zur Verfügung gestellt.

DANKSAGUNG

Diesem Beitrag liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 15.393/2003/FRB durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine beim Autor. Der Bundesanstalt für Straßenwesen wird für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts gedankt.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- BAST, 2003. Bundesanstalt für Straßenwesen: Heft V 101, Straßenverkehrszählung 2000: Ergebnisse. Wirtschaftsverlag NW – N. Lensing.
- BAST, 2005. Programmsystem SIB-Bauwerke, DV-Programm zur Erfassung, Speicherung und Auswertung von Bauwerksdaten nach Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten. Ingenieurbüro Wendebaum-Peter-Mosbach. URL <http://www.sib-bauwerke.bast.de>. Version: 1.7.
- DIN 4149-1, 1981. Norm, Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Beuth Verlag, Berlin.
- EC 8-2, 2004. Vornorm, Eurocode 8-2 Juni 2004. Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges. – Draft No 5 - pr Stage 51.
- Meskouris, K. ; Renault, P. ; Butenweg, C. ; Hinzen, K.-G. ; Weber, B., 2006. Gefährdungsabschätzung von Brücken in Deutschland unter Erdbebenbelastung / Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft 952, Abschlussbericht des Forschungsprojektes FE 15.0393/2003/FRB. Reihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik
- Metzler, H., 2004. Die Erhaltung von Brücken - eine umfassende strategische Aufgabe. In: Bauingenieur, 79, S. 329–335.
- Nielson, B., 2003. Bridge Seismic Fragility-Functionality Relationships: A Requirement for Loss Estimation in Mid-America / Georgia Institute of Technology.
- Renault, P. und Meskouris, K., 2005. A coupled BEM/FEM approach for the numerical simulation of bridge structures, im Tagungsband: EURODYN 2005, S. 1267-1272.
- Renault, P., 2007. Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Brückenbauwerken, Dissertation, RWTH Aachen – Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik.