

Das Verhalten von Straßenbrücken während des Chile-Erdbebens am 27. Februar 2010

T. Wenk, K. Beyer

S 2

1 Einleitung

Während des Erdbebens am 27. Februar 2010 mit einer Magnitude von $M_V = 8.8$ wurde in Chile neben Gebäuden auch die Infrastruktur sehr stark beschädigt. Eine der Hauptverkehrsadern in Chile ist die Nord-Süd-Autobahn Ruta N° 5. Sie führt über eine Strecke von 1'500 km von La Serena nach Puerto Montt und durchquert damit das gesamte Schadensgebiet des Erdbebens. Während der gemeinsamen französisch-schweizerischen Erkundungsmission der Association française du génie parasismique (AFPS) und der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGBE) wurde die vierspurige Autobahn zwischen der Hauptstadt Santiago und der 400 km südlich gelegenen Stadt

Chillán abgefahren (Bild 1) und die Schäden an den Autobahnbrücken sowie den Überführungen aufgenommen [Mar+10]. Die Erkundungsmission fand ungefähr fünf Wochen nach dem Erdbeben statt. Zu diesem Zeitpunkt war die Autobahn bereits wieder über die gesamte Strecke befahrbar. Heruntergestürzte Brückenträger von Überführungen waren entfernt worden. Fast alle Autobahnbrücken waren als Zwillingsbrücken mit unterschiedlichen Baudaten ausgeführt. In keinem Fall waren beide Zwillingsbrücken stark beschädigt oder eingestürzt und daher konnte zumindest eine befahren werden. Zusätzlich zu den Autobahnbrücken und Überführungen wurden weitere Straßenbrücken in Concepción besichtigt, die stark beschädigt waren. Im folgenden werden einige ausgewählte Brückenschäden beschrieben und die Auswirkungen der Konstruktionspraxis auf das Erdbebenverhalten diskutiert. Informationen zum Schadensgebiet, Schadensausmaß und dem Verhalten von Gebäuden mit Stahlbetontragwänden sind in [BW10] zusammengefasst.

Dr. sc. techn. Thomas Wenk

Gehrenholz 2h
CH-8055 Zürich

Prof. Dr. Katrin Beyer

Faculté de l'environnement naturel,
architectural et construit
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

2 Bodenbewegung

Leider war das Starkbebenetz in Chile zum Zeitpunkt des Erdbebens nur mit relativ wenigen Stationen ausgerüstet, von denen die meisten in und um Santiago aufgebaut waren. Aus der Gegend von Concepción, der Stadt mit den verhee-

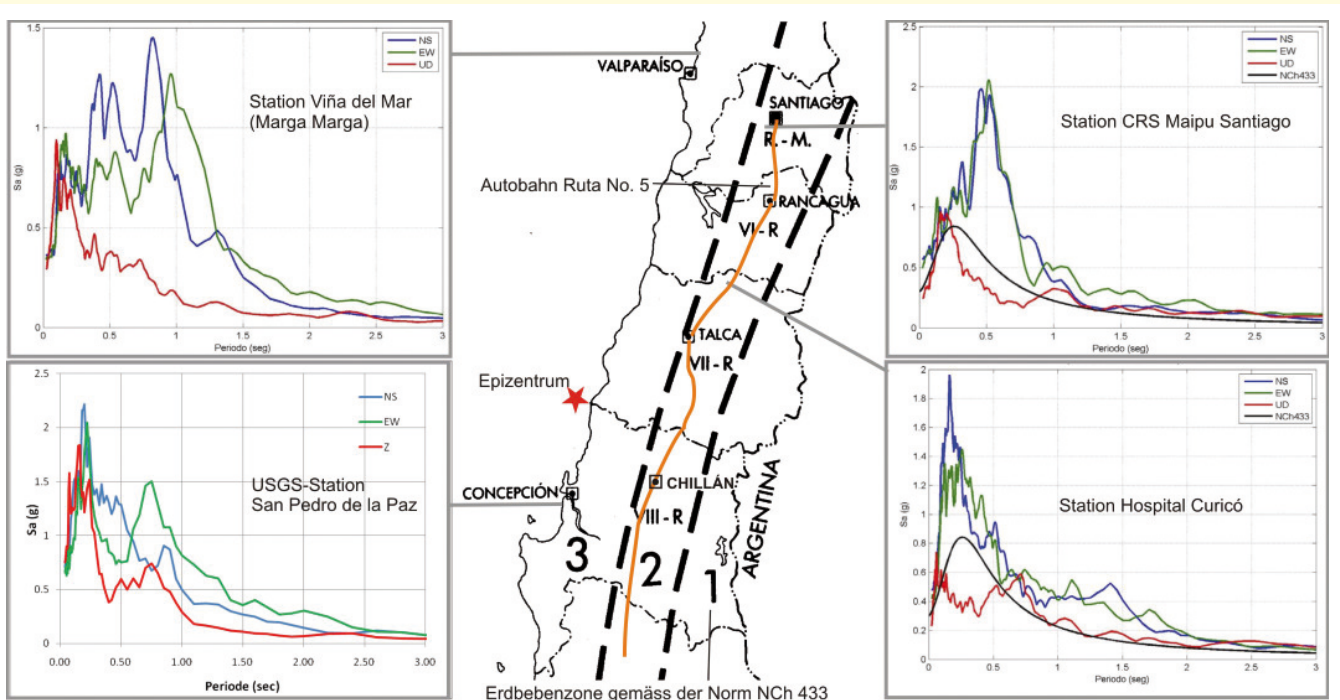


Bild 1. Verlauf der Autobahn Santiago – Chillán Ruta N° 5 in der chilenischen Erdbebenzonenkarte [NCh433-09] mit Antwortspektren der Beschleunigung bei 5% viskoser Dämpfung für die N-S-Komponente (blau), die E-W-Komponente (grün) und die Vertikalkomponente (rot) der Bodenbewegung [Bor+10, USGS10]. NB: Die Skalen der Spektren sind nicht einheitlich.

Tabelle 1. Maximalwerte der horizontalen Bodenbeschleunigung und der Spektralwerte der Beschleunigung und der Verschiebung für 5% viskose Dämpfung im Vergleich mit Bemessungswerten der entsprechenden Erdbebenzonen für die fünf in Bild 1 eingezeichneten Messstationen.

Messstation	Erdbebenzone	Bemessungswert der horizontalen Bodenbeschleunigung	max. horizontale Bodenbeschleunigung	max. Spektralwert der horizontalen Beschleunigung	maximaler Spektralwert der horiz. Verschiebung $T \leq 3$ s
Viña del Mar (Marga Marga)	3	0.4 g	0.35 g	1.4 g	21 cm
Santiago (CRS Maipu)	2	0.3 g	0.56 g	2.1 g	27 cm
Curicó (Hospital)	2	0.3 g	0.47 g	2.0 g	25 cm
Talca	2	0.3 g	0.48 g	1.8 g	26 cm
Concepción (USGS San Pedro de la Paz)	3	0.4 g	0.71 g	2.2 g	30 cm

rendsten Schäden, ist eine weitere Aufzeichnung veröffentlicht worden [USGS10]. Dies ist auch die einzige allgemein zugängliche Aufzeichnung, die bis heute digital vorliegt. In Bild 1 sind die Antwortspektren dieser Station und drei weiterer Messstationen aus [Bor+10] dargestellt, die sich im Bereich des untersuchten Autobahnabschnitts zwischen Santiago und Chillán befinden. Über diese vier Standorte betrachtet erreichten die maximalen Spektralwerte der horizontalen Beschleunigung für 5% viskose Dämpfung 2.2 g und die maximalen Spektralwerte der horizontalen Verschiebung 30 cm. Die maximale horizontale Bodenbeschleunigung betrug für die vier Stationen zwischen 0.35–0.71 g.

Die Autobahn Ruta N° 5 verläuft im Abschnitt Santiago–Chillán in der mittleren Erdbebenzone 2 der chilenischen Erdbebennorm mit einer horizontalen Bemessungsbodenbeschleunigung von 0.3 g [NCh435–09]. Die maximalen Spektralwerte der Beschleunigung und der Verschiebung für die drei verfügbaren Aufzeichnungen in Santiago, Talca und Curicó entlang dieses Autobahnabschnitts sowie für die Messstationen Viña del Mar und Concepción in der benachbarten Erdbebenzone 3 sind in **Tabelle 1** zusammengefasst [BSL10]. Die gemessenen maximalen Bodenbeschleunigungen der drei Stationen in der Erdbebenzone 2 sind ungefähr 50–100% größer als die Bemessungsbodenbeschleunigung von 0.3 g. Die maximalen Spektralwerte der horizontalen Verschiebung erreichen knapp 30 cm.

3 Typische Schadensbilder

Im Folgenden werden die Schadensbilder von zehn Straßenbrücken beschrieben. Darunter befinden sich eine Natursteinbogenbrücke, eine Balkenbrücken und fünf Überführungen auf dem Autobahnabschnitt Santiago–Chillán (Bild 1). Die restlichen drei Brücken sind längere Balkenbrücken über den Fluss Biobío in Concepción. Beschreibungen weiterer beschädigter Brücken finden sich in den Erkundungsberichten [Abr+10], [EERI10], [Eln+10], [HSV10] und [Yas+10].

3.1 Bogenbrücke

Der spektakulärste Brückeneinsturz entlang der panamerikanischen Autobahn (Ruta N° 5) betrifft die 118 m lange Bogenbrücke aus Natursteinmauerwerk über den Rio Claro, welche sich 220 km südlich von Santiago befindet [STR10] (**Bild 2a**). Alle sieben Bögen mit Spannweiten von je 17 m sind eingestürzt (**Bild 2b**), doch blieb der mittlere 23 m hohe Pfeiler samt einem Stück der Fahrbahnplatte stehen. Die Stahlbetonplatte der Fahrbahn wirkte als Zugband über den verbliebenen Bogenbereichen. Im unteren Bereich des Nachbarpfeilers sind die für zyklische Erdbebenbeanspruchung typischen X-förmigen Schubrisse in der Längsseite (**Bild 3a**) und der Querseite (**Bild 3b**) zu erkennen. Die Schubrisse folgen mehr oder weniger treppenförmig den Mörtelfugen zwischen den Steinen.

Die Brücke wurde 1870 eröffnet und war ein Baudenkmal in Chile. Sie wurde nachträglich mit einer auf beiden Seiten auskragenden Fahrbahnplatte aus Stahlbeton verbreitert



Bild 2. Eingestürzte 7-feldrige Bogenbrücke aus Natursteinmauerwerk über den Rio Claro: Ansicht vor (a) und nach (b) dem Erdbeben.



Bild 3. Eingestürzte 7-feldrige Bogenbrücke aus Natursteinmauerwerk über den Rio Claro: X-förmige Schubrisse in der unteren Längs- und Querseite eines stehengebliebenen Pfeilers (a und b) und Überreste eines Bogens mit nachträglich aufbetonierter Stahlbetonplatte zur Verbreiterung der Fahrbahn (c).

(Bild 3c) und diente vor dem Erdbeben den beiden südwärts führenden Fahrspuren. Im Hintergrund von Bild 2b ist eine neuere Stahlbeton-Bogenbrücke mit den beiden Fahrspuren für die Gegenrichtung zu erkennen, die nur geringfügige Schäden erlitten hat. Bis zur Eröffnung einer Stahlfachwerk-Hilfsbrücke im Januar 2011 als provisorischen Ersatz für die eingestürzte Naturstein-Bogenbrücke wurde die Stahlbeton-Bogenbrücke im Gegenverkehr genutzt.

3.2 Balkenbrücken

Mehrfeldrige Balkenbrücken bestehen in Chile oft aus einer Folge von einfachen Balken mit Fugen auf jeder Zwischenstütze. Dieser Brückentyp weist eine besondere Erdbebenverletzbarkeit bezüglich Trägerabsturz bei ungenügender Länge der Auflagerbank auf. Bild 4 zeigt das typische Schadensbild des Trägerabsturzes bei der alten Brücke „Puente viejo“ über den Fluss Biobío in der Stadt Concepción. Es handelt sich um eine Stahl-Beton-Verbundbrücke von 1400 m Länge mit Einzelspannweiten von etwa 15 m. Im mittleren Teil der Brücke sind über 30 Träger abgestürzt, Bild 4b zeigt vier davon. Die Brücke war bereits beim $M_w = 9.6$ Chile-Erdbeben von 1960 eingestürzt und dann repariert worden [SF65]. Trotz der Reparatur ist sie seit 2003 für jeglichen Verkehr gesperrt. Ausschlaggebend für die Schließung der Brücke waren Bedenken bezüglich ihrer Sicherheit unter Verkehrslasten und nicht bei Erdbeben [Vil+11].

Auch bei der neuen vierspurigen Autobahnbrücke „Puente Llacolén“, die 1 km flussabwärts vom „Puente viejo“ den Biobío mit einer Länge von über 2 km überquert, stürzte das erste Feld auf der Seite Concepción ab (Bild 5a). Die Brücke besteht aus vorfabrizierten Doppel-T-Spannbetonträgern mit einer Fahrbahnplatte aus Ortsbeton. Die Regelspannweite beträgt 38 m mit einer Fuge auf jeder Zwischenstütze. Bei der vom Absturz betroffenen Pfeilerachse münden Rampenbrücken von beiden Seiten in die Hauptbrücke, so dass sich relativ komplizierte Erdbebenbeanspruchungen ergeben haben müssen (Bild 5). Risse im Boden, primär in den Pfeilerachsen und parallel zum Fluss verlaufend, deuten auf starke Längsschwingungen der Brücke hin sowie möglicherweise auf Spreizbruch des Baugrunds infolge Bodenverflüssigung („Lateral Spreading“, Bild 5b). Da auch die einzige Alternativroute über den Fluss Biobío in Concepción, die Brücke „Juan Pablo II“, nach dem Erdbeben unpassierbar war, legte das Militär in wenigen Tagen zwei Stahlfachwerk-Hilfsbrücken vom Typ „Mecano“ über das eingestürzte Feld, so dass wieder in beiden Richtungen je eine Fahrspur mit reduzierter Geschwindigkeit zur Verfügung stand (Bild 5a).

Bei der dritten Brücke über den Fluss Biobío in Concepción, der Brücke „Juan Pablo II“, versagten drei Pfeilerreihen im Uferbereich auf der Seite Concepción auf Schub in Brückenlängsrichtung (Bild 6). Es handelt sich ebenfalls um eine vierspurige Autobahnbrücke mit einer Länge von 2.3 km be-

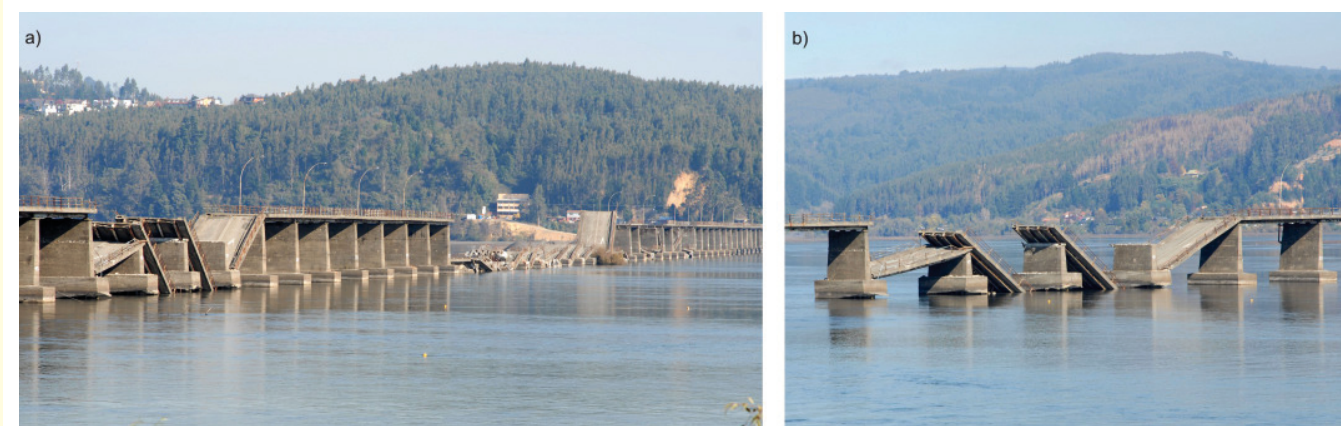


Bild 4. Trägerabsturz bei der älteren Stahl-Beton-Verbundbrücke „Puente viejo“ über den Fluss Biobío in Concepción: Ansicht (a) und vier abgestürzte Träger im mittleren Bereich (b).



Bild 5. Trägerabsturz bei der neuen vierspurigen Autobahnbrücke „Puente Llacolén“ über den Fluss Biobío in Concepción: Stahlfachwerk-Hilfsbrücke über das abgestürzte Feld (a), landseitige Stütze mit Rissen im Baugrund (b), flussseitige Stütze (c).



Bild 6. Stützenversagen bei der Brücke „Juan Pablo II“ über den Fluss Biobío in Concepción: Ansicht der Brücke mit den Stützen mit Schubbruch beim Ufer links (a), Detailansicht der Stütze mit Schubbruch (b und c).

stehend aus vorfabrizierten Doppel-T-Spannbetonträgern mit einer Fahrbahnplatte aus Ortsbeton. Die Regelspannweite beträgt etwa 30 m mit einer Fuge auf jeder Zwischenstütze. Die um 45°-geneigte Schubbruchfläche auf der Längsseite der Pfeiler passieren praktisch nur Längsstäbe der Bewehrung, eine eigentliche Schubbewehrung ist nicht zu erkennen und insbesondere auch nicht eine Umschnürungsbewehrung, die für duktiles Stahlbetonverhalten erforderlich wäre (Bild 6c). Auf Schub versagt haben die wesentlich niedrigeren Stützen im Vorland und nicht die höheren Stützen im Fluss. Dies war zu erwarten, da kurze Stützen steifer sind und ein kleineres Verformungsvermögen haben als lange Stützen. Aus diesem Grund ziehen sie größere Schubkräfte an und daher kann es zum schubkritischen Kurzen-Stützen-Versagen („short column effect“) kommen, wenn die kurze Stütze nicht entsprechend bemessen wurde. Von geotechnischer Seite wird das Stützenversagen primär dem Spreizbruch des Baugrunds im Uferbereich in Richtung Fluss zugeschrieben, welches durch Bodenverflüssigung in tieferen Schichten verursacht wurde [Vil+11]. Die Schubbruchflächen verlaufen gegen das Land schräg nach unten, so dass sie effektiv durch eine Uferbewegung in Richtung Fluss mit entsprechendem Druck auf den unteren Stützentheil hervorgerufen worden sein könnten (Bild 6b).

Bei der Autobahnbrücke „Puente Perquilauquén“ 350 km südlich von Santiago auf der Ruta N° 5 verschob sich die jün-

gere der Zwillingsbrücken um gut 30 cm in Querrichtung zur älteren, parallel verlaufenden Brücke (Bild 7a). Die Querverschiebung ist gut sichtbar im Versatz des Geländers und der Sicherheitslinie bei der Dilatationsfuge (Bild 7b). Ebenfalls wurde ein vertikaler Versatz von bis zu 10 cm beobachtet. Bei der jüngeren Brücke handelt es sich um eine 12-feldrige Balkenbrücke aus vorfabrizierten Spannbetonträgern mit einer Regelspannweite von 45 m und Fugen auf jeder Zwischenstütze. Die ältere Brücke weist einen Doppelhohlkastenquerschnitt auf und wurde jeweils monolithisch über vier Felder verlaufend in Ortsbeton erstellt. Ein Blick unter die Brückenträger der jüngeren Brücke zeigt, dass sich die Längsträger quer verschoben haben und teilweise von den Gummilagern gefallen sind (Bild 8a), welche unverankert im Mörtelbett lagen. Die dünnen, schwach bewehrten, seitlichen Puffer, die eine Querverschiebung verhindern sollten, wurden von den Randträgern weggeschlagen. Ein Gummilager mit den Abmessungen 40 cm x 40 cm x 10 cm ist auf den Boden gefallen (Bild 8b). Anstelle von Horizontalkraftlagern ist eine Absturzsicherung der Träger vorgesehen, nämlich für die Querrichtung durch die seitlichen Puffer und für die Längsrichtung durch eine breite Auflagerbank. Da die ältere Zwillingsbrücke praktisch keine Schäden aufwies, konnte der Verkehr in beiden Richtungen über diese geführt werden, bis die jüngere Zwillingsbrücke repariert war.



Bild 7. Querverschiebung der Autobahnbrücke „Puente Perquilauquéu“: Ansicht (a), Querversatz des Geländers und der Sicherheitslinie bei der Dilatationsfuge (b).



Bild 8. Querverschiebung der Autobahnbrücke „Puente Perquilauquéu“: Die Randträger rechts haben den seitlichen Puffer weggeschlagen und sind vom Gummilager auf das Stützenjoch gefallen (a). Ein Gummilager ist auf den Boden gefallen (b, rot umrahmt).

3.3 Überführungen

Auf dem Abschnitt Santiago-Chillán der vierspurigen Nord-Süd-Autobahn befinden sich etwa 40 Straßenüberführungen ähnlichen Bautyps, die von unbeschädigt bis zum Total-Einsturz praktisch alle Schädigungsgrade aufwiesen. Es handelt sich um zweifeldrige Balkenbrücken aus vorfabrizierten Doppel-T-Spannbetonträgern mit einer Fahrbahnplatte aus Ortsbeton. Jeder Spannbetonträger liegt auf einem der zwei Widerlager sowie einer Stütze auf dem Mittelstreifen auf (Bild 9a). Die Spannweiten der einfachen Balken liegen zwischen 20 m und 27 m. Jede Spannweite ist als einfacher Balken mit einer Zwischenfuge über der Stütze auf dem Mittelstreifen ausgebildet. Die Spannbetonträger sind auf unverankerten, dünnen Gummilagern gelagert. Die beiden Widerlager und vermutlich auch die Mittelstütze sind auf Pfählen fundiert.

Bild 9 zeigt als Beispiel für kleinere Schäden eine Überführung bei Talca mit Rissen und Abplatzungen in den Fugen sowie bei den seitlichen Puffern („Ohren“), die exzessive Querverschiebungen vermeiden sollen. Der aufgeschüttete Straßendamm setzte sich um die Widerlager bis zu 1 m. Die vermörtelte Deckschicht brach auf und fiel auf den Stand-

streifen hinunter (Bild 9b). Im Übergangsbereich zwischen Widerlager und Straßendamm zeigte ein neuer Schwarzbelag, dass die Setzungen der Fahrbahn bereits repariert wurden.

Bild 10 zeigt eine Überführung mit mittleren Schäden in Chillán, die erst kurz vor dem Erdbeben neu eröffnet worden war. Die Randträger wären beinahe abgestürzt. Sie wurden mit Hilfsstützen vor der Widerlagerwand gestützt (Bild 10a). Die Träger der schief gelagerten Brücke verdrehten sich leicht um die vertikale Achse mit der Folge, dass der Randträger in der spitzen Ecke die größte horizontale Verschiebung erfuhr (Bild 11). Da das Gummilager nicht verankert war, verrutschte es während des Erdbebens. Infolgedessen liegt der Randträger in Bild 11c auf der Seite des Widerlagers exzentrisch auf dem Mörtelbett auf. Die Stangen in Bild 11a waren ursprünglich senkrecht und sind Festhaltevorrichtungen in vertikaler Richtung (Holding-Down Devices) zur Aufnahme negativer Auflagerreaktionen infolge Erdbeben. Sie bestehen aus einem Bewehrungsstab, der durch ein Stahlrohr geschützt wird, und sowohl in das Widerlager wie auch die Ortsbetondecke über den Spannbetonträgern einbetoniert ist. Der Bewehrungsstab mit Durchmesser 22 mm



Bild 9. Überführung bei Talca mit kleineren Schäden (a). Setzungen des Strassendamms von ca. 50 cm (b) um das Widerlager links in Bild (a).



Bild 10. Schief gelagerte Überführung bei Chillán mit mittleren Schäden (a), Risse im aufgeschütteten Strassendamm mit der Überführung im Hintergrund (b).



Bild 11. Widerlagerbank der Überführung aus Bild 10. Festhaltevorrückungen zur Aufnahme negativer Auflagerreaktionen (a) bestehend aus je einem Bewehrungsstab geschützt durch ein Stahlrohr (b). Der beinahe abgestürzte Randträger liegt exzentrisch auf dem Mörtelbett des heruntergefallenen Gummilagers auf (c).



Bild 12. Überführung bei Chada mit schweren Schäden (a), Aufwölbung zweier Gehsteigplatten infolge starker Bodenbewegung direkt neben der Überführung (b).



Bild 13. Widerlager der Überführung aus Bild 12. Der Randträger erlitt schwere Schäden im Unterflansch und im Steg beim Anprall an den seitlichen Puffer, der beschädigt stehen blieb (a). Die Träger sind quer von den Lagern gefallen und die Stangen der vertikalen Festhaltevorrückung stehen schräg (b).

ist in Bild 11b am unteren Rand des Stahlrohrs zu erkennen. Zwischen den Trägern sind jeweils zwei Stangen angeordnet; dies entspricht auch der Anordnung bei der Autobahnbrücke in Bild 8a. Diese ursprünglich vertikalen Stangen haben die Querbewegung, denen die Träger unterworfen waren, mitgemacht, ohne zu versagen. Es fehlten jedoch wirkungsvolle seitliche Puffer, um die Querbewegung der Träger zu verhindern oder zu beschränken. Die vorhandenen Puffer waren zu weit von der ursprünglichen Lage der Träger entfernt und außerdem zu schwach. Im aufgeschütteten Straßendamm sind breite, primär längs verlaufende Risse entstanden (Bild 10b).

Bei der Überführung in Chada erlitten die Randträger schwere Schäden im Unterflansch und im Steg beim Anprall an die seitlichen Puffer (Bild 12a und 13). Die Puffer wurden ebenfalls stark beschädigt, doch hielten sie stand. Die Schäden im Randträger sind auf den fehlenden Endquerträger zurückzuführen, der den Randträger beim Anprall des Unterflansches an den Puffer stabilisiert hätte (Bild 13b). Der Randträger erfuhr durch den Anprall eine starke Torsionsbeanspruchung, die eine übermäßige Querbiegung des Unterflansches und des Steges verursachte. Die ursprünglich vertikalen Stangen der Festhaltevorrückung wurden schräg gestellt, wie in Bild 13b ebenfalls ersichtlich. Von den Unterflansch-Schäden betroffen wurden sowohl der Randträger Seite Santiago auf dessen Ostende als auch der Randträger

Seite Chillán auf dessen Westende, so dass eine Verdrehung des Überbaus um die vertikale Achse ähnlich wie bei der Überführung in Chillán ursächlich sein könnte. Die Aufwölbung zweier Gehsteigplatten direkt neben der Überführung zeigt, dass eine starke Bodenbewegung geherrscht haben muss (Bild 12b).



Bild 14. Eingestürzte Überführung bei Ranagua. Die heruntergefallenen Träger sind weggeräumt und eine provisorische Fußgängerpasserelle führt über die Autobahn.



Bild 15. Reparatur der Überführung bei Rengo. Stahlseile entlang der Widerlagerbank zum Zurückschieben der Träger (a) und Montage von Z-förmigen Haken auf dem Stützenjoch zur Lagerung der Stahlseile (b).

Nur eine einzige Überführung auf dem Autobahnabschnitt Santiago-Chillán erlitt einen Totalschaden. Bei der Ausfahrt Ranagua waren die heruntergefallenen Träger bereits weggeräumt und eine provisorische Fußgängerpasserelle war errichtet worden. Bild 14 zeigt die verbliebene Mittelstütze und ein Widerlager der früheren Überführung. Weitere zwei Überführungen sind auf der nördlichen Umfahringautobahn von Santiago eingestürzt.

Fünf Wochen nach dem Erdbeben waren die Reparaturarbeiten an den Brücken in vollem Gang. Bei Rengo etwas südlich von Ranagua wurden die in erster Linie quer verschobenen Brückenträger wieder in die ursprüngliche Lage zurückgebracht. Dazu wurden Stahlseile entlang der Widerlagerbank und dem Stützenjoch montiert (Bild 15). Große Z-förmige Haken aus fachwerkartig zusammengeschweißten Platten dienen zur Lagerung der Stahlseile (Bild 15b). Die Schräge der ursprünglich vertikalen Stangen zwischen den Trägern zeigt die vom Erdbeben verursachte Querverschiebung von knapp 1 m beim Widerlager und von etwa 20 cm bei der Stütze. Die Reparaturarbeiten waren auf die Wiederherstellung des Zustands vor dem Erdbeben ohne irgendeine Ertüchtigung des Systems beschränkt. Die Träger wurden auf neue nicht verankerte Gummilager versetzt, neue vertikale Stangen wurden montiert und die seitlichen Puffer ersetzt. Meist wies das Tragwerk von Stützen und Widerlagern praktisch keine Schäden mit Ausnahme der erwähnten Puffer auf, da über die nicht verankerten Gummilager und die schwachen Puffer keine großen horizontalen Erdbebenkräfte von den Brückenträgern in den Unterbau übertragen werden konnten. Bei den Widerlagern mussten jeweils die Schäden infolge der Setzungen der Aufschüttungen repariert werden.

4 Erdbebenbemessung der Brückenlager

Die zahlreichen Schadensbilder der Überführungen über die Autobahn mit von den Lagern gerutschten Trägern lassen zuerst vermuten, dass Brückenlager in Chile nicht auf Erdbebenkräfte ausgelegt werden und stattdessen mit konstruktiven Maßnahmen wie seitlichen Puffern, breiten Auflagerbänken und Festhaltevorrichtungen versucht wird, den Absturz des Brückenträgers zu verhindern. Bei genauerer Betrachtung der chilenischen Norm für Brücken („Manual de Carreteras“ [EUA02]) zeigt sich aber, dass die Brückenlager sehr wohl auf Erdbebenkräfte bemessen werden. Die

zahlreichen Schäden an den Brückenlagern weisen jedoch darauf hin, dass die Erdbebenanregung während des Centro-Sur-Erdbebens wesentlich größer gewesen ist als das Bemessungsbeben (siehe Abschnitt 2). Außerdem konnten nach dem Versagen der Lager die konstruktiven Maßnahmen die Erdbebenbeanspruchungen nicht übernehmen. Im folgenden werden die chilenischen Erdbebenbestimmungen für Brückenlager am Beispiel der Überführungen mit den entsprechenden Regeln des EC 8 [CEN05] verglichen.

4.1 Manual de Carreteras

Die chilenischen Erdbebenbestimmungen für Brücken befinden sich im umfangreichen Straßenhandbuch („Manual de Carreteras“), das Regeln für verschiedene Bemessungsaspekte von Verkehrswegen und deren Kunstbauten enthält [EUA02]. Die typischen Überführungen (Bilder 9 bis 15) gelten als Brücken aus einfachen Balken mit maximal zwei Feldern und Spannweiten bis 70 m. Diese Brücken dürfen nach der so genannten Methode des seismischen Koeffizienten, einem vereinfachten Ersatzkraftverfahren, bemessen werden. Der horizontale seismische Koeffizient K_h beträgt unabhängig vom Schwingungsverhalten der Brücke:

$$K_h = \frac{K_f S A_0}{2g} = \frac{0.8 \cdot 1.0 \cdot 0.3g}{2g} = 0.12$$

wobei $K_f = 0.8$ der Bedeutungsfaktor für Überführungen, $S = 1.0$ ein Baugrundparameter für Baugrundklasse II (entsprechend Baugrundklasse B nach EC 8), $A_0 = 0.3 g$ die effektive horizontale Bodenbeschleunigung in der chilenischen Erdbebenzone 2 und g die Erdbeschleunigung sind. Insgesamt resultiert eine horizontale Ersatzkraft von nur 12% des Eigengewichts, die z. B. für die Bemessung der Lager in Längs- und Querrichtung der Brücke anzusetzen ist.

Als Festhaltevorrichtungen schreibt das „Manual de Carreteras“ vertikale Stäbe von Durchmesser 22 mm oder dicker vor, so genannte „Barras de Anclaje“ (Bild 11), die mit dem folgenden vertikalen seismischen Koeffizienten zu bemessen sind:

$$K_v = \frac{A_0}{2g} = \frac{0.3g}{2g} = 0.15$$

Dabei ist die positive Auflagerreaktion infolge des Eigengewichts zu vernachlässigen, d.h. die vertikalen Stäbe sind auf eine Zugkraft von 15% des Eigengewichts auszulegen.

Zur Begrenzung der Querverschiebung sind gemäß „Manual de Carreteras“ bei den Auflagern seitliche Puffer mit einer Minimalhöhe von 30 cm vorzusehen (Bild 15). Die Puffer müssen die halbe horizontale Lagerkraft in Querrichtung aufnehmen können und sie müssen „genügend duktil“ sein, ohne dass das „Manual de Carreteras“ irgendwelche konstruktiven oder konzeptionellen Regeln vorgibt, wie diese Duktilität zu erreichen wäre. Zwischen Puffer und Brückenträger ist eine Fuge mit der Breite gleich der Lager-Querverschiebung infolge Erdbebenersatzkraft plus 5 cm vorzusehen.

Querträger in den Pfeiler- und Widerlagerachsen werden nur in der höchsten Erdbebenzone 3 verlangt und zwar für die Aufnahme der Auswirkungen infolge vertikaler Erdbebenanregung. Die Randträger müssen für die Auswirkungen des Anpralls auf die Puffer auch bei fehlendem Querträger nicht nachgewiesen werden (Bild 15).

Zur Absturzsicherung des Brückenträgers muss die Auflagerbank des Widerlagers die folgende Mindest-Überlappungslänge N in Brückenlängsrichtung aufweisen:

$$N = (205 + 1.67 L + 6.66 H) (1 + 0.000125 \alpha^2) \text{ mm}$$

wobei L die Brückenlänge in m bis zur nächsten Dilatationsfuge, H die Höhe in m des benachbarten Pfeilers und α der Winkel in Grad der Schiefe der Lagerachse sind. Die resultierenden Abmessungen für die Absturzsicherung sind unabhängig von der Baugrundklasse. Für den Fall einer typischen geraden ($\alpha = 0$) Überführung mit einer Trägerlänge von $L = 27$ m und einer Pfeilerhöhe von $H = 6$ m ergibt sich eine minimale Breite der Auflagerbank von nur $N = 228$ mm (Bild 16).

4.2 Eurocode 8

Die Erdbebenbemessungsregeln für Brückenlager sind im Kapitel 6.6 des Teils 2 „Brücken“ des EC 8 aufgeführt [CEN05]. Grundsätzlich sind Erdbebenkräfte durch Lager vom Überbau auf den Unterbau zu übertragen. Der EC 8 lässt jedoch zu, dass dazu auch so genannte seismische Verbinder („Seismic Links“), wie Schubnocken, Puffer, Stangen- oder Kabelverbindungen, anstelle von Lagern verwendet werden, falls dynamische Anpralleffekte in der Bemessung der seismischen Verbinder berücksichtigt werden. Die horizontale Ersatzkraft beträgt 24% des maßgebenden Gewichts für die chilenische Erdbebenzone 2 und Baugrundklasse B (entsprechend Baugrundklasse II nach chilenischer Norm) sowie unter Berücksichtigung eines Verhaltensbeiwerts von $q = 1.5$ und einer Grundschwingzeit der Brücke auf den Gummilagern von etwa 1 s. Die horizontale Ersatzkraft gemäß EC 8 entspricht daher gerade dem doppelten Wert der chilenischen Norm. Bei dynamischen Beanspruchungen wie Erdbeben dürfen die Horizontalkräfte nicht über Reibung abgetragen werden, sondern die Lager sind für die volle horizontale Reaktionskraft infolge Erdbeben zu verankern [CEN01].

Die seismischen Verbinder, d.h. hier die seitlichen Puffer, sind nach der Methode der Kapazitätsbemessung auszulegen, wobei der horizontale Widerstand der Lager zu Null angenommen werden muss. Zur Reduktion der dynamischen Anpralleffekte müssen Vorrichtungen zur Stoßübertragung

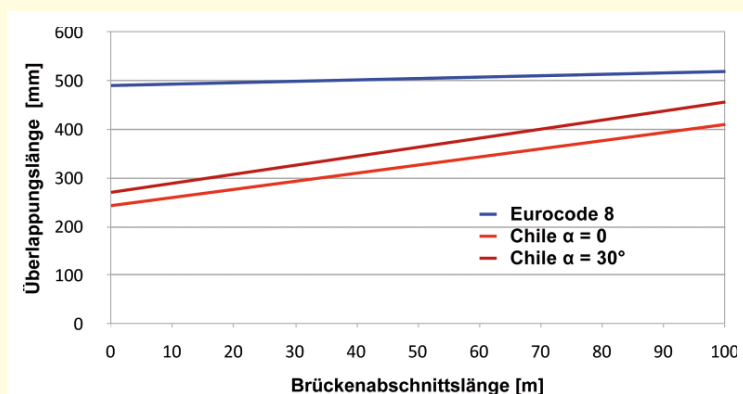


Bild 16. Überlappungslängen der Auflagerbereiche in Brückenlängsrichtung von Überführungen mit unterschiedlicher Schiefe α der Lagerung gemäss Eurocode 8 und chilenischer Norm für Baugrundklasse B bzw. II in Erdbebenzone 2.

(„Shock Transmitting Units“) eingesetzt werden.

Festhaltevorrichtungen („Holding-down devices“) müssen dort vorgesehen werden, wo die vertikale Auflagerreaktion infolge Erdbebeneinwirkung einen Prozentsatz p_H der vertikalen Auflagerreaktion infolge ständiger Einwirkungen überschreitet. Der Prozentsatz p_H ist ein national festzulegender Parameter (NDP) mit dem empfohlenen Wert $p_H = 80\%$ für kapazitätsbemessene Brücken mit duktilem Verhalten und $p_H = 50\%$ in den übrigen Fällen.

Die Mindest-Überlappungslänge l_{ov} zur Absturzsicherung des Brückenträgers beträgt bei einem Endauflager auf einem Widerlager:

$$l_{ov} = l_m + \frac{2d_g L_{eff}}{L_g} + d_{Ed} + s$$

wobei die einzelnen Parameter folgendermaßen definiert sind: $l_m \geq 400$ mm ist ein Minimalmaß der Überlappungslänge zur Übertragung der Auflagerkraft, d_g die Bemessungsbodenverschiebung, L_{eff} die effektive Brückenabschnittslänge, L_g eine von der Baugrundklasse abhängige Distanz, ab welcher die Bodenbewegung als vollkommen unkorreliert betrachtet werden darf, d_{Ed} der Bemessungswert der Längsverschiebung unter der Bemessungssituation Erdbeben sowie s der Schlupf in seismischen Verbindern, soweit solche vorhanden sind. Für den Fall der typischen chilenischen Überführung mit einer Trägerlänge von $L_{eff} = 27$ m ergibt sich unter Annahme der Baugrundklasse B ($L_g = 500$ m) in Erdbebenzone 2 sowie eines Bedeutungsfaktors 0.8 und einer Grundschwingzeit von 1 s eine minimale Breite l_{ov} der Auflagerbank von 498 mm (Bild 16).

4.3 Vergleich der chilenischen Erdbebenbestimmungen mit dem Eurocode 8

Gemäß EC 8 sind die Lager entweder auf die Auswirkungen infolge Erdbebeneinwirkung auszulegen oder es können seismische Verbinder, z. B. seitliche Puffer, zur Übernahme der Erdbebenauswirkungen vorgesehen werden. In letzterem Fall ist der Widerstand der Lager gleich Null anzunehmen und die seismischen Verbinder sind auf die vollen Erdbebenauswirkungen zu dimensionieren. Gemäß chilenischer Norm müssen die Puffer nur auf die halben Erdbebenauswirkungen ausgelegt werden. Wenn die Puffer nicht satt am Träger anliegen, schreibt der EC 8 besondere Vorrichtungen zur Stoßübertragung vor, um die Stoßeffekte zu dämpfen. In Chile sind solche Dämpfer nicht vorgeschrie-

ben. Die chilenische Norm beschränkt sich darauf, einen Zwischenraum zwischen Träger und Puffer vorzuschreiben, so dass gefährliche Stoßeffekte, die die Puffer stark beschädigen, unvermeidlich werden (Bilder 8 und 15).

Unverankerte Gummilager, wie in Chile üblich, sind nach der europäischen Lagernorm für Erdbebenbeanspruchungen nicht erlaubt, da dynamische Beanspruchungen nicht über Reibung abgetragen werden dürfen [CEN01]. In der Schweiz darf nach den konstruktiven Richtlinien des Bundesamts für Straßen (ASTRA) eine Abtragung durch Reibung angenommen werden, falls die dazugehörige Normalkraft unter Berücksichtigung der horizontalen und vertikalen Komponenten der Erdbebeneinwirkung bestimmt wird [AST08]. Diese Regelung wurde im Sinne einer Relaxation der europäischen Bestimmungen für hohe Seismizität für die in der Schweiz vorherrschende niedrige bis mittlere Seismizität entwickelt. Zu beachten ist ferner, dass im Falle der Autobahnüberführungen die für die Lagerbemessung maßgebende horizontale Ersatzkraft nach chilenischer Norm nur gerade 12% des Eigengewichts beträgt und sämtliche Lager horizontale Kräfte übertragen, so dass eine Abtragung über Reibung allein zumindest für die normgemäßen Erdbebenbeanspruchungen auch unter Berücksichtigung der vertikalen Anregung möglich erscheint. In Wirklichkeit müssen die Erdbebenbeanspruchungen bei den beschädigten Autobahnüberführungen wesentlich größer gewesen sein, wie es auch die Messwerte in Tabelle 1 vermuten lassen. Die unverankerten Gummilager wirkten zusammen mit den schwachen seitlichen Puffern wie ungewollte Sollbruchstellen, die größere Schäden am Unterbau verhinderten.

Vertikale Festhaltevorrichtungen sind in Chile immer vorgeschrieben, während sie gemäß EC 8 nur vorgeschrieben sind, falls die vertikale Reaktion infolge Erdbeben einen gewissen Prozentsatz p_H der vertikalen Auflagerreaktion infolge ständiger Einwirkungen überschreitet. Bei den betrachteten Überführungen in der chilenischen Erdbebenzone 2 würde die vertikale Reaktion gemäß EC 8-Bemessungsspektrum 54% erreichen, so dass die Limite von $p_H = 50\%$ für konventionelle Bemessung überschritten wäre und ebenfalls vertikale Festhaltevorrichtungen anzuordnen wären (siehe Abschnitt 4.2). Die vertikale Reaktion gemäß EC 8 wird unter Berücksichtigung eines Verhaltensbeiwerts $q = 1.5$ für vertikale Anregung ermittelt. Für die in Chile besichtigten Brücken waren die vertikalen Stangen, die das Abheben der Träger infolge vertikaler Beschleunigungen verhindern sollten, vermutlich eher überdimensioniert, da bei den meisten Messstationen außerhalb Concepción maximale vertikale Spektralbeschleunigungen kleiner als 1 g gemessen wurden.

Zur Absturzsicherung in Längsrichtung des Brückenträgers sehen beide Normen minimale Überlappungslängen in den Auflagerbereichen vor. Obwohl unterschiedliche Parameter in den Bemessungsgleichungen verwendet werden, ist die um etwa 200 mm größere Überlappungslänge gemäß EC 8 primär auf das entsprechend größere Minimalmaß $l_m \geq 400$ mm zurückzuführen. Der Einfluss der übrigen Parameter ist bei der kleinen maßgebenden Brückenabschnittslänge entsprechend der Spannweite der einfachen Balken von 27 m recht gering (Bild 16). Auffallend in Bild 16 ist der wesentlich steilere Verlauf der chilenischen Überlappungslänge in Funktion der Brückenabschnittslänge. Interessant ist ferner die Berücksichtigung der Schiefe der Lagerung in der chile-

nischen Norm mit dem Winkel α , die zu einer Vergrößerung der Überlappungslänge führt. Im EC 8 wird hingegen die Schiefe der Lagerung bei der Berechnung der minimalen Auflagerlänge vernachlässigt. Einige Autoren (z. B. [Eln+10] und [HSV10]) weisen darauf hin, dass schiefe Brücken eine breitere Auflagerbank zur Absturzsicherung benötigen. Die Formel zur Berechnung der Auflagerlänge im „Manual de Carreteras“ führt bei einer Schiefstellung von 30° nur zu einer ungefähr 10% größeren Überlappungslänge (Bild 16). Dies ist relativ gering, wenn man es mit den um 100% verschiedenen Minimalmassen für die Auflagerlänge im „Manual de Carreteras“ und EC 8 vergleicht. Bei beiden Normen ist die Überlappungslänge unabhängig vom Freiraum auf der gegenüberliegenden Seite bis zum Anschlag auf ein Hindernis, z. B. auf die Widerlagerrückwand, wie es in der Norm SIA 261 für feste Längslagerung geregelt ist [SIA03].

Zusätzlich zur Absturzsicherung in Längsrichtung sind die Lager auf die horizontalen Erdbebenkräfte in Längsrichtung zu bemessen. Bei beiden Normen gilt die Absturzsicherung als zweite Verteidigungslinie zur Vermeidung übermäßiger Schäden (Trägerabsturz) im Sinne einer robusten Bemessung, falls das Bemessungsbeben überschritten wird. Die Absturzsicherung allein genügt nicht zur Erdbebensicherung. Beim EC 8 können alternativ zur Lagerbemessung seismische Verbinder in Längsrichtung, z. B. Stangen oder Kabel, zusammen mit Vorrichtungen zur Stoßübertragung angeordnet werden.

5 Schlussfolgerungen

Das Ziel dieses Beitrags war es, einige Schadensbilder von Brücken, die während des Chile-Erdbebens in 2010 beschädigt wurden, zusammenzutragen und mögliche Ursachen für die Schäden zu diskutieren. In Anbetracht der außerordentlichen Stärke des Erdbebens und des riesigen Gebietes, in dem das Bemessungsbeben überschritten wurde, sind abgesehen von der Region Concepción relativ wenige Brücken eingestürzt oder stark beschädigt worden. Entlang der Nord-Süd-Autobahn Ruta N° 5 hat sich das Konzept der Zwillingbrücken mit je zwei Fahrspuren und unterschiedlichen Bauperioden, Konstruktionstypen und Normengenerationen bewährt. Die daraus resultierende Redundanz führte dazu, dass die Autobahn mit zumindest einem Fahrstreifen je Richtung über die ganze Länge befahrbar war, nachdem abgestürzte Träger von Autobahnüberführungen entfernt worden waren.

Abgesehen von der Bogenbrücke über den Rio Claro und dem „Puente Perquilauquén“ mit Einhängeträgern waren alle beschädigten Brücken Balkenbrücken mit Einfeldträgern. Dieser Brückentyp ist bereits von früheren Erdbeben dafür bekannt, dass er sehr erdbebenverletzbar ist. Entlang der Nord-Süd-Autobahn sind praktisch alle Überführungen von diesem Brückentyp. Trotz Erdbebenbemessung wiesen diese Überführungen die unterschiedlichsten Schädigungsgrade von unbeschädigt bis zum Total-Einsturz auf. Es zeigte sich, dass diese einfachen Brücken für vergleichsweise kleine Erdbebenkräfte bemessen werden, so dass sie auf unverankerten Gummilagern gelagert werden können. Zur Aufnahme stärkerer Erdbebenkräfte nach Versagen bzw. Verrutschen der Gummilager sind seitliche Puffer für die Querrichtung und breite Auflagerbänke für die Längsrichtung vorgesehen, wobei sich diese Maßnahmen oft als ungenügend erwiesen haben und zum Trägerabsturz führten.

Ein Vergleich der Erdbebenbestimmungen für Brückenlager der chilenischen Brückennorm („Manual de Carreteras“ [EUA02]) mit denen im EC 8 [CEN05] zeigt wesentliche Unterschiede auf. So sind seitliche Puffer chilenischer Bauart ohne Dämpfer gemäß EC 8 nicht erlaubt, da sonst die großen Anprallkräfte nicht zu meistern sind. Bei der Absturzsicherung in Längsrichtung fallen die unterschiedlichen Vorgaben für die Überlappungslänge der Auflager auf. Aufgrund der chilenischen Brückennorm ergeben sich erstaunlich geringe Überlappungslängen (Bild 16). Dies sowohl im Vergleich zum EC 8 als auch zu den gemessenen Spektralwerten der Verschiebung (Tabelle 1).

Zur Aufnahme negativer Auflagerreaktionen schreibt die chilenische Brückennorm für alle Erdbebenzonen vertikale Stangen bei allen Lagern vor. Diese Regel ist vermutlich auf entsprechende Schäden bei früheren starken Erdbeben in Chile zurückzuführen. Beim Erdbeben in 2010 wurden zwar sehr viele dieser Stangen beschädigt, doch nicht infolge vertikaler Anregung sondern infolge exzessiver Horizontalverschiebung der Brückenträger. Die vertikalen Stangen erscheinen insbesondere in den Erdbebenzonen 1 und 2 überdimensioniert, da bei den meisten Messstationen außerhalb Concepcións maximale vertikale Spektralbeschleunigungen kleiner als 1 g gemessen wurden. Nach EC 8 wären solche Festhaltevorrichtungen in der höchsten Erdbebenzone 3 und teilweise in der mittleren Erdbebenzone 2 erforderlich.

Literatur

- [Abr+10]
Abrahamczyk, L., Schwarz, J., Lobos, D., Maiwald, H. (2010) "Das Magnitude 8.8 Maule (Chile)-Erdbeben vom 27. Februar 2010 – Ingenieuranalyse der Erdbebenschäden", *Bautechnik* 87 (2010), Heft 8. [AST08]
- ASTRA (2008) "Richtlinien für konstruktive Einzelheiten von Brücken", Bundesamt für Strassen, Bern.
- [Bor+10]
Boroschek, R., Soto, P., Leon, R., Compte, D. (2010) "Terremoto Centro Sur Chile 27 de Febrero de 2010", *Informe Preliminar N° 4*, Red National de Acelerografos, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [BSL10]
Boroschek, R., Soto, P., Leon, R. (2010) "The Maule Region Earthquake February 27, 2010, $M_w = 8.8$ ", *RENADIC Report 10/08*, Red National de Acelerografos, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [BW10]
Beyer, K., Wenk, T. (2010) "Das Verhalten von Gebäuden mit Stahlbetontragwänden während des Erdbebens Centro-Sur in Chile am 27.2.2010", D-A-CH-Mitteilungsblatt, *Bauingenieur* 85 (2010), Heft 9. [CEN01]
- CEN (2001) "Structural Bearings – Part 1: General Design Rules", *European Standard EN 1337-1*, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- [CEN05]
CEN (2005) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges", *European Standard EN 1998-2*, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- [EERI10]
Earthquake Engineering Research Institute (2010) "The M_w 8.8 Chile Earthquake of February 27, 2010", *EERI Special Earthquake Report*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, United States.
- [Eln+10]
Elnashai, A. S., Gencturk, B., Kwon, O., Al-Qadi, I. L., Hashash, Y., Roesler J. R., Kim, S. J., Jeong S.-H., Dukes, J., Valdivia, A. (2010) "The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010 – Consequence Assessment and Case Studies", *MAE Center Report No. 10-04*, Mid-America Earthquake Center, Buffalo, New York.
- [EUA02]
Etcheverry Celhay, J., Uribe Bascur, C., Arriagada, E. (2002) "Manual de Carreteras, Instrucciones y Criterios de Diseño", Vol. N° 3 Parte III, Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Publicas, Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.
- [HS10]
Hube, M., Santa María, H. (2010) "Comportamiento Sísmico de Puentes durante el Terremoto del 27 de Febrero", X Jornadas de Sismología e Ingeniería Sísmica, Sesión Terremoto Centro-Sur de Chile 2010, *Presentation slides*, Presentation at the National Earthquake Engineering Conference, Santiago, Chile.
- [HSV10]
Hube, M., Santa María, H., Villalobos F. (2010) "Preliminary Analysis of the Seismic Response of bridges during the Chilean 27 February 2010 Earthquake", *Obras y Proyecto*, Edición 8 Primavera 2010, 48–57, Concepción, Chile.
- [Mar+10]
Martin, C., Beyer, K., Colbeau-Justin, L., Devaux, M., Quistin, P., Vezin, J.-M., Wenk, T. (2010) "Le Séisme du Chili ($M_w=8.8$) du 27 Février 2010 – Rapport de la mission AFPS/SGEB du 9 au 16 avril 2010", *Technical report*, Paris, Frankreich.
- [NCh433-09]
Instituto Nacional de Normalización (2009) "Diseño sísmico de edificios," Norma chilena NCh433-2009, Santiago, Chile.
- [SF63]
Steinbrugge, K.V., Flores, R. (1963) "The Chilean Earthquake of May, 1960: a Structural Engineering Viewpoint", *Bulletin of the Seismological Society of America* 53(2), 225–307
- [SIA03]
SIA (2003) "Actions on Structures", *Swiss Standard SIA 261*, Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.
- [STR10]
Structurae (2010) "Puente sobre el Río Claro", Internationale Galerie und Datenbank des Ingenieurbaus: <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s0006598>
- [USGS10]
USGS (2011) "Datensatz für das Chile Erdbeben am 27.2.2010" (heruntergeladen am 7.2.2011), U. S. Geological Survey, http://nsmpr.wr.usgs.gov/data_sets/20100227_0634.html.
- [Vil+11]
Villalobos, F., Ovando, E., Mendoza, M., Oróstegui, P. (2011) "Damages Observed in the 2010 Concepción Earthquake Related to Soil Phenomena", *Proc. of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, January 2011, 10–13, Santiago, Chile.
- [Yas+10]
Yashinsky, M., Oviedo, R., Ashford, S., Fargier-Gabaldon, L., Hube, M. (2010) "Performance of Highway and Railway Structures during the February 27, 2010 Maule Chile Earthquake", *Presentation slides*, available online: <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/wp-content/uploads/2010/04/Yashinsky-et-al-Bridges.pdf>