

Die Kosten der Erdbebensicherung in der Schweiz

Thomas Wenk

Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, CH-8055 Zürich

ZUSAMMENFASSUNG: Mit der Einführung neuer Tragwerksnormen wurden die Erdbebenbestimmungen in der Schweiz verschärft. Die daraus entstehenden Mehrkosten sind bei Neubauten praktisch vernachlässigbar, falls die Regeln des erdbebengerechten Entwurfs befolgt werden. Bei bestehenden Bauten werden die Mehrkosten der Erdbebensicherung durch die neuen Kriterien der Verhältnismässigkeit auf wenige Prozente des Gebäudewertes begrenzt. Der Beitrag zeigt auf, wie und in welchem Umfang beim einzelnen Bauwerk Mehrkosten entstehen.

1. EINLEITUNG

Im Jahre 2003 sind in der Schweiz neue Tragwerksnormen SIA 260 bis SIA 267 auf Grundlage der Eurocodes in Kraft getreten. Dabei wurden die Erdbebenbestimmungen an den Eurocode 8 angepasst, was eine erheblich höhere Erdbebeneinwirkung gegenüber früheren Normengenerationen zur Folge hatte. Als Vergleichsgrösse zeigt Abbildung 1 die Antwortspektren der Verschiebung für elastisches Tragwerksverhalten jeweils in der niedrigsten Zone Z1 auf mittelsteifem Boden bzw. Baugrundklasse C gemäss der letzten vier Normengenerationen aus den Jahren 1956, 1970, 1989 und 2003. Als Folge der im Allgemeinen höheren Anforderungen stellt sich sowohl bei Neubauten als auch bei bestehenden Bauten die Frage der Kosten der Erdbebensicherung. Während bei Neubauten dank modernen Konzepten des Erdbebeningenieurwesens wie erdbebengerechte Entwurfsregeln und Kapazitätsbemessung praktisch kostenneutrale Alternativen zu traditionellen Bauweisen zur Verfügung stehen, können bestehende Bauten meist nur mit erheblichen Kosten auf das Anforderungsniveau für Neubauten ertüchtigt werden. Von einigen ausgeführten Fallbeispielen in der Schweiz sind in letzten Jahren die effektiven Baukosten der Erdbebensicherung bei Gebäuden bekannt geworden, die auch für die anderen beiden D-A-CH-Länder mit vergleichbarer Seismizität von Interesse sind.

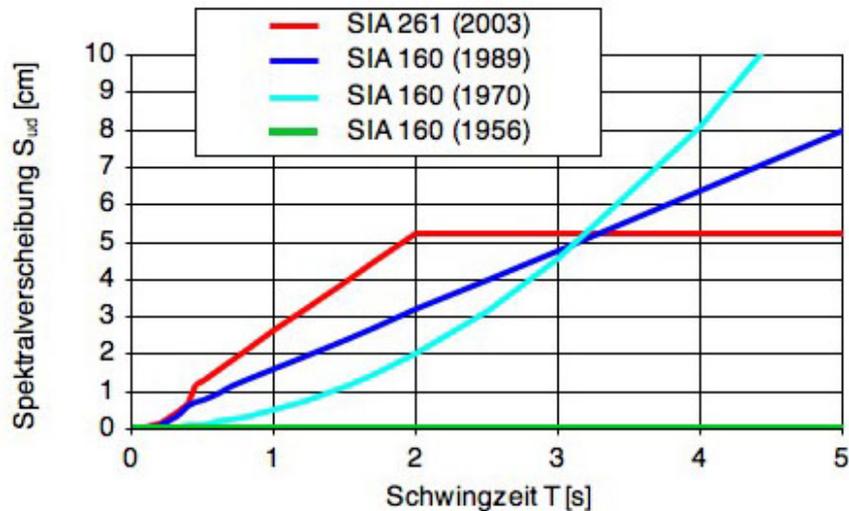


Abbildung 1: Vergleich der Antwortspektren der Verschiebung für elastisches Tragwerksverhalten jeweils in der niedrigsten Zone Z1 auf mittelstifem Boden bzw. Baugrundklasse C gemäss der letzten vier Normengenerationen in der Schweiz.

2. NEUBAUTEN

2.1 ERDBEBENGERECHTER ENTWURF

Bei Neubauten können die Mehrkosten zur Erzielung der normengemässen Erdbebensicherheit auf eine vernachlässigbare Grösse reduziert werden, falls bei der Planung der so genannte «Miteinander-Entwurf» (Bachmann, 2002) befolgt wird. Dabei arbeiten Architekt und Ingenieur von der frühen Entwurfsphase an zusammen unter Einbezug der Aspekte des erdbebengerechten Entwurfs. Bei Stahl- oder Stahlbetonbauten entstehen so praktisch keine zusätzlichen Kosten mit Ausnahme gewisser Kosten der erdbebengerechten Planung, doch sollten diese mit zunehmender Erfahrung der Beteiligten entfallen.

Wichtig ist vor allem, dass die Kriterien der Regelmässigkeit im Grundriss und Aufriss eingehalten sind. Pro Hauptrichtung muss ein über alle Geschosse durchlaufendes Tragsystem für horizontale Einwirkungen vorhanden sein. Bei einem Tragsystem aus Stahl oder Stahlbeton mit angepasster Steifigkeit kann mit einfachen verformungsbasierten Überlegungen gezeigt werden, dass dann die Erdbebenkräfte ohne Mehrkosten abgetragen werden können.

Ein unregelmässiger Grundriss oder ein unregelmässiger Aufriss kann einen wesentlich grösseren Verformungsbedarf sowie eine ungünstige Konzentration des Verformungsbedarfs auf ein einziges, horizontal weiches Stockwerk (Soft-Story) bewirken. Bei niedriger bis mittlerer Seismizität lassen sich die Erdbebenbeanspruchungen trotzdem aufnehmen, doch werden diese für die Dimensionierung klar massgebend und lösen in der Regel Mehrkosten aus.

Gebäude aus unbewehrtem Mauerwerk sind nicht erdbebengerecht, da sie einerseits ein kleines Verformungsvermögen aufweisen und da andererseits wegen ihrer grossen Steifigkeit grosse Erdbebenkräfte entstehen. In der Regel werden bei mehrgeschossigen, unbewehrten Mauerwerksgebäuden zwei Stahlbetontragwände pro Hauptrichtung im Grundriss zur Aufnahme der Erdbebenbeanspruchung erforderlich, was mit Mehrkosten gegenüber einer reinen Mauerwerkskonstruktion verbunden ist (Abbildung 2).



Abbildung 2: Bei mehrgeschossigen, unbewehrten Mauerwerksgebäuden werden in der Regel zwei Stahlbetontragwände pro Hauptrichtung im Grundriss zur Aufnahme der Erdbebenbeanspruchung erforderlich,

2.2 ANGEPASSTE STEIFIGKEIT

Am Beispiel von schlanken Stahlbetontragwänden soll erklärt werden, unter welchen Voraussetzungen die Erdbebenbeanspruchungen quasi «gratis» abgetragen werden können. Der einfache verformungsbasierte Zusammenhang nach Priestley (2003) zwischen Schiefstellung, Verschiebeduktilität und Schlankheit von Stahlbetontragwänden wurde in Abbildung 3 von Dazio (2005) für Schweizer Verhältnisse dargestellt. Für einen typischen Bereich der Wandschlankheit h_w/l_w zwischen 3 und 5 sowie einer Verschiebeduktilität $\mu_\Delta = \Delta_y/\Delta_m = 3$, wie es duktilem Tragwerksverhalten gemäss der Norm SIA 262 (2003) entspricht, kann eine maximale Schiefstellung zwischen 1,5% und 2,5% erreicht werden. Bereits ab einer Wandhöhe $h_w = 2$ m kann folglich bei einer Schiefstellung $\delta_{\max}/h_w = 2,5\%$ eine horizontale Verschiebung von $\delta_{\max} = 5$ cm erreicht werden. Dies entspricht der maximalen Spektralverschiebung für Zone Z1 (rote Kurve in Abbildung 1). Der Bewehrungsgehalt und die Normalkraft der Wand spielen bei dieser Überlegung keine Rolle, solange sie sich in normalen Grenzen befinden (Priestley, 2003). Wichtig ist, dass die Wand genügend schlank ist, d.h. eine angepasste Steifigkeit aufweist, und mit konstanten Querschnittsabmessungen über alle Geschosse verläuft.

Mit aufwendigeren Parameterstudien unter Einbezug der Grundschwingzeit in Abhängigkeit von Steifigkeit und Höhe könnte aufgezeigt, dass schlanke Stahlbetontragwände mit Minimalbewehrung auch für ein- oder mehrgeschossige Gebäude in allen Erdbebenzonen der Schweiz ausreichend sind, d.h. die Erdbebenkräfte ohne Mehrkosten abgetragen werden können. Einen Zusatzaufwand könnte einzig für die Fundierung im Baugrund erforderlich werden, falls die Kippmomente der Wände nicht über horizontale Kräftepaare in die Untergeschosse eingeleitet werden können.

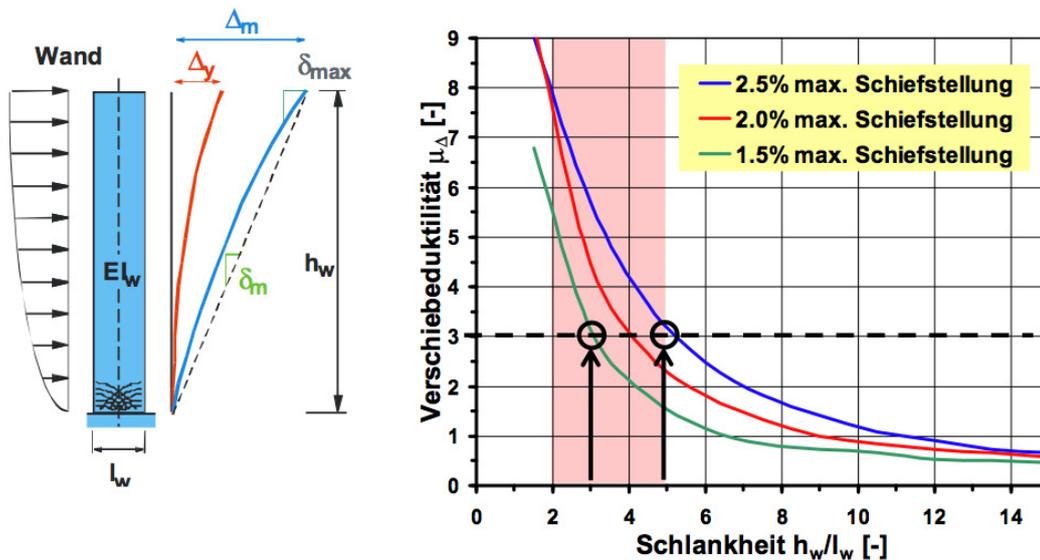


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Schiefstellung, Verschiebeduktilität und Schlankheit von Stahlbetontragwänden (Dazio, 2005).

2.3 BEISPIELE

Es sind nur wenige Beispiele von Neubauten bekannt, bei denen seriöse Kostenberechnungen für die Erdbebensicherung durchgeführt worden sind. Peruzzi und Mittaz (2005) weisen bei drei 4- bis 6-geschossigen Wohngebäuden in der höchsten Erdbebenzone Z3b der Schweiz im Wallis (Bodenbeschleunigung von 18% g für Bauwerksklasse I und Baugrundklasse C) Mehrkosten zwischen 1,2% und 2,0% der gesamten Baukosten, bzw. 3,7% bis 6,1% der Rohbaukosten, nach. In diesen Fällen war ursprünglich ein Tragwerk ausschliesslich aus unbewehrten Mauerwerkswänden vorgesehen. Einzelne Mauerwerkswände mussten durch Stahlbetontragwände ersetzt werden. Die Mehrkosten der Erdbebensicherung zwischen 1,2% und 2,0% werden durch die etwa 130 Fr./m² teureren Stahlbetontragwände verursacht. Bei einem weiteren 4-geschossigen Wohngebäude in der Zone Z3b kommen Peruzzi und Mittaz (2005) auf wesentlich kleinere Mehrkosten von nur 0,3% der gesamten Baukosten, bzw. 0,9% der Rohbaukosten, da in diesem Fall vom Architekten sowieso geplante Stahlbetonwände für die Abtragung der Erdbebenkräfte herangezogen werden konnten. Alle vier Neubauten wurden nicht entsprechend dem «Miteinander-Entwurf» geplant. Trotzdem erreichten die Mehrkosten der Erdbebensicherung im Mittel nur wenig mehr als 1% der gesamten Baukosten.

Eine nachträgliche Untersuchung von fünf Verwaltungsgebäuden des Bundes durch Duvernay und Anliker (2006) ergab, dass die Mehrkosten der Erdbebensicherung maximal 0,3% der gesamten Baukosten betragen. Es handelte sich um 5- bis 6-geschossige Stahlbetonskelettbauten in der Erdbebenzone Z1 (Bodenbeschleunigung von 8% g für Bauwerksklasse II und Baugrundklasse C), die in den Jahren 1994 bis 2002 erstellt worden sind. Auch bei der Planung dieser Neubauten wurden die erdbebengerechten Entwurfsregeln und insbesondere der «Miteinander-Entwurf» nicht befolgt.

Die aufgeführten Fallbeispiele zeigen, dass auch bei Nicht-Einhaltung des erdbebengerechten Entwurfs nur mit Mehrkosten von wenigen Prozenten der Baukosten zu rechnen ist. Wenn der erdbebengerechte Entwurf befolgt wird, entstehen keine oder vernachlässigbare Mehrkosten.

3. BESTEHENDE BAUTEN

3.1 PROBLEMATIK

Werden gemäss früheren Normen bemessene Bauten gemäss den neuen Tragwerksnormen SIA 260 bis SIA 267 überprüft, so können die erforderlichen Nachweise der Erdbebensicherheit oft nicht erbracht werden. Die Regeln des erdbebengerechten Entwurfs sind in den meisten Fällen nicht erfüllt und im Gegensatz zu Neubauten kann die nachträgliche Erdbebensicherung mit erheblichen Kosten verbunden sein. Neben den vertikalen Tragelementen können bei älteren Gebäuden auch die Holzdecken und insbesondere die Verbindung zwischen Decken und Wänden problematisch sein. In den letzten Jahren sind Zahlen zu einigen Beispielen ausgeführter Erdbebenertüchtigungen in der Schweiz bekannt geworden, die im nachstehenden Abschnitt zusammengefasst sind.

3.2 BEISPIELE

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten zu 15 Musterbeispielen ausgeführter Erdbebenertüchtigung bei Gebäuden zusammengestellt. Neben der Erdbebenzone und der Bauwerksklasse (BWK I: gewöhnliches Gebäude, BWK II: Schule, öffentliche Verwaltung, Einkaufszentrum, BWK III: Lifeline-Gebäude) sind die Kosten der Erdbebenertüchtigung sowohl absolut in CHF als auch relativ zum Gebäudeversicherungswert angegeben.

Gebäude	Zone	BWK	Kosten in kCHF	Kosten in %	Bauliche Massnahme
Polizeigebäude in Sion	Z3b	III	3000	29%	Anbau
Feuerwehrgebäude in Visp	Z3b	III	35	1,8%	Vorspannung Mauerwerk
Schulgebäude in Monthey	Z3b	II	540	11%	St.-Betonwände
Wohn- und Geschäftshaus in Sion	Z3b	II	130	2,9%	St.-Betonwände
Unterwerk in Basel	Z3a	III	650	5,4%	Stahlfachwerk
Verwaltungsgebäude in St. Maurice	Z3a	II	50	3,5%	St.-Betonwände
Wohngebäude in Crans-Montana	Z3a	I	150	4,2%	St.-Betonwände
Gymnasium in Gossau	Z1	II	370	10%	Bewehrung Mauerwerk
Einkaufszentrum in Fribourg	Z1	II	1700	7,4%	St.-Betonwände
Kinderklinik Aarau	Z1	II	900	3,8%	St.-Betonwände
Schulgebäude in Zürich	Z1	II	130	3,3%	St.-Betonwände
Radiostudio Zürich	Z1	II	340	2,3%	Stahlfachwerk
Einkaufszentrum in Winterthur	Z1	II	120	2,2%	Stahlfachwerk
Gymnasium in Bern	Z1	II	300	0,7%	Fugenschluss
Hörsaalgebäude HPH, ETH Zürich	Z1	II	500	0,7%	Stahlfachwerk

Tabelle 1: Beispiele von Gebäuden in der Schweiz mit absoluten und relativen Kosten der Erdbebenertüchtigung

In der letzten Spalte in Tabelle 1 befindet sich ein Stichwort für die wichtigste bauliche Massnahme, die zur Erdbebenertüchtigung ausgeführt worden ist. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Musterbeispiele befindet sich in Wenk (2005 und 2007).

Die relativen Kosten variieren sehr stark zwischen 0,7% bis 29% für die 15 Musterbeispiele. Kostenfaktoren sind sicher die Erdbebenzone und die Bauwerksklasse. Aufgeschlüsselt nach diesen beiden Faktoren sind die mittleren relativen Kosten in % in Abbildung 4 dargestellt. Es ist ein genereller Trend zunehmender Kosten mit höherer Erdbebenzone und Bauwerksklasse festzustellen, doch beruhen die meisten Werte des Säulendiagramms auf nur 1 bis 2 Beispielen. Einzig bei der Kombination von Bauwerksklasse II in Erdbebenzone Z1 ist der Durchschnittswert aus 8 Beispielen mit relativen Erdbebenertüchtigungskosten von 3,8% einigermaßen aussagekräftig. Werden ferner die beiden Gebäude mit hohen relativen Kosten (Gymnasium in Gossau und Einkaufszentrum in Fribourg in Tabelle 2), bei denen die Kriterien der Verhältnismässigkeit der erst nachträglich erschienenen Norm SIA 2018 (2004) nicht eingehalten sind (siehe Kapitel 3.3), weggelassen, dann ergibt sich ein Durchschnittswert aus 6 Beispielen der Bauwerksklasse II in Erdbebenzone Z1 mit relativen Erdbebenertüchtigungskosten von nur 2,2%.

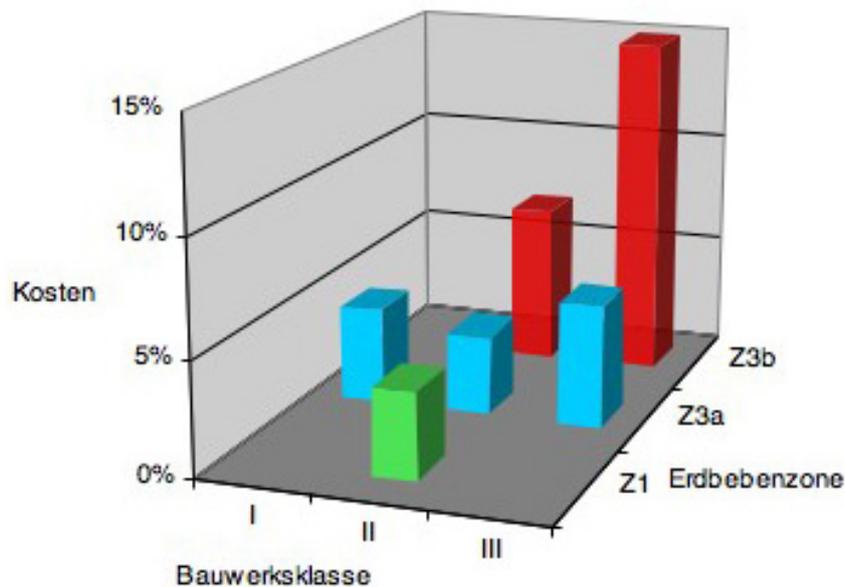


Abbildung 4: Mittlere relative Kosten der Erdbebenertüchtigung der 15 Gebäude von Tabelle 1 in Funktion der Erdbebenzone und der Bauwerksklasse

Konstruktive Randbedingungen der Erdbebenertüchtigung haben offensichtlich einen stärkeren Einfluss auf die Kosten als Erdbebenzone, Bauwerksklasse oder auch Baugrundklasse. Kann der bauliche Eingriff auf wenige Stellen im Gebäude eingegrenzt werden, wie z.B. auf eine Wand in einem Geschoss, dann können die Kosten niedrig gehalten werden, so z.B. beim Hörsaalgebäude HPH mit Kosten von nur 0,7%. Wenn jedoch neue Tragelemente über die ganze Höhe eingezogen werden müssen, steigen die Kosten rasch an, insbesondere wenn zusätzlich noch die Foundation verstärkt werden muss (Abbildung 5). Beispiele dafür sind die 3 Gebäude mit Kosten von 10% und mehr in Tabelle 1.



Abbildung 5: Schulgebäude in Monthey wird mit neuem aussenliegendem Liftkern aus Stahlbeton erdbebenertüchtigt.

3.3 VERHÄLTNISSMÄSSIGKEIT DER KOSTEN

Aufgrund von Kosten-Risiko-Überlegungen ist es nicht immer sinnvoll, bestehende Bauten auf das gleiche Sicherheitsniveau wie Neubauten zu ertüchtigen. Die neue Schweizer Norm SIA 2018 (2004) «Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben» berücksichtigt explizit die Verhältnismässigkeit der Kosten einer Ertüchtigungsmassnahme über die so genannte Rettungseffizienz. Die wichtigsten drei Parameter sind dabei die mittlere Personenbelegung P_B , der Erfüllungsfaktor α_{eff} als Quotient aus normengemässen Widerstand im Istzustand und normengemässer Auswirkung der Bemessungssituation Erdbeben sowie der Erfüllungsfaktor α_{int} nach Realisierung der betrachteten Massnahme.

Ausgehend von einer typischen Restnutzungsdauer von 50 Jahren ergeben sich gemäss SIA 2018 verhältnismässige Ertüchtigungskosten von CHF 3'000.-- pro Person falls $\alpha_{eff} = 0,25$ ist. Bei einem noch kleineren Erfüllungsfaktor steigen sie aufgrund des Kriteriums der Zumutbarkeit rasch an auf z.B. CHF 52'000.-- pro Person falls $\alpha_{eff} = 0,15$. In Tabelle 2 sind die 12 Musterbeispiele der Bauwerksklassen I und II mit den wichtigsten Kriterien für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Erdbebenertüchtigungsmassnahmen zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Kosten pro Person der mittleren Personenbelegung P_B meist unter den Grenzwerten gemäss SIA 2018 liegen. Die 3 Gebäude der Bauwerksklasse III in Tabelle 1 wurden weggelassen, da bei solchen Lifeline-Gebäuden zusätzliche Kriterien im Einzelfall zu berücksichtigen sind.

Die beiden Gebäude mit relativ hohen Kosten pro Person (Gymnasium in Gossau und Einkaufszentrum in Fribourg in Tabelle 2) wurden in den Jahren 2001 bzw. 2002 ertüchtigt, d.h. vor Erscheinen der Norm SIA 2018 (2004) mit den erwähnten Kriterien der Verhältnismässigkeit.

Gebäude	Zone	BWK	PB	α_{eff}	α_{int}	Kosten in kCHF	Kosten in CHF pro PB
Schulgebäude in Monthey	Z3b	II	56	0,15	0,8	540	9600
Wohn- und Geschäftshaus in Sion	Z3b	II	85	0,2	1,0	130	1500
Verwaltungsgebäude in St. Maurice	Z3a	II	2	0,17	0,7	50	25'000
Wohngebäude in Crans-Montana	Z3a	I	6	0,2	1,0	150	25'000
Gymnasium in Gossau	Z1	II	25	0,3	1,0	370	15'000
Einkaufszentrum in Fribourg	Z1	II	135	0,5	1,0	1700	13'000
Kinderklinik Aarau	Z1	II	350	0,1	1,0	900	2600
Schulgebäude in Zürich	Z1	II	48	0,2	1,1	130	2700
Radiostudio Zürich	Z1	II	150	0,3	1,0	340	2300
Einkaufszentrum in Winterthur	Z1	II	71	0,2	1,0	120	1700
Gymnasium in Bern	Z1	II	200	0,1	0,5	300	1500
Hörsaalgebäude HPH, ETH Zürich	Z1	II	200	0,25	1,0	500	2500

Tabelle 2: Kriterien für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Erdbebenertüchtigungsmassnahmen der Gebäude von Tabelle 1 (ohne BWK III).

4 FOLGERUNGEN

Bei Neubauten bleiben die Kosten der Erdbebensicherung trotz Verschärfung der Erdbebenbestimmungen in den neuen Tragwerksnormen praktisch vernachlässigbar, falls die Regeln des erdbebengerechten Entwurfs befolgt werden. Bei bestehenden Bauten werden die Kosten der Erdbebensicherung durch die neuen Kriterien der Verhältnismässigkeit in den meisten Fällen auf wenige Prozente des Gebäudewertes begrenzt. Aus den hier betrachteten Kosten bei einzelnen Gebäuden kann nicht direkt auf die Kosten der Erdbebenertüchtigung des gesamten Gebäudebestandes geschlossen werden, da bei einem grösseren Teil der bestehenden Bauten der Ist-Zustand als genügend erdbebensicher akzeptiert werden kann.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Bachmann, H., 2002. Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden. Richtlinie des BWG, Bundesamt für Wasser und Geologie: Biel.
- Dazio, A., 2005. Vorlesung Erdbebensicherung von Bauwerken, Kapitel 7: Bemessung und konstruktive Durchbildung von Hochbauten. Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH: Zürich.
- Duvernay, B., Anliker, E.M., 2006. Kostenauswirkungen durch In-Kraft-Treten der neuen Tragwerksnormen SIA 260 bis 267 für repräsentative Verwaltungsgebäude aus Stahlbeton des Bundes. Bauingenieur, 81, S. 57 - 71.
- Peruzzi, R., Mittaz, X., 2005. Surcoûts du parasismique – Exemples construits. In: Tagungsband “Sécurité parasismique des bâtiments: Aspects techniques –juridiques et bancaires, liens économiques et exemples pratiques”, Sion 30. September 2005, S. 1 - 25.
- Priestley, M.J.N., 2003. Myths and Fallacies in Earthquake Engineering Revisted. IUSS Press: Pavia.
- SIA 262, 2003. Betonbauten. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich.
- SIA 2018, 2004. Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich.
- Wenk, T., 2005. Seismische Ertüchtigung von Bauwerken: Fallstudie Schweiz. Bautechnik, 82, S. 539 - 543.
- Wenk, T., 2007. Erdbebenertüchtigung von Bauwerken – Strategie und Beispielsammlung aus der Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern (in Vorbereitung).