

ERDBEBENERTÜCHTIGUNG VON MAUERWERKSBAUTEN MIT HOLZELEMENTEN

KONZEPTSTUDIE

**Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Projekt 2010.07**

Brunner Roland	Lignum, Holzwirtschaft Schweiz
Jung Pirmin	Pirmin Jung Ingenieure für Holzbau AG
Steiger René	Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen
Wenk Thomas	Wenk Erdbebeningenieurwesen & Bau- dynamik GmbH
Wirz Niklaus	Pirmin Jung Ingenieure für Holzbau AG

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
VORWORT	4
1. ZUSAMMENFASSUNG	5
2. MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	7
2.1 MOTIVATION ZUM PROJEKT.....	7
2.2 BEDEUTUNG DER THEMATIK	7
2.3 ZIELE DER KONZEPTSTUDIE.....	8
2.4 METHODIK	8
3. LITERATURSTUDIE	9
3.1 ERDBEBENERTÜCHTIGUNG WELTWEIT	9
3.2 ERDBEBENERTÜCHTIGUNG IN DER SCHWEIZ.....	10
3.3 ERDBEBENERTÜCHTIGUNG IN DER NORMUNG	10
3.4 ERDBEBENERTÜCHTIGUNG IN DER HOLZFORSCHUNG	10
3.5 ERDBEBENSICHERUNG VON HOLZBAUTEN	11
4. GEBÄUDEBESTAND IN DER SCHWEIZ	12
4.1 MAUERWERKSBAUTEN.....	12
4.2 ERDBEBENSICHERHEIT	14
5. UMGANG MIT BESTEHENDEN GEBÄUDEN	15
5.1 GENERELLE VORGEHENSWEISE BEI DER ERHALTUNGSPLANUNG	15
5.2 VORGEHENSWEISE BEI DER ERDBEBENERTÜCHTIGUNG.....	16
5.3 ZU BEACHTENDEN RANDBEDINGUNGEN.....	16
5.3.1 <i>Bauphysik</i>	16
5.3.2 <i>Bauprozess</i>	16
5.3.3 <i>Weitere Aspekte</i>	17
5.4 TRAGSICHERHEIT UND GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT	17
5.4.1 <i>Normative Grundlage in der Schweiz</i>	17
5.4.2 <i>Nachweis der Tragsicherheit</i>	17
5.4.3 <i>Nachweis der Gebrauchstauglichkeit</i>	18
5.4.4 <i>Verhältnismässigkeit und Zumutbarkeit</i>	18
5.5 BRANDSCHUTZ	19
5.5.1 <i>Tragwerk</i>	19
5.5.2 <i>Aussenwände</i>	19
5.5.3 <i>Innenwände</i>	19
5.5.4 <i>Geschossdecken</i>	19
5.5.5 <i>Nachweis zur Erfüllung der Brandschutzanforderungen</i>	20
6. ERTÜCHTIGUNGSSTRATEGIEN	21
6.1 STRATEGIE 1: REGULARITÄT VERBESSERN	21
6.2 STRATEGIE 2: VERSTÄRKEN	22
6.3 STRATEGIE 3: DUKTILITÄT ERHÖHEN	23
6.4 STRATEGIE 4: SCHWÄCHEN	24
6.5 STRATEGIE 5: ERDBEBENEINWIRKUNG DURCH DÄMPFUNG REDUZIEREN	25
6.6 STRATEGIE 6: MASSE REDUZIEREN	25
6.7 STRATEGIE 7: NUTZUNG ÄNDERN	25
7. IDENTIFIKATION VON SCHWACHSTELLEN UND DEREN BEHEBUNG	26
7.1 MAUERWERKSWÄNDE.....	26
7.1.1 <i>Beanspruchung in der Wandebene</i>	26
7.1.2 <i>Beanspruchung quer zur Wandebene</i>	26
7.2 UNTERBROCHENE ODER VERSETZTE WÄNDE.....	27
7.3 NICHT TRAGENDE WÄNDE.....	27
7.4 HOLZDECKEN	27

7.5	VERBINDUNGEN ZWISCHEN DECKEN UND WÄNDEN	27
7.6	UNTERGESCHOSSE	27
7.7	FUNDATION	27
8.	KONSTRUKTIVE UMSETZUNG.....	28
8.1	VERSTÄRKUNG VON MAUERWERKSWÄNDEN IN DER WANDEBENE	28
8.2	VERSTÄRKUNG VON MAUERWERKSWÄNDEN QUER ZUR WANDEBENE	28
8.2.1	<i>Fassadenwände aussen ertüchtigt</i>	29
8.2.2	<i>Fassadenwände innen ertüchtigt</i>	30
8.3	ERGÄNZUNGEN BEI UNTERBROCHENEN ODER VERSETZTEN WÄNDEN	31
8.4	NICHT TRAGENDE WÄNDE ERSETZEN	32
8.5	NICHT TRAGENDE WÄNDE VERSTÄRKEN	33
8.6	HOLZDECKEN UND DEREN VERBINDUNGEN ZU DEN WÄNDEN VERSTÄRKEN	34
8.6.1	<i>Trockenbaulösung</i>	34
8.6.2	<i>Lösung als Holz-Beton-Verbund</i>	35
9.	ERGEBNISSE UND FORSCHUNGSBEDARF.....	36
9.1	ERREICHTE ZIELE	36
9.2	BEGRÜNDUNG DER ABWEICHUNGEN VON DEN ZIELEN	37
9.3	ZUSAMMENFASSUNG DER UMFRAGE BEI DEN INDUSTRIEPARTNERN	37
9.4	BEDARF AN FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	38
10.	LITERATURVERZEICHNIS.....	39
ANHANG A: UMFRAGE BEI DEN INDUSTRIEPARTNERN.....		42
ANHANG A1: RETOURNIERTE FRAGEBOGEN		42
ANHANG A2: QUALITATIVE ZUSAMMENFASSUNG DER GESPRÄCHE.....		46
ANHANG B: FINANZIERUNGSGESUCH AN DEN WALD- UND HOLZFORSCHUNGSFONDS WHFF – ERDBEBENERTÜCHTIGUNG VON MAUERWERKSBAUTEN MIT HOLZELEMENTEN: VOM 21.09.2010		47
PROBLEMBESCHREIBUNG.....		47
ZIELE DES PROJEKTS		48
BEDEUTUNG DES PROJEKTS		48
<i>Bedeutung für die Praxis</i>		48
<i>Bedeutung für die Schweizer Holzindustrie</i>		48
STAND DES WISSENS AUF DEM GEBIET.....		48
MOTIVATION ZUM ANTRAG		49
BISHERIGE ABKLÄRUNGEN		49
FORSCHUNGSPLAN		50
PROJEKTORGANISATION		51
<i>Beteiligte Institutionen</i>		51
<i>Interessierte Industriepartner</i>		51
<i>Verantwortlichkeiten im Rahmen der Konzeptstudie</i>		51
ZEITPLAN.....		52
FINANZPLAN UND BENÖTIGTE MITTEL		52
<i>Aufwand</i>		52
<i>Finanzierung</i>		52
ANTRAG		52
LITERATUR		53
STICHWORTE.....		53
KEYWORDS		53
KONTAKTE.....		54

Vorwort

Holz ist der einzige nachwachsende Baustoff und weist eine ausgeglichene CO₂-Bilanz auf. Ein verstärkter Einsatz von Holz nicht nur im Neubau sondern auch beim Bauen im Bestand ist daher anzustreben. Vor diesem Hintergrund ist es durchaus naheliegend, dass bei Sanierungen vermehrt Holzbaulösungen zur Anwendung kommen. Zudem, mit Holz können ohne aufwendige zusätzliche Massnahmen bei adäquater Konzeption, Konstruktion und Bemessung erdbebengerechte Hochbauten auch mehrgeschossig erstellt werden. Holz hat als Baustoff, was das Erdbebenverhalten von entsprechenden Tragstrukturen betrifft, einige Vorteile gegenüber anderen Baustoffen, so z. B. die bezogen auf die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit und Steifigkeit) geringe Masse. Die Frage stellt sich also, wie sehen effiziente Holzbaulösungen zur energetischen Sanierung und gleichzeitigen Erdbebenertüchtigung aus und wie können allenfalls vorhandene Problemstellen bei Sanierungen effizient mit Holzbaulösungen behoben werden?

Das Projekt wurde finanziell durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung im BAFU und durch Eigenleistungen aller Projektbeteiligten unterstützt. Folgende Industriepartner haben mit ihrem Fachwissen am Projekt mitgewirkt:

ZZ Wancor AG
Althardstrasse 5
8105 Regensdorf

SFS unimarket AG
Nefenstrasse 30
9435 Heerbrugg

Schilliger Holz AG
Haltikon 33
6403 Küsnacht

Pius Schuler AG
Kronenstrasse 12
6418 Rothenthurm

Zürich, 09. November 2012
Roland Brunner

1. Zusammenfassung

Die Projektidee zur Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen entstand im Rahmen der Erarbeitung der Dokumentation „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“ (Brunner et al., 2010) und dem davor erschienen Lignatec „Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten“ (Jung et al., 2009). Dem Bauen mit Holz liegt eine schier unendliche Konstruktionsvielfalt aus Kombinationen von Verbindungsmitteln und Holzwerkstoffen zugrunde, das dem „Holzbaukundigen“ die Entwicklung einer optimal auf die Anforderungen abgestimmten Konstruktion erlaubt. Werden die Vorteile von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber anderen, tragend einsetzbaren Baustoffen genutzt, z.B. die tiefe Wärmeleitfähigkeit sowie die Transportfähigkeit und somit die Vorfertigbarkeit, erschliesst sich beim Betrachten möglicher Anwendungsgebiete mit hohem Volumen relativ naheliegend die Ertüchtigung von Mauerwerksbauten.

Die Hauptidee bestand bei der Projektinitiierung in der Annahme, die Mauerwerkswände in den Fassaden mit aussenliegenden Holzelementen zu dämmen und zu bekleiden sowie dabei gleichzeitig die Mauerwerkswand zu verstärken. Einige Vergleichsrechnungen der Steifigkeiten in der Wandebene machten schnell deutlich, dass die erforderlichen Dicken an Holzwerkstoffplatten von einigen 100 mm (siehe Kapitel 8.1) zu unrealistischen Lösungen führen würden, sofern man von grossflächigen Anwendungen und unversehrtem Mauerwerk ausgeht.

Der grösste Teil der Gebäude in Schweizer Städten weist Wände aus Mauerwerk auf (siehe Kapitel 4). Wegen mangelnder Beachtung der Erdbebeneinwirkung wird beziehungsweise wurde häufig unbewehrtes Mauerwerk aus Backsteinen für Gebäude mit mehreren Stockwerken verwendet. Gesamthaft gesehen sind Mauerwerksbauten für Erdbeben sehr verletzlich. Auf dem Markt existieren Systeme, die das Bewehren (Armieren) von tragenden Backsteinwänden erlauben. Während solche Systeme im Neubau durchaus Anwendung finden, ist die nachträgliche Erdbebenertüchtigung von bestehenden Mauerwerksbauten mit diesen Systemen oft nur sehr aufwendig realisierbar. Bei mangelhafter Erdbebensicherheit oder aus anderen Gründen ungenügendem Tragwiderstand werden Mauerwerksbauten häufig mit aufgeklebten Lamellen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff ertüchtigt. Weitere, häufig praktizierte Ertüchtigungsmassnahmen sind das nachträgliche Einbauen von schlanken, über die gesamte Gebäudehöhe durchlaufenden Stahlbetonwänden, das Einbauen von Stahlfachwerken oder das vertikale Vorspannen der Mauerwerkswände.

Nach Möglichkeit sollten Erdbebenertüchtigungsmassnahmen zusammen mit Umbauten und Instandsetzungen realisiert werden, um Synergien zu nutzen (siehe Kapitel 5). Die Kosten der Erdbebenertüchtigung können so erheblich gesenkt werden. Mit gleicher Überlegung sollte die Überprüfung auch die Erdbebensicherheit umfassen, wenn für ein Bauwerk bauliche Massnahmen wie Instandsetzungen oder Umbauten geplant sind, um die erforderlichen Massnahmen frühzeitig in die Planung einbeziehen zu können.

Die Analyse des Gebäudebestandes (Kapitel 4) von Mauerwerksbauten und deren Schwachstellen (Kapitel 7) legt die Potentiale der Anwendung von Holzelementen in der gesamten Breite dar. Eine Anwendung ergibt sich aus der Grundidee, Holzelementen innen- oder aussen an der Fassade anzubringen und damit das Mauerwerk für Beanspruchungen quer zur Wandebene zu stabilisieren (Lagesicherung, Stabilität; siehe Kapitel 7.1.2). Andere Anwendungen wären das Ergänzen von unterbrochenen oder versetzten Wänden durch Holzelemente bei Fassaden und/oder Innenwänden sowie das Ersetzen von nicht tragenden Wänden in Mauerwerk durch leichtere Wände in Holzbauweise. Spezielle Aufmerksamkeit sollten auch bestehende Holzdecken in Mauerwerksbauten erhalten (siehe Kapitel 7.4 und 7.5), denn deren Kraftübertragung und Steifigkeit in der Deckenebene ist oft ungenügend. Diese Deckenkonstruktionen können grossflächig durch eine steife horizontale Scheibe aus Holz verstärkt werden. Ebenso kritisch sind die Verbindungen zwischen den Decken und den Wänden zu beurteilen, was oft eine Verstärkung dieser Anschlüsse im Zusammenhang mit der Scheibenausbildung in der Deckenebene zur Folge haben sollte.

Im eigenen Kapitel 8 wurden zu den erkannten Schwachstellen und Lösungsansätzen konstruktive Umsetzungen ausgearbeitet, wobei den Anforderungen aus der Bauphysik und dem Brandschutz besondere Beachtung gegeben wurde. Auf die Bemessung wurde nicht im Detail eingegangen, da die Detaillösung zum einen einer grossen objektspezifischen Vielfalt von Parametern unterliegt und zum anderen die Umsetzbarkeit als eher unproblematisch erschien.

Die Ergebnisse aus der Konzeptstudie erscheinen einfach und naheliegend. Sicher ein Indiz dafür, dass mit wenigen, aber zielgerichteten Massnahmen, effiziente Gebäudeertüchtigungen realisiert werden könnten. Die Interviews mit Projektpartnern zeigen aber auch, dass dennoch eine weitere Hoffnung darin besteht, Mauerwerkswände in der Ebene mit Holzelementen zu verstärken. Einige Projektpartner sehen trotz hoher Steifigkeit der Mauerwerkswände eine Ertüchtigung mit Holzelementen bei Mauerwerkswänden in gerissenem oder beschädigtem Zustand. Eine umfassende Literaturstudie zum Thema Holzbau und Erdbeben (siehe Kapitel 3) zeigte, dass die Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen weltweit noch unbekannt ist. Woher entstammt dann die Begeisterung aller beteiligten Fachleute für das Projekt? Gibt es einen vergessenen, wesentlichen Aspekt oder waren die Vergleichsrechnungen nach Kapitel 8.1 zu vereinfachend? Sind alle Hoffnungen unbegründet und die Unterschiede der beiden Materialien in der Schubsteifigkeit doch so hoch, dass die Grundidee einfach fallen gelassen werden muss?

Als nächster Schritt in der Bearbeitung der Thematik müssten sicherlich einzelne Bauprojekte konkreter aufgegriffen werden, um die Ertüchtigungsmassnahmen genauer evaluieren zu können. Darauf aufbauend könnte der Bedarf an Parameterstudien zur Erfassung von Randbedingungen und deren Streubereich sowie zur Auslegung von Ertüchtigungen, inklusive allfälliger Versuche zur Bestimmung der Bauteileigenschaften unter zyklischer Einwirkung. Sinnvoll wäre sicherlich auch eine Kleinversuchsreihe zum Belegen respektive Verwerfen des Verformungs- und Versagensverhaltens von mit Holzelementen verstärkten Mauerwerkswänden in und quer zur Wandebene.

2. Motivation und Zielsetzung

2.1 Motivation zum Projekt

Die Projektidee entstand im Rahmen der Erarbeitung der Dokumentation „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“ (Brunner et al., 2010) und dem davor erschienen Lignatec „Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten“ (Jung et al., 2009). Dem Bauen mit Holz liegt eine schier unendliche Konstruktionsvielfalt aus Kombinationen von Verbindungsmitteln und Holzwerkstoffen zugrunde, das dem „Holzbaukundigen“ die Entwicklung einer optimal auf die Anforderungen abgestimmten Konstruktion erlaubt. Werden die Vorteile von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber anderen, tragend einsetzbaren Baustoffen genutzt, z.B. die tiefe Wärmeleitfähigkeit sowie die Transportfähigkeit und somit die Vorfertigbarkeit, erschliesst sich beim Betrachten möglicher Anwendungsgebiete mit hohem Volumen relativ naheliegender die Ertüchtigung von Mauerwerksbauten. Dabei sind u. a. die folgenden Punkte zu beachten:

- Da beide Baustoffe, Holz wie Mauerwerk, ein sprödes Bruchverhalten aufweisen, muss die Dissipation der Erdbebenenergie in den Verbindungen zwischen beiden Werkstoffen erfolgen. Die Prüfung auf dem Markt vorhandener oder allenfalls die Entwicklung neuer, speziell auf die Energiedissipation ausgelegter Verbindungsmittel ist also ein Schlüsselement. Für den Einsatz von Holzkonstruktionen spricht, dass es verschiedenste Holzwerkstoffe und Verbindungsmittel gibt, die sich optimal ergänzend auf die Festigkeits- und Verschiebungsanforderungen der Sanierungsmaßnahme abstimmen lassen.
- Die Verstärkungselemente müssen so appliziert werden, dass die resultierende Wandkonstruktion als Ganzes aus bauphysikalischer Sicht keine Probleme aufweist, bezüglich Wärme- und Feuchte-, sowie Schallschutz. Für den Einsatz von Holzkonstruktionen spricht, dass ein Ein- oder Aufbringen von zusätzlichen Tragwerksteilen nicht grundsätzlich zu einer Wärmebrücke führt, da Holz und Holzwerkstoffe gegenüber anderen, für Tragwerke geeignete Baustoffe eher geringe Wärmeleitfähigkeiten aufweisen.
- Den Aspekten des Brandschutzes muss man gerecht werden bzw. bleiben. Hier gibt es eher Vorbehalte gegenüber dem Baustoff Holz im Vergleich zu massiven Baustoffen, jedoch wurden in den letzten Jahren entsprechende Lösungskonzepte für brennbare Baustoffe im Einsatz bei mehrgeschossigen Gebäuden entwickelt.

Da das Autorenteam des erwähnten Projektes (Jung et al., 2009, und Brunner et al., 2010) sich fachlich optimal ergänzte und persönlich äusserst gut harmonierte, wurde die Konzeptstudie in derselben Konstellation realisiert. Dies erlaubte eine effiziente Erörterung der relevanten Machbarkeitshürden und Potentiale als Grundlage für die Planung eines breiter abgestützten Forschungsvorhabens.

2.2 Bedeutung der Thematik

Der Grossteil der Gebäude in der Schweiz ist in Mauerwerksbauweise erstellt worden. Trotz den Bestrebungen der letzten Jahre, insbesondere bezüglich energetischer Ertüchtigung des Gebäudebestandes, besteht nach wie vor ein grosser Ertüchtigungsbedarf. Würde es gelingen, ein Konzept vorzustellen, welches neben der thermischen Instandstellung auch die Erdbebenertüchtigung im selben Arbeitsgang und in derselben Bauteilebene erlaubt, wäre dies allenfalls ein Argument, welches mehr Bauherren für bauliche Eingriffe motivieren würde.

Können effiziente Lösungen zur Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen gefunden werden, würde dies neue Anwendungsgebiete für den Baustoff Holz und für die Holzbauunternehmen im Bereich der Ertüchtigung schaffen sowie die Argumentation zum Ertüchtigen mit Holzelementen stärken. Zudem erlaubten solche Lösungen erstmals eine gemeinsame Kommunikation zwischen Ziegelei- und Holzindustrie respektive eine Kommunikation mit Organisationen, welche insbesondere auch Eigentümer von Gebäuden in Mauerwerksbauweise vertreten.

2.3 Ziele der Konzeptstudie

Mittels einer Konzeptstudie sollten als Vorbereitungsarbeit für ein späteres, grösseres Forschungsvorhaben nachfolgende Aspekte untersucht werden:

- Abschätzung des Bedarfs an Ertüchtigungsmassnahmen bei Mauerwerksbauten in der Schweiz, aufgeteilt nach Erdbebenzonen und Bauwerksklassen gemäss SIA 261 (2003).
- Identifikation der massgeblich durch Erdbeben gefährdeten Tragwerksteile von Mauerwerksbauten.
- Abschätzung der aus Erdbeben auftretenden Kräfte und Verformungen.
- Vergleichsrechnungen Mauerwerkswände, Holzwände unterschiedlichsten Aufbaus.
- Materialtechnische und konstruktive Evaluation von möglichen Verstärkungs- und Versteifungselementen aus Holz.
- Lage von Elementen aus Holz (bezüglich z. B. einer Wand: innen, aussen, beidseitig).
- Befestigung der Elemente aus Holz an der bestehenden Tragstruktur. Praktische Umsetzung (Montage, Kontrolle, Unterhalt, etc.). Energiedissipation.
- Zusammenstellung der wichtigsten Aspekte, welche aus bauphysikalischer (Wärme-, Feuchte- und Schallschutz) und aus brandschutztechnischer Sicht zu beachten sind.

2.4 Methodik

Bei der Projektumsetzung sind wir gemäss nachfolgendem Forschungsplan vorgegangen. Dabei konnten die meisten Fragestellungen mit dem Konsultieren der Literatur beantwortet werden. Der wesentliche Mehrwert aus dem Projekt konnte in Kapitel 8 mit der konstruktiven Umsetzung der im Kapitel 7 zugrunde gelegten Analyse der Identifikation von Schwachstellen bei Mauerwerksbauten generiert werden.

1. Literaturstudium zum Thema
 - a. Übersicht zu diesem Thema in der Forschungsliteratur in Kapitel 3
 - b. Übersicht zum Potential von Ertüchtigungsmassnahmen in Kapitel 4
 - c. Vorgehen bei Ertüchtigungen in Kapitel 5
 - d. Mögliche Ertüchtigungsstrategien beim Anwenden von Holzelementen in Kapitel 6
2. Identifikation der zu verändernden Teile der Tragstruktur von Mauerwerksbauten
 - a. Erfassen der Schwachstellen von Mauerwerksbauten als Input vom Experten
 - b. Skizzieren möglicher Verstärkungsszenarien durch den Experten
3. Anforderungskatalog an einen Eingriff generell und an einen Eingriff mit Holzelementen
 - a. Betrachten von kritischen Anforderungen beim Anwenden von Holzelementen in Kapitel 5 aufgrund der Literatur und Diskussion im Autorenteam.
 - b. Auf das ausführliche Zusammenstellen der Anforderungen wurde verzichtet, da dies in einer Teilzusammenfassung verschiedener Normen geendet hätte.
4. Vorschläge von Instandstellungsstrategien unter Einsatz von Bauteilen aus Holz/HWS
 - a. Konstruktive Umsetzung der identifizierten Schwachstellen im Kapitel 8 mit Hinweisen Tragverhalten und der kritischen Anschlüsse sowie dem bauphysikalischen Verhalten als Ingenieursleistung aus dem Autorenteam.
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für ein Forschungsprojekt
 - a. Ergebnisse und Forschungsbedarf in Kapitel 9 aus der Diskussion im Autorenteam

3. Literaturstudie

3.1 Erdbebenertüchtigung weltweit

Während vielen Jahrzehnten war weltweit die Erdbebensicherung von Gebäuden auf Neubauten beschränkt. Erst nach den starken Erdbeben 1985 in Chile und 1989 in Loma Prieta in Kalifornien, beides Länder mit einer langen Tradition von Erdbebenbestimmungen in den Baunormen seit den 1930er-Jahren setzte eine Trendwende ein und bestehende Bauten rückten ins Interesse der nachträglichen Erdbebensicherung, der so genannten Erdbebenertüchtigung. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei den erwähnten beiden Erdbeben auch vermeintlich erdbebensichere Bauten, d.h. Bauten die gemäss den damals gültigen Erdbebennormen ausgelegt waren, schwere Schäden erlitten hatten. In der Folge wurden die Erdbebenbestimmungen verschärft, so dass ein umfassender Erdbebenertüchtigungsbedarf aller bestehenden Bauten entstand. In den letzten Jahren wurde die Erdbebenertüchtigung in allen Industrieländern mit Erdbebengefährdung ein Thema. Eine Datenbankrecherche von www.nicee.org/wcee der Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten zur Erdbebenertüchtigung in den Weltkonferenzen des Erdbebeningenieurwesens (World Conferences on Earthquake Engineering WCEE), die seit 1956 etwa alle vier Jahre stattgefunden haben, zeigt diese Entwicklung beispielhaft in untenstehender Abbildung. Der erste Beitrag zur Erdbebenertüchtigung erschien 1980, doch erst ab 1992 ist ein starker Zuwachs von Konferenz zu Konferenz zu erkennen, der den Zuwachs der Gesamtzahl der Beiträge bei weitem übertrifft.

Trotzdem ist unter den über 300 Beiträgen zur Erdbebenertüchtigung an den Weltkonferenzen kein einziger dem Thema Erdbebenertüchtigung mit Holz gewidmet. Die Datenbank scholar.google.com zeigt wohl vereinzelte Beiträge zum Thema Erdbebenertüchtigung von Holzbauten, wobei es sich meist um die Verstärkung traditioneller Holzbauten handelt, jedoch ebenfalls keine Beiträge zum Thema Erdbebenertüchtigung mit Holz. Als Beispiel sei Parisi & Piazza (2008) genannt, die eine Verstärkungsmethode für traditionelle zimmermannsmässige Holzverbindung mit Stahlbolzen oder Stahllamellen vorschlagen.

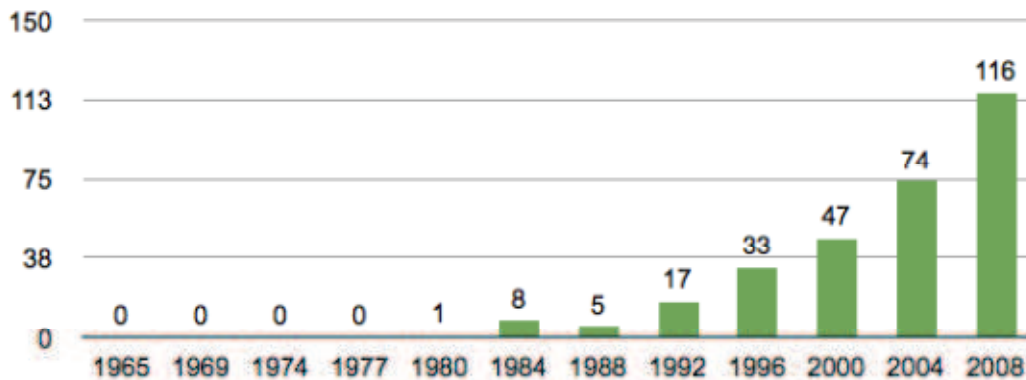


Abb.: Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten zur Erdbebenertüchtigung in den Weltkonferenzen des Erdbebeningenieurwesens WCEE seit 1965. Die grünen Flächen zeigen die Anzahl Publikationen mit zum Stichwort "Retrofit".

3.2 Erdbebenertüchtigung in der Schweiz

In der Schweiz stellte sich vermehrt die Frage der Erdbebensicherheit der bestehenden Bauten nach dem Inkrafttreten der Ausgabe 1989 der Norm SIA 160 Einwirkungen auf Tragwerke, in der die Erdbebenbestimmungen gegenüber der früheren Ausgabe 1970 der Norm SIA 160 verschärft wurden. Eine erste Fachtagung widmete sich diesem Thema (Ammann et al., 1992) und anschliessend wurden die Verstärkungstechniken in der SIA-Dokumentation D 093 (Ammann et al., 1993) umfassend dargestellt, jedoch ohne Holzbau, der damals noch keine Rolle spielte.

Nach einer weiteren Verschärfung der Erdbebennormen in den heutigen Tragwerksnormen SIA 260 ff. (2003) und der Publikation des Merkblatts SIA 2018 (2004) wurden in der Schweiz zahlreiche Gebäude erdbebenertüchtigt (Wenk, 2008). Insbesondere bestehende Mauerwerksbauten erfüllen die heutigen Anforderungen nicht und müssen auch unter Berücksichtigung der Kriterien der Verhältnismässigkeit des Merkblatts SIA 2018 erdbebenertüchtigt werden. Beschreibungen von aktuellen Projekten der Erdbebenertüchtigung in der Schweiz befinden sich ferner in (Dazio & Wenk, 2009), doch sind keine Beispiele darunter, die mit Holz ertüchtigt wurden.

3.3 Erdbebenertüchtigung in der Normung

Die Erdbebenertüchtigung wurde erstmals 1996 mit der Europäischen Vornorm ENV 1998 1-4 „Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1.4: Grundlagen - Verstärkung und Reparatur von Hochbauten“ normiert. Diese Vornorm wurde 2005 abgelöst durch den Eurocode 8, Teil 3 „Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden“. Mit dieser Norm wurde erstmals der Fachbegriff „Ertüchtigung“ normiert. Mit Ertüchtigung wird jede nachträgliche Verbesserung der Erdbebensicherheit mit baulichen Massnahmen bezeichnet unabhängig davon, ob es sich um eine Verstärkung oder eine andere Massnahme handelt. Mit dem Merkblatt SIA 2018 (2004) „Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben“ wurden in der Schweiz risikobasierte Kriterien zur Beurteilung der Erdbebensicherheit eingeführt, die erlauben, bestehende Bauten im Ist-Zustand als genügend erdbebensicher zu akzeptieren, auch wenn sie die Anforderungen in den heutigen Tragwerksnormen nicht voll erfüllen.

Ausserhalb von Europa wurde in Neuseeland die Erdbebenertüchtigung normiert (NZSEE, 2006). Ähnlich wie im Merkblatt SIA 2018 (2004) definiert NZSEE (2006) einen Erfüllungsfaktor für bestehende Bauten, der den Grad der Erfüllung der Anforderung an die Erdbebensicherheit für Neubauten misst. In den USA sind eine Reihe von ausführlichen Richtlinien des amerikanischen Zivilschutzes FEMA publiziert worden, die den Status von Vornormen haben. Die wichtigsten darunter zur Erdbebenertüchtigung sind die beiden Publikationen FEMA 273 (1997) „NEHRP-Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings“ und FEMA 547 (2006) „Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings“.

3.4 Erdbebenertüchtigung in der Holzforschung

Ein Studium der Inhaltsverzeichnisse der Proceedings der seit 1988 durchgeführten 11 World Conferences on Timber Engineering WCTE (WCTE, 2010) sowie der Proceedings der seit 1973 durchgeführten 43 Meetings der Working Commission W18 Timber Structures des International Council for Research and Innovation in Building and Construction CIB (CIB-W18, 2011) zeigt, dass weder die Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Bauteilen aus Holz noch die Erdbebenertüchtigung von Holztragwerken in den Konferenzbeiträgen thematisiert wurde. Vielmehr widmeten sich die Beiträge der Bemessung, konstruktiven Gestaltung und experimentellen Untersuchung von Holztragwerken, Bauteilen und Verbindungen. Ertüchtigungsmassnahmen, wie z. B. Verstärkungen, werden in den Proceedings durchaus thematisiert, jedoch nicht speziell mit Blick auf die Einwirkung Erdbeben und die damit zusammenhängende zyklisch dynamische Beanspruchung. Ein häufig bezüglich Verhalten unter seismischer Einwirkung experimentell, numerisch und analytisch untersuchtes Bauteil sind die im angelsächsischen und japanischen Raum weit verbreiteten „structural walls“ respektive „shear walls“. Bezüglich Herkunft der Publikationen sind die Nationen USA, Kanada, Japan und Neuseeland führend, in Europa insbesondere Italien und Slowenien, Länder mit hoher seismischer Gefährdung und gleichzeitig mit Kompetenz in Holzbauforschung.

3.5 Erdbebensicherung von Holzbauten

In den letzten Jahren widmeten sich Forschungsarbeiten mehr und mehr verformungs- und verhaltensbasierten Aspekten der Erdbebensicherung von Holzbauten, während die klassischen kraftbasierten Verfahren an Interesse einbüssten (Filiatrault & Folz, 2002). Als Beispiel sei das NEESWood-Forschungsprojekt in den USA genannt, bei dem mehrere Holzrahmengebäude im Massstab 1:1 auf dem Rütteltisch von Van de Lindt et al. (2006) getestet und von Pang & Rosowsky (2009) wurde ein verhaltensbasierte Regeln für die Erdbebenbemessung für mehrgeschossige Holzbauten in hoher Seismizität entwickelt. Ferner wurde in Neuseeland ein vorgespanntes Holzsystem für mehrgeschossige Bauten von Buchanan et al. (2008) entwickelt. Dank kontrollierten zyklischen Kippbewegungen (rocking) in den Verbindungen kann das Gebäude grosse horizontale Verformungen infolge Erdbeben erfahren, ohne dass sich bleibende plastische Verformungen ergeben.

Bei Forschungsarbeiten in Europa werden experimentelle Untersuchungen zum Erdbebenverhalten von Holzbauten weiterhin kraftbasiert mittels eines so genannten Verhaltensbeiwerts interpretiert. In Italien führten Ceccotti & Follesa (2006) Rütteltischversuche von Brettsperrholz (XLam)-Gebäuden mit kreuzweise verleimten Holzplatten mit Nagelverbindungen durch und bestimmten entsprechende Verhaltensbeiwerte für die Erdbebenbemessung. In der Schweiz untersuchten Steurer & Fuhrmann (2009) das zyklisch-statische Verhalten von Steko-Wandbauteilen. Gefunden wurde ein zyklisches Horizontalkraft-Horizontalverschiebungs-Verhalten mit stark eingeschnürten Hysteresekurven und nur geringfügiger Energiedissipation. Dieses Verhalten ist typisch für eine zyklische Kippbewegung (rocking) der Holzwand auf dem Fundament. Eine aktuelle Übersicht über Forschungsarbeiten zum Erdbebenverhalten in der Schweiz findet sich in Wenk (2011). Eine Übersicht über frühere Forschungsarbeiten fokussiert auf die in Mitteleuropa verbreiteten Holzbauweisen verfasste Blass (1994).

Die Nachteile der bisher üblichen kraftbasierten Verfahren zur Erfassung des Erdbebenverhaltens von Holztragwerken werden von Priestley et al. (2007) auf Seite 462 treffend zusammengefasst: "Die kraftbasierte Erdbebenbemessung ist nicht gut geeignet für Holztragwerke einerseits, weil deren Hystereseverhalten unregelmässig ist und andererseits, weil deren duktiles Verformungsvermögens nicht klar abgegrenzt werden kann. Trotzdem verhalten sich Holzbauten auch bei starken Erdbeben klar überdurchschnittlich, wie Graf & Seligson (2011) für Kalifornien aufgezeigt haben. Ein verformungsbasiertes Bemessungskonzept für Holzbauten bei niedriger und mittlerer Seismizität, wie es in der Schweiz vorherrschend ist, wird zur Zeit im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP66 von Steiger et al. (2011) erarbeitet.

4. Gebäudebestand in der Schweiz

4.1 Mauerwerksbauten

Der grösste Teil der Gebäude in Schweizer Städten weist entweder tragende oder nicht tragende Wände aus Mauerwerk auf. Wegen mangelnder Beachtung der Erdbebeneinwirkung wird bzw. wurde häufig unbewehrtes Mauerwerk aus Backsteinen für Gebäude mit mehreren Stockwerken (teilweise bis 15) verwendet. Backsteinwände sind zwar gut wärmedämmend bzw. wärmespeichernd und vertikale Kräfte aus Schwerlasten können relativ gut abgetragen werden, der vorwiegend horizontalen und zyklischen Erdbebeneinwirkung setzen Mauerwerksbauten jedoch wenig Widerstand und sehr wenig Verformungsvermögen entgegen (Bachmann & Lang, 2002). Mauerwerksbauten sind recht steif, sie haben meist eine hohe Grundfrequenz – im Plateaubereich des Bemessungsspektrums der Beschleunigung gemäss Norm SIA 261 (2003) – und sie erfahren entsprechend grosse Erdbebenkräfte. Andererseits sind unbewehrte Mauerwerkswände ziemlich spröde und zeigen eine verhältnismässig geringe Energiedissipation und Bruchdeformation. Ferner können Mauerwerkswände häufig die Beanspruchungen quer zur Wandebene infolge Erdbeben nicht aufnehmen (Dazio & Beyer, 2009). Gesamthaft gesehen sind Mauerwerksbauten für Erdbeben sehr verletzlich (Bachmann & Lang, 2002, und Dazio & Beyer, 2009).

Im Vergleich mit anderen europäischen Staaten mit hoher Erdbebengefährdung wie z. B. Italien liegt die Erdbebengefährdung in der Schweiz im Bereich niedrig bis mittel (Giardini et al., 2004). Trotzdem warnen Experten immer wieder davor, diese Gefahr nicht zu unterschätzen und weisen darauf hin, dass das Erdbebenrisiko in der Schweiz das bedeutendste Risiko aus Naturgefahren ist (Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, 2006) (Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, 2007). Erdbebennormen gibt es in der Schweiz erst seit 1970 (SIA 160, 1970). Diese wurden 1989 (SIA 160, 1989) und 2003 verschärft. Rund 60% der bestehenden Hochbauten in der Schweiz sind im Zeitraum vor 1970 (etwa 80% vor 1989) projektiert und erstellt worden und weisen eine unbekannt und oft ungenügende Erdbebensicherheit auf. Die seit 2003 für die Bemessung von Gebäuden in der Schweiz gültigen SIA-Tragwerksnormen der 260er-Reihe setzen die Eurocodes um. Im Falle des Erdbebennachweises ergab sich u. a. dadurch eine starke Erhöhung des bei der Bemessung anzusetzenden Bemessungserdbebens (Wenk, 2004). Während man bei Neubauten diese Anforderungen im Rahmen der Konzeption, Konstruktion und Projektierung mit einer erdbebengerechten Bauweise relativ einfach und in der Regel ohne Mehrkosten erfüllen kann (Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, 2006), tritt bei der Erhaltung bestehender Bauwerke häufig eine ungenügende Erdbebensicherheit auf und entsprechend werden Ertüchtigungsmassnahmen erforderlich.

Auf dem Markt existieren Systeme, die das Bewehren (Armieren) von tragenden Backsteinwänden erlauben. Während solche Systeme im Neubau durchaus Anwendung finden (in der Schweiz allerdings bisher wenig (Rupf et al., 2009)), ist die nachträgliche Erdbebenertüchtigung von bestehenden Mauerwerksbauten mit diesen Systemen oft nur sehr aufwendig realisierbar. Insbesondere Mischsysteme mit tragenden Mauerwerkswänden oder durch Mauerwerk ausgefachte Rahmen zeigen ein ungünstiges Erdbebenverhalten (Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, 2006). Bei mangelhafter Erdbebensicherheit oder aus anderen Gründen ungenügendem Tragwiderstand werden Mauerwerksbauten häufig mit aufgeklebten Lamellen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff ertüchtigt (Schwegler, 1995). Dies ist allerdings keine ideale Lösung, da auch die Verstärkungselemente und die Klebstoffe (üblicherweise Epoxidharze), wie das Mauerwerk ein sprödes Bruchverhalten aufweisen. Nur Matten mit Fasern in mehreren Richtungen sind in beschränkter Masse duktil (Schwegler, 1995). Eine weitere, häufig praktizierte Ertüchtigungsmassnahme ist das nachträgliche Einbauen von schlanken, über die gesamte Gebäudehöhe durchlaufenden Stahlbetonwänden oder von Stahlfachwerken oder das vertikale Vorspannen der Mauerwerkswände (Wenk, 2008). Generell soll die Verstärkung die Systemduktivität steigern, eine gleichmässige Rissverteilung über die gesamte Tragwandoberfläche erzeugen und den Tragwiderstand erhöhen (Schwegler, 1995).

In der vorliegenden Konzeptstudie wird auf den Wohnungsbau in der Schweiz fokussiert. In diesem Segment des Baubestandes liegt nach wie vor ein hoher Sanierungsbedarf vor, primär aufgrund der energetischen Ertüchtigung (Dämmen der Gebäudehülle, Haustechnik) sowie der Renditeoptimierung respektive -sicherung (Angebotsanpassung Nutzflächen, Werterhalt durch energetische Ertüchtigung und durch Unterhalt sowie Erhöhen der Nutzflächen durch Aufstocken und Erweitern). Rund 80%

dieser Gebäude, unabhängig von ihrem Standort, in der Stadt, in der Agglomeration oder im ländlichen Gebiet, verfügen über vernünftige Geschosshöhen von drei bis fünf Geschossen. Architekten, Energiefachleute und Bauingenieure werden direkt mit diesen Anliegen und Objekten konfrontiert, Spezialfragen tauchen meist erst in der Projektentwicklung oder erst in der Ausführungsphase auf.

Zu diesen Spezialfragen gehört auch die Erdbebenertüchtigung. Erste Erfahrungen aus untersuchten Objekten und ausgeführten Erdbebenertüchtigungen in der Schweiz (Wenk, 2008) zeigten, dass meist nur dort ertüchtigt werden muss, wo bereits grössere Mängel vorhanden sind. Im erwähnten Segment Wohnungsbau kann somit von nicht zwingend kritischen Situationen ausgegangen werden. Eine reine Erdbebenertüchtigung wäre in vielen Fällen als unverhältnismässig zu betrachten. Wird sie jedoch in der ohnehin geplanten energetischen Sanierung berücksichtigt, kann sie nach ersten Einschätzungen zum Nulltarif mitgeliefert werden. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen mögliche Ausgangslagen bezüglich zu Sanierenden respektive zu Ertüchtigenden Wohnbauten aus Städten und Agglomerationen.



Abb.: Stadthäuser an der Seebahnstrasse in Zürich. Viele der Fassaden sind ungedämmt oder bei einer ersten Sanierung nur minimal mit Dämmung versehen worden. Teilweise sind die Erscheinungsbilder der Fassaden erhaltenswert. Das zweite vollständig erkennbare Gebäude von rechts wurde bis im April 2006 um zwei Geschosse aufgestockt und erhielt hofseitig eine komplett neue, vorgebaute Fassade mit Balkonen.



Abb.: Stadthäuser an der Secheron in Genf. Bauten im originalen Erstellungszustand wechseln sich mit sanierten Bauten ab. Neue Fassadenbilder und eine Aufstockung um ein bis drei Geschosse scheinen sinnvoll.



Abb.: Agglomerationswohnbau an der Badenerstrasse in Schlieren. Der landesweit typische Bau aus den 60er-Jahren ist viergeschossig, besitzt noch ein Schrägdach und ist entweder ungedämmt (Einschalenmauerwerk mit Aussenputz) oder wurde in den 80er-Jahren nach der Energiekrise saniert (40-80mm Dämmung mit Aussenputz oder hinterlüfteter Fassadenbekleidung).



Abb.: Typischer Baubestand im Zürcher Seefeld. In der Regel vier- bis fünfgeschossig. Massive Bruchsteinwände ohne Dämmung wurden mit Sanierungen bezüglich ihrer Nutzung ausgereizt. Aktuelle Sanierungen sind primär auf Rendite orientiert, was vereinzelt auch zu Ersatzneubauten führt.

4.2 Erdbebensicherheit

Nach der Einführung der ersten Erdbebenbestimmungen in den SIA-Tragwerksnormen im Jahre 1970 (SIA 160, 1970) wurden die Anforderungen in den späteren Normengenerationen von 1989 und 2003 weiter verschärft. Die Hintergründe dafür waren neue Erkenntnisse im Erdbebeningenieurwesen und in der Seismologie und die Anpassung an die europäische Normung.

Der Gebäudebestand in der Schweiz hat sich seit 1970 kaum erneuert. Rund 55% aller Gebäude wurden vor Inkrafttreten der ersten Erdbebenbestimmungen in der Norm SIA 160 (1970) erstellt. Etwa 24% fallen in die Zeit zwischen 1971 und 1989. Lediglich 20% wurden seit 1990 nach aus heutiger Sicht modernen Erdbebennormen erstellt. Und nur 5% davon sind gemäss der heute gültigen Normengeneration von 2003 erstellt worden. Es muss jedoch auch bei diesen Gebäuden davon ausgegangen werden, dass aufgrund mangelnder rechtlicher Verpflichtungen die Erdbebenvorschriften der Normen oft nicht eingehalten wurden.

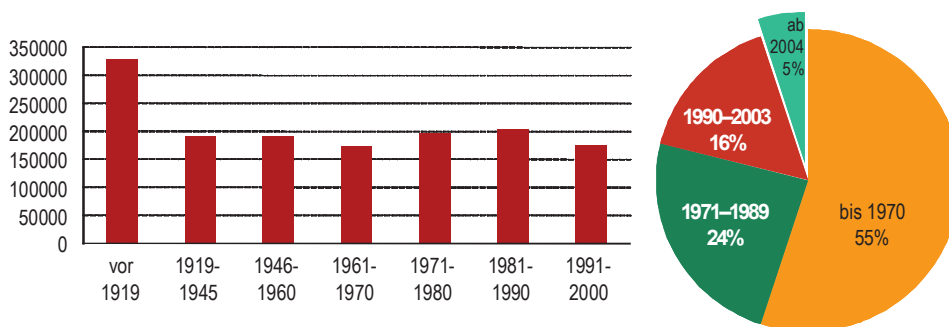


Abb.: Verteilung des Gebäudebestandes nach Bauperioden (links) und nach SIA Normengenerationen (rechts), basierend auf den Daten der Eidgenössischen Volkszählung aus dem Jahre 2000 (Wenk, 2008).

Dank konstruktiver Aspekte und Windbemessung weisen ältere Gebäude, die nicht auf seismische Einwirkungen ausgelegt wurden, einen gewissen Grundschutz gegen Erdbeben auf. Es ist jedoch davon auszugehen, dass viele ältere Bauten und vor allem diejenigen mit typischen Schwachstellen bezüglich Erdbebenverhalten die Anforderungen der heutigen Normen nicht erfüllen. Die wichtigsten und in der Schweiz am häufigsten beobachteten Schwachstellen mit negativen Folgen auf das Erdbebenverhalten sind:

Horizontal weiches Geschoss oder «Soft-Story»

Oft werden die massiveren Aussteifungen der oberen Geschosse, wie Wände, im Erdgeschoss weggelassen. Die verbleibenden Stützen im Erdgeschoss genügen nicht, um die Erdbebenbeanspruchungen zu übernehmen.

Unsymmetrische Aussteifungen

Bei im Grundriss unsymmetrisch angeordnetem Aussteifungssystem entsteht bei Erdbeben zusätzlich eine Verdrehung des Gebäudes. Dies kann zu frühzeitigem Versagen führen.

Mauerwerksbauten ohne aussteifende Stahlbetonwände

Aufgrund der einfachen Handhabung und der günstigen bauphysikalischen Eigenschaften ist Mauerwerk im Wohnungsbau weit verbreitet. Doch ist unbewehrtes Mauerwerk wegen seiner geringen Zugfestigkeit und des spröden Bruchverhaltens weniger geeignet für Erdbebenbeanspruchungen.

5. Umgang mit bestehenden Gebäuden

5.1 Generelle Vorgehensweise bei der Erhaltungsplanung

Im Rahmen der Erhaltungsplanung sind bestehende Gebäude durch die Eigentümerschaft bzw. von durch diese beauftragten Sachverständigen in regelmässigen Abständen zu überwachen, Instand zu halten, zu überprüfen und an die Entwicklung der technischen Normen anzupassen. Mit der Erhaltung eines bestehenden Gebäudes werden die folgenden Ziele verfolgt (SIA 469, 1997, und SIA 269, 2011):

- die Anforderungen aus der Nutzung zu erfüllen,
- die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen,
- die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten,
- den Erhaltungswert zu bewahren oder zu steigern (Komfortsteigerung),
- das Potential des Bauwerks auszuschöpfen.

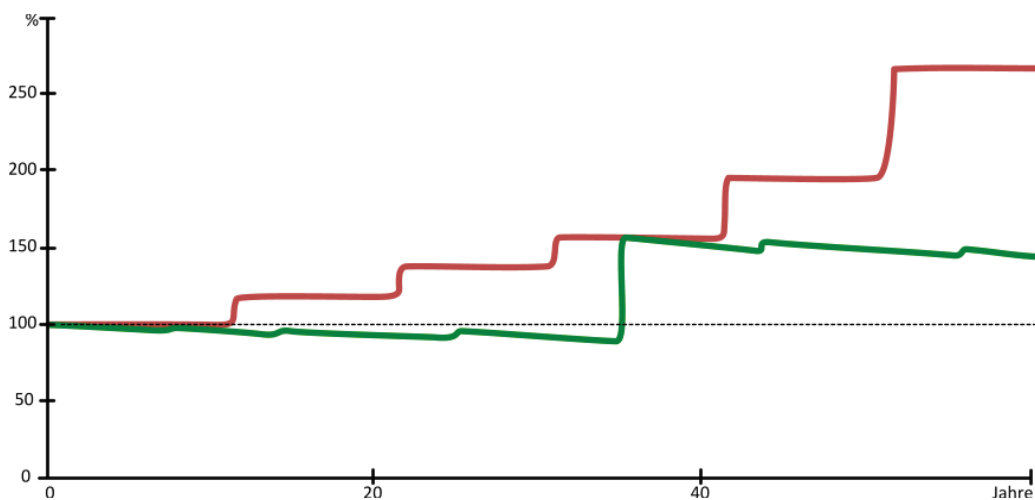


Abb.: Zeitverlauf der Summe von Anforderungen an Gebäude (rot) und des Zustandes eines Gebäudes (grün). Basis beider Zeitverläufe (100%) ist der Erstellungszeitpunkt des Gebäudes bei $t = 0$ mit einer Übereinstimmung von Anforderungen und Zustand. Die Anforderungen sind von der Gültigkeitsdauer respektive der Einführung neuer Norm- und Gesetzesgenerationen geprägt und nehmen in Intervallen von 5–10 Jahre zu. Der Zustand eines Gebäudes nimmt durch dessen Nutzung leicht ab und wird durch Unterhalte in kurzen Intervallen von 10–15 Jahre aufgewertet respektive durch Instandstellungen im langen Intervall von 30–40 Jahre wieder auf den Stand der Anforderungen gebracht.

Im Rahmen der Überprüfung eines bestehenden Gebäudes wird aufgrund betrieblicher und wirtschaftlicher Betrachtungen eine Restnutzungsdauer als Zeitspanne festgelegt, über welche die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit sichergestellt sein sollen. Sie liegt bei Gebäuden typischerweise im Bereich von 20 bis 50 Jahren. Am Ende der Restnutzungsdauer wird eine weitere Überprüfung fällig. Bei der Überprüfung sind die Informationen betreffend Einwirkungen (u. a. Erdbeben), Baustoff- und Baugrundeigenschaften, das Tragwerksmodell, die geometrischen Grössen sowie die Tragwiderstände und das Verformungsvermögen zu aktualisieren, d.h. unter Berücksichtigung sämtlicher verfügbarer und allenfalls zusätzlich zu erhebenden Informationen auf einen aktuellen Stand zu bringen (SIA 269, 2011).

Die Überprüfung erstreckt sich auf das gesamte Tragwerk einschliesslich aller nicht tragenden Bauteile, bei deren Versagen eine Gefährdung für Personen, wertvolle Sachgüter und die Umwelt zu erkennen ist. Sie erfolgt üblicher Weise stufenweise mit zunehmender Vertiefung. Der Grad der Vertiefung hängt von der Qualität der zur Verfügung stehenden Informationen über das Tragwerk und von dessen Bedeutung ab. Die Überprüfung umfasst eine Zustandserfassung, eine Zustandsbeurteilung und eine Massnahmenempfehlung (SIA 269, 2011). Tragwerksanalysen (quantitative und/oder empirische) im Rahmen der Zustandsbeurteilung können empirischer oder quantitativer Art sein. Die Überprüfung mündet in eine Massnahmenempfehlung, welche u. a. die Planung von Instandsetzungs-, Erneuerungs- und/oder Veränderungsmaßnahmen beinhalten kann.

Wird die Tragsicherheit und/oder Gebrauchstauglichkeit als ungenügend beurteilt, sind Ertüchtigungsmassnahmen zu planen.

Die ertüchtigte Bausubstanz ist zu überwachen (SIA 469, 1997) Die Intervalle der Überwachungsmassnahmen (gezielte Beobachtungen, regelmässige Inspektionen, periodische Kontrollmessungen, regelmässige Funktionskontrollen) und die zu überwachende Bauteile sind dabei in Abhängigkeit des Beanspruchungsgrades und der Bewitterungsverhältnisse festzulegen. Bei der Planung von Ertüchtigungsmassnahmen ist zudem die Zugänglichkeit der zu überwachenden Bauteile sicherzustellen, bzw. sind Baustoffe und Oberflächenbehandlungen vorzusehen, die einen Langzeitschutz später nicht mehr zugänglicher Bauteile gewährleisten.

5.2 Vorgehensweise bei der Erdbebenertüchtigung

Nach Möglichkeit sollten Erdbebenertüchtigungsmassnahmen zusammen mit Umbauten und Instandsetzungen realisiert werden, um Synergien zu nutzen. Die Kosten der Erdbebenertüchtigung können so erheblich gesenkt werden. Mit gleicher Überlegung sollte die Überprüfung auch die Erdbebensicherheit umfassen, wenn für ein Bauwerk bauliche Massnahmen wie Instandsetzungen oder Umbauten geplant sind, um erforderliche Massnahmen frühzeitig in die Planung einbeziehen zu können.

Bei der Ertüchtigung für die dynamische Einwirkung Erdbeben sind gegenüber der Vorgehensweise bei den üblichen Verstärkungsmassnahmen für statische Lasten einige Besonderheiten zu beachten. Eine erdbebengerechte Ertüchtigung sollte optimal auf das Zusammenwirken der drei Tragwerkeigenschaften Steifigkeit, Tragwiderstand und Verformungsvermögen abgestimmt sein. Zu vermeiden sind Ertüchtigungsstrategien, die zu stark auf die Veränderung einer einzelnen Tragwerkeigenschaft fokussiert sind, ohne dabei mögliche negative Auswirkungen auf andere Eigenschaften zu berücksichtigen (Wenk, 2008).

Weiter sollte das primäre Ziel der Ertüchtigung die Korrektur der Hauptschwachstelle bezüglich Erdbebenverhalten sein. Wichtige Aspekte sind ausserdem die Verbindung zwischen neuen und bestehenden Bauteilen sowie die Weiterleitung der Beanspruchungen über die Foundation in den Baugrund.

5.3 Zu beachtenden Randbedingungen

5.3.1 Bauphysik

Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz: diese Aspekte bestimmen den Gesamtnutzen der neu eingebrachten Konstruktion sowie die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes. Die Anforderungen unterscheiden sich dabei grundlegend nach Lage des Bauteiles (Aussenwand, Innenwand, Brandmauer, Geschossdecke usw.). Entsprechend wegweisend sind diese Kriterien bei einem Projektentwurf.

5.3.2 Bauprozess

Je nach Eingriff in die bestehende Bausubstanz ist eine Nutzung während der Ertüchtigung nur bedingt oder gar nicht möglich. Eine Teilnutzung kann durch eine Etappierung der Ertüchtigung sichergestellt werden, ist aber nur dann sinnvoll wenn die Lärmbelastung zumutbar ist und wenn eine Gefährdung der Nutzer ausgeschlossen werden kann. Werden Ertüchtigungsmassnahmen im Innenbereich ausgeführt (an Aussen- oder Innenwänden), ist eine Nutzung des Bauwerkes während der Ertüchtigung kaum möglich. Massnahmen an der Aussenseite der Fassade lassen dagegen eine Nutzung unter Rücksichtnahme auf die Nutzer in beschränktem Masse zu. Ertüchtigungsstrategien, welche auf der Aussenseite von Aussenwänden Massnahmen vorsehen, haben eher kleinere Eingriffe in die bestehende Bausubstanz zur Folge. Werden Tragwerksteile im Innern von Gebäuden ergänzt bzw. ertüchtigt, sind die erforderlichen Eingriffe meist wesentlich umfangreicher. In solchen Fällen werden Gebäude in der Regel in einen der Rohbauphase vergleichbaren Zustand zurückversetzt. Die Ausbildung von Anschlüssen und Verankerungen wird dadurch wesentlich einfacher. Zudem kann die bestehende Bausubstanz zuverlässiger überprüft und die gewählten Ertüchtigungsmassnahmen können besser auf das bestehende Tragwerk abgestimmt werden.

5.3.3 Weitere Aspekte

Bei Ertüchtigungsmassnahmen können sich fallweise weitere Fragen bzw. Randbedingungen ergeben, wie:

- Ortsbild
- Gesamterscheinung des Bauwerks
- Fassadenbild
- Denkmalpflege: Historische bedeutende Bauteile wie z.B. Mauerwerk mit Stuckaturen können hinter neu eingezogenen Leichtbauwänden in Holz geschützt und/oder durch diese stabilisiert werden.
- Grenzabstände
- Ausnutzungsziffer
- CO₂-Bilanz:
- Haustechnik
- Einbruchschutz
- etc.

5.4 Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

5.4.1 Normative Grundlage in der Schweiz

Am 1. Januar 2011 ist die neue SIA-Normenreihe 269 erschienen, welche sich als Pendant zu den Tragwerksnormen (260er-Reihe) nicht der Projektierung von Neubauten, sondern der Erhaltung von bestehenden Tragwerken widmet. Für die Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben gilt weiterhin das Merkblatt SIA 2018 (2004), bis es durch die zurzeit in Bearbeitung stehende Norm SIA 269/8 ersetzt wird.

Bei bestehenden Tragwerken wird die Einhaltung des in Tragwerksnormen SIA 260 bis 267 für die Projektierung von Neubauten geforderten Sicherheitsniveaus bezüglich Erdbebeneinwirkung nicht zwingend gefordert, sondern die Verhältnismässigkeit und die Zumutbarkeit der Massnahmenkosten soll beim Entscheid über eine Erdbebenertüchtigung berücksichtigt werden (SIA 2018, 2004).

5.4.2 Nachweis der Tragsicherheit

Unterscheidung Tragwerksbestand / Veränderung

Bei Veränderungen (wie z. B. An- und Umbauten, Ertüchtigungen) sind in der Regel neue Tragwerksteile gemäss den Normen SIA 260 bis 267 und bestehende Tragwerksteile gemäss der Normenreihe SIA 269, bzw. betreffend Erdbeben nach dem Merkblatt SIA 2018 zu behandeln.

Bauwerksklasse

Bei einem bestehenden Bauwerk wird die Bauwerksklasse aufgrund der zukünftigen Nutzung festgelegt.

Konzeptionelle und konstruktive Mängel

Bezüglich konzeptioneller und konstruktiver Mängel ist das Bauwerk hinsichtlich der Bedingungen der Tabelle 27 der Norm SIA 261 (2003) zu überprüfen. Falls zwingende Bedingungen nicht eingehalten sind, ist ein verfeinertes Berechnungsmodell für die rechnerische Beurteilung zu wählen, welches die Auswirkungen des Nichteinhaltens ausreichend genau berücksichtigt.

Nicht-duktilen und duktilen Tragwerksverhalten

Ältere, gemäss früheren Normen bemessene Bauwerke sind bezüglich des Erdbebenverhaltens meist der ungünstigen Kategorie des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens zuzuordnen und die erforderlichen Nachweise der Tragsicherheit können bei Verwendung der Neubaunormen nicht erbracht werden. Das Merkblatt SIA 2018 stellt Hilfsmittel bereit für eine Beurteilung der Erdbebensicherheit für bestehende Tragwerke und für die Entscheidung, ob ein Gebäude bezüglich Erdbebeneinwirkung ertüchtigt werden soll, oder der vorhandene Zustand weiterhin akzeptiert werden kann.

Rechnerische Beurteilung der Erdbebensicherheit

Die rechnerische Beurteilung der Erdbebensicherheit erfolgt durch einen Vergleich des Erfüllungsfaktors α_{eff} mit den Reduktionsfaktoren (Schwellenwerten) α_{adm} und α_{min} .

Der Erfüllungsfaktor α_{eff} bestimmt sich als das Verhältnis zwischen normengemässen Auswirkungen und dem normengemässen Widerstand bzw. dem normengemässen Verformungsvermögen. Beim kräftebasierten Verfahren ergibt sich der Erfüllungsfaktor, also das Verhältnis zwischen dem Überprüfungswert des Tragwiderstands bzw. Verformungsvermögens und dem Überprüfungswert einer Auswirkung, zu $\alpha_{eff} = R_d/E_d$. Die Schwellenwerte α_{min} und α_{adm} weisen Werte kleiner als 1 auf, da sie die Akzeptanz eines höheren Schadensausmasses für bestehende Bauten gegenüber Neubauten infolge der höheren Massnahmenkosten sowie eine reduzierte Restnutzungsdauer berücksichtigen. Es ergeben sich folgende Situationen im Nachweis:

$\alpha_{eff} < \alpha_{min}$	Massnahmen erforderlich
$\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$	Beurteilung der Verhältnismässigkeit; Massnahmen erforderlich, falls die Verhältnismässigkeit gegeben ist.
$\alpha_{adm} \leq \alpha_{eff}$	Keine Massnahmen empfohlen, weil in der Regel nicht verhältnismässig.

Massnahmen

Massnahmen können baulicher Art sein, mit dem Ziel die Tragsicherheit auf ein angemessenes Niveau zu erhöhen, oder betrieblicher Art, indem das Personenrisiko reduziert wird, so dass sich u. a. die Verhältnismässigkeit von baulichen Massnahmen verändert. Grundsätzlich ist ein normengemässer Zustand wie für Neubauten nach den Tragwerksnormen SIA 260 bis 266 anzustreben, d. h. $\alpha_{int} \geq 1,0$. Wenn die Verhältnismässigkeit von Massnahmen zur Erreichung des normengemässen Zustands gegeben ist, sind solche zu ergreifen. Es können auch Teilmassnahmen ergriffen werden, welche den Erfüllungsfaktor α_{int} erhöhen, ohne jedoch $\alpha_{int} = 1,0$ zu erreichen.

Vorgehen bei Mauerwerksbauten

Bei Mauerwerksbauten sind die Beanspruchungen sowohl in als auch senkrecht zur Wandebene zu betrachten. In der Regel erfolgt die Überprüfung von Mauerwerk nach dem kräftebasierten Verfahren unter Berücksichtigung eines Verhaltensbeiwerts $q = 1,5$ für unbewehrtes Mauerwerk.

Die verformungsbasierte Überprüfung, bei der die Erdbebensicherheit eines Bauteils durch einen Vergleich zwischen Auswirkung (Verformung) infolge Erdbebeneinwirkung mit dem Verformungsvermögen untersucht wird, soll für Mauerwerk in der zukünftigen Norm SIA 269/8 eingeführt werden.

Nicht tragende Bauteile

Für nicht tragende Bauteile, die im Falle eines Versagens Personen gefährden, das Tragwerk beschädigen oder den Betrieb wichtiger Anlagen beeinträchtigen können, sind sowohl das nicht tragende Bauteil selbst als auch dessen Verbindungen und Befestigungen oder Verankerungen zu überprüfen. Nicht tragende Bauteile sind für die Erdbebeneinwirkungen aus der Ebene gemäss Ziffer 16.7 der Norm SIA 261 zu untersuchen.

5.4.3 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Die im vorliegenden Projekt fokussierten mehrgeschossigen Wohnbauten entsprechen in der Regel der Bauwerksklasse BWK I. Für diese Bauwerksklasse ist kein Nachweis der Gebrauchstauglichkeit unter Erdbebeneinwirkung zu erbringen (SIA 261, 2003).

5.4.4 Verhältnismässigkeit und Zumutbarkeit

Die Verhältnismässigkeit oder Zumutbarkeit einer Erdbebensicherungsmassnahme wird beurteilt durch die Gegenüberstellung von Kosten (sicherheitsbezogene Massnahmenkosten) und Nutzen (Reduktion der Personenrisiken in Form von vermiedenen Todesopfern) unter Berücksichtigung der Sicherheitsansprüche des Individuums. Zu diesem Zweck ist in SIA 2018 (2004) ein einfaches semi-empirisches Verfahren basierend auf dem Erfüllungsfaktor, der durchschnittlichen Personenbelegung und der Restnutzungsdauer normiert.

5.5 Brandschutz

Gemäss VKF (2003) sind bestehende Bauten und Anlagen im Rahmen der Verhältnismässigkeit an die Brandschutzvorschriften anzupassen, wenn:

- a) wesentliche bauliche oder betriebliche Veränderungen, Erweiterungen oder Nutzungsänderungen vorgenommen werden;
- b) die Gefahr für Personen besonders gross ist.

Ein Eingriff in das Tragwerk, was eine Erdbebenertüchtigung in jedem Fall ist, stellt unter diesen Bedingungen eine wesentliche bauliche Veränderung dar und unterliegt somit den Brandschutzvorschriften (VKF, 2003).

Gemäss Artikel 11 von VKF (2003) wird das Schutzziel im Normalfall mit vorgeschriebenen Standardmassnahmen erreicht. Anstelle vorgeschriebener Brandschutzmassnahmen können alternativ Brandschutzmassnahmen als Einzel- oder Konzeptlösung treten, soweit für das Einzelobjekt das Schutzziel gleichwertig erreicht wird. Über die Gleichwertigkeit entscheidet die Brandschutzbehörde.

Für alle verwendeten Baustoffe ist die Richtlinie der Verwendung brennbarer Baustoffe zu berücksichtigen. Für sichtbare Oberflächen in Räumen gelten Mindestanforderungen von Brandkennziffer BKZ 4.2. Für sichtbare Oberflächen in Fluchtwegen sind nicht brennbare Baustoffe zu verwenden.

5.5.1 Tragwerk

Gemäss VKF (2003) gelten als Tragwerk von Bauten und Anlagen die Gesamtheit aller zur Lastaufnahme und Lastableitung sowie zur Stabilisierung notwendigen Bauteile und deren Verbindungen.

Neu eingebaute Konstruktionen zur Erdbebenertüchtigung werden zu Teilen des Tragwerkes. Die Tragfähigkeit (R) muss somit während einer bestimmten Zeit gewährleistet werden. Bauteile aus Holz sind mit Ausnahmen (Brandmauern und in Absprache mit der Brandschutzbehörde für die Sanierung bestehender Bauten) nur bis 60 Minuten Feuerwiderstand möglich (Lignum, 2007).

Die detaillierten Anforderungen sind Lignum (2005) zu entnehmen.

5.5.2 Aussenwände

Für tragende Aussenwände sind die Anforderungen an das Tragwerk zu berücksichtigen. Für nicht tragende Aussenwände gilt zu berücksichtigen, dass ab vier und mehr Geschossen die Anforderung EI30 besteht (Richtlinie Verwendung brennbarer Baustoffe von VKF, 2003). Weitere Anforderungen an einzelne Schichten sind gemäss Lignum (2009) umzusetzen.

5.5.3 Innenwände

Bei Ertüchtigungsmassnahmen an tragenden Innenwänden ist wirtschaftlich abzuwägen, ob die Ertüchtigungsmassnahme nur der Tragfähigkeit (R) oder gleichzeitig der Brandabschnittsbildung (EI) dienen soll.

Bei einem geforderten Feuerwiderstand von 90 Minuten sind Ertüchtigungsmassnahmen mit Holz für Brandmauern REI90 zwischen Einfamilienhäusern oder bei Sanierungen bestehender Bauten in Absprache mit der Brandschutzbehörde möglich (Lignum, 2007).

5.5.4 Geschossdecken

Geschossdecken sind mehrheitlich brandabschnittsbildende und tragende Bauteile (REI). Abhängig vom Umfang der Ertüchtigungsmassnahmen an Geschossdecken sind diese nur bezüglich Tragfähigkeit (R) oder bezüglich Brandabschnittsbildung und Tragfähigkeit (REI) zu beurteilen.

5.5.5 Nachweis zur Erfüllung der Brandschutzanforderungen

Der erforderliche Feuerwiderstand durch das gesamte Bauteil (katalogisierter Aufbau oder Bemessung) oder mit der Bekleidung erbracht werden.

Wird das Konzept der Bekleidung angewandt, besteht keine Anforderung an den Feuerwiderstand des Tragwerkes (Lignum, 2007).

Mit dem baulichen Brandschutz oder unter Einsatz von Sprinklern kann Holz für Tragwerke bei Wohn-, Büro- und Schulbauten bis zu sechs Geschosse eingesetzt werden.

Bei der Bemessung der Bauteile ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Erdbebeneinwirkung als auch Brand aussergewöhnliche Einwirkungen sind. Sie müssen bei der Bemessung von Tragwerken gemäss (SIA 261, 2003) nicht als gleichzeitig wirkend angenommen werden.

6. Ertüchtigungsstrategien

Die im Folgenden vorgestellten Ertüchtigungsstrategien wurden aus Wenk (2008) übernommen und auf Mauerwerksgebäude fokussiert. Mit Ausnahme der Strategie 1 „Regularität verbessern“ beschränken sie sich der Einfachheit halber auf die Veränderung einer einzigen Tragwerkeigenschaft (Tragwiderstand, Duktilität, Steifigkeit, Dämpfung oder Masse). In der Praxis lässt sich jedoch die Veränderung einer einzigen Tragwerkeigenschaft meist nicht realisieren. Daher kommen oft mehrere Strategien zur Anwendung.

Das Tragwerksverhalten vor und nach Umsetzung einer der Ertüchtigungsstrategien wird mithilfe von Kapazitätskurven illustriert. Eine Kapazitätskurve stellt vereinfachend den Verlauf der horizontalen Erdbeben-Ersatzkraft in Funktion der horizontalen Verschiebung des Gebäudes dar und ermöglicht einen Vergleich zwischen dem Verformungsvermögen des Gebäudes und dem Verformungsbedarf aus der Erdbebeneinwirkung.

6.1 Strategie 1: Regularität verbessern

Grundsätzlich ist mit jeder baulichen Ertüchtigung eine Verbesserung der Regularität oder Regelmässigkeit der Verteilung von Steifigkeit, Tragwiderstand und Masse im Aufriss und Grundriss des Tragwerks anzustreben. Die neuen Bauteile sollen so eingepasst werden, dass ein regelmässigeres Tragwerk entsteht. Ein einfaches Beispiel für diese Strategie ist der Fugenschluss zwischen zwei ursprünglich voneinander getrennten Gebäudeteilen mit jeweils exzentrischem Aussteifungssystem zu einem symmetrisch ausgesteiften Gesamtragsystem wie es beim Berner Gymnasium Neufeld realisiert wurde.

Diese Strategie steht immer auch bei der Ertüchtigung mit Holz im Vordergrund. Neue Wände aus Holz sollten derart in das bestehende Tragwerk eingefügt werden, dass die Regularität im Grundriss und im Aufriss verbessert wird. Das gleiche gilt für neue Decken, mit denen bestehende Fugen zur Verbesserung der Regularität im Grundriss geschlossen werden sollten.

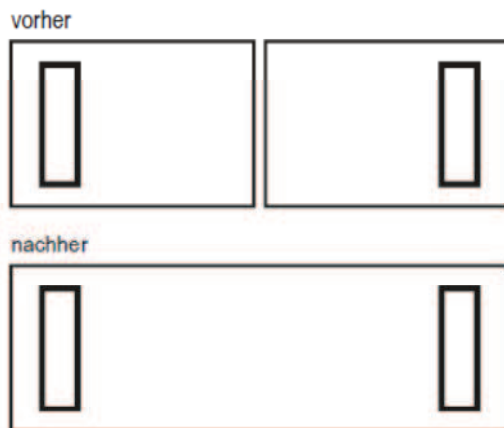


Abb.: Durch die Schliessung der bestehenden Dilatationsfuge entsteht aus zwei exzentrisch ausgesteiften Gebäudeteilen (vorher) ein durch zwei aussenliegende Stahlbetonkerne zentrisch ausgesteiftes Gebäude (nachher), wie links im Grundriss schematisch dargestellt.

6.2 Strategie 2: Verstärken

Die klassische Ertüchtigungsstrategie ist die Verstärkung des bestehenden Tragwerks durch neue Bauteile oder durch Aufdoppelung bestehender Bauteile, zum Beispiel durch neue Stahlbetonwände oder Stahlfachwerke. Damit werden der Tragwiderstand und die Steifigkeit erhöht, während sich das Verformungsvermögen praktisch nicht verändert. Dank der höheren Steifigkeit lässt sich der Verschiebungsbedarf aus der Erdbebeneinwirkung auf das vorhandene Verschiebungsvermögen reduzieren.

Das Kraft-Verschiebungsverhalten der Strategie „Verstärken“ anhand der sogenannten Kapazitätskurven des bestehenden und des verstärkten Gebäudes ist schematisch in der Grafik dargestellt. Diese Strategie wird häufig angewandt, insbesondere durch den Einbau von Fachwerken in Stahl oder das Einziehen einer Stahlbetonwand.

Bei der Ertüchtigung mit Holz eines Mauerwerksgebäudes ist die Strategie „Verstärken“ der Normalfall. Durch die geplante Aufdoppelung der Wände der Tragwiderstand und die Steifigkeit erhöht, während das Verformungsvermögen durch die bisherigen Mauerwerkswände begrenzt bleibt, da sie spröder als die neuen Holzwände sind.

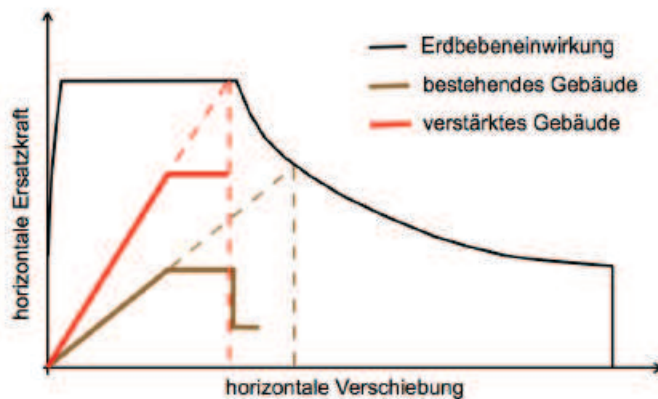


Abb.: Die Kapazitätskurven des bestehenden und des verstärkten Gebäudes, dargestellt als horizontale Ersatzkraft in Funktion der horizontalen Verschiebung im Vergleich mit den Anforderungen der Erdbebeneinwirkung.

6.3 Strategie 3: Duktilität erhöhen

Die Duktilität ist das plastische Verformungsvermögen über die Fließgrenze, das heisst die Grenze des elastischen Verformungsvermögens, hinaus. Spröde Bauteile, wie zum Beispiel Mauerwerkswände, können mittels nachträglich aufgeklebter Lamellen wesentlich duktiler gemacht werden. Damit wird das gesamte Verformungsvermögen (elastisch und plastisch) erhöht, während Tragwiderstand und Steifigkeit nur geringfügig zunehmen (siehe Abbildung). Einsatzbereich dieser Strategie ist beispielsweise das Aufbringen von Kohlefaserlamellen auf Mauerwerkswänden.

Bei der Ertüchtigung mit Holz kann die Duktilität nur erhöht werden, wenn bestehende, spröde Mauerwerkswände entfernt und als Ersatz neue, duktilere Holzwände eingebaut werden. Bei einer Aufdoppelung einer bisherigen Mauerwerkswand mit einer neuen Holzwand erhöht sich die Duktilität des neuen Gesamtsystems nicht.

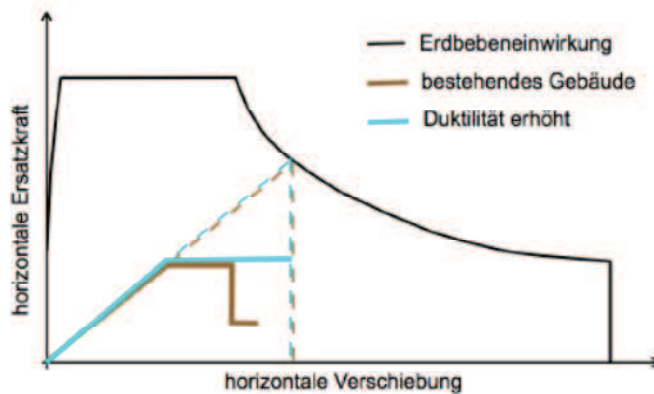


Abb.: Die Erhöhung der Duktilität bewirkt ein grösseres plastisches Verformungsvermögen, das heisst einen längeren horizontalen Ast der Kapazitätskurve, um den Verschiebungsbedarf aus der Erdbebeneinwirkung aufzunehmen.

6.4 Strategie 4: Schwächen

Eine Schwächung des Tragwerks durch eine Reduktion der Steifigkeit vermindert die Kräfte bei gleichzeitiger Erhöhung der Verschiebungen infolge Erdbeben (siehe Abbildung). Eine praktische Anwendung dieser Strategie ist der Wechsel von fester auf schwimmende Längslagerung einer mehrfeldrigen Brücke auf einem Pfeiler.

Die seismische Isolation durch den Einbau von horizontal weichen, hochdämpfenden Erdbebenlagern aus bewehrten Gummischichten ist eine typische Umsetzung der Strategie „Schwächen“. Dank der guten Dämpfungseigenschaften dieser speziellen Lager erfolgt gleichzeitig eine Reduktion der Einwirkung entsprechend der Strategie 5. Eine weitere Möglichkeit der Schwächung besteht im Entfernen von steifen Ausfachungen oder Einbauten, so dass sich das Tragwerk besser horizontal verformen kann.

Für sich allein umgesetzt, ist diese Strategie mit neuen Holzwänden kaum zu realisieren. Doch wird sie bei der Strategie 3 „Duktilität erhöhen“ durch Ersatz von Mauerwerkswänden durch Holzwände in der Regel indirekt umgesetzt, da dann auch eine Schwächung des Gesamtsystems infolge der geringeren horizontalen Steifigkeit der neuen Holzwände resultiert.

Der Ersatz von nicht tragenden Mauerwerkswänden durch neue Holzwände ist ebenfalls eine Anwendung dieser Ertüchtigungsstrategie, wenn die bestehenden Mauerwerkswände mit dem Tragwerk verbunden waren. Dann wird durch die Ertüchtigung die Gesamtsteifigkeit des effektiven Tragsystems bestehend aus den tragenden und den nicht tragenden Wänden reduziert.

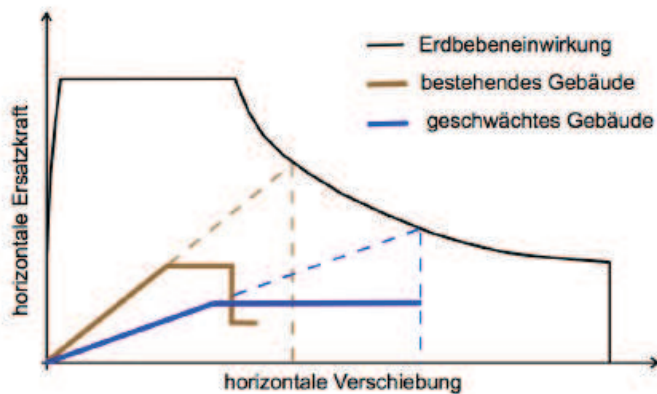


Abb.: Mit einer Schwächung wird die Steifigkeit und damit die anfängliche Neigung der Kapazitätskurve reduziert. Es resultieren kleinere Kräfte, aber grössere Verschiebungen. Als Beispiel zeigt das Bild rechts seitliche Nocken zur schwimmenden Längslagerung auf einem Pfeiler einer Autobahnbrücke in Basel, die ursprünglich eine feste Längslagerung bei einem Widerlager aufwies.

6.5 Strategie 5: Erdbebeneinwirkung durch Dämpfung reduzieren

Eine Erhöhung der Dämpfung bewirkt eine Reduktion der Erdbebeneinwirkung (siehe Abbildung). Diese kann durch den Einbau zusätzlicher Dämpfer realisiert werden. Bei der seismischen Isolation mittels horizontal weicher, hochdämpfender Erdbebenlager wird gleichzeitig mit der Reduktion der Steifigkeit (Strategie 4) die Dämpfung erhöht, wie es bei den drei zuvor genannten Beispielen (Feuerwehrgebäude in Basel, Brunnenbrücke und Flüssiggastank) erfolgt ist.

Für die Ertüchtigung mit Holz ist diese Strategie nicht relevant. Die bereits ohne besondere Dämpfungselemente vorhandene Dämpfung von Mauerwerk- und von Holz-Tragelementen ist ausreichend und muss nicht erhöht werden.

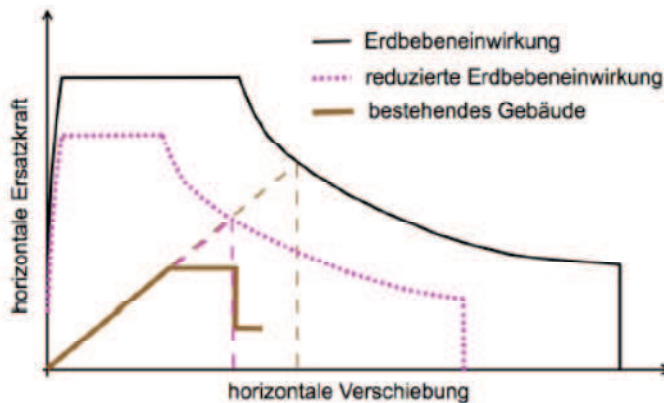


Abb.: Mit zusätzlicher Dämpfung kann die Erdbebeneinwirkung so weit reduziert werden, dass die Kapazitätskurve des bestehenden Gebäudes ein genügendes Verformungsvermögen aufweist. Rechts ist ein hochdämpfendes Gummilager zur seismischen Isolation des Feuerwehrgebäudes in Basel abgebildet.

6.6 Strategie 6: Masse reduzieren

Wenn die Masse eines Gebäudes reduziert, ergeben sich kleinere Trägheitskräfte und damit auch kleinere Beanspruchungen infolge Erdbeben. In der praktischen Umsetzung kann durch Abtragen des Dachgeschosses und weitere Obergeschosse oder durch Ersatz von den obersten Geschossen durch eine leichtere Konstruktion eine solche Massenreduktion erfolgen. Grundsätzlich sind leichtere Bauweisen massiven Bauweisen vorzuziehen, wie z. B. beim Ersatz von nicht tragenden Bauteilen.

Der Ersatz von sowohl tragenden als auch nicht tragenden Mauerwerkswänden durch neue, leichtere Holzwände folgt dieser Ertüchtigungsstrategie quasi automatisch in einem gewissen Masse. Als besonders geeignete Umsetzung dieser Ertüchtigungsstrategie ist der Ersatz eines massiven Dachgeschosses und allenfalls weiterer Obergeschosse durch einen leichten Aufbau in Holzbauweise.

6.7 Strategie 7: Nutzung ändern

Eine Reduktion der Erdbebeneinwirkung kann nicht nur durch bauliche Massnahmen erzielt werden, sondern auch durch betriebliche, die eine Deklassierung eines Gebäudes in eine tiefere Bauwerksklasse erlauben. Ein Akutspital der BWK III kann beispielsweise in ein Bettenhaus (BWK II) oder in eine Wohnhaus (BWK I) umgewandelt werden. Infolge des kleineren Bedeutungsfaktors wird die Erdbebeneinwirkung reduziert.

Diese Strategie erfordert für sich allein umgesetzt keine baulichen Massnahmen. Oft genügt jedoch die vergleichsweise geringe Reduktion der Erdbebeneinwirkung von maximal knapp 30% (Deklassierung von BWK III in BWK I) nicht. Für die Ertüchtigung mit Holz ist sie jedoch in Kombination mit weiteren Strategien (Strategien 1, 2, 3, 4 und 6) gut geeignet.

7. Identifikation von Schwachstellen und deren Behebung

Die folgenden Bauteile eines typischen Mauerwerksgebäudes sind potentielle Schwachstellen bezüglich Erdbebenverhalten und müssen je nach konkretem Fall ertüchtigt werden.

7.1 Mauerwerkswände

Mauerwerkswände können nicht nur für die Beanspruchung in der Wandebene durch Normalkraft, Querkraft und Biegung infolge Erdbeben überbeansprucht werden, sondern auch die Beanspruchung aus der Horizontalbeschleunigung quer zur Wandebene kann infolge der fehlenden Zugfestigkeit des Mauerwerks problematisch werden. Dies gilt sowohl für tragende als auch für nicht tragende Mauerwerkswände. Bei anderen Bauweisen, wie z.B. im Holzbau, sind die Erdbebenbeanspruchungen quer zur Wandebene nicht kritisch, da die Bauteile leicht und gleichzeitig zugfest sind.

Mauerwerkswände können aus Natursteinen oder aus künstlichen Steinen (Backsteinen) bestehen. Wänden aus künstlichen Steinen können ein- oder zweischalig ausgeführt sein. Grundsätzlich eignen sich alle Mauerwerksarten für die Erdbebenertüchtigung mit Holzbauteilen.

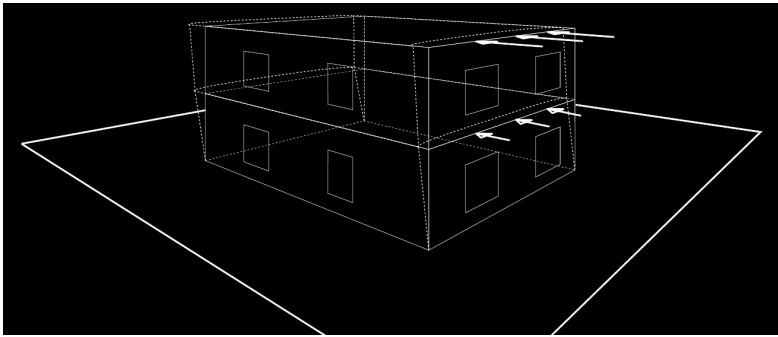


Abb.: Die raschen, primär horizontalen Bewegungen im Baugrund während eines Erdbebens erzeugen horizontal wirkende Trägheitskräfte in der Ebene der Geschossdecken. Dies führt zu Verformungen in den Decken- (Schub) und Wandscheiben (Schub, Biegung). Die auf die Wände wirkenden Trägheitskräfte bewirken deren Biegebeanspruchung quer zur Wandebene.

7.1.1 Beanspruchung in der Wandebene

Pro Hauptrichtung im Grundriss, d.h. in Längs- und Querrichtung, des Gebäudes sind je mindestens zwei Wände zu identifizieren, die es zu verstärken gilt. Die Verstärkung durch Holzelemente soll wandförmig über alle Geschosse laufen. Primär sind Fassadenwände zu verstärken, doch können auch durchgehende Innenwände für die Verstärkung geeignet sind. Auf Niveau der Geschossdecken ist eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den neuen Holzelementen und der Deckenkonstruktion erforderlich, um Horizontalkräfte in Wandlängsrichtung übertragen zu können.

Neben den erwähnten Wänden, die kragarmartig die Erdbeben-Beanspruchungen in die Untergeschosse abtragen, können auch Mauerwerks-Wandriegel über den Fenstern mit Holzelementen verstärkt werden. Damit kann eine effiziente Rahmenwirkung zwischen mehreren schlanken Holzwänden, die dann als Wandstützen wirken, erzielt werden.

7.1.2 Beanspruchung quer zur Wandebene

Sämtliche Mauerwerkswände, ob tragend oder nicht tragend, können auf Erdbeben-Beanspruchungen quer zur Wandebene kritisch sein. Dies gilt insbesondere für schlanke Wände und solche die oben in Querrichtung nicht gehalten sind. Die Wandschlankheit ist das Verhältnis zwischen lichter Wandhöhe und Steindicke, falls die Wand oben gehalten ist, bzw. das Doppelte dieses Verhältnisses falls die Wand oben nicht gehalten ist.

Die Verstärkung kann durch neue Holzelemente über der ganzen Wandfläche, allenfalls kombiniert mit der Verstärkung für Beanspruchung in der Wandebene, durch neue Stützen oder Riegel aus Holz zur Unterteilung der freien Mauerwerks-Wandflächen oder durch eine neue seitliche Halterung am oberen Deckenanschluss erfolgen.

7.2 Unterbrochene oder versetzte Wände

In einem Geschoss unterbrochene oder von einem zum anderen Geschoss im Grundriss versetzte Wände bilden eine besonders krasse Schwachstelle bezüglich Erdbebenverhalten. Oftmals sind ursprünglich über die ganze Gebäudehöhe laufende Fassadenwände nachträglich in der Decke über dem Erdgeschoss abgefangen und im selbst Erdgeschoss entfernt worden, um die Zugänglichkeit zu verbessern. Mit einer neuen Holzwand direkt unter der abgefangenen Wand kann die Abtragung der horizontalen Erdbebenkräfte sichergestellt werden.

7.3 Nicht tragende Wände

Im Falle von nicht tragenden Mauerwerkswänden wird meist übersehen, dass diese wegen ihrer grossen Steifigkeit starke Erdbebenkräfte in der Wandebene anziehen können, wenn sie mit den Decken verbunden sind. Diese Beanspruchung erfolgt unabhängig davon, ob sie in der Tragwerksanalyse als tragend oder nicht tragend deklariert wurden. Dort wo nicht tragende Mauerwerkswände unterbrochen sind, wird meist die Decke lokal auf Durchstanzen infolge Erdbebeneinwirkung überbeansprucht. Mit einem Ersatz solcher Wände durch nachgiebigere Holzwände kann das Gebäude einfach auf Erdbeben ertüchtigt werden. Und die Problematik der Beanspruchung quer zur Wandebene wird durch den Ersatz durch eine Holzwand ebenfalls gelöst.

7.4 Holzdecken

Bei Erdbebenbeanspruchung ist die Aufgabe der Geschossdecken in einem Gebäude, eine in der Deckenebene steife Verbindung zwischen den vertikal abtragenden Wänden zu bilden. Decken aus monolithischem Stahlbeton erfüllen diese Anforderungen meist problemlos. Bei anderen Deckenkonstruktionen, wie Holzdecken, Hourdis-Decken oder Decken aus Fertigteilen, sind die Kraftübertragung und die Steifigkeit in der Deckenebene ungenügend. Diese Deckenkonstruktionen können grossflächig durch eine steife horizontale Scheibe aus Holz verstärkt werden.

7.5 Verbindungen zwischen Decken und Wänden

Die Verbindung zwischen der Deckenkonstruktion und den Wänden muss Horizontalkräfte längs und quer zur Wand übertragen können. Auch neue Holzwände, die nachträglich zur Verstärkung eingefügt wurden, müssen möglichst mit allen Decken verbunden sein.

7.6 Untergeschosse

Die Beanspruchungen in den verstärkten Wänden infolge Erdbeben müssen über die Untergeschosse und die Foundation in den Baugrund einzulegen. Als günstig für das Erdbebenverhalten eines Gebäudes sind Untergeschosse, die zusammen mit der Foundation als steifer Kasten sowohl für horizontale als auch vertikale Beanspruchung ausgebildet sind. Besonders geeignet sind folglich Untergeschosse, die als Zivilschutzräume ausgebaut sind.

Falls die Untergeschosse keinen steifen Kasten bilden, kann die Einleitung der Erdbebenkräfte problematisch werden. Als Ertüchtigung der Untergeschosse stehen neue Stahlbetonwände im Vordergrund. Immerhin ist die Ertüchtigung mit Holz in den Obergeschossen insofern von Vorteil, dass sie vergleichsweise leicht und flexibel ist und somit die von den Untergeschossen aufzunehmenden Kräfte klein bleiben.

7.7 Foundation

Die Beanspruchungen in den verstärkten Wänden infolge Erdbeben müssen bis zurück in die Erde verfolgt werden. Wenn die bestehende Foundation diese nicht aufnehmen können, so muss auch die Foundation verstärkt werden. Grundsätzlich sollte eine Foundationsverstärkung wenn immer möglich vermieden werden, da eine solche meist mit grossem Aufwand verbunden ist. Durch eine geschickte Auswahl der zu verstärkenden Wände kann oft auf eine Foundationsverstärkung verzichtet werden. Gleich wie bei den Untergeschossen wirkt sich auch bei der Foundation die Ertüchtigung mit Holz in den Obergeschossen positiv aus, da sie vergleichsweise leicht und flexibel ist und die von der Foundation aufzunehmenden Kräfte klein bleiben.

8. Konstruktive Umsetzung

Nachfolgend werden konstruktive Möglichkeiten dargestellt, wie die im Kapitel 7 identifizierten typischen Schwachstellen bezüglich Erdbebenverhalten von Mauerwerksbauten eliminiert werden können. Ertüchtigungsmassnahmen mit Holzelementen sind besonders effizient, wenn gleichzeitig auch eine bauphysikalische Sanierung erzielt wird.

Aus bauphysikalischer Sicht verbessern neue Fassadenbauteile aus Holz primär die Dämmung und die Dichte der Gebäudehülle und damit die Energieeffizienz des Gebäudes. Bei raumtrennenden Holzbauteilen im Gebäudeinnern kann der Mehrwert durch eine Verbesserung des Brandschutzes und des Schallschutzes gegeben sein. Ein weiterer Vorteil der Holzbauweise liegt in den schnellen Montagezeiten und der dadurch reduzierten Nutzungseinschränkung der Immobilie, was insbesondere mit der Vorfertigung von Fassadenbauteilen – aussen aufgebracht – zum Tragen kommt.

Bei der konstruktiven Umsetzung sind zwei Hauptaspekte zu beachten. Die neuen Bauteile aus Holz müssen mit ihrem Kraft-Verformungsverhalten für horizontale Einwirkung auf die bestehenden Mauerwerkswände abgestimmt und mit geeigneten Verbindungsmitteln in den bestehenden Wänden und Decken verankert werden.

8.1 Verstärkung von Mauerwerkswänden in der Wandebene

Ein einfacher Vergleich der Schubsteifigkeit von Holzwänden mit derjenigen von Mauerwerkswänden zeigt, dass die Aufdoppelung mit Holz die Beanspruchbarkeit in der Wandebene für Erdbeben nur geringfügig erhöht. Dazu genügt es, das Produkt aus Schubmodul mal Wandstärke der beiden quasi nebeneinander tragenden Bauteile zu vergleichen. Nach Ziffer 3.1.4 der Norm SIA 266 (2003) weist Mauerwerk einen charakteristischen Wert des Schubmoduls G_k von 1280–2800 N/mm² auf. Die charakteristischen Werte des Schubmoduls G_{mean} bei Holzwerkstoffen reichen nach Norm SIA 265/1 (2009) von rund 500 N/mm² bei Massivholzplatten bis zu etwa 2500 N/mm² für Intrallam. Um die gleiche Schubsteifigkeit zu erreichen wie bei einer Mauerwerkswand mit einer typischen Wandstärke von 150 mm, wird folglich eine rund 800 mm dicke Massivholzplatte benötigt. Eine 80 mm dicke Massivholzplatte hätte nur gerade einen Anteil von 1:11 an der gesamten Schubsteifigkeit von Mauerwerks- und Holzwand zusammen. Die Holzwand wäre dann fast vernachlässigbar beim Nachweis der Abtragung der Erdbebenkräfte in der Wandebene. Daraus wird schnell klar, dass Holzwerkstoffe wie Massivholzplatten, Buchensperrholz oder Intrallam für eine vollflächige Verstärkung in der Regel nicht wirtschaftlich sind. Völlig aussichtslos erscheint eine Verstärkung in Holzrahmenbauweise mit nur dünnen Beplankungen zwischen 15 mm und 40 mm.

Andererseits genügen Mauerwerksgebäude mit grossflächigen Wänden in beiden Hauptrichtungen des Grundrisses oft bereits im Ist-Zustand für die Erdbebenbeanspruchungen in der Wandebene, so dass einer Ertüchtigung nicht erforderlich wird, siehe z.B. das Beispielgebäude Nr. 1 in der Dokumentation SIA D 0237 (2011). Problematisch sind fehlende, unterbrochene, im Grundriss versetzte oder infolge grosser Öffnungen geschwächte Mauerwerkswände. In diesen Fällen kann eine Ertüchtigung mit Holzbauteilen auch für die Beanspruchung in der Wandebene sinnvoll sein, wobei die konkreten Randbedingungen im Einzelfall einen dominierenden Einfluss haben.

8.2 Verstärkung von Mauerwerkswänden quer zur Wandebene

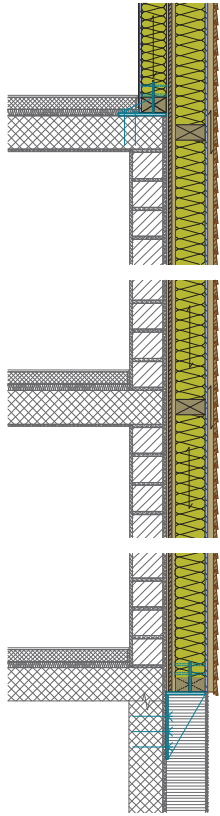
Die bezüglich Erdbebenbeanspruchung quer zur Wandebene kritischen Mauerwerkswände zeichnen sich durch eine grosse Wandschlankheit aus und weisen folglich eine relativ geringe Steifigkeit in Querrichtung auf. Ungünstig wirkt sich ferner die fehlende Zugfestigkeit des Mauerwerks aus. Deshalb sind Holzbauteile mit den gängigen Baustoffeigenschaften a priori geeignet für die Verstärkung von Mauerwerkswänden quer zur Wandebene. In den folgenden Skizzen werden Verstärkungsvarianten mit Holz für verschiedene Mauerwerksarten dargestellt.

8.2.1 Fassadenwände aussen ertüchtigt

Bei einschaliger Ausführung des Mauerwerkes bietet sich eine Ertüchtigung von aussen an, da der Eingriff von aussen die Nutzung im Inneren weniger beeinträchtigt, die Fassade eine bauphysikalische Aufwertung erhält und das Mauerwerk durch das Holzbauteil verstärkt wird.

Bei zweischaligem Mauerwerk kann eine Ertüchtigung von aussen sinnvoll sein, wenn durch die Verstärkung der äusseren Schale gleichzeitig eine Entlastung eventuell sogar eine Verstärkung der inneren, in der Regel tragenden Schale, erfolgen kann. In jedem Fall kann mit dem Holzbauteil das meist kritische Verhalten quer zur Wandebene der Aussenschale verbessert werden.

Für die Ertüchtigung können massive vollflächige Holzkonstruktionen oder die Holzrahmenbauweise angewandt werden.

Skizzen	Konstruktion	Bauphysik
	<p>Mehrwert durch Aufstocken: Die Holzkonstruktion kann in einer Ebene zur Aufstockung weiter geführt werden. Sie kann zudem zur Lastabtragung in den massiven Baubestand genutzt oder dazu mit Innenwänden ergänzt werden. Idealerweise werden die Schwerelasten aus der Aufstockung auf den Baubestand (Deckenkonstruktion und Mauerwerkswände) abgetragen. Die Holzkonstruktion kann zudem im Bereich der Aufstockung zur Aufnahme der horizontalen Kräfte verwendet werden.</p> <p>Tragwirkung: Die vorgesetzte Holzkonstruktion kann das Eigengewicht abtragen oder auch auf das Mauerwerk übertragen. Die Lasten und die horizontalen Kräfte in der Wandebene werden nach wie vor über das Mauerwerk abgetragen.</p> <p>Verstärkung: Mit der Holzkonstruktion können bisher fehlende seitliche Halterungen des Mauerwerks ergänzt oder die freien Mauerwerkswandflächen unterteilt werden. Mit einer zusätzlichen Verbindung zwischen Mauerwerk und vollflächiger Holzwerkstoffplatte oder Beplankung kann zudem eine Lagesicherung des Mauerwerks erbracht werden.</p> <p>Geschossdecke: Eine Kraftschlüssige Verbindung der Geschossdecken mit der Holzkonstruktion ist erforderlich. Zu diesem Zweck muss die Geschossdecke von der Aussenseite zugänglich sein.</p>	<p>Dämmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - nach Energiegesetz 120–140mm - nach Minergie 200–220mm - nach Minergie-P 400–420mm <p>Die Masse des Mauerwerks bleibt für die Wärmespeicherung erhalten.</p> <p>Das Feuchteverhalten ist unproblematisch, sofern die neu aufgebrachte Konstruktion funktioniert (diffusionsoffen nach aussen).</p> <p>Die Luftdichtung ist möglichst mit der Beplankung oder der Massivholzplatte zu erbringen, die Winddichtung ist zusätzlich aussen an die Dämmung einbauen.</p> <p>Der Feuchteschutz bezüglich Regen ist unproblematisch, sofern die neu angebrachte Fassade fachgerecht konstruiert und ausgeführt ist.</p> <p>Zur Fassadenbekleidung können hinterlüftete und belüftete Aufbauten sowie verputzte Aussendämmungen verwendet werden.</p>

8.2.2 Fassadenwände innen ertüchtigt

Sofern der Baubestand schon über eine aussen aufgebrachte Dämmung verfügt und die Fassadenbekleidung intakt ist oder wenn das Fassadenbild nicht verändert werden sollte, dann bietet sich eine Ertüchtigung von innen an.

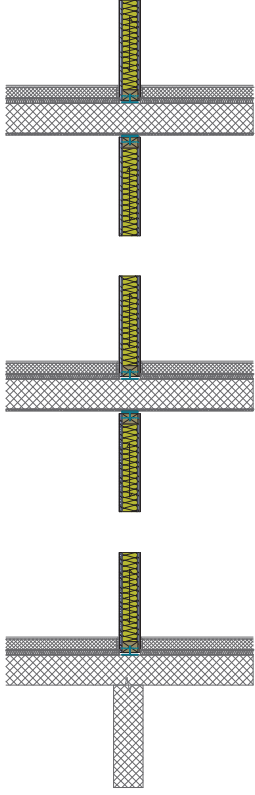
Eine Ertüchtigung von innen ist bei zweischaligem Mauerwerk sinnvoll, da dadurch direkt die innere, in der Regel tragende Schale, verstärkt wird.

Für die Ertüchtigung von innen und der damit verbundenen schlechten Zugänglichkeit mit vorgefertigten oder grossflächigen Elementen ist die Holzrahmenbauweise zu bevorzugen.

Skizzen	Konstruktion	Bauphysik
	<p>Mehrwert durch Aufstocken: Die Holzkonstruktion zur Verstärkung dient in keiner Weise der Aufstockung.</p> <p>Tragwirkung: Die vorgesetzte Holzkonstruktion bringt das Eigengewicht jeweils in der Geschossdecke ein. Die Lasten und die horizontalen Kräfte in der Wandebene werden nach wie vor über das Mauerwerk abgetragen.</p> <p>Verstärkung: Mit der Holzkonstruktion können bisher fehlende seitliche Halterungen des Mauerwerks ergänzt oder die freien Mauerwerkswandflächen unterteilt werden. Mit einer zusätzlichen Verbindung zwischen Mauerwerk und vollflächiger Holzwerkstoffplatte oder Beplankung kann zudem eine Lagesicherung des Mauerwerks erbracht werden.</p> <p>Geschossdecke: Eine Kraftschlüssige Verbindung der Geschossdecken mit der Holzkonstruktion ist erforderlich, aber wesentlich aufwendiger zu realisieren als bei einem Eingriff von aussen.</p>	<p>Dämmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - nach Energiegesetz rund 120 mm - nach Minergie rund 180 mm - nach Minergie-P rund 360 mm <p>Die Kapazität der Wärmespeicherung wird reduziert, da das Mauerwerk bekleidet wird.</p> <p>Der Schallschutz zwischen den Geschossen wird durch die unterdrückte Flankenübertragung wegen den Vorsatzschalen verbessert. Zusätzlich wird der Schallschutz gegen Aussenlärm verbessert.</p> <p>Bezüglich Feuchteverhalten wird der Taupunkt nach innen verschoben, wodurch eine genaue Prüfung des hygrischen Verhaltens der Wand notwendig wird.</p> <p>Die Luftdichtung ist innen einzubauen, die Notwendigkeit einer Winddichtung aussen an der Dämmung ist zu prüfen.</p> <p>Der Feuchteschutz bezüglich Regen ist unproblematisch, sofern die neu angebrachte Fassade fachgerecht konstruiert und ausgeführt ist.</p> <p>Die Fassadenbekleidung respektive das Fassadenbild kann im Bestand belassen oder ebenfalls ergänzt respektive erneuert werden.</p> <p>Die innere Bekleidung wird von der Beplankung (Gipsfaserplatte, Holzwerkstoffe) gebildet, eventuell ergänzt um eine weitere Schicht ohne tragende Funktion.</p>

8.3 Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden

Werden zur Lösung der Unstetigkeit beim vorhandenen Tragwerk neue Wände eingezogen, können dafür massive Holzkonstruktionen, die Holzrahmenbauweise aber auch Fachwerke in Holz in Betracht gezogen werden. Die Wahl ist letztlich von den Platzverhältnissen, den Anschlussmöglichkeiten (punktuell oder linear) bei den bestehenden Wänden und der Geschosdecke sowie der erforderlichen Steifigkeit abhängig.

Skizzen	Konstruktion	Bauphysik
	<p>Tragwirkung: Die neue Tragkonstruktion trägt sämtliche Vertikal- und Horizontallasten ab. Je nach Wahl des Tragsystems werden die Horizontalkräfte über Schubfelder oder über Zug- und Druckstreben abgetragen.</p> <p>Geschosdecke: Die kraftschlüssige Verbindung zu den Geschosdecken ist zwingend erforderlich.</p>	<p>Wenn beidseitig der Wandkonstruktion dasselbe Klima herrscht, sind keine Anforderungen hinsichtlich Wärmedämmung einzuhalten.</p> <p>Die Kapazität der Wärmespeicherung wird stark reduziert, da das Mauerwerk ersetzt wird.</p> <p>Aus Schallschutzgründen ist eine Bedämpfung des Hohlraumes empfehlenswert. Die Anforderungen an die Schalldämmung sind gemäss Norm SIA 181 (2006) einzuhalten.</p> <p>Die innere Bekleidung wird von der Beplankung (Gipsfaserplatte, Holzwerkstoffe) gebildet, eventuell ergänzt um eine weitere Schicht ohne tragende Funktion.</p>

8.4 Nicht tragende Wände ersetzen

Für den Ersatz von nicht tragenden Mauerwerkswänden eignen sich insbesondere sehr leichte Systeme wie die Holzrahmenbauweise oder jegliches andere Systeme der Leichtbauweise (Gipsplatten und Metallständer).

Skizzen	Konstruktion	Bauphysik
	<p>Tragwirkung: Die neue Holzkonstruktion bringt das Eigengewicht jeweils in der Geschossdecke ein. Die Lasten und die horizontalen Kräfte werden von anderen Bauteilen des Tragwerkes abgetragen.</p> <p>Bestehende Mauerwerkswand: Die bestehenden Mauerwerkswände werden zurück gebaut, um die Masse zu reduzieren und Platz für grössere Wohnflächen oder den Einbau von Leichtbausystemen zu schaffen.</p> <p>Geschossdecke zur Innenwand: Die Verbindung zur Geschossdecken dient alleine der Abtrennung der Räume und damit der bauphysikalischen Raumentrennung. Kräfte des Tragwerkes werden keine übernommen.</p>	<p>Wenn beidseitig der Wandkonstruktion dasselbe Klima herrscht, sind keine Anforderungen hinsichtlich Wärmedämmung einzuhalten.</p> <p>Die Kapazität der Wärmespeicherung wird stark reduziert, da das Mauerwerk ersetzt wird.</p> <p>Aus Schallschutzgründen ist eine Bedämpfung des Hohlraumes empfehlenswert. Die Anforderungen an die Schalldämmung sind gemäss Norm SIA 181 (2006) einzuhalten.</p> <p>Die innere Bekleidung wird von der Beplankung (Gipsfaserplatte, Holzwerkstoffe) gebildet, eventuell ergänzt um eine weitere Schicht ohne tragende Funktion.</p>

8.5 Nicht tragende Wände verstärken

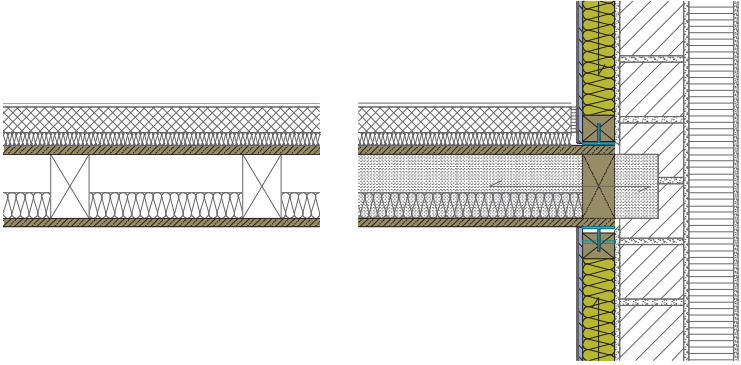
Wenn die nicht tragende Mauerwerkswand erhalten werden soll, z.B. wegen historisch erhaltenswerten Stuckaturen, so kann wie schon beschrieben eine Verstärkung des Mauerwerkes für Beanspruchungen quer zur Wandebene vorgenommen werden oder durch die neu vorgesetzte Holzkonstruktion der historische Bestand geschützt werden. Dazu eignen sich insbesondere sehr leichte Systeme wie die Holzrahmenbauweise oder jegliches andere Systeme der Leichtbauweise (Gipsplatten und Metallständer).

Skizzen	Konstruktion	Bauphysik
	<p>Tragwirkung: Die vorgesetzte Holzkonstruktion bringt das Eigengewicht jeweils in der Geschossdecke ein. Die Lasten und die horizontalen Kräfte werden von anderen Bauteilen des Tragwerkes abgetragen.</p> <p>Bestehende Mauerwerkswand: Die bestehenden Mauerwerkswände können weiterhin Lasten abtragen. Allerdings muss konstruktiv sichergestellt werden, dass sie keine horizontalen Kräfte mehr anziehen können, indem entsprechende Gleitfugen zu den Geschossdecken ausgebildet werden. Einfacher wird vermutlich aber sein, die bestehende Mauerwerkswand komplett von der Decke zu entkoppeln.</p> <p>Verstärkung: Mit der Holzkonstruktion kann die neu fehlende seitliche Halterungen des Mauerwerkes ergänzt werden. Mit einer zusätzlichen Verbindung zwischen Mauerwerk und Beplankung kann zudem eine Lagesicherung des Mauerwerkes erbracht werden.</p> <p>Geschossdecke: Eine Kraftschlüssige Verbindung der Geschossdecken mit der Holzkonstruktion ist erforderlich.</p>	<p>Wenn beidseitig der Wandkonstruktion dasselbe Klima herrscht, sind keine Anforderungen hinsichtlich Wärmedämmung einzuhalten.</p> <p>Die Kapazität der Wärmespeicherung wird stark reduziert, da das Mauerwerk ersetzt wird.</p> <p>Aus Schallschutzgründen ist eine Bedämpfung des Hohlraumes empfehlenswert. Die Anforderungen an die Schalldämmung sind gemäss Norm SIA 181 (2006) einzuhalten.</p> <p>Die innere Bekleidung wird von der Beplankung (Gipsfaserplatte, Holzwerkstoffe) gebildet, eventuell ergänzt um eine weitere Schicht ohne tragende Funktion.</p>

8.6 Holzdecken und deren Verbindungen zu den Wänden verstärken

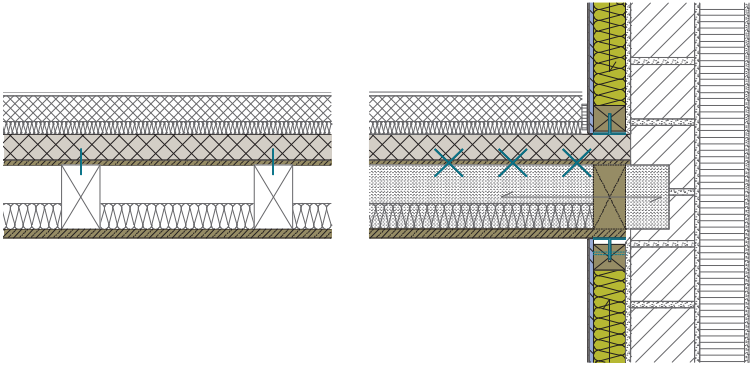
8.6.1 Trockenbaulösung

Bestehende Konstruktionen sind häufig Balkenlagen. Eine Beplankung der Balkenlage mit Holzwerkstoffplatten zur Ausbildung einer Deckenscheibe und das Aufbringen eines Trockenestriches ist eine übliche Instandstellungsmassnahme.

<p>Skizzen</p>	
<p>Konstruktion</p>	<p>Tragwirkung: Die neu aufgebrachte Holzwerkstoffplatte bildet die statische Deckenscheibe und verteilt die Horizontalkräfte auf die aussteifenden Wandscheiben. Die bestehende Balkenlage trägt nach wie vor die Lasten auf die Mauerwerkswände ab. In Abhängigkeit der Verbundsteifigkeit zwischen Balkenlage und Holzwerkstoffplatte werden die Tragfähigkeit und die Steifigkeit der Deckenkonstruktion definiert, wobei eine möglichst hohe Steifigkeit in der Ebene erzielt werden soll. Dazu müssen sämtliche Plattenstösse und Plattenränder untereinander schubsteif respektive mit der Balkenlage verbunden sein.</p> <p>Anschluss zur Wandkonstruktion: Die neu aufgebrachte Holzwerkstoffplatte muss mit der aussteifenden Wandkonstruktion kraftschlüssig (schubsteif) verbunden werden. Das gilt auch für aussteifende Wände, die als Zwischenaufleger von Durchlaufsystemen (Balkenlage) dienen.</p> <p>Bei aussteifenden Wandpartien ist der Anschluss für Vertikal- und Horizontalkräfte auszulegen. Bei Wänden, welche nicht für die horizontale Gebäudeaussteifung herangezogen werden, reicht ein Anschluss für Vertikalkräfte. Hier muss der Lagesicherung der Geschossdecke aber die nötige Beachtung geschenkt werden, damit ein Abrutschen der Decke von den Auflagern während eines Erdbebens verhindert wird (Mindestbreite Deckenaufleger oder mechanische Lagesicherung).</p>
<p>Bauphysik</p>	<p>Wenn beidseitig der Deckenkonstruktion dasselbe Klima herrscht, sind keine Anforderungen hinsichtlich Wärmedämmung einzuhalten.</p> <p>Aus Schallschutzgründen ist eine Bedämpfung des Hohlraumes gemäss Angabe durch Bauphysiker empfehlenswert. Innerhalb der gleichen Nutzungseinheit bestehen keine Anforderungen an den Schallschutz. Die Anforderungen an die Schalldämmung sind gemäss Norm SIA 181 (2006) einzuhalten.</p>

8.6.2 Lösung als Holz-Beton-Verbund

Die bestehende Balkenlage mit einem Überbeton zu versehen und mit geeigneten Verbindungsmitteln als Holz-Beton-Verbunddecke auszubilden, führt zu wesentlich höheren Steifigkeiten der Deckenscheibe als bei Trockenbaulösungen. Steht die Erdbebenertüchtigung des Gebäudes im Vordergrund, muss diese Konstruktion gewählt werden.

<p>Skizzen</p>	
<p>Konstruktion</p>	<p>Tragwirkung: Die neu aufgebrachte Ortbetonschicht bildet die statische Deckenscheibe und verteilt die Horizontalkräfte auf die aussteifenden Wandscheiben. Die bestehende Balkenlage trägt im Verbund mit dem Beton die Lasten auf die bestehenden Mauerwerkswände ab. In Abhängigkeit der erzielten Verbundsteifigkeit zwischen Balkenlage und Beton werden die Tragfähigkeit und die Steifigkeit der Deckenkonstruktion definiert, wobei eine möglichst hohe Steifigkeit in der Deckenebene erzielt werden soll.</p> <p>Ortbeton: Die neue Ortbetonplatte muss mit einer Mindestbewehrung für die Ausbildung der statischen Deckenscheibe versehen werden.</p> <p>Anschluss zur Wandkonstruktion: Der Holz-Beton-Verbund oder nur der Ortbeton muss mit der aussteifenden Wandkonstruktion kraftschlüssig (schubsteif) verbunden werden. Das gilt auch für aussteifende Wände, die als Zwischenaufleger von Durchlaufsystemen (Balkenlage) dienen. Bei aussteifenden Wandpartien ist der Anschluss für Vertikal- und Horizontalkräfte auszulegen. Bei Wänden, welche nicht für die horizontale Gebäudeaussteifung herangezogen werden, reicht ein Anschluss für Vertikalkräfte. Hier muss der Lagesicherung der Geschossdecke aber die nötige Beachtung geschenkt werden, damit ein Abrutschen der Decke von den Auflagern während eines Erdbebens verhindert wird (Mindestbreite Deckenaufleger oder mechanische Lagesicherung).</p>
<p>Bauphysik</p>	<p>Wenn beidseitig der Deckenkonstruktion dasselbe Klima herrscht, sind keine Anforderungen hinsichtlich Wärmedämmung einzuhalten.</p> <p>Aus Schallschutzgründen ist eine Bedämpfung des Hohlraumes gemäss Angabe durch Bauphysiker empfehlenswert. Innerhalb der gleichen Nutzungseinheit bestehen keine Anforderungen an den Schallschutz. Die Anforderungen an die Schalldämmung sind gemäss Norm SIA 181 (2006) einzuhalten.</p>

9. Ergebnisse und Forschungsbedarf

Bei der Projektumsetzung konnten die meisten Fragestellungen mit Überlegungen basierend auf eigenen Erfahrungen und der Literatur beantwortet werden. Der wesentliche Mehrwert aus dem Projekt ergab sich aus dem 4. Arbeitsschritt des ursprünglichen Forschungsplans (Anhang B), den Vorschlägen von Instandstellungsstrategien unter Einsatz von Bauteilen aus Holz und HWS, abgebildet im Kapitel 8 „Konstruktive Umsetzung“. Diese Arbeit basiert primär auf der im Kapitel 7 erstellten Analyse der Ausgangslage, der „Identifikation von Schwachstellen und deren Behebung“.

9.1 Erreichte Ziele

Ein Vergleich der vorliegenden Konzeptstudie mit den im Finanzierungsgesuch vom 21.9.2010 (Anhang B) erwähnten Zielen zeigt folgendes Ergebnis:

vollständig erreichte Ziele:

- Identifikation der massgeblich durch Erdbeben gefährdeten Tragwerksteile von Mauerwerksbauten
- Lage von Elementen aus Holz (bezüglich z. B. einer Wand: innen, aussen, beidseitig)
- Zusammenstellung der wichtigsten Aspekte, welche aus bauphysikalischer (Wärme-, Feuchte- und Schallschutz) und aus brandschutztechnischer Sicht zu beachten sind.
- Abschätzung des Bedarfs an Ertüchtigungsmassnahmen bei Mauerwerksbauten in der Schweiz, aufgeteilt nach Erdbebenzonen und Bauwerksklassen (gemäss SIA 261, 2003)

teilweise erreichte Ziele:

- Vergleichsrechnungen Mauerwerkswände, Holzwände unterschiedlichsten Aufbaus.
→ Eine durchgeführte Vergleichsrechnung auf Basis der aktuellen SIA-Tragwerksnormen hat einen deutlichen Unterschied der Steifigkeiten in Wandebene von Mauerwerks- und Holzwänden aufgezeigt. Weitere Untersuchungen waren im Rahmen der Konzeptstudie nicht vorgesehen.
- Materialtechnische und konstruktive Evaluation von möglichen Verstärkungs- und Versteifungselementen aus Holz.
→ Möglichkeiten wurden aufgezeigt, eine weiterführende Evaluation scheint vorerst nicht erforderlich, da sinnvollen Lösungen naheliegend sind.

nicht erreichte Ziele:

- Abschätzung der aus Erdbeben auftretenden Kräfte und Verformungen
→ vorerst nicht relevant
- Befestigung der Elemente aus Holz an der bestehenden Tragstruktur. Praktische Umsetzung (Montage, Kontrolle, Unterhalt, etc.). Energiedissipation.
→ vorerst nicht relevant

9.2 Begründung der Abweichungen von den Zielen

Die Ausgangsidee – Mauerwerkswände in der Fassade zu verstärken und gleichzeitig zu dämmen – hat sich nach vertiefenden Gesprächen unter den Experten als nicht sehr realistisch, respektive nicht effizient heraus gestellt. Die erforderlichen Schubsteifigkeiten zur wesentlichen Verstärkung der Mauerwerkswände wären nur mit Holzwerkstoffplatten von mehreren 100 mm Stärke erreichbar, was nur auf Sonderanfertigung erhältlich und eher unwirtschaftlich ist.

Allerdings zeigte sich schnell, dass es andere Schwachstellen im Gebäudebestand gibt, woraus eine Erdbebenertüchtigung an Holzbauteilen in Mauerwerksbauten (z.B. Geschossdecken) oder mit Holzelementen an Mauerwerksbauten (z.B. bei quer zur Ebene beanspruchten Mauerwerkswänden) abzuleiten ist. Die Erfassung und Spezifizierung dieser Schwachstellen sowie Konstruktionsansätze zu deren Behebung rückten dann in den Vordergrund der Konzeptstudie.

Der Forschungsplan gemäss Antrag wurde komplett umgesetzt, bezüglich Arbeitsumfang natürlich adäquat auf die gewonnenen Erkenntnisse angepasst. In der Planung der Konzeptstudie wurden einige Arbeitsschritte vorgesehen – insbesondere die Vergleichsrechnungen, die Evaluation oder konstruktive Umsetzung der Befestigungen – welche fest von der Machbarkeit von Verstärkungen in der Ebene von Mauerwerkswänden ausgingen. Der dabei entfallene Aufwand wurde mit der Bearbeitung der bezüglich Lösungsansätze anspruchsvolleren „anderen Schwachstellen im Gebäudebestand“ kompensiert.

9.3 Zusammenfassung der Umfrage bei den Industriepartnern

Als Grundlage zur Umfrage diente der vollständige Entwurf des vorliegenden Schlussberichtes vom WHFF-Projekt 2010.07 „Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen: Konzeptstudie“. Bei jeder Frage ist das entsprechende Kapitel im Berichtsentwurf referenziert.

Ein erster Teil der Umfrage bestand aus einem Katalog mit geschlossenen Fragen, welche von den im Projekt involvierten Industriepartnern personalisiert beantwortet wurden. In einem zweiten Teil wurden von der Projektleitung bei den Industriepartnern mit offenen Fragen nachgefasst. Die Ergebnisse aus beiden Teilen sind im Anhang A festgehalten.

Zusammenfassend zur Umfrage kann festgehalten werden, dass:

- die Schwachstellen von Mauerwerksbauten innerhalb der Tätigkeitsgebiete der Industriepartner bekannt sind,
- die Verbindung zwischen Decken und Wänden war mehrheitlich nicht als Schwachstelle bekannt,
- zum Verstärken von Decken in deren Scheibenwirkung sind Produkte am Markt bekannt und
- von den Industriepartnern der Holzindustrie wird Handlungsbedarf signalisiert, zum einen zur Verhaltensanalyse in der Ebene von mit Holzelementen verstärkten Mauerwerkswände sowie zum anderen zur besseren Kenntnis der eignen Produkte (Massivholzplatten) bezüglich relevanter Eigenschaften für die Bemessung bei der Einwirkung Erdbeben.

9.4 Bedarf an Forschung und Entwicklung

Die Konzeptstudie identifiziert Schwachstellen und schlägt Konstruktionen zu deren Behebung vor. Sie bildet damit eine Ausgangslage für weiterführende Arbeiten im Themengebiet. Ein entsprechender Forschungsbedarf ist aus den Erkenntnissen der Konzeptstudie direkt ableitbar. Dabei geht es aus unserer Sicht primär um die weitere Konkretisierung der vorgeschlagenen Konstruktionen, wozu (1) einzelne Versuche zum Verifizieren der Materialeigenschaften, darauf aufbauenden (2) Parameterstudien und (3) daraus die Ableitung von kostenoptimierten Konstruktionen notwendig wären. Vorgezogen oder parallel könnte (0) ein Versuch mit einer mit Holzelementen verstärkten Mauerwerkswand in der Wandebene genauere Erkenntnisse zum Verformungs- und Versagensverhalten ermöglichen.

Die Arbeiten (1) Versuche und (2) Parameterstudie sind Forschungsarbeiten. Die Umsetzung daraus (3) mit der Ableitung der kostenoptimierten Konstruktionen ist eine Aufgabe der Industrie, welche in Zusammenarbeit mit dem Forschungsteam realisiert werden kann. Das Realisieren von weiteren Versuchen zur Verifikation der Eigenschaften der evaluierten Konstruktionen ist zu prüfen. Folgende Arbeiten würden wir aktuell zur Weiterverfolgung der Thematik vorschlagen:

- (0) Versuche zum Verformungs- und Versagensverhalten von mit Holzelementen verstärkten Mauerwerkswänden in der Wandebene.
- (1) Versuche zum Verifizieren der Materialeigenschaften: Ermitteln von allenfalls nicht vorhandenen Eigenschaften bei Holzwerkstoffen und Verbindungsmitteln mit Laborversuchen. Geschätzter Aufwand rund CHF 80'000.-.
- (2) Parameterstudien: Erfassen von Randbedingungen und deren Streubereich sowie Ermitteln dessen Einfluss auf die Auslegung der Verstärkungen (die Reihenfolge entspricht den Prioritäten). Geschätzter Aufwand rund CHF 450'000.-.
 - a. Verstärken von Holzbalkendecken
 - b. Verstärken der Verbindung der Holzbalkendecken und der Mauerwerkswände
 - c. Verstärken in der Wandebene von Brüstungsbereichen von Mauerwerkswänden
 - d. Verstärken quer zur Wandebene von Mauerwerkswänden
 - e. Halterung quer zur Wandebene von Mauerwerkswänden mit Holzbauteilen
 - f. Ergänzung von unterbrochenen oder versetzten Mauerwerkswänden
- (3) Kostenoptimierte Konstruktionen: Evaluation von kostenoptimierten Konstruktionen anhand der technischen Anforderungen und der baulichen Abläufe mit allfälligen Versuchen zur Verifikation der Eigenschaften der erdbebenertüchtigten Konstruktionen (Bestand und Verstärkung). Geschätzter Aufwand rund CHF 200'000.-.

10. Literaturverzeichnis

- Ammann, W.J., Kluge, D. und Wenk, T. (1992). Recueil des techniques de renforcement sismique. *Renforcement du bâti existant*. **D 092**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Ammann, W.J., Bucher, K., Kluge, D., Matousek, M., Walter, E., Wenk, T., Wieland, M., Zahn, F. und Zwicky, P. (1993). Verstärkungsmassnahmen für erdbebengefährdete Bauwerke. **D 097**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Bachmann, H. und Lang K. (2002). Zur Erdbebensicherung von Mauerwerksbauten. IBK-Berichte, ed. E.Z.. **274**. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- Blass, H.J., et al. (1994). Timber structures in seismic regions, RILEM State-of-the-art Report. *Materials and Structures*. **27(167)**, 157-184.
- Brunner, R., Jung, P., Steiger R., Wenk, T. und Wirz, N. (2010). Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten. Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich.
- Buchanan, A., Deam, B., Fragiacomio, M., Pampanin, S. und Palermo, A. (2008). Multi-Storey Prestressed Timber Buildings in New Zealand. *Structural Engineering International*. **18/2**, 166-173.
- Bundesamt für Wasser und Geologie BWG and Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge (2003). Beurteilung der Erdbebensicherheit eidgenössischer Bauwerke - Konzept und Richtlinie für die erste Stufe.
- Ceccotti, A. und Follesa, M. (2006). Seismic Behaviour of Multi-Storey XLam Buildings. CNR-IVALSA, San Michele all'Adige, Italy.
- CIB-W18, Current List of Papers (2011). http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/cib_gesamt.pdf
- Dazio, A. und Beyer, K. (2009). Schäden an Mauerwerksbauten beim Erdbeben vom 6. April 2009 in L'Aquila. *Erdbeben und Mauerwerk*. **D 0231**, 33-42. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Dazio, A. und Wenk, T. (2009). Erdbeben und Mauerwerk. **D 0231**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Dazio, A. (2009). Vorlesung an der ETHZ zur Erdbebensicherung von Bauwerken II, Teil 3. Seismisches Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk.
- Giardini, D., Wiemer, S., Fäh, D., Deichmann, N. (2004). Seismic Hazard Assessment of Switzerland, Swiss Seismological Service, ETH Zürich.
- Eurocode 8 (1998). Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1.4: Grundlagen - Verstärkung und Reparatur von Hochbauten, Europäische Vornorm **ENV 1998-1-4**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Eurocode 8 (2004). Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Allgemeine Regeln, Regeln für Gebäude, European Standard **EN 1998-1**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Eurocode 8 (2005). Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden, European Standard **EN 1998-3**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- FEMA 273 (1997). NEHRP-Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA.
- FEMA 547 (2006). Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA.
- Filiatrault, A. und Folz, B. (2002). Performance-based seismic design of wood framed buildings. *ASCE Journal of Structural Engineering*. **128(1)**, 39-47.
- Graf, W.P. und Seligson, H.A. (2011). Earthquake Damage to Wood-Framed Buildings in the ShakeOut Scenario. *Earthquake Spectra*. **27/2**, 351–373.
- Jung, P., Steiger, R. und Wenk, T. (2008). Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten. Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich.

- Lignum, Holzwirtschaft Schweiz (2005). Lignum-Dokumentation Brandschutz: Bauten in Holz – Brandschutz-Anforderungen.
- Lignum, Holzwirtschaft Schweiz (2007). Lignum-Dokumentation Brandschutz: Bauteile in Holz – Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand.
- Lignum, Holzwirtschaft Schweiz (2007). Lignum-Dokumentation Brandschutz: Brandmauern – Konstruktion REI90.
- Lignum, Holzwirtschaft Schweiz (2009). Lignum-Dokumentation Brandschutz: Aussenwände – Konstruktion und Bekleidungen.
- NZSEE (2006). Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes. New Zealand Society for Earthquake Engineering, Auckland.
- Pang, W.C. und Rosowsky, D.V. (2009). Direct Displacement Procedure for Performance-Based Seismic Design of Mid-Rise Wood-Framed Structures. *Earthquake Spectra*. **25 583**.
- Parisi, M.A. und Piazza, M. (2008). Seismic Strengthening of Traditional Carpentry Joints. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Rupf, M., Braun, B., Beyer, K. und Dazio, A. (2009). Quasi-statisch zyklische Versuche an vorfabrizierten, bewehrten Mauerwerkswänden. *Erdbeben und Mauerwerk*. **D 0231**, 77-84. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.
- Schwegler, G. (1995). Sanierung von Mauerwerk mit Faserverbundwerkstoffen. IBK-Berichte, ed. E.Z.. **SP-004**, 116-120. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (1970). Einwirkungen auf Tragwerke. **160**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (1989). Einwirkungen auf Tragwerke. **160**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (1997). Erhaltung von Bauwerken. **469**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2003). Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. **260**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2003). Einwirkungen auf Tragwerke. **261**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2003). Mauerwerk. **266**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2004). Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben. **M 2018**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2005). Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben, Einführung in das Merkblatt SIA 2018. **D 0211**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2006). Schallschutz im Hochbau. **181**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2009). Holzbau – Ergänzende Festlegungen. **265/1**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2010). Beurteilung von Mauerwerksbauten bezüglich Erdbeben. **D 0237**.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia (2011). Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken. **269**.
- Steurer, A. und Fuhrmann, C. (2009). Verhalten unter Erdbebenbeanspruchung Trag- und Verformungsverhalten unter Normalkraft - zyklischer Schubkraft – Beanspruchung in Scheibenebene, Final Report, KTI - Project 3225.1. ibk, ETH Zürich.
- Steiger, R., Bernasconi, A., Beyer, K., Brunner, R., Jung, P., Wenk, T. (2011). Earthquake resistant timber systems for multi-storey buildings, Full-Proposal submitted to: Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF), Bern.
- Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen und Bundesamt für Umwelt BAFU (2006). Erdbebensicheres Bauen in der Schweiz - Worauf es ankommt und warum.
- Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen und Bundesamt für Umwelt BAFU (2007). Ist unser Haus erdbebensicher?

Van de Lindt, J.W., Rosowsky, D.V., Filiatrault, A., Symans, M. und Davidson, R. (2006). Development of a Performance-Based Seismic Design Philosophy for Mid-Rise Woodframe Construction: Progress on the NEESWood Project. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, OR.

Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF (2003). Schweizerische Brandschutzvorschriften VKF.

Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF (2003). Verzeichnis von Begriffen, die für oder in Brandschutzmassnahmen massgeblich sind.

WCTE Conference Proceedings: 1988, Seattle, USA; 1990, Tokyo, Japan; 1991, London, UK; 1996, New Orleans USA; 1998, Montreux, Switzerland; 2000, Whistler, Canada; 2002, Shah Alam, Malaysia; 2004, Lahti, Finland; 2006, Portland, USA; 2008, Miyazaki, Japan; 2010, Riva del Garda, Italy.

Wenk, T. (2004). Einführung in die Erdbebenbemessung mit den neuen Tragwerksnormen. *Fortbildungskurs "Erdbebenbemessung mit den neuen Tragwerksnormen"*. ibk, ETH Zürich.

Wenk, T. (2008). Erdbebenertüchtigung von Bauwerken. Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz. *Umwelt-Wissen*. **0832**. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Wenk, T. (2011). Erdbebenforschung, Entwicklung und Nachweisführung im Schweizer Holzbau. *Grazer Holzbau-Fachtagung "Aussergewöhnliche Einwirkung - Erdbeben - im Holzbau"*, TU Graz.

Anhang A: Umfrage bei den Industriepartnern

Anhang A1: Retournierte Fragebogen

ZZ Wancor AG, Martin Bodmer (23.07.12)

Identifizierte Schwachstellen (Kap. 7)	bisher nicht bekannt	schon lange bekannt (vor 2003)	seit kurzem bekannt (nach 2009)	aufgrund von Projekten darauf gestossen	aufgrund von Literatur und WB darauf gestossen
Beanspruchung in der Wandebene (Kapitel 7.1.1)		X			
Beanspruchung quer zur Wandebene (Kapitel 7.1.2)		X			
Unterbrochene oder versetzte Wände (Kapitel 7.2)		X			
Nicht tragende Wände (Kapitel 7.3)		X			
Holzdecken (Kapitel 7.4)	X				
Verbindungen zwischen Decken und Wänden (Kapitel 7.5)	X				
Untergeschosse (Kapitel 7.6)	X				
Fundation (Kapitel 7.7)	X				

Konstruktive Umsetzung (Kap. 8)	Lösung bisher nicht bekannt	Lösung schon angewandt	Produkte für Lösung vorhanden	interessiert an einer Produkt-Entwicklung	andere Lösungs-konzepte sind vorhanden
Verstärkung in der Wandebene (Kapitel 8.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, aussen ertüchtigt (Kapitel 8.2.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, innen ertüchtigt (Kapitel 8.2.2)	X				
Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden (Kapitel 8.3)			X		
Nicht tragende Wände ersetzen (Kapitel 8.4)			X		
Nicht tragende Wände verstärken (Kapitel 8.5)			X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, Trockenbaulösung (Kapitel 8.6.1)			X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, HBV-Lösung (Kapitel 8.6.2)			X		

SFS unimarket AG, Marcel Thomi (09.09.11)

Identifizierte Schwachstellen (Kap. 7)	bisher nicht bekannt	schon lange bekannt (vor 2003)	seit kurzem bekannt (nach 2009)	aufgrund von Projekten darauf gestossen	aufgrund von Literatur und WB darauf gestossen
Beanspruchung in der Wandebene (Kapitel 7.1.1)		X			
Beanspruchung quer zur Wandebene (Kapitel 7.1.2)		X			
Unterbrochene oder versetzte Wände (Kapitel 7.2)		X			
Nicht tragende Wände (Kapitel 7.3)		X			
Holzdecken (Kapitel 7.4)		X			
Verbindungen zwischen Decken und Wänden (Kapitel 7.5)	X				
Untergeschosse (Kapitel 7.6)		X			
Fundation (Kapitel 7.7)		X			

Konstruktive Umsetzung (Kap. 8)	Lösung bisher nicht bekannt	Lösung schon angewandt	Produkte für Lösung vorhanden	interessiert an einer Produkt-Entwicklung	andere Lösungs-konzepte sind vorhanden
Verstärkung in der Wandebene (Kapitel 8.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, aussen ertüchtigt (Kapitel 8.2.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, innen ertüchtigt (Kapitel 8.2.2)	X				
Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden (Kapitel 8.3)	X				
Nicht tragende Wände ersetzen (Kapitel 8.4)			X		
Nicht tragende Wände verstärken (Kapitel 8.5)			X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, Trockenbaulösung (Kapitel 8.6.1)		X	X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, HBV-Lösung (Kapitel 8.6.2)		X	X		

Schilliger Holz AG, Werner Leidungut (23.07.12)

Identifizierte Schwachstellen (Kap. 7)	bisher nicht bekannt	schon lange bekannt (vor 2003)	seit kurzem bekannt (nach 2009)	aufgrund von Projekten darauf gestossen	aufgrund von Literatur und WB darauf gestossen
Beanspruchung in der Wandebene (Kapitel 7.1.1)			X		
Beanspruchung quer zur Wandebene (Kapitel 7.1.2)			X		
Unterbrochene oder versetzte Wände (Kapitel 7.2)			X		
Nicht tragende Wände (Kapitel 7.3)			X		
Holzdecken (Kapitel 7.4)		X			
Verbindungen zwischen Decken und Wänden (Kapitel 7.5)		X			
Untergeschosse (Kapitel 7.6)		X			
Fundation (Kapitel 7.7)		X			

Konstruktive Umsetzung (Kap. 8)	Lösung bisher nicht bekannt	Lösung schon angewandt	Produkte für Lösung vorhanden	interessiert an einer Produkt-Entwicklung	andere Lösungs-konzepte sind vorhanden
Verstärkung in der Wandebene (Kapitel 8.1)	X		X		
Verstärkung quer zur Wandebene, aussen ertüchtigt (Kapitel 8.2.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, innen ertüchtigt (Kapitel 8.2.2)	X				
Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden (Kapitel 8.3)	X				
Nicht tragende Wände ersetzen (Kapitel 8.4)	X				
Nicht tragende Wände verstärken (Kapitel 8.5)	X				
Holzdecken/Verbindungen verstärken, Trockenbaulösung (Kapitel 8.6.1)			X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, HBV-Lösung (Kapitel 8.6.2)		X			

Pius Schuler AG, Pius Schuler (19.10.11)

Identifizierte Schwachstellen (Kap. 7)	bisher nicht bekannt	schon lange bekannt (vor 2003)	seit kurzem bekannt (nach 2009)	aufgrund von Projekten darauf gestossen	aufgrund von Literatur und WB darauf gestossen
Beanspruchung in der Wandebene (Kapitel 7.1.1)	X				
Beanspruchung quer zur Wandebene (Kapitel 7.1.2)	X				
Unterbrochene oder versetzte Wände (Kapitel 7.2)	X				
Nicht tragende Wände (Kapitel 7.3)	X				
Holzdecken (Kapitel 7.4)		X			
Verbindungen zwischen Decken und Wänden (Kapitel 7.5)	X				
Untergeschosse (Kapitel 7.6)	-	-	-	-	-
Fundation (Kapitel 7.7)	-	-	-	-	-

Konstruktive Umsetzung (Kap. 8)	Lösung bisher nicht bekannt	Lösung schon angewandt	Produkte für Lösung vorhanden	interessiert an einer Produkt-Entwicklung	andere Lösungs-konzepte sind vorhanden
Verstärkung in der Wandebene (Kapitel 8.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, aussen ertüchtigt (Kapitel 8.2.1)	X				
Verstärkung quer zur Wandebene, innen ertüchtigt (Kapitel 8.2.2)	X				
Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden (Kapitel 8.3)	X				
Nicht tragende Wände ersetzen (Kapitel 8.4)	X				
Nicht tragende Wände verstärken (Kapitel 8.5)	X				
Holzdecken/Verbindungen verstärken, Trockenbaulösung (Kapitel 8.6.1)			X		
Holzdecken/Verbindungen verstärken, HBV-Lösung (Kapitel 8.6.2)					X

Anhang A2: Qualitative Zusammenfassung der Gespräche

ZZ Wancor AG, Martin Bodmer (23.07.12)

Die im Kapitel 7 identifizierten Schwachstellen seien im Bezug auf die Wand alle bekannt. Auch sei ihm bewusst, dass die beiden Schwachstellen bei den Decken kritisch seien, jedoch war die Begründung dazu nie schlüssig greifbar. Ähnliches trifft bei der Beurteilung des Untergeschosses und der Foundation zu.

Diese im Kapitel 8 dargestellten konstruktiven Umsetzungen seien bezüglich der Wandverstärkung - in der und quer zur Wandebene - nicht bekannt. Alle anderen konstruktiven Umsetzungen seien bekannt und würden auch regelmässig angewandt, respektive hätten sie auch regelmässig Beratungen in der Anwendungstechnik zu erbringen. Entsprechend wären auch Produkte am Markt vorhanden.

Den weiteren Handlungsbedarf spricht Martin Bodmer bei ZZ Wancor AG intern ab und lässt dieses Feedback Roland Brunner von Lignum im August 2012 zukommen.

SFS unimarket AG, Marcel Thomi (09.09.11)

Die im Kapitel 7 identifizierten Schwachstellen seien alle bekannt, bis auf die Problemstelle Verbindung zwischen Decken und Wänden. Allerdings seien Untergeschosse und Foundations weniger problematisch einzustufen, sofern diese in Beton ausgeführt seien, was zumeist zuträfe.

Diese im Kapitel 8 dargestellten konstruktiven Umsetzungen seien bis anhin weniger nicht bekannt gewesen: Verstärkungen in der und quer zur Wandebene sowie Ergänzungen bei unterbrochenen oder versetzten Wänden. Für die anderen konstruktiven Umsetzungen kenne er realisierte Objekte, wobei bei SFS unimarket Produkte zum Verstärken von nicht tragenden Wänden oder zum Verstärken von Decken und deren Anschlüsse an die Wand vorhanden wären.

Alles in allem sieht er für SFS unimarket keinen Handlungsbedarf, der sich aus dem Projekt ergäbe.

Schilliger Holz AG, Werner Leidunggut (23.07.12)

Die im Kapitel 7 identifizierten Schwachstellen seien alle bekannt gewesen wie auch alle im Kapitel 8 dargestellten konstruktiven Umsetzungen. Zum Verstärken von Holzdecken mit einer Trockenbaulösung verfügt die Schilliger Holz AG über eigene Produkte.

Die eigenen Produkte wurden noch wenig unter dem Gesichtspunkt der Erdbebenertüchtigung eingesetzt. Der Einsatz erfolgte meist bei Sanierungen zum Verstärken der Decken bezüglich der Eigen- und Nutzlasten infolge Umnutzungen.

Die Thematik des Verstärkens von Mauerwerkswände in der Ebene sei aber nach wie vor interessant, doch bestünden diverse Fragen zu ihren eigenen Produkten: Wie verhält sich das fertige Bauteil in der Realität und mit welchen Abweichungen zur Modellierung ist zu rechnen? Wie verhält sich beispielsweise beschädigtes Mauerwerk und inwieweit können mit Holzbau-elementen Verstärkungen vorgenommen werden. Wie erfolgen die Verankerungen der Holzbau-elemente in den Betondecken und die Stabilisierungsbefestigungen der Mauerwerkswände?

Pius Schuler AG, Pius Schuler (19.10.11)

Die im Kapitel 7 identifizierten Schwachstellen seien fast ausschliesslich nicht bekannt gewesen, bis auf die Schwachstelle in den Holzdecken.

Nahezu alle im Kapitel 8 dargestellten konstruktiven Umsetzungen seien bis anhin nicht bekannt gewesen. Einzig zum Verstärken von Decken und deren Anschlüsse seien die im Markt vorhandenen Lösungen bekannt. Zum Verstärken von Holzdecken mit einer Trockenbaulösung verfügt die Pius Schuler AG über eigene Produkte.

Er wäre zudem überrascht, dass der Tragwiderstand in der Ebene der Mauerwerkswände so hoch sei und in der Schweiz als wenig relevantes Problem gelte. Ihn würde die Erkenntnis zum Verformungs- und Versagensverhalten aus einem Versuch einer mit Holzelementen verstärkten Mauerwerkswand interessieren.

**Anhang B: Finanzierungsgesuch an den Wald- und Holzforschungsfonds WHFF –
Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen:
vom 21.09.2010**

Seismic retrofitting of masonry buildings with timber elements: Pilot study

Problembeschreibung

Im Vergleich mit anderen europäischen Staaten wie z. B. Italien ist die Erdbebengefährdung in der Schweiz als gering bis mässig einzustufen [1]. Trotzdem warnen Experten immer wieder davor, diese Gefahr nicht zu unterschätzen und weisen darauf hin, dass das Erdbebenrisiko in der Schweiz das bedeutendste Risiko aus Naturgefahren ist [2, 3]. Da es moderne Erdbebennormen in der Schweiz erst seit 1989 gibt [4] und rund 80% der bestehenden Hochbauten in der Schweiz im Zeitraum vor 1989 (etwa 60% vor 1970) projektiert und erstellt wurden [5], weisen eine Vielzahl dieser Bauten eine unbekannte und oft ungenügende Erdbebensicherheit auf. Die seit 2003 für die Bemessung von Gebäuden in der Schweiz gültigen SIA-Tragwerksnormen der 260er-Reihe setzen die Eurocodes um. Im Falle des Erdbebennachweises ergab sich u. a. dadurch eine starke Erhöhung des bei der Bemessung anzusetzenden Bemessungserdbebens [6]. Während man bei Neubauten diese Anforderungen im Rahmen der Konzeption, Konstruktion und Projektierung mit einer erdbebengerechten Bauweise relativ einfach erfüllen kann [2], tritt bei der Erhaltung bestehender Bauwerke häufig eine ungenügende Erdbebensicherheit auf und entsprechend sind Erüchtigungsmassnahmen zu planen.

Circa zwei Drittel der Gebäude in Schweizer Städten sind Mauerwerksbauten [7]. Wegen mangelnder Beachtung der Erdbebeneinwirkung wird bzw. wurde häufig unbewehrtes Mauerwerk aus Backsteinen für Gebäude mit mehreren Stockwerken (teilweise bis 15) verwendet. Backsteinwände sind zwar gut wärmedämmend und wärmespeichernd und vertikale Kräfte aus Schwerlasten können relativ gut abgetragen werden, der vorwiegend horizontalen und zyklischen Erdbebeneinwirkung setzen Mauerwerksbauten jedoch wenig Widerstand und sehr wenig Verformungsvermögen entgegen [8]. Einerseits sind sie recht steif, sie haben meist eine hohe Eigenfrequenz – im Plateaubereich des Bemessungsspektrums der Beschleunigung gemäss Norm SIA 261:2003 [9] – und sie erfahren entsprechend grosse Erdbebenkräfte. Andererseits sind unbewehrte Mauerwerkswände ziemlich spröde und zeigen eine verhältnismässig geringe Energiedissipation und Bruchdeformation. Ferner können Mauerwerkswände häufig die Beanspruchungen quer zur Wandebene infolge Erdbeben nicht aufnehmen [10]. Gesamthaft gesehen sind Mauerwerksbauten für Erdbeben sehr verletzlich [8] [10]. Es existieren daher auf dem Markt Systeme, die das Bewehren (Armieren) von tragenden Backsteinwänden erlauben. Während solche Systeme im Neubau durchaus Anwendung finden (in der Schweiz allerdings bisher wenig [11]), ist die nachträgliche Erdbebenertüchtigung von bestehenden Mauerwerksbauten mit diesen Systemen oft nur sehr aufwendig realisierbar. Insbesondere Mischsysteme mit tragenden Mauerwerkswänden oder durch Mauerwerk ausgefachte Rahmen zeigen ein ungünstiges Erdbebenverhalten [2]. Bei mangelhafter Erdbebensicherheit oder aus anderen Gründen ungenügendem Tragwiderstand werden Mauerwerksbauten häufig mit aufgeklebten Lamellen aus Kohlefaserverstärktem Kunststoff ertüchtigt [12]. Dies ist allerdings keine ideale Lösung, da auch die Verstärkungselemente und die Klebstoffe (üblicherweise Epoxidharze), wie das Mauerwerk ein sprödes Bruchverhalten aufweisen. Nur Matten mit Fasern in mehreren Richtungen sind in beschränkter Masse duktil [12]. Eine weitere, häufig praktizierte Ertüchtigungsmassnahme ist das nachträgliche Einbauen von schlanken, über die gesamte Gebäudehöhe durchlaufenden Stahlbetonwänden oder von Stahlfachwerken [13] oder das vertikale Vorspannen der Mauerwerkswände [13, 14]. Generell soll die Verstärkung die Systemduktilität steigern, eine gleichmässige Rissverteilung über die gesamte Tragwandoberfläche erzeugen und den Tragwiderstand erhöhen [12].

Mit Holz können ohne aufwendige zusätzliche Massnahmen bei adäquater Konzeption, Konstruktion und Bemessung erdbebengerechte Hochbauten auch mehrgeschossig erstellt werden [15]. Holz hat als Baustoff, was das Erdbebenverhalten von entsprechenden Tragstrukturen betrifft, einige Vorteile gegenüber anderen Baustoffen, so z. B. die bezogen auf die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit und Steifigkeit) geringe Masse [16]. Holz ist zudem der einzige nachwachsende Baustoff und weist eine ausgeglichene CO₂-Bilanz auf. Ein verstärkter Einsatz von Holz nicht nur im Neubau sondern auch beim Bauen im Bestand ist daher anzustreben. Vor diesem Hintergrund will die beantragte Konzeptstudie der Idee einer Erdbebenertüchtigung von bestehenden Mauerwerksbauten mittels Holzelementen nachgehen.

Ziele des Projekts

Mittels einer Konzeptstudie sollen als Vorbereitungsarbeit für ein im Nachgang allenfalls zu lancierendes grösseres Forschungsvorhaben folgende Dinge untersucht werden:

- Abschätzung des Bedarfs an Ertüchtigungsmassnahmen bei Mauerwerksbauten in der Schweiz, aufgeteilt nach Erdbebenzonen und Bauwerksklassen (gemäss [9])
- Identifikation der massgeblich durch Erdbeben gefährdeten Tragwerksteile von Mauerwerksbauten
- Abschätzung der aus Erdbeben auftretenden Kräfte und Verformungen
- Vergleichsrechnungen Mauerwerkswände, Holzwände unterschiedlichsten Aufbaus
- Materialtechnische und konstruktive Evaluation von möglichen Verstärkungs- und Versteifungselementen aus Holz
- Lage von Elementen aus Holz (bezüglich z. B. einer Wand: innen, aussen, beidseitig)
- Befestigung der Elemente aus Holz an der bestehenden Tragstruktur. Praktische Umsetzung (Montage, Kontrolle, Unterhalt, etc.). Energiedissipation.
- Zusammenstellung der wichtigsten Aspekte, welche aus bauphysikalischer (Wärme-, Feuchte- und Schallschutz) und aus brandschutztechnischer Sicht zu beachten sind.

Die Ergebnisse der Studie werden zusammen mit Empfehlungen für ein allfälliges grösseres nachfolgendes Forschungsprojekt in einem Bericht zusammengefasst.

Bedeutung des Projekts

Bedeutung für die Praxis

Wie in der Problemstellung beschrieben, ist ein Grossteil der Gebäude in der Schweiz Mauerwerksbauten. Trotz den Bestrebungen der letzten Jahre insbesondere bezüglich energetischer Sanierung des Gebäudebestandes, besteht nach wie vor ein grosser Erhaltungsbedarf. Würde es gelingen, ein Konzept vorzustellen, welches neben der thermischen Sanierung auch die Erdbebenertüchtigung im selben Arbeitsgang und in derselben Bauteilebene erlaubt, wäre dies allenfalls ein Argument, welches mehr Bauherren für bauliche Eingriffe motivieren würde.

Bedeutung für die Schweizer Holzindustrie

Können Lösungen im Bereich der oben erwähnten Ansätze gefunden werden, würde das neue Anwendungsgebiete für den Baustoff Holz und für die Holzbauunternehmen im Bereich der Sanierung schaffen. Zudem erlaubten solche Lösungen erstmals eine gemeinsame Kommunikation zwischen Ziegelei- und Holzindustrie respektive eine Kommunikation mit Organisationen, welche insbesondere auch Eigentümer von Gebäuden in Mauerwerksbauweise vertreten.

Stand des Wissens auf dem Gebiet

Nach derzeitigem Kenntnisstand der Gesuchsteller wurde die Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen bisher noch nicht untersucht oder in der Praxis angewandt. Die hiermit beantragte Konzeptstudie soll gerade eben diesen Zweck verfolgen.

Motivation zum Antrag

Die Projektidee entstand im Rahmen der Erarbeitung der Dokumentation „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“ [16] und dem davor erschienenen Lignatec „Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten“ [15]. Ausgehend von einer eigentlichen Schwäche des Bauens mit Holz, dem Vorliegen einer schier unendlichen Konstruktionsvielfalt aus Kombinationen von Verbindungsmitteln und Holzwerkstoffen, welche dem „nicht Holzbaukundigen“ den Zugang zum Bauen mit Holz oft erschwert, kann im positiven Sinne der „Holzbaukundigen“ eine optimal auf die Anforderungen abgestimmte Konstruktion entwickelt werden. Werden die Vorteile von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber anderen, tragend einsetzbaren Baustoffen genutzt, z.B. die tiefe Wärmeleitfähigkeit sowie die Transportfähigkeit und somit die Vorfertigbarkeit, erschliesst sich beim Betrachten möglicher Anwendungsgebiete mit hohem Volumen relativ naheliegend die Instandstellung von Mauerwerksbauten. Dabei sind u. a. die folgenden Punkte zu beachten:

- Da beide Baustoffe, Holz wie Mauerwerk, ein sprödes Bruchverhalten aufweisen, muss die Dissipation der Erdbebenenergie in den Verbindungen zwischen beiden Werkstoffen erfolgen. Die Prüfung auf dem Markt vorhandener oder allenfalls die Entwicklung neuer, speziell auf die Energiedissipation ausgelegter Verbindungsmittel ist also ein Schlüsselement. Für den Einsatz von Holzkonstruktionen spricht, dass es verschiedenste Holzwerkstoffe und Verbindungsmittel gibt, die sich optimal ergänzend auf die Festigkeits- und Verschiebungsanforderungen der Sanierungsmassnahme abstimmen lassen.
- Die Verstärkungselemente müssen so appliziert werden, dass die resultierende Wandkonstruktion als Ganzes aus bauphysikalischer Sicht keine Probleme aufweist, bezüglich Wärme- und Feuchte-, sowie Schallschutz. Für den Einsatz von Holzkonstruktionen spricht, dass ein Ein- oder Aufbringen von zusätzlichen Tragwerksteilen nicht grundsätzlich zu einer Wärmebrücke führt, da Holz und Holzwerkstoffe gegenüber anderen, für Tragwerke geeignete Baustoffe eher geringe Wärmeleitfähigkeiten aufweisen.
- Den Aspekten des Brandschutzes muss man gerecht werden bzw. bleiben. Hier gibt es eher Vorbehalte gegenüber dem Baustoff Holz im Vergleich zu massiven Baustoffen, jedoch wurden in den letzten Jahren entsprechende Lösungskonzepte für brennbare Baustoffe im Einsatz bei mehrgeschossigen Gebäuden entwickelt.

Da das Autorenteam des erwähnten Projektes [15, 16] sich fachlich optimal ergänzte und persönlich äusserst gut harmonierte, soll die Konzeptstudie in derselben Konstellation realisiert werden. Dies erlaubt eine effiziente Erörterung der relevanten Machbarkeitshürden und Potentiale als Grundlage für ein breiter abgestütztes Forschungsvorhaben.

Bisherige Abklärungen

Eine erste konsultative Sitzung unter den Projektinitianten und potentiellen weiteren Interessenten hat am 11.05.2010 an der ETH Zürich stattgefunden. An der Sitzung teilgenommen haben die Herren R. Brunner (Lignum), A. Müller (bfh/ahb), K. Blechschmidt (ZZ Wancor), N. Mojsilovic (ETHZ, ibk) und R. Steiger (Empa). Sämtliche Beteiligten bewerteten den Lösungsansatz als äusserst interessant, votierten allerdings für eine fundierte Konzeptstudie als Grundlage für ein allenfalls später zu startendes grösseres Forschungsvorhaben.

Forschungsplan

Die Studie soll in folgenden Teilschritten erarbeitet werden:

1. Literaturstudium zu den Themen:

- Erdbebengefährdung in der Schweiz
- Gebäude-Mix in der Schweiz (Anteil von Mauerwerksbauten und geographische Lage bezüglich Zonenkarte, Bauwerksklasse)
- Erdbebenverhalten von Mauerwerksbauten,
- typische Schadenbilder in und quer zur Wandebene
- etc.

→ Bedarfsbewertung für Ertüchtigungsstrategien bei Mauerwerksbauten (Regularität in Grund- und Aufriss verbessern, Verstärken, Duktilität erhöhen, Schwächen, Dämpfung erhöhen, Masse reduzieren, Nutzung ändern)

2. Identifikation der zu verändernden Teile der Tragstruktur von Mauerwerksbauten

- z. B. aussteifende Wände, „nicht tragende Wände“, Lagerung und Foundation der Wände, Einleitung von Schwere- und von Horizontallasten in die Wände
- Wo treten welche äusseren und inneren Kräfte auf?
- Welche Bereiche sind gefährdet?

3. Anforderungskatalog an einen Eingriff generell (baustoffunabhängig) und an einen Eingriff mit Holzelementen (im Besonderen), bezüglich:

- Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (Tragwiderstand, Steifigkeit und Verformungsvermögen)
- Robustheit
- Dauerhaftigkeit
- Verhalten im Bruchzustand, Energiedissipation
- Brandwiderstand
- Bauphysik
- Verbindung mit der bestehenden Tragstruktur
- Montage
- Kontrolle, Instandhaltung, Instandsetzung
- Kosten
- etc.

4. Vorschläge von Instandstellungsstrategien unter Einsatz von Bauteilen aus Holz und HWS:

- Baustoff
- Konstruktiver Aufbau der Elemente
- Anordnung der Elemente (innen, aussen, beidseitig)
- Verbindung der Elemente untereinander und mit der Wand
- Konstruktionsskizzen

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für ein Forschungsprojekt

- Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse
- Beantwortung der Frage, ob Holzelemente zur Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten tauglich sind, d. h. ob in der Folge die Lancierung eines grösseren Forschungsprojekts sinnvoll ist
- Empfehlungen betreffend anzugehende Fragestellungen in einem Forschungsprojekt

Projektorganisation

Beteiligte Institutionen

Eine effiziente Projektabwicklung ist nur möglich, wenn die an der Konzeptstudie beteiligten Partner über ein gewisses Mass an Basiswissen zu den Themen Baudynamik, Erdbebeningenieurwesen, Mauerwerks- und Holzbau verfügen. Das Projektteam, welches die kürzlich erschienenen Dokumentationen [15, 16] über den erdbebengerechten mehrgeschossigen Holzbau erarbeitet hat, bildet daher das Kernteam für die Konzeptstudie:

- Lignum, Holzwirtschaft, Zürich (Dipl.-Ing. Roland Brunner): Federführung
- Pirmin Jung Ingenieure für Holzbau AG, Rain LU (Dipl.-Ing. Pirmin Jung, Dipl.-Ing. Niklaus Wirz, Dipl.-Ing. Lukas Wolf)
- Empa, Abteilung Holz, Dübendorf (Dr. René Steiger)
- Wenk Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik GmbH, Zürich (Dr. Thomas Wenk)

Als Partner in einem potentiellen Nachfolgeprojekt kommen neben der bfh/ahb Biel (Dipl.-Ing. Andreas Müller), dem Institut für Baustatik und Konstruktion (Dr. Nebojsa Mojsilovic) und der Professur für Tragwerksentwurf (Prof. Dr. Joseph Schwartz) der ETH Zürich auch die kürzlich neu geschaffene Professur für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen an der EPFL (Prof. Dr. Katrin Beyer) sowie die Abteilung Ingenieurstrukturen der Empa (Dr. Glauco Feltrin) in Frage.

Interessierte Industriepartner

Falls die Konzeptstudie mit dem Resultat endet, dass die Initiierung eines grösseren Forschungsvorhabens sinnvoll ist, haben die folgenden Industriepartner bereits Interesse bekundet, am Projekt mitzuwirken:

ZZ Wancor AG
Althardstrasse 5
8105 Regensdorf
www.zzwancor.ch

SFS unimarket AG
Nefenstrasse 30
CH-9435 Heerbrugg
www.sfsunimarket.biz

vertreten durch:
Dipl.-Bauing. FH Kay Blechschmidt

vertreten durch:
Dipl. Bauing. HTL Marcel Thomi

Schilliger Holz AG
Haltikon 33
6403 Küssnacht am Rigi
www.schilliger.ch

Pius Schuler AG
Kronenstrasse 12
CH-6418 Rothenthurm
www.pius-schuler.ch

vertreten durch:
Ernest Schilliger

vertreten durch:
Pius Schuler

Verantwortlichkeiten im Rahmen der Konzeptstudie

Die Leitung und Koordination der Konzeptstudie liegt bei der Lignum. Die Projektarbeiten werden im Ingenieurbüro Pirmin Jung und an der Empa durchgeführt. Als Fachexperte wirkt Dr. Thomas Wenk mit. Die Studie wird in einem Bericht dokumentiert und mündet in eine Empfehlung betreffend Lancierung eines Nachfolgeprojekts (KTI und/oder NFP 66).

Zeitplan

Das Projekt ist bei folgendem Ablauf auf eine Laufzeit von 6 Monaten veranschlagt:

Projektbeginn: 01.11.2010 bzw. 1 Monat nach Bewilligung des Projekts

Projektende: 31.05.2011 bzw. 7 Monate nach Bewilligung des Projekts

Finanzplan und benötigte Mittel

Aufwand

Arbeitsschritt / Aufgabe	Involviert	Aufwand [AT]	Aufwand [CHF]
0. Projektleitung und Begleitung durch Industriepartner (Stellungnahmen zu Konstruktionen und Montage sowie Teilnahme an Besprechungen)	Lignum	15	15'000.-
	Industriepartner	12	12'000.-
1. Literaturstudium und Bedarfsbewertung	Empa	3	3'000.-
	Experte	3	3'000.-
2. Identifikation der zu verändernden Teile der Tragstruktur von Mauerwerksbauten	Empa	5	5'000.-
	Experte	5	5'000.-
3. Anforderungskatalog an einen Eingriff generell (baustoffunabhängig) (Empa) und an einen Eingriff mit Holzelementen (im besonderen) (PL + Ingenieurbüro)	Empa	4	4'000.-
	Lignum	4	4'000.-
	Ingenieur	4	4'000.-
4. Vorschläge von Instandstellungsstrategien auf der Basis von Bauteilen aus Holz und HWS	Lignum	3	3'000.-
	Ingenieur	10	10'000.-
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für ein Forschungsprojekt	Lignum	2	2'000.-
	Empa	2	2'000.-
	Experte	2	2'000.-
Summe Aufwand			CHF 74'000.-

Finanzierung

Projektpartner	CHF
Eigenleistung Lignum: 100% der Lohnkosten	24'000.-
Eigenleistung Industriepartner: 100% der Lohnkosten	12'000.-
Eigenleistung Empa: 30% der Lohnkosten	4'000.-
Eigenleistung Ingenieur: 0% der Lohnkosten	0.-
Eigenleistung Experte: 0% der Lohnkosten	0.-
Leistung Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung:	34'000.-
Summe Finanzierung	74'000.-

Antrag

Die Gesuchsteller ersuchen hiermit den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, die Konzeptstudie zur „Erdbebenertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Holzelementen“ mit einem Betrag von CHF 34'000.- zu unterstützen.

Literatur

1. Weidmann, M., Erdbeben in der Schweiz. 2002, Chur: Verlag Desertina. 303.
2. Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, Erdbebensicheres Bauen in der Schweiz - Worauf es ankommt und warum. 2006.
3. Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen and Bundesamt für Umwelt BAFU, Ist unser Haus erdbebensicher? 2007.
4. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, SIA-Norm 160: Einwirkungen auf Tragwerke. 1989. p. 104.
5. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG and Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge, Beurteilung der Erdbebensicherheit eidgenössischer Bauwerke - Konzept und Richtlinie für die erste Stufe. 2003.
6. Wenk, T., Einführung in die Erdbebenbemessung mit den neuen Tragwerksnormen, in Fortbildungskurs "Erdbebenbemessung mit den neuen Tragwerksnormen". 2004, ibk, ETHZ: ETH Zürich.
7. Michel, C., et al., Erdbebenverletzbarkeitsfunktionen von einem typischen Schweizer Mauerwerksgebäude, in SIA-Dokumentation D 0231: Erdbeben und Mauerwerk - 11. D-A-CH-Tagung 2009. 2009, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. p. 27-32.
8. Bachmann, H. and K. Lang, Zur Erdbebensicherung von Mauerwerksbauten. IBK-Berichte, ed. E.Z. Institut für Baustatik und Konstruktion. Vol. IBK-Bericht Nr. 274. 2002: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. 52.
9. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, SIA-Norm 261: Einwirkungen auf Tragwerke. 2003. p. 114.
10. Dazio, A. and K. Beyer, Schäden an Mauerwerksbauten beim Erdbeben vom 6. April 2009 in L'Aquila, in SIA-Dokumentation D 0231: Erdbeben und Mauerwerk - 11. D-A-CH-Tagung 2009. 2009, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. p. 33-42.
11. Rupf, M., et al., Quasi-statisch zyklische Versuche an vorfabrizierten, bewehrten Mauerwerkswänden, in SIA-Dokumentation D 0231: Erdbeben und Mauerwerk - 11. D-A-CH-Tagung 2009. 2009, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. p. 77-84.
12. Schwegler, G., Sanierung von Mauerwerk mit Faserverbundwerkstoffen, in IBK-Publikationen, E.Z. Institut für Baustatik und Konstruktion, Editor. 1995, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. p. 116-120.
13. Wenk, T., Erdbebenertüchtigung von Mauerwerk. Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz. Umweltwissen Nr. 0832. 2008: Bundesamt für Umwelt, Bern.
14. Räss, R. and A. Vital, Vorgespannte Mauerwerkswände auf Schalldämmagern, in SIA-Dokumentation D 0231: Erdbeben und Mauerwerk - 11. D-A-CH-Tagung 2009. 2009, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. p. 71-76.
15. Jung, P., R. Steiger, and T. Wenk, Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten, in Lignatec, L.-H. Schweiz, Editor. 2009, Lignum - Holzwirtschaft Schweiz: Zürich.
16. Brunner, R., et al., Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten. Technische Dokumentation der Lignum, ed. L.-H. Schweiz. 2010, Zürich: Lignum - Holzwirtschaft Schweiz.

Stichworte

Erdbebengefährdung, Mauerwerksbauten, Verstärkung, Brettsperrholz, Energiedissipation, Aussteifung, Gebäudehülle, Wandaufbau, Schubwand, duktile Verbindung, Verhaltensbeiwert

Keywords

Risk of earthquake, masonry buildings, strengthening, cross-laminated solid timber, solid wood panels, energy dissipation, stiffening, building envelope, wall construction, shear wall, ductile joint, behaviour factor

Kontakte

Roland Brunner
Lignum, Holzwirtschaft Schweiz
Mühlebachstrasse 8
8008 Zürich
Tel 044 267 47 89

Pirmin Jung
Ingenieure für Holzbau AG
Dipl. Holzbauing. FH/STV
Grossweid 4
6026 Rain
Tel 041 459 70 40

René Steiger
Dr. sc. techn. / dipl. Bauing. ETH/SIA
EMPA Abteilung Ingenieur-Strukturen
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
Tel 058 765 4215

Thomas Wenk
Dr. sc. techn./ dipl. Bauing. ETH/SIA
Wenk Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik GmbH
Gehrenholz 2h
8055 Zürich
Tel 044 451 31 28