

TECHNISCHE BERATUNG FÜR DEN INGENIEUR

Leitfaden

Leitfaden: Technische Hinweise für den Ingenieur zur Erdbebensicherheit

Dieses Dokument enthält Empfehlungen für den Bauingenieur, der für das Tragwerk verantwortlich ist, und soll eine Hilfestellung bei der Anwendung von Analyse- und Berechnungsmethoden zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit des Bauwerks bieten. Diese Empfehlungen beziehen sich auf gängige Gebäudetypen. Bei besonderen Gebäuden sind die Empfehlungen vom Ingenieur, der für den Entwurf verantwortlich ist, an den jeweils vorliegenden Fall anzupassen. Obwohl diese Empfehlungen allgemein gehalten sind, werden sie im vorliegenden Dokument aus Gründen der Übersichtlichkeit in Empfehlungen für Neubauten und Empfehlungen für bestehende Bauten gegliedert.

1. Neubauten

1.1 Erdbebensicherer Entwurf

Bei Neubauten hängt die Erdbebensicherheit massgeblich von der Entwurfsphase ab. Werden die Grundsätze der Erdbebensicherheit bereits in den frühen Entwurfsphasen eines Gebäudes berücksichtigt, kann ein günstiges Verhalten des Gebäudes ohne nennenswerte Zusatzkosten erreicht werden. Ein guter erdbebensicherer Entwurf erfordert die Einhaltung der folgenden Grundsätze:

- einfache und kompakte Grundrisse
- Regelmässigkeit und Symmetrie
- keine plötzlichen Veränderungen von Widerstand und Steifigkeit
- Torsionsfestigkeit und -steifigkeit

Die Grundsätze des erdbebensicheren Entwurfs im Grundriss sind in [Abbildung 1](#) zusammengefasst. Kompakte, symmetrische und regelmässige Grundrissformen sind zu bevorzugen. Überstehende Teile und einspringende Ecken müssen vermieden werden, da sie zu Belastungskonzentrationen führen. Asymmetrische Formen führen zu Torsion und sollten am besten durch den Einbau von erdbebengerechten Fugen in einfache Formen aufgebrochen werden. Dieses Aufbrechen wird auch für längliche Formen empfohlen, die unterschiedlichen Schwingungen ausgesetzt sind. Die Elemente für die horizontale Aussteifung sollten symmetrisch und nahe am Rand angeordnet werden, um für eine hohe Torsionssteifigkeit des Gebäudes zu sorgen.

Die Grundsätze des erdbebensicheren Entwurfs im Aufriss sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Eine regelmässige Gestaltung der Elemente im Aufriss ohne abrupte Unterbrechungen ist zu bevorzugen. Unregelmässigkeiten der Gebäudeform im Aufriss können durch Aufbrechen in einfache Formen

vermieden werden. Es ist wichtig, dass die horizontalen Aussteifungselemente vom oberen Ende des Bauwerks bis zum Fundament durchgängig sind. Darüber hinaus müssen abrupte Änderungen der Eigenschaften der Elemente vermieden werden.

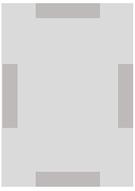
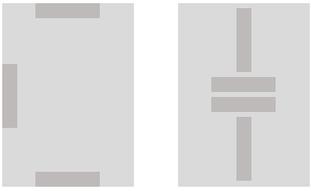
Zu bevorzugen	Zu vermeiden	Bemerkungen
		<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Grundrisse anstreben - Vorstehende Gebäudeteile und rückspringende Ecken bewirken Kräftekonzentrationen
		<ul style="list-style-type: none"> - Unsymmetrische Formen erzeugen unterschiedliche Schwingungen und Torsion - Aufteilung in einfache Formen mittels Erdbebenfugen anstreben
		<ul style="list-style-type: none"> - Langgestreckte Formen sind an den Extremitäten unterschiedlichen Schwingungen ausgesetzt
		<ul style="list-style-type: none"> - Symmetrische Anordnung von Aussteifungselementen vermindert Torsion - Anordnung der Aussteifungselemente nahe der Peripherie bewirken eine hohe Torsionssteifigkeit

Abb. 1: Grundsätze des erdbebengerechten Entwurfs im Grundriss

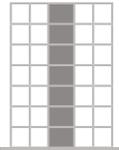
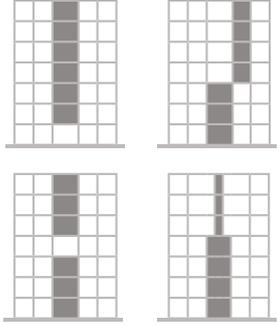
Zu bevorzugen	Zu vermeiden	Bemerkungen
		<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Grundrisse anstreben - Vorstehende Gebäudeteile und rückspringende Ecken bewirken Kräftekonzentrationen
		<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuität der Aussteifungselemente bis zur Foundation gewährleisten - Weiche Erdgeschosse vermeiden ("Soft-storey") - Kein Versatz der Aussteifungselemente - Sprünge bei Steifigkeiten und Widerständen sind problematisch: Weiche Zwischengeschosse und lokale Reduktion der Aussteifungselemente vermeiden

Abb. 2: Grundsätze des erdbebensicheren Entwurfs im Aufriss

Es ist zu beachten, dass nicht alle diese Grundsätze die gleiche Bedeutung haben, insbesondere bei einer moderaten Erdbebengefährdung wie sie in der Schweiz besteht. Bestimmte Grundsätze müssen zwingend eingehalten werden, während andere als Empfehlungen zu betrachten sind, die mehr oder weniger streng umzusetzen sind, oder auch ausser Acht gelassen werden können, wenn sie zu Problemen bei der Ausführung oder Instandhaltung führen, zum Beispiel erdbebengerechte Fugen. Die vertikale Durchgängigkeit der seitlichen Aussteifungselemente etwa ist ein typisches Beispiel für Grundsätze, die unbedingt beachtet werden müssen. Die symmetrische Anordnung der Aussteifungselemente im Grundriss hingegen ist zwar wünschenswert, jedoch kann von diesem Grundsatz bei Berücksichtigung der zusätzlichen Kräfte abgewichen werden. Die Zerlegung in einfache Formen durch erdbebengerechte Fugen wiederum ist im Allgemeinen mit erhöhten Schwierigkeiten bei der Realisierung verbunden, die oft nicht wirklich durch eine erhebliche Verbesserung des seismischen Verhaltens gerechtfertigt werden.

1.2 Zu vermeidende Fehler

Bei der konkreten Anwendung der Grundsätze des erdbebensicheren Entwurfs sollten die folgenden häufigen Fehler, insbesondere bei Stahlbetongebäuden, vermieden werden:

- Auswahl der horizontalen Aussteifungselemente
- Berücksichtigung von monolithischen Querschnitten
- problematische Querschnitte

1.2.1 Auswahl der horizontalen Aussteifungselemente

Bei der seismischen Analyse müssen alle Elemente berücksichtigt werden, die sich auf das dynamische Verhalten des Gebäudes auswirken. Insbesondere in den Erdbebenzonen Z1 und Z2 kommt es häufig vor, dass «mehr» Wände vorhanden sind, als zur Aufnahme der seismischen Kräfte eigentlich notwendig gewesen wären. Der Ingenieur kann jedoch das Vorhandensein solcher «überzähliger» Elemente nicht einfach ignorieren und nur diejenigen Wände auswählen, die ihm für die erdbebensichere Bemessung als geeignet erscheinen. Denn diese Elemente beeinflussen in potenziell «negativer» Weise das seismische Verhalten des Gebäudes, indem sie die Steifigkeit des Gebäudes erhöhen (kürzere Schwingzeit) und zu Torsion führen. Sofern keine besonderen konstruktiven Massnahmen zur Entkopplung getroffen werden,



Abb. 3: Die Auswahl an Aussteifungselementen ist begrenzt. Alle Elemente, die zum seismischen Verhalten des Gebäudes beitragen, müssen berücksichtigt werden, auch wenn sie sich ungünstig auswirken.

die aus anderen Gründen unerwünscht sind, müssen alle Elemente berücksichtigt werden. Andererseits bewirken die «überzähligen» Elemente einen zusätzlichen Widerstand, der im Allgemeinen für die zu berücksichtigenden zusätzlichen seismischen Beanspruchungen völlig ausreichend ist.

1.2.2 Monolithische Querschnitte

Bei zusammengesetzten Querschnitten, die aus mehreren Segmenten bestehen, ist es üblich, diese bei Stahlbetonkonstruktionen als monolithisch zu betrachten und bei unbewehrtem Mauerwerk einzeln als separate Querschnitte zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk muss daher zum Beispiel auf Stahlbetonkerne gelegt werden.

1.2.3 Problematische Querschnitte

Monolithische Querschnitte in L- oder T-Form sind problematisch, weil es hier unter Biegebeanspruchung zu einem Sprödbrech kommen kann. Ihre Konfiguration kann zu einem Versagen des Betons unter Druck vor der Plastifizierung der Bewehrung unter Zugbeanspruchung führen. Dies ist ein bekanntes Problem bei Stahlbeton, wenn die Nulllinie zu «tief» im Querschnitt liegt. Daher müssen L-förmige Querschnitte vermieden werden, indem sie beispielsweise in C-förmige Querschnitte umgewandelt werden, die in diesem Zusammenhang weniger problematisch sind. T-förmige Querschnitte wiederum können verbessert werden, indem die Basis verbreitert wird, um die Zugkräfte der Bewehrung im Stab des T-Querschnitts «aufzunehmen».



Abb. 4: Zusammengesetzte Querschnitte sind bei Stahlbeton als monolithisch und bei unbewehrtem Mauerwerk als System mehrerer Einzelquerschnitte zu betrachten.

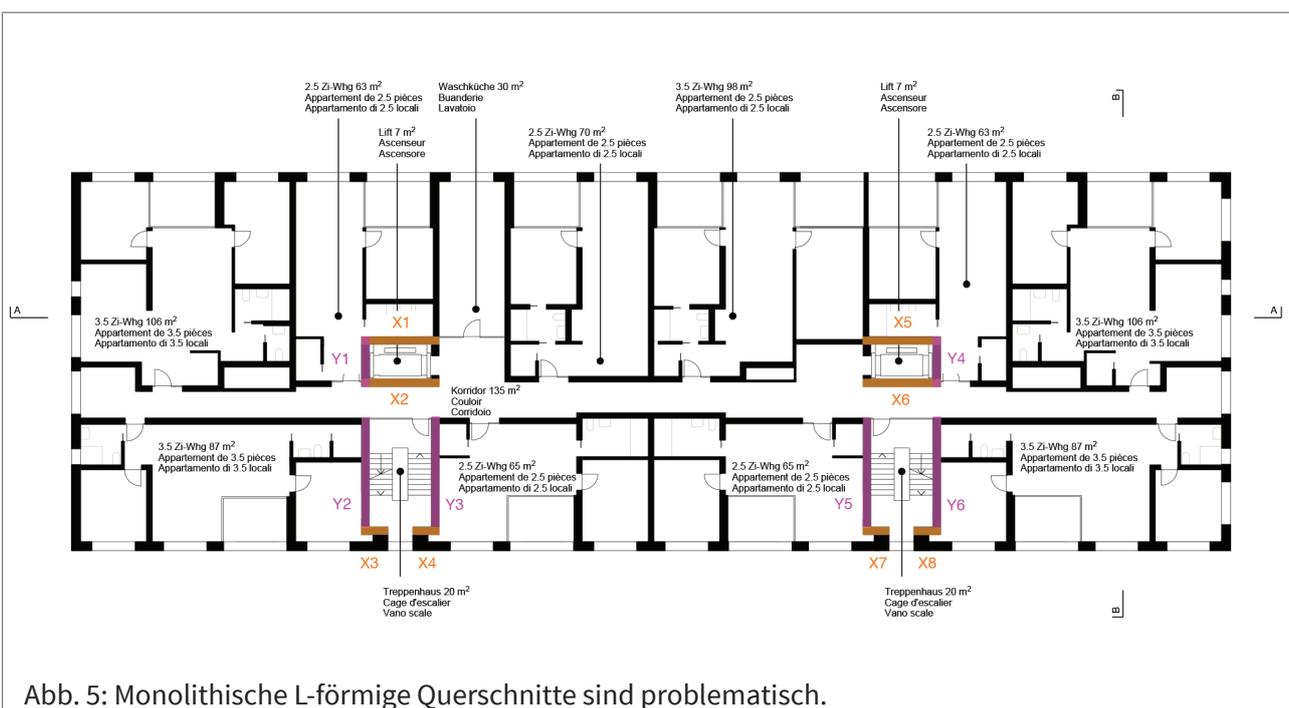


Abb. 5: Monolithische L-förmige Querschnitte sind problematisch.

1.3 Erdbebensichere Bemessung

Mit einem guten erdbebensicheren Entwurf wird ein günstiges Verhalten des Bauwerks bei Erdbeben sichergestellt und die Berechnungen werden zweitrangig. Es sind keine aufwendigen Berechnungsmethoden notwendig, das Ersatzkraftverfahren ist für die Bemessung mehr als ausreichend. Die folgenden Punkte sollten jedoch beachtet werden:

- Steifigkeit der horizontalen Aussteifungselemente
- Rayleigh-Quotient
- Fundamentbemessung

1.3.1 Steifigkeit der horizontalen Aussteifungselemente

Da die Grundschnitzzeit der zentrale Parameter für die erdbebensichere Bemessung ist, muss bei der Ermittlung der zugehörigen Erdbebenlasten eine «realistische» Steifigkeit des Tragwerks berücksichtigt werden. Im Vergleich zum ungerissenen Zustand kann ohne Weiteres eine Steifigkeit von 50 % des entsprechenden Wertes angenommen werden, um den Einfluss der Rissbildung zu berücksichtigen. Dieser Wert gilt für Stahlbeton und für unbewehrtes Mauerwerk. Genauere Werte sind in der SIA 269/8 angegeben.

1.3.2 Rayleigh-Quotient

Für eine Berechnung ohne Finite-Elemente-Software (oder zur Überprüfung der Ergebnisse einer Software) kann die Grundschnitzzeit mit ausreichender Genauigkeit mithilfe des Rayleigh-Quotienten bestimmt werden. Hierzu ist die vollständige Formel zu verwenden. Die vereinfachte Formel aus der SIA 261 ist hier ungeeignet, da sie keine guten Ergebnisse liefert.

1.3.3 Fundamentbemessung

Die Fundamentbemessung ist ein integraler Bestandteil der erdbebensicheren Bemessung. Gerade hier treten oft Schwierigkeiten auf. Daher muss die Übertragung der Kräfte bis in den Baugrund überwacht und kontrolliert werden.

2. Bestehende Bauten

Bei der seismischen Überprüfung bestehender Bauten ist es wichtig, dass frühzeitig eine Schätzung des Erfüllungsfaktors vorliegt, da die weitere Untersuchung von der Höhe des Erfüllungsfaktors in Bezug auf den entsprechenden Mindestwert (α_{min}) abhängt. Daher werden die ersten Schritte der Beurteilung der Erdbebensicherheit in der Regel mit dem vereinfachten Ersatzkraftverfahren durchgeführt. Da es sich jedoch um eine Schätzung des Grads der Erdbebensicherheit handelt, gelten für die Anwendung weniger strenge Einschränkungen als in der SIA 261 für die Bemessung von Neubauten. Insbesondere die Auswirkungen der Torsion können auf vereinfachte Weise geschätzt werden.

2.1 Gebäude aus unbewehrtem Mauerwerk

2.1.1 Gebäude aus Mauerwerk mit starren Decken

Bei Mauerwerksgebäuden mit starren Decken (zum Beispiel Stahlbeton oder Hourdisdecken mit oberer Stahlbetonschicht) ist im Allgemeinen der Widerstand in der Ebene der Tragwände massgebend. Durch die Diaphragmawirkung können die Geschosskräfte auf die Tragwände verteilt werden. Es wird jedoch empfohlen, die Verteilung nicht wie üblich proportional zu den Trägheiten, sondern proportional zu den Widerständen der Tragwände vorzunehmen. Denn diese Hypothese der plastischen Kräfteverteilung führt zu weniger ungünstigen und realistischeren Ergebnissen als die Hypothese der elastischen Verteilung in Verbindung mit den Trägheiten. Darüber hinaus muss bei der Betrachtung der Wechselwirkungen der Tragwände über Stürze und Decken eine Rahmenwirkung berücksichtigt werden. Nach den Empfehlungen der Dokumentation SIA D 0237 (2011) gilt eine Nullmomentpunkthöhe zwischen dem Ein- und Zweifachen der Geschosshöhe des Erdgeschosses als angemessen.

2.1.2 Gebäude aus Mauerwerk mit weichen Decken

Bei Mauerwerksgebäuden mit weichen Decken (zum Beispiel Holzbalken) ist in der Regel der Tragwiderstand quer zur Wandebene massgebend. Ohne gegenteilige Informationen muss davon ausgegangen werden, dass keine Abstützung über die Höhe vorhanden ist. Daher ist die Wand als vertikale Konsole zu betrachten (Abbildung 6, links). Oft ist die Erdbebensicherheit quer zur Ebene mangelhaft und die entscheidende Frage hierbei ist die Ermittlung der Anzahl der Höhen, in denen ein Eingriff erforderlich wäre, um die Sicherheit quer zur Ebene zu gewährleisten. Im Allgemeinen ist ein Eingriff am oberen Ende ausreichend (Abbildung 6, rechts). Die Ermittlung der Erdbebensicherheit quer zur Ebene kann mittels Annahme eines Starrkörperverhaltens analysiert werden. In der italienischen Norm (NTC) wurde ein solcher Ansatz auf der Grundlage des von Griffith (2006) vorgeschlagenen Modells formalisiert.

Der Tragwiderstand in der Wandebene wiederum kann für jedes Element (zum Beispiel eine Fassade) bestimmt werden und sollte normalerweise auf dem Plateauwert der Spektralbeschleunigung des Antwortspektrums basieren.

2.2 Gebäude aus Stahlbeton

2.2.1 Nicht rechteckige Querschnitte

Bei nicht rechteckigen Querschnitten aus Stahlbeton ist zu beachten, dass unbedingt ein monolithischer Querschnitt betrachtet werden muss und der Querschnitt keinesfalls – wie manchmal zu sehen ist – in Rechtecke «zerlegt» werden darf. Eine angemessene Vereinfachung komplexer Querschnitte, zum Beispiel von Kernen, in C-, E-, T- oder I-Form ist jedoch zulässig (Abbildungen 7 und 8).

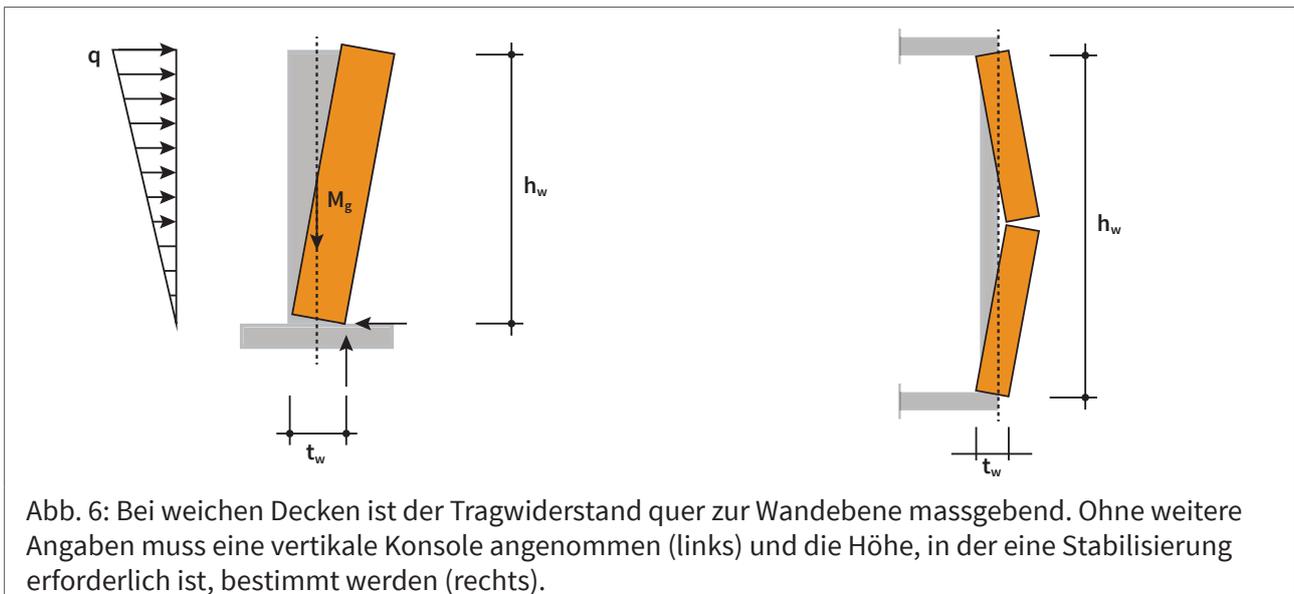


Abb. 6: Bei weichen Decken ist der Tragwiderstand quer zur Wandebene massgebend. Ohne weitere Angaben muss eine vertikale Konsole angenommen (links) und die Höhe, in der eine Stabilisierung erforderlich ist, bestimmt werden (rechts).

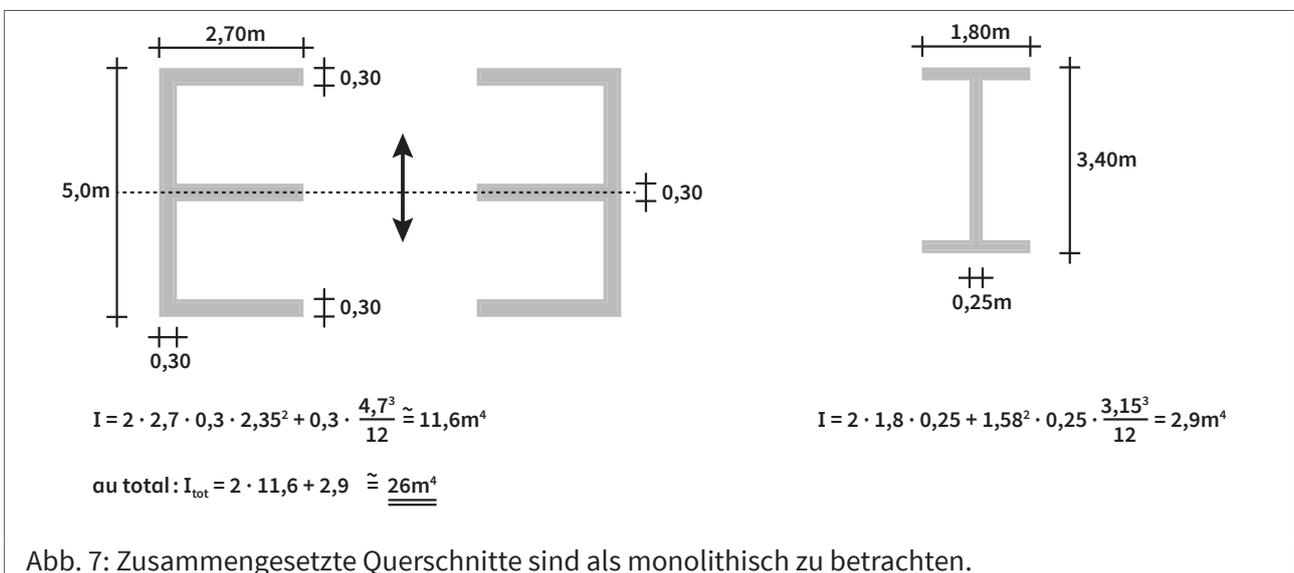


Abb. 7: Zusammengesetzte Querschnitte sind als monolithisch zu betrachten.

2.2.2 Querkraftnachweis

Der Nachweis von Stahlbetonelementen mit dem Mehrfachgittermodell muss mit einem geeigneten Neigungswinkel der Druckstäbe geführt werden. Eine untere Grenze von 25° ist oft angemessen. Der übliche Winkel von 45° ist bei einer schwachen Querbewehrung meist zu ungünstig.

2.3 Gebäude durch Dilatationsfugen getrennt

Gemäss den BAFU-Richtlinien für die Stufe 2 ist bei Gebäuden, die durch Dilatationsfugen getrennt sind, jeder Teil als eigenständiges Gebäude zu betrachten. Die Kenntnis des Erfüllungsfaktors aller Teile ist jedoch im Allgemeinen nicht erforderlich. Wenn es viele Teile gibt (mehr als zwei), ist es sinnvoller, die Grenzen der Erfüllungsfaktoren anzugeben, indem man zunächst die Werte des empfindlichsten Teils und des unempfindlichsten Teils ermittelt, und dann den Erfüllungsfaktor zu schätzen, den man bei Überbrückung der Dilatationsfugen erhält. Diese logische

Massnahme kann leicht in ein Renovationsprojekt integriert werden und trägt im Allgemeinen deutlich zur Verbesserung des Gesamtverhaltens des Gebäudes bei.

2.4 Abschätzung der Torsionswirkung

Je nach den Gegebenheiten kann der Einfluss der Torsion hinreichend sicher abgeschätzt werden, indem die Geschosskräfte auf der Grundlage eines statischen Modells mit den Tragwänden als Auflager verteilt werden (Abbildung 9).

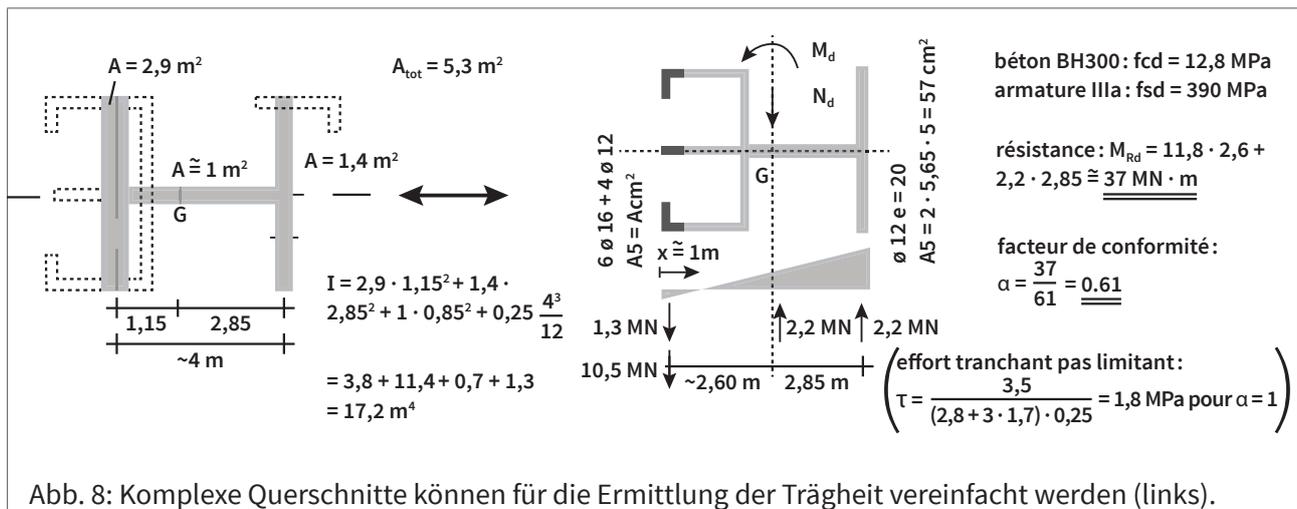


Abb. 8: Komplexe Querschnitte können für die Ermittlung der Trägheit vereinfacht werden (links).

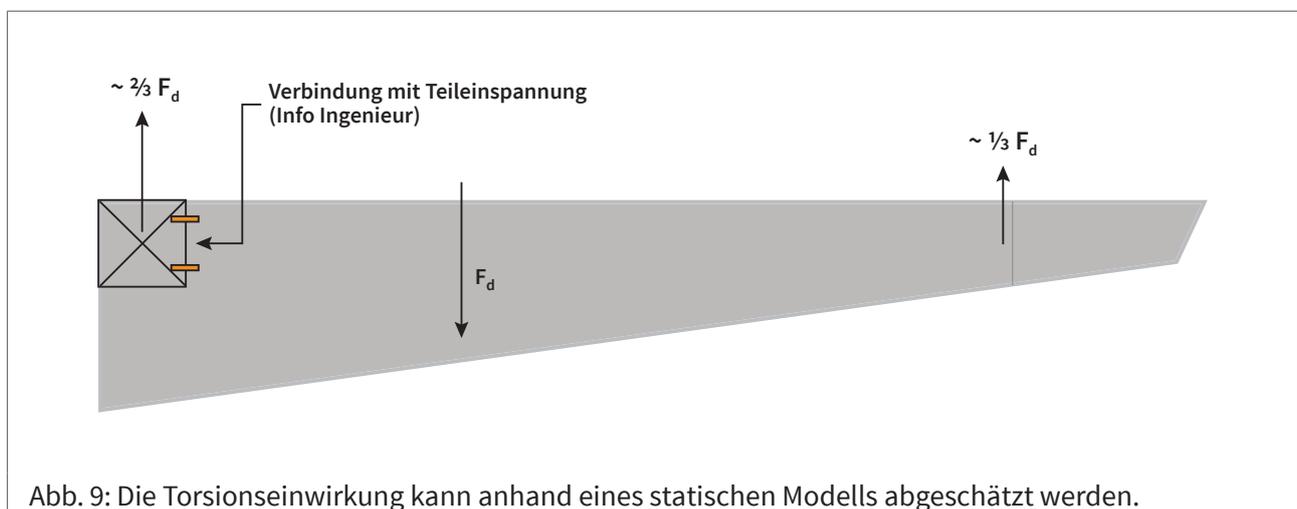


Abb. 9: Die Torsionseinwirkung kann anhand eines statischen Modells abgeschätzt werden.

3. Literatur

SIA 261 (2020), Baunorm, «Einwirkungen auf Tragwerke», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

SIA 269/8 (2017), Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, SIA, Zürich.

Griffith et al. (2006), Displacement-based Assessment of the Seismic Capacity of Unreinforced Masonry Walls in Bending, Australian Journal of Structural Engineering, Vol. 6 No. 2, 2006.

Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude, Konzept und Richtlinie für die Stufe 2 (2. Auflage)», Ittigen, 2006.

SIA D 0237 (2011), Dokumentation, «Beurteilung von Mauerwerksgebäuden bezüglich Erdbeben», SIA, Zürich.