

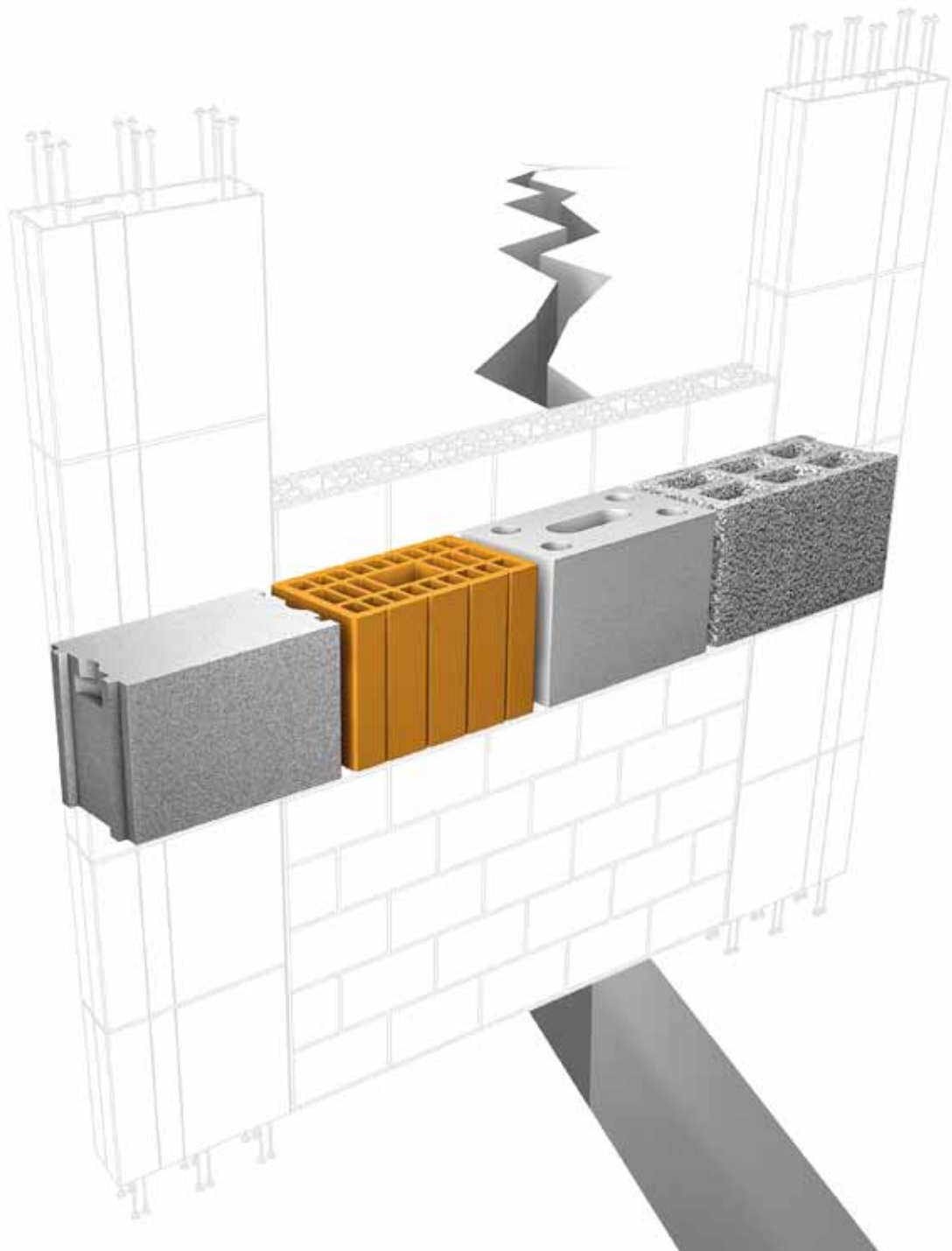


Bauen mit
Mauerwerk

Die Schweizer
Mauerwerkspartner



Erdbebensicher Bauen mit Mauerwerk





1. Zehn gute Gründe für Mauerwerk	4
2. Anwendung der Norm SIA 266 Mauerwerk (2015)	6
2.1 Wesentliche Änderungen und Ergänzungen gegenüber der Norm SIA 266: 2003	6
2.2 Mauerwerk unter Schubbeanspruchung mit zentrischer Normalkraft	6
2.3 Funktionsweise von Mauerwerk mit Zuelementen (Wandsystem Seismur)	7
3. Modellbildung unter Erdbebenbeanspruchung	8
3.1 Nachweis der Erdbebensicherheit am 3D-Stabmodell mit Ersatzkraft-Verfahren	8
3.2 Verformungsbasierter Nachweis mit Berechnungsmodellen auf Basis von Makro-Elementen	9
4. Beispiel eines MFH in Lyss	10
4.1 3D-Stabstatik mit Push-Over-Methode (Promur)	10
4.2 3D-Stabstatik mit dem Antwortspektren-Verfahren (Statik 6.0 Cubus)	12
4.3 Berechnung auf Basis von Makro-Elementen mit Push-Over-Methode (3muri)	13
5. Literaturverzeichnis	14

1. Zehn gute Gründe für Mauerwerk

Ökologie

Durch die Verwendung heimischer Rohstoffe ergeben sich kurze Transportwege. Die lange Lebensdauer macht Mauerwerk besonders nachhaltig. Durch den Rückbau des Baumaterials als auch die Renaturierung der Abbaustätten entstehen vollständige Kreisläufe.



Wohnklima

Wände aus Mauerwerk bieten ein gesundes Raumklima und wirken durch ihre Diffusionsoffenheit feuchteregulierend. Damit ist die wichtigste Voraussetzung für Behaglichkeit gegeben. Darüber hinaus werden keine Schadstoffe freigesetzt. Sie können aufatmen.



Energieeffizienz

Gute Wärmedämmeigenschaften garantieren den winterlichen Wärmeschutz. Massive Wandbaustoffe wirken sich dank ihrer Wärmespeicherfähigkeit positiv auf das sommerliche Temperaturverhalten eines Gebäudes aus.



Lebensdauer

Seit Jahrhunderten stellt Mauerwerk seine sehr lange Lebensdauer unter Beweis. Die Beständigkeit des Baumaterials führt zu geringen Instandhaltungskosten.



Kosteneffizienz

Mauerwerk ist eine preisgünstige Bauweise und sehr effizient in der Verarbeitung, dadurch werden niedrige Baukosten generiert. Auch ist der Planungsaufwand mit Mauerwerk sehr gering.



Wertschöpfung

Mauerwerk hat eine hohe Wertbeständigkeit mit einem hohen Wiederverkaufswert. Ein Mauerwerksbau ist ein Symbol für eine gebaute Lebensversicherung.



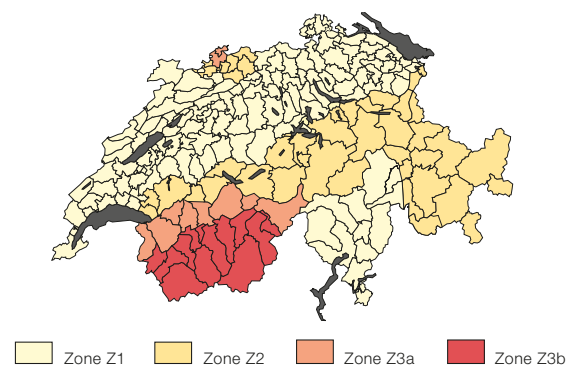
Schallschutz

Alle Mauerwerksarten bieten anforderungsgerechte Lösungen für den Schallschutz. Mauerwerkswände bieten einen hohen Schutz gegen Innen- und Aussenlärm und reduzieren den Körperschall durch Masse und Entkoppelung.



Erdbebensicherheit

Mit den heutigen Konstruktionen und Mauerwerkssystemen können Gebäude erdbebensicher konzipiert werden. Innovative Lösungen und entsprechende Bemessungssoftware sind vorhanden.



Brandschutz

Das Mauerwerk bietet eine bestmögliche Brandsicherheit durch nichtbrennbare Baustoffe. Zudem treten im Brandfall keine giftigen Rauchgase auf.



Tragfähigkeit

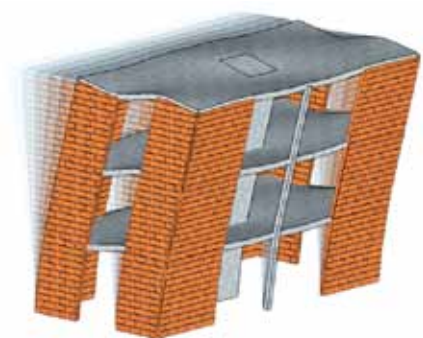
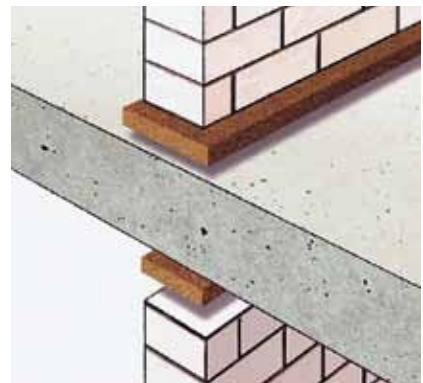
Durch eine ausgezeichnete Druckfestigkeit können schlanke Mauerwerkslösungen realisiert werden. Die auftretenden Normalkräfte können problemlos abgetragen werden.



2. Anwendung der Norm SIA 266 Mauerwerk (2015)

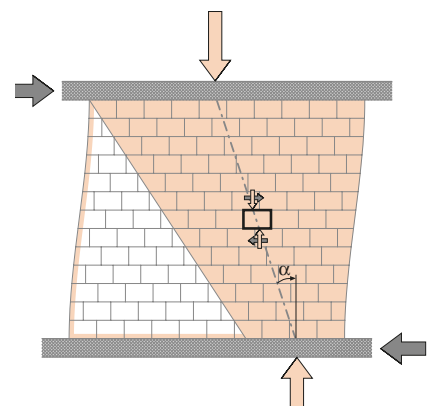
2.1 Wesentliche Änderungen und Ergänzungen gegenüber der Norm SIA 266: 2003

- Mauerwerk mit Dünnbettmörtelfugen gilt als Standardmauerwerk, wenn die Mindestfestigkeiten und eine Biegebruchbedingung eingehalten werden (Ziffer 3.1.3.3).
- Für Mauersteine entfällt der Nachweis der Steinquerzugfestigkeit (Ziffer 3.2.5).
- Die Eignung eines Mauersteins für eine Standardmauerwerksart gilt als nachgewiesen, wenn unter Verwendung von Referenz-Normalbettmörtel die Mindestfestigkeiten erreicht werden.
- Bei Zentrierlagern ist die Lagertraglast am Mauerwerk und die dazugehörige maximal mögliche Deckenverdrehung zu deklarieren.
- Schalldämmlager dürfen die Tragfähigkeit des Mauerwerks nicht abmindern, ansonsten ist sie zu deklarieren.
- Die Bemessungswerte für Standardmauerwerke sind neu tabelliert (Ziffer 4.2.1.1).
- Die Tragsicherheit unter Normalkraftbeanspruchung und für Schubbeanspruchung mit zentrischer Normalkraft kann mit einem einfachen oder erweiterten Nachweis durchgeführt werden (Ziffern 4.3.1.2/3 und 4.3.2.2/3).
- Bemessungssituation Erdbeben (Kap. 4.7):
 - Die Schlankheitsbedingung für Schubwände entfällt. Dafür sind die Beanspruchungen sowohl in Wandebene als auch quer zur Wandebene nachzuweisen (Ziffer 4.7.1.2)
 - Der Verhaltensbeiwert q ist anhand der Normalkraftbeanspruchung oder dem Verformungsvermögen zu bestimmen (Ziffer 4.7.1.5).
 - Es darf ein verformungsbasiertes Verfahren angewendet werden (Ziffer 4.7.1.6).

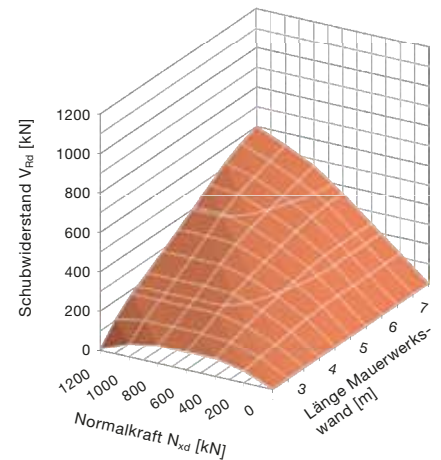


2.2 Mauerwerk unter Schubbeanspruchung mit zentrischer Normalkraft

- Im Allgemeinen ist von einem statisch zulässigen Spannungszustand auszugehen. Die Tragsicherheit gilt als nachgewiesen, wenn die Druckfestigkeit in keinem Punkt überschritten wird. Geneigte Druckspannungen bis zu einem Betrag $f_{\alpha d}$ dürfen mit senkrecht zu den Lagerfugen wirkenden Druckspannungen bis zu einem Betrag $f_{xd} - f_{\alpha d}$ überlagert werden (Ziffer 4.3.2.1).

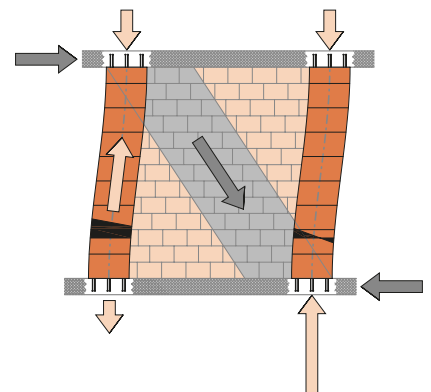


- Eine Grenze für den Schubwiderstand ist durch den maximalen Neigungswinkel von 31° durch Abscheren der Fuge gegeben. Mit höherem Ausnutzungsgrad der Wand im Bezug auf Normalkraft reduziert sich die Schubkapazität, was sich in der Praxis vor allem bei kurzen Wänden zeigt.



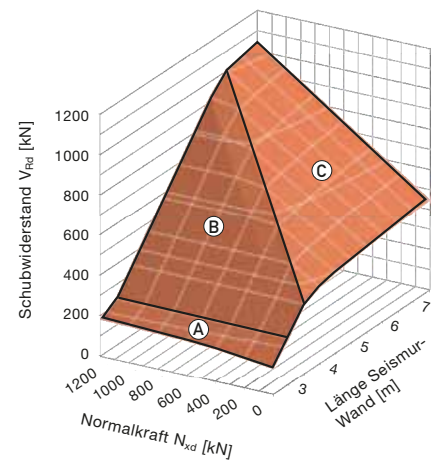
2.3 Funktionsweise von Mauerwerk mit Zuelementen (Wandsystem Seismur)

- Das Wandsystem Seismur macht aus einer unbewehrten Mauerwerkswand ein Mauerwerk mit Zuelementen. Diese Zuelemente werden durch vorgespannte Wandelemente an den Wandenden gebildet, mit denen die Zugkräfte auch in den Geschossdecken verankert sind.
- Geschossdecken und Wandelemente bilden einen Rahmen, in dem das Mauerwerk eingefasst ist.
- Zugkräfte werden von den vorgespannten Wandelementen übernommen und in die Geschossdecken abgetragen.
- Im Mauerwerk kann sich unabhängig von der Normalkraftbeanspruchung der Wand ein Druckspannungsfeld ausbilden.



Mechanismen für Widerstandsbegrenzung:

- A** Schubwiderstand V_{Rs} aus maximalem Biegezugwiderstand der Seismur-Elemente
- B** Schubwiderstand V_{Rm} aus maximaler Druckdiagonale des Mauerwerks
- C** Schubwiderstand V_{Rp} aus maximaler Zugkraft der Spannstahlbewehrung der Seismur-Elemente



3. Modellbildung unter Erdbebenbeanspruchung

3.1 Nachweis der Erdbebensicherheit am 3D-Stubmodell mit Ersatzkraft-Verfahren

- **Nachweis der Erdbebensicherheit mit Aktivierung speziell ausgebildeter Schubwände**

Der Nachweis, bei dem der Widerstand der Mauerwerkswände hinsichtlich Schub nicht berücksichtigt wird, entspricht der bisherigen Praxis bei Schubwänden aus Stahlbeton. Die Mauerwerkswände übertragen lediglich Vertikallasten und demzufolge wird mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 2.0$ gerechnet. Die analoge Betrachtungsweise ist auch bei der Ausbildung der Schubwände mit Mauerwerk mit Zug-elementen (Wandsystem Seismur) möglich, da dieses System ebenfalls die erforderliche Duktilität aufweist.

Bei dieser Betrachtungsweise ist zu verifizieren, dass die auftretenden Deformationen die Verformungskapazität des Mauerwerks nicht überschreiten.

- **Nachweis der Erdbebensicherheit mit Aktivierung der tragenden Mauerwerkswände**

Wird der Schubwiderstand aller Mauerwerkswände rechnerisch berücksichtigt, ist von einem Verhaltensbeiwert $q = 1.5$ auszugehen. Bei einer rein elastischen Bemessung wird der Schubwiderstand des Gesamtsystems markant unterschätzt, da bei Erreichen der Traglast der ersten Wand deren plastisches Verformungsvermögen nicht berücksichtigt wird und daher keine Erhöhung des Widerstandes durch Umlagerung der Beanspruchung erfolgt.

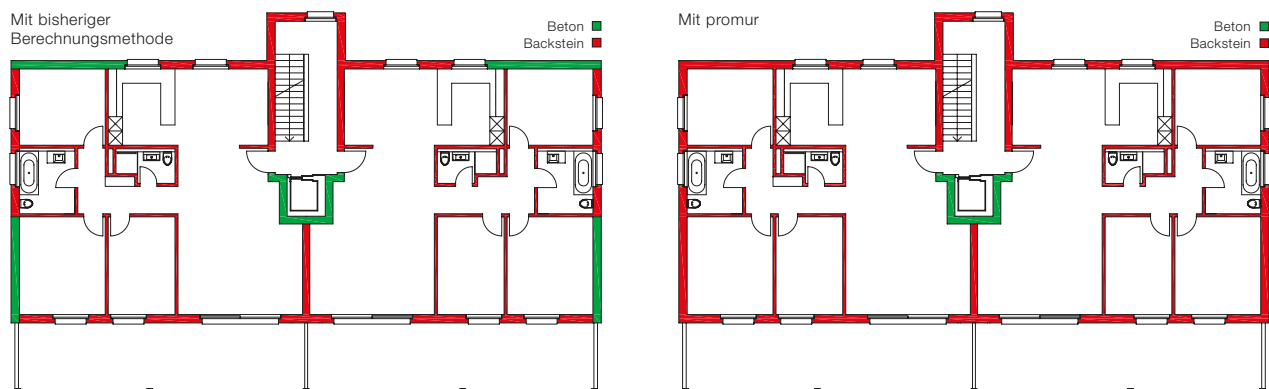
- **Push-over-Analyse mit Software promur**

Als Ersatzsystem für das durch Geschossdecken, Wände und Stützen definierte Gebäude wird ein dreidimensionales Stabtragwerk erzeugt. Die Geschossdecken werden dabei als in der Ebene starre Scheiben betrachtet.

Die Erdbebeneinwirkungen werden unter Berücksichtigung des Ersatzkraftverfahrens ermittelt und schrittweise aufgebracht. Falls eine Wand ihren Tragwiderstand erreicht hat, wird im System ein plastisches Schubgelenk eingeführt. Die plastische Verformungsfähigkeit wird mit einem einfachen Ansatz unter Berücksichtigung der Normalkraftausnutzung und der Wandgeometrie bestimmt.

Die Software promur für die Push-over-Analyse von Mauerwerksgebäuden ermöglicht damit eine wesentlich bessere rechnerische Ausnutzung des vorhandenen Erdbebenwiderstands von Gebäuden als die konventionelle linearelastische Berechnung.

Beispiel einer Berechnung mit promur



3.2 Verformungsbasierter Nachweis mit Berechnungsmodellen auf Basis von Makro-Elementen

- Funktionsweise von Makro-Elementen am Beispiel der Software 3muri

Die Makro-Elemente bestehen aus den 3 Typen:

Pfeiler (seitlich von Öffnungen)

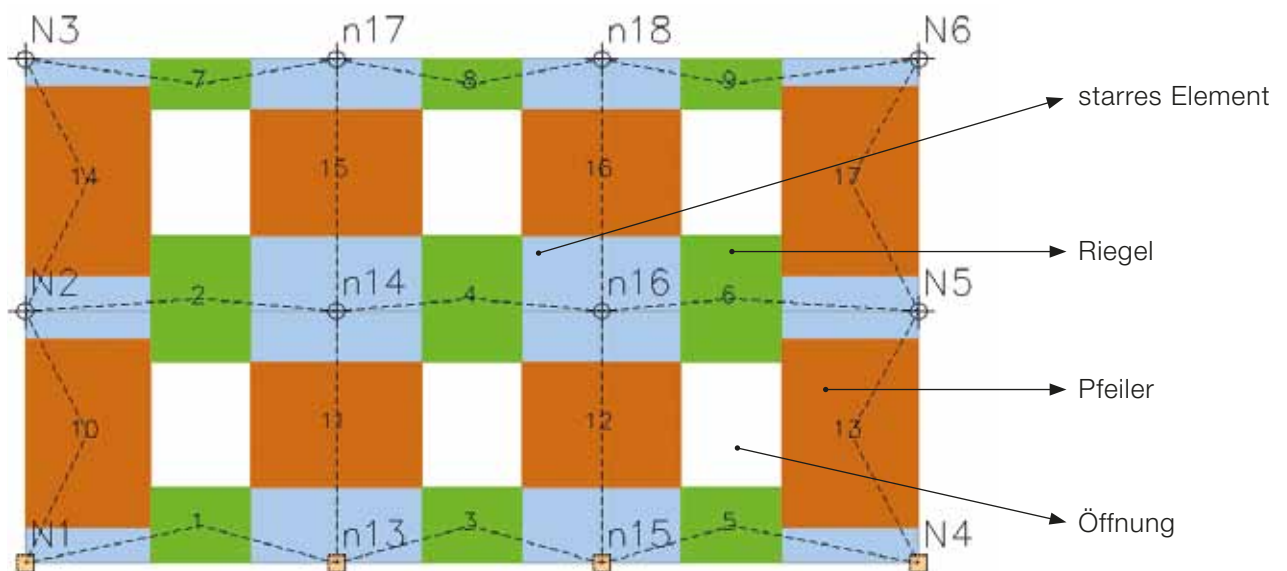
Starre Elemente (ungestörte Mauerwerksscheiben)

Riegel (ober- und unterhalb von Öffnungen)

Die Gebäudestruktur wird durch Verbindung dieser Elemente als äquivalenter Rahmen gebildet.

Das Makroelement, das als bilinear verformbares Element die ungestörte Mauerwerksscheibe abbildet, besteht aus 3 Teilbereichen: Randzone oben und unten für axiale Verformbarkeit und Mittelteil für die tangentielle Verformbarkeit durch Abscheren. Mauerwerkspfeiler und Riegel sind ebenfalls durch bilineare Balkenelemente gebildet.

Beispiel einer Makro-Element-Struktur im Fassadenbereich



In den Makro-Elementen sind Bruchkriterien und Deformationskapazität eingebaut. Die Erdbebeneinwirkung kann nach EC8 oder SIA 260/261 ermittelt werden. Es werden die Bruchkriterien des Mauerwerks nach EC6 verwendet (SIA 266 ist nicht implementiert). Bei der Modellierung werden Tragfähigkeit der Wände senkrecht zur Ebene sowie lokale Biegung der Decken vernachlässigt.

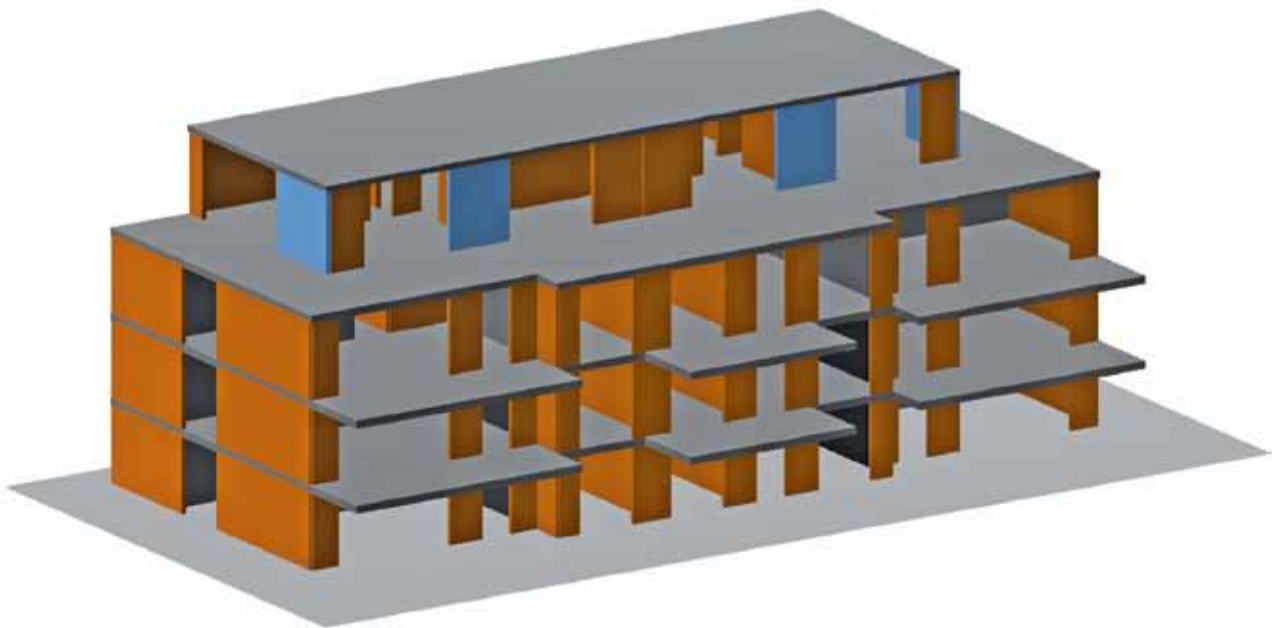
Die nichtlineare Berechnung berücksichtigt das tatsächliche Verhalten des Mauerwerks. Die Beurteilung des Tragverhaltens erfolgt anhand der Verformungen.

4. Beispiel eines MFH in Lyss

4.1 3D-Statistik mit Push-Over-Methode (promur)

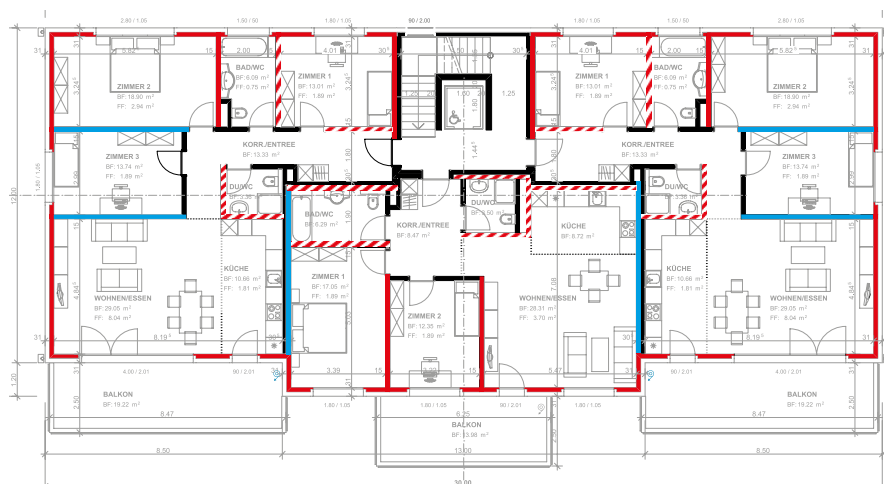
Sowohl in räumlichen Stabtragwerksmodellen wie auch in 3D-Gebäudesimulationen mit Makro-Elementen ist die Push-Over-Analyse inzwischen integriert. Anhand des folgenden Beispiels, bei dem es sich um ein 2015 realisiertes Objekt handelt, werden die erwähnten Berechnungsmodelle gezeigt:

Gebäudestruktur: 4-geschossiges Mehrfamilienhaus, wobei das 4. Geschoss als Attika ausgebildet ist.
Geschossdecken aus Stahlbeton, Dicke 26 cm
Wände aus Mauerwerk der Breite 15 und 17.5 cm

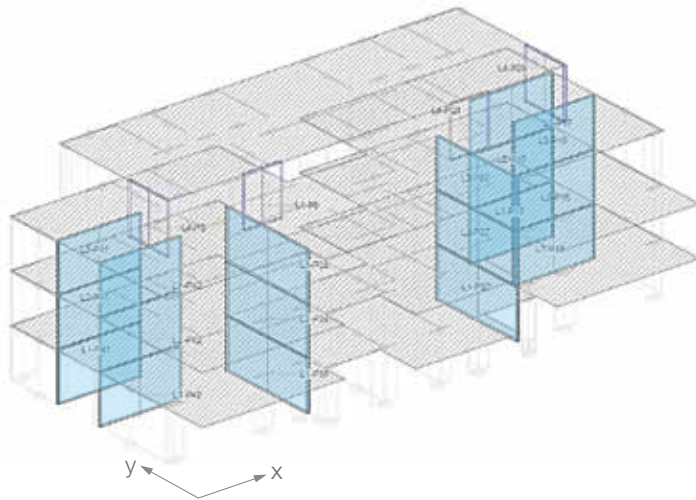


Das Gebäude liegt in Erdbebenzone Z1
Baugrundklasse E
Bauwerksklasse I

Grundrisskonzept der Geschosse 1 - 3:



- Wandsystem Seismur 17.5 cm mit Seismo
- MB = 15 cm
- nur vertikal tragend



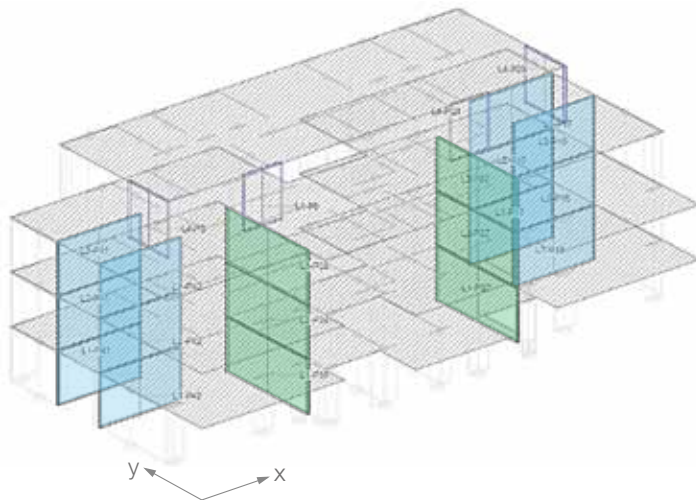
- aktiviertes Mauerwerk
- ausgewählte Schubwände mit dem Wandsystem Seismur

Verhaltensbeiwert $q = 1.5$

Ergebnis:

x-Richtung: 4 Wände als Wandsystem Seismur ausgebildet

y-Richtung: als Wandsystem Seismur sind die beiden Wände im EG überbeansprucht



Gewählte Ausführung:

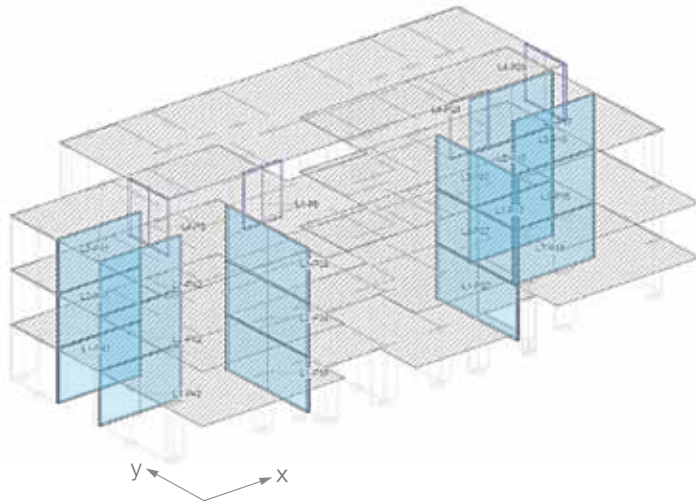
x-Richtung: 4 Wände als Wandsystem Seismur

y-Richtung: 2 Wände aus Stahlbeton



Rohbau im Mai 2015

4.2 3D-Stabstatik mit dem Antwortspektren-Verfahren (Statik 6.0 Cubus)

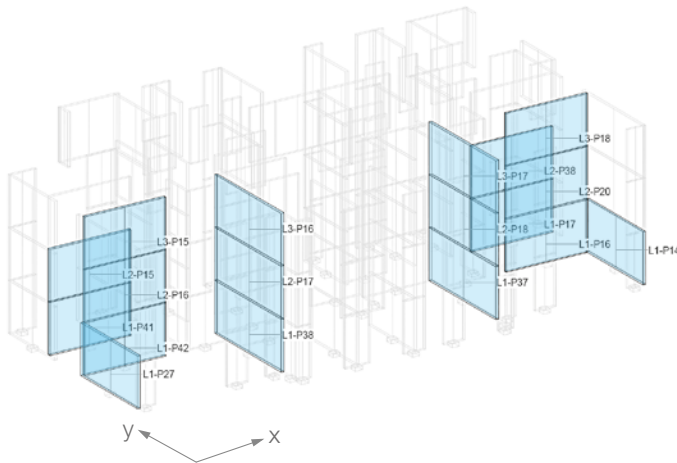


- Schubwände mit dem Wandsystem Seismur
- keine Aktivierung der übrigen Mauerwerkswände

Verhaltensbeiwert $q = 2.0$

Die Berechnung mit dem Antwortspektren-Verfahren führt auf mit Promur-Berechnung vergleichbare Ergebnisse:

Auch in diesem Fall sind die beiden Schubwände in y-Richtung im EG als Wandsystem Seismur überbeansprucht. Anstelle einer Ausführung in Beton wurden nun aber im EG 2 zusätzliche Seismur-Wände in y-Richtung eingeführt und im 2.OG in x-Richtung die Anzahl Seismur-Wände von 4 auf 2 reduziert.



Optimierte Ausführung:

x-Richtung: - 4 Wände als Wandsystem Seismur (EG + 1.OG)
- 2 Wände als Wandsystem Seismur (2.OG)

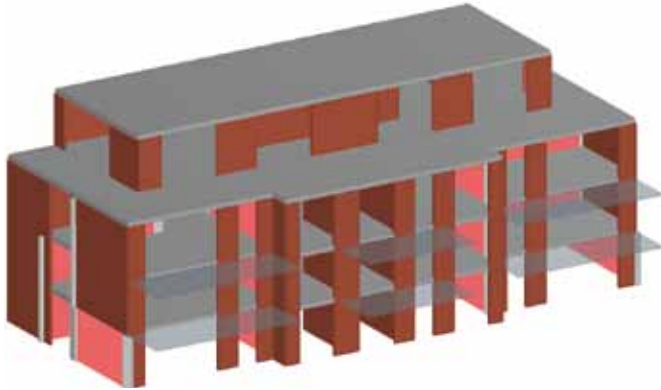
y-Richtung: - 4 Wände als Wandsystem Seismur (EG)
- 2 Wände als Wandsystem Seismur (1. + 2. OG)

Kontrolle der Deformationen:

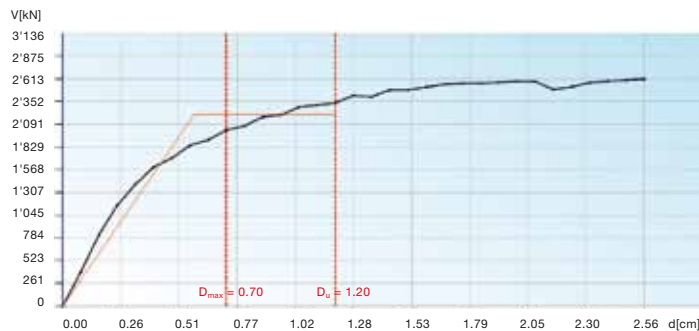
Die auftretenden Verformungen liegen innerhalb der Deformationskapazität des Mauerwerks. Der Verhaltensbeiwert von 2.0 ist für die Berechnung zulässig.

Fazit: Bei diesem, für mehrgeschossigen Wohnungsbau typischen Beispiel, ist der rechnerische Anteil des Schubwiderstandes aus dem nicht spezifisch als Schubwände ausgebildetem Mauerwerk mit $q=1.5$ in einer ähnlichen Größenordnung wie die Differenz der geringeren Belastung bei Verhaltensbeiwert $q=2.0$ und vernachlässigtem Schubwiderstand dieser Mauerwerkswände.

4.3 Berechnung auf Basis von Makro-Elementen mit Push-Over-Methode (3muri)



- Schubwände mit dem Wandsystem
- Seismur durch Makro-Elemente modelliert
- verformungsbasierte Berechnung



Die Push-Over-Kurve der 3muri-Analyse zeigt die Verschiebung beim Erreichen des Verformungsvermögens D_u und die effektive Verformung D_{max} . Der Erfüllungsfaktor liegt bei $1.20/0.7 = 1.71$



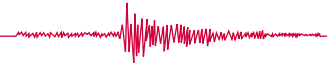
Das Schädigungsbild der Struktur zeigt den Zustand der einzelnen Elemente bei der maximal möglichen Verformung.

- Unbeschädigt
- Plastisch auf Abscheren
- Versagen durch Abscheren
- Plastisch unter Biegung

Fazit: Die Berechnung mit Makro-Elementen führt auf einen grösseren Erfüllungsfaktor als die kraftbasierten Berechnungen. Gründe dafür sind:
Die verformungsbasierte Berechnung berücksichtigt

- individuelles Verformungsvermögen der Makro-Elemente anstelle der pauschalisierten Duktilität in Form des Verhaltensbeiwertes q
- die Modellierbarkeit von Brüstungen unter den Fensteröffnungen (in diesem Beispiel aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt)

5. Literaturverzeichnis



- [1] Norm SIA 261 (2003) Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [2] Norm SIA 266 (2015) Mauerwerk, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [3] Dokumentation SIA D 0237 (2010) Beurteilung von Mauerwerksgebäuden bezüglich Erdbeben, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [4] Dokumentation SIA D 0227 (2008) Erdbebensicherheit von Gebäuden - Rechts- und Haftungsfragen, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [5] Merkblatt Erdbebensicheres Bauen in der Schweiz, Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen www.baudyn.ch, 2006
- [6] Normative Grundlagen und Anwendungsinstrumente zur Erdbebensicherung von Neubauten und bestehenden Bauten, Bundesamt für Umwelt BAFU, www.umwelt-schweiz.ch/erdbeben, 2009
- [7] Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten - Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden, Prof. Dr. Dr. h.c. Hugo Bachmann, Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel 2002
- [8] Erdbeben Dokumentation D 0181: Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Einwirkungen auf Tragwerke, Einführung in die Normen SIA 260 und 261, Thomas Wenk, Pierino Lestuzzi, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2003.
- [9] Prof. Dr. Joseph Schwartz, Dr. Neven Kostic: Wandsystem Seismur, Bemessungsgrundlagen, 2011
- [10] Christoph Becker, Ruedi Räss, Prof. Dr. Joseph Schwartz: Statisch zyklische Versuche über das Tragverhalten von Mauerwerk mit Seismur-Wandelementen, ETH Zürich und p + f Sursee, 2010
- [11] Prof. Dr. Dr. h.c. Hugo Bachmann, Dr. Kerstin Lang: Zur Erdbebensicherung von Mauerwerksbauten, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2002
- [12] Erdbebensicherheit im Mauerwerksbau, www.swissbrick.ch, Swissbrick AG, 2005
- [13] Dr. Hansruedi Ganz, Prof. Dr. Bruno Thürlimann: Versuche an Mauerwerksscheiben unter Normalkraft und Querkraft, Bericht Nr. 7502-4, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1984
- [14] Erdbebensicher bauen mit Promur. Die Lösung der Schweizer Industriepartner für ein Gebäude mit Mauerwerk, 2010



Die Schweizer Mauerwerkspartner – Ihre kompetenten Ansprechpartner für promur

Verbände



ETH Zürich
Prof. Dr. Joseph Schwartz
Professur für
Tragwerksentwurf
ETH Zürich, HIL E 43.2
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich
www.schwartz.arch.ethz.ch



Verband Schweizer Kalksandsteinproduzenten KSV
Postfach 432
3250 Lyss
Tel. 032 387 92 00
www.kalksandstein.ch



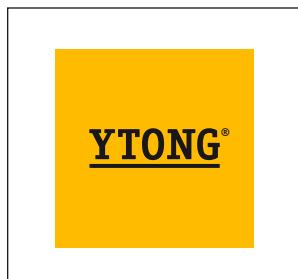
swissbrick.ch
Verband Schweizerische Ziegelindustrie
Leidenbergstrasse 1a
Postfach
6210 Sursee
Tel. 052 234 70 30
www.swissbrick.ch



UFPB
Union des Fabricants
de Produits en Béton
de Suisse romande.
Rte Aloys-Fauquez 28
1018 Lausanne
Tel. 021 648 29 49
www.swissmatbeton.ch

Commission Brique Béton
Tel. 027 322 54 85

Firmen



Xella Porenbeton Schweiz AG
Kernstrasse 37
8004 Zürich
Tel. 043 388 35 35
www.xella.ch



Presyn AG
Ostermündigenstr. 34a
3006 Bern
Tel. 031 333 42 52
www.presyn.ch



Stahlton Bauteile AG
Hauptstrasse 131
5070 Frick
Tel. 062 865 75 00
www.stahlton-bauteile.ch



Bricosol AG
Hermetschloostrasse 75
8048 Zürich
Tel. 044 431 15 66
www.bricosol.ch