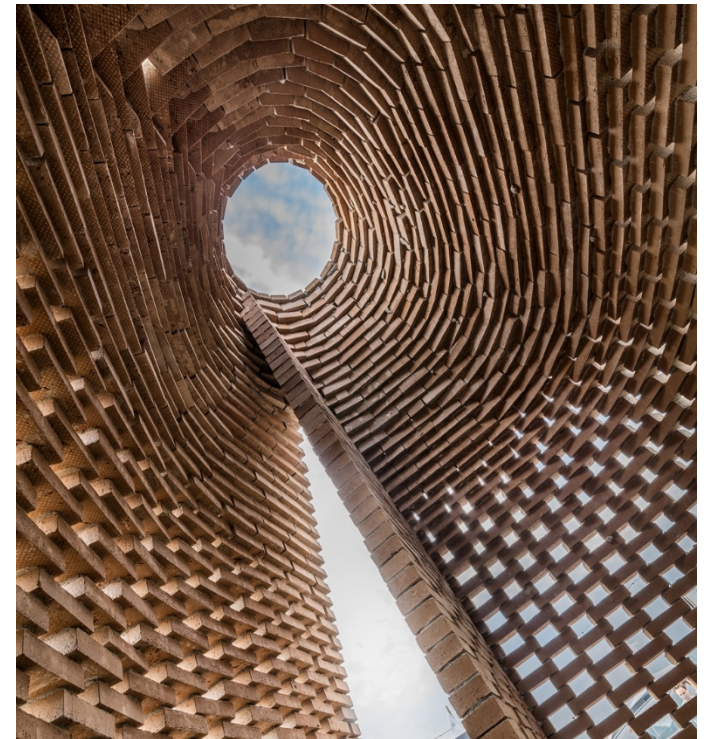


Steenconstructies: wat, hoe, waarvoor?



Gestapelde units al dan niet met tussenvoeging van voegmateriaal



Steenconstructies: stenen, blokken, elementen



Steenconstructies: stenen, blokken, elementen



What is Timbercrete Made Of?

Timbercrete is made of a unique blend of cellulose (timber waste), cement, sand, binders, and other materials.

Load-bearing Capacity

- Timbercrete has a very high load-bearing capacity. A single standard 200 mm thick Timbercrete block supports in excess of 30 tonnes.



Steenconstructies: stenen, blokken, elementen

'The Carbon Buster' is made up of more than **50%** recycled material.

This includes the Carbon8 pellets which are produced by combining CO₂, sand, cement and water. The result is a unique aggregate that, when incorporated into Lignacite's products, creates the first ever carbon negative building block.



LIGNACITE

Sustainable Masonry

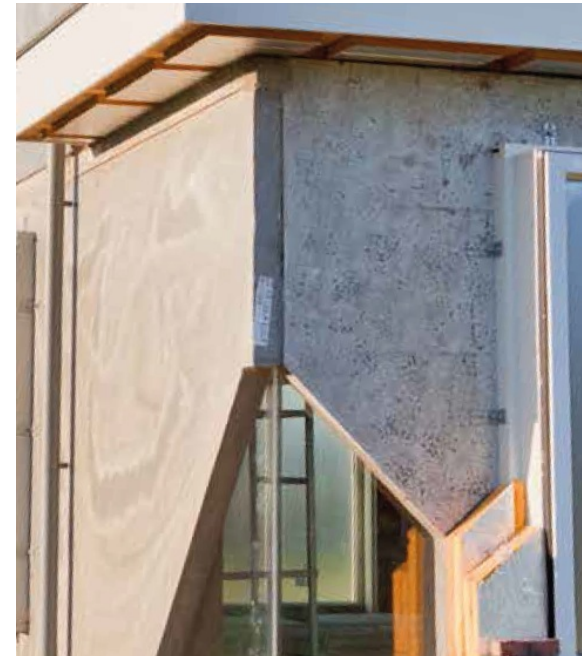
Steenconstructies: stenen, blokken, elementen

Type Vellingblok

- breedte (mm) 100
- hoogte (mm) 168
- lengte (mm) 437

Kenmerken

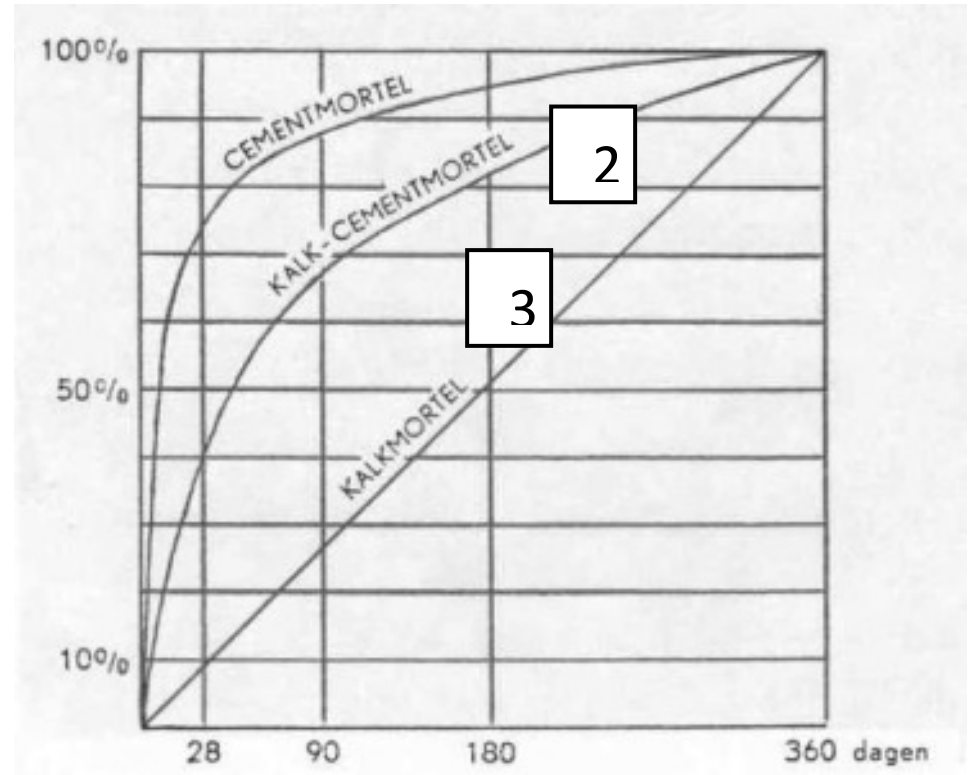
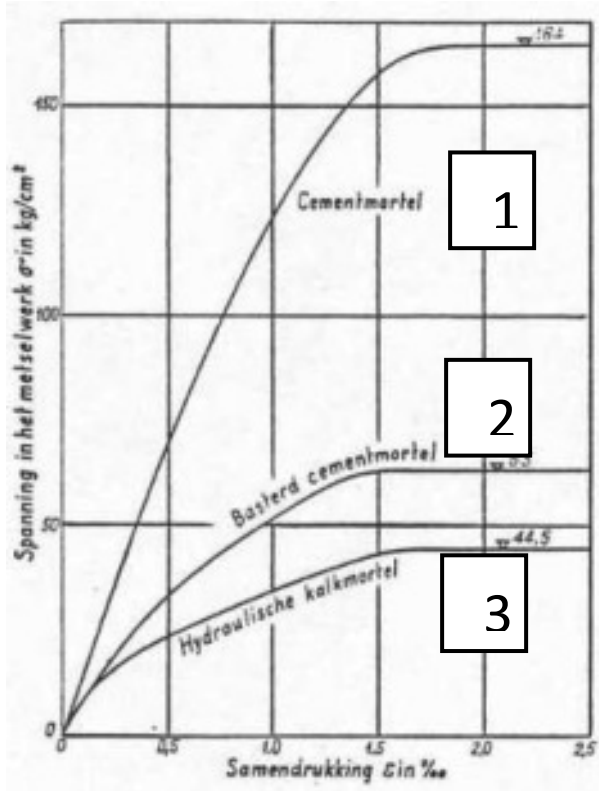
- Binding middels CO_2
- Gebruik van reststoffen
- Volumieke massa: ca. 1950 kg/m^3
- Licht grijze kleur
- Strak en glad uiterlijk
- Gegarandeerde CO_2 besparing
- Verwerking als bij gebruikelijke steenachtige blokken



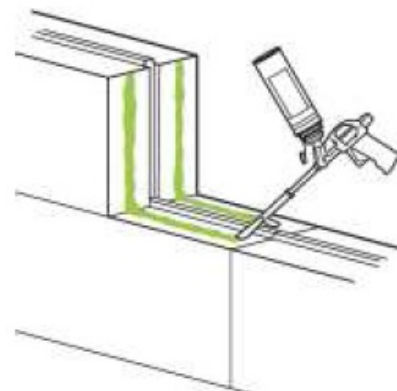
Steenconstructies: voegmaterialen



Steenconstructies: voegmaterialen



- cement mortar (1)
- lime-cement mortar (2)
- lime mortar (3)



PU-mortel?

Steenconstructies: voegmaterialen



**metselmortel
dunbedmortel
lijmmortel
droogstapeltechnieken**

Dunbedmortel

KOMO GECERTIFICEERD (BRL 1905)

De sleutel tot

60%

CO₂-reductie*

Steenconstructies: droogstapelen



Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid



Kan de Burj Khalifa in metselwerk worden gerealiseerd?



Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

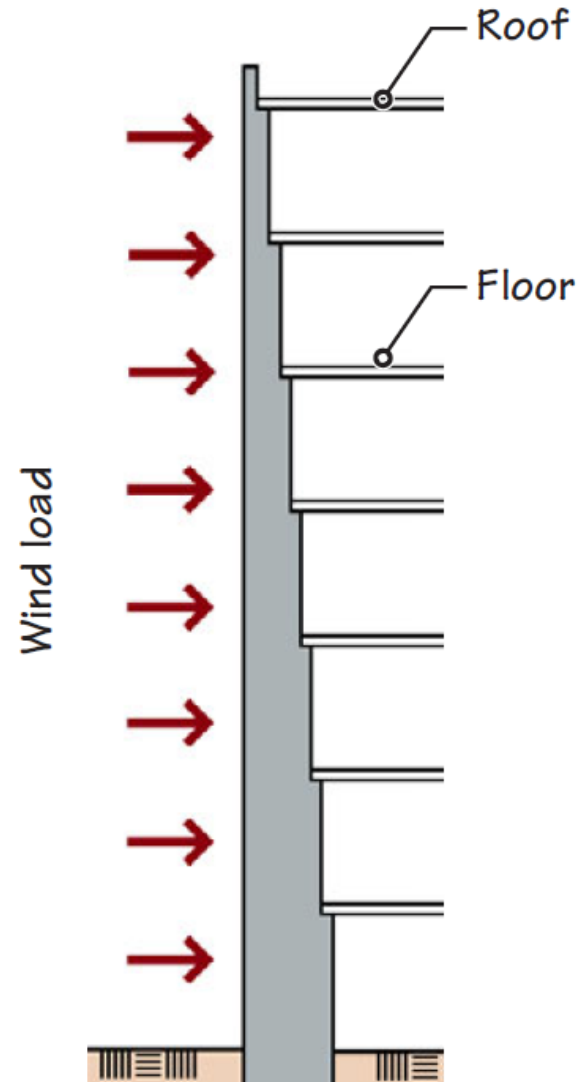


Figure 2. 19-storey high building in Londrina, PR,

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Druksterkte is geen intrinsieke materiaaleigenschap

Bezwijken treedt op door overschrijding van de treksterkte

Druksterkte is de maximaal opneembare drukbelasting van een element met een welbepaalde geo-metrie en be-proefd volgens een eenduidige proefprocedure (randcondities en be-las-tingsnelheid)

1.5.3.2

compressive strength of masonry

the strength of masonry in compression without the effects of platen restraint, slenderness or eccentricity of loading

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

<i>Rock type</i>	<i>Bulk density (Mg/m³)</i>	<i>Apparent relative density</i>	<i>Porosity (%)</i>	<i>Compressive strength (MN/m²)</i>	<i>Flexural strength (MN/m²)</i>
<i>Igneous</i>					
Granites	2.60–2.80	2.54–2.66	0.4–2.4	96–310	
Syenites		2.72–2.97	0.9–1.9	186–434	10–20
Gabbros		2.81–3.03	0.3–2.7	124–303	10–20
Diorites	2.70–3.00				
Dolerites	2.75–2.95	2.87–2.97	1.0–2.0	151–185	8–14
Basalts	2.85–3.05			110–338	
Porphyries	2.50–2.80				10–20
<i>Sedimentary</i>					
Limestones	2.65–2.85	1.79–2.92	0.3–3.6	14–255	
Sandstones				34–248	
Greywackes	2.60–2.75				4–15
<i>Metamorphic</i>					
Gneisses	2.65–3.10	2.64–3.36	0.5–0.8	152–248	10–20
Quartzites		2.75	0.3	207–627	
Marbles		2.37–3.20	0.6–2.3	69–241	
Slates		2.71–2.90	0.1–4.3	138–206	

Vergelijking beton?

Metselwerksterkte \ll steensterkte

Characteristic compressive strength f_k
(EC6 + NA)

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad \text{N/mm}^2$$

Design value:

$$f_d = f_k / \gamma_M$$

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Table 1 — Constants for the determination of the representative value of the compressive strength of masonry

Masonry unit	Total volume of perforations	Masonry mortar			Thin layer mortar			
		K	α	β	Bed joint	K	α	β
Clay	$\leq 25\%$	0,6	0,65	0,25	^a	0,8	0,75	0,1
	$\leq 55\%$	0,5	0,65	0,25	^b	0,7	0,7	0
Calcium silicate	$\leq 25\%$	0,6	0,65	0,25	^b	0,8	0,85	0
	$\leq 55\%$	0,5	0,65	0,25	^b	0,65	0,85	0
Aggregate concrete	$\leq 25\%$	0,6	0,65	0,25	^b	0,8	0,85	0
	$\leq 60\%$	0,5	0,65	0,25	^b	0,65	0,85	0
Autoclaved aerated concrete	$\leq 25\%$	0,6	0,65	0,25	^b	0,8	0,85	0
^a Bed joint $\geq 0,5$ mm and ≤ 5 mm. ^b Bed joint $\geq 0,5$ mm and ≤ 3 mm.								

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

NOTE The numerical values to be ascribed to the symbol γ_M for use in a country may be found in its National Annex. Recommended values, given as classes that may be related to execution control (see also Annex A) according to national choice, are given in the table below.

Material		γ_M				
		Class				
		1	2	3	4	5
	Masonry made with:					
A	Units of Category I, designed mortar ^a	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
B	Units of Category I, prescribed mortar ^b	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
C	Units of Category II, any mortar ^{a, b, e}	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0
D	Anchorage of reinforcing steel	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
E	Reinforcing steel and prestressing steel	1,15				
F	Ancillary components ^{c, d}	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
G	Lintels according to EN 845-2	1,5 to 2,5				

Tabel NB-1 — Partiële factoren voor materiaaleigenschappen in de uiterste grenstoestand

Materiaal	γ_M van constructies in gevolgklasse	
	CC2 en CC3	CC1
Metselwerk vervaardigd met stenen categorie I	1,7	1,5
Metselwerk vervaardigd met stenen categorie II	2,2	2,0
Verankering van wapeningsstaal	2,0	1,8
Wapeningsstaal, voorspanstaal en lintvoegwapening volgens NEN-EN 845-3	1,15	1,15
Nevenproducten volgens NEN-EN 845-1 en NEN-EN 845-2	2,0	1,8

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Tabel 1 — Karakteristieke waarde van de druksterkte van metselwerk, f_k , in N/mm² bij stenen met perforatievolume ≤ 25 %

Genormaliseerde baksteendruksterkte	Mortel voor algemene toepassing				Lijmmortel
	M5	M10	M15	M20	
5	2,55	3,04	3,04	3,04	3,44
10	4,01	4,77	5,27	5,67	5,79
15	5,22	6,20	6,86	7,38	7,85
20	6,29	7,48	8,28	8,89	9,74
25	7,27	8,65	9,57	10,28	11,51
30	8,19	9,73	10,77	11,58	13,20
Genormaliseerde kalkzandsteendruksterkte	Mortel voor algemene toepassing				Lijmmortel
	M5	M10	M15	M20	
12	4,51	5,37	5,94	6,38	6,61
16	5,44	6,47	7,16	7,69	8,44
20	6,29	7,48	8,28	8,89	10,21
28	7,83	9,31	10,30	11,07	13,59
36	9,21	10,96	12,13	13,03	16,82
44	10,50	12,49	13,82	14,85	19,95

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Genormaliseerde betonsteendruksterkte	Mortel voor algemene toepassing				Lijmmortel
	M5	M10	M15	M20	
5	2,55	3,04	3,04	3,04	3,14
10	4,01	4,77	5,27	5,67	5,66
15	5,22	6,20	6,86	7,38	7,99
20	6,29	7,48	8,28	8,89	10,21
25	7,27	8,65	9,57	10,28	12,34
30	8,19	9,73	10,77	11,58	14,41
Genormaliseerde cellenbetondruksterkte	Lijmmortel				
2	1,44				
3	2,04				
4	2,60				
5	3,14				

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

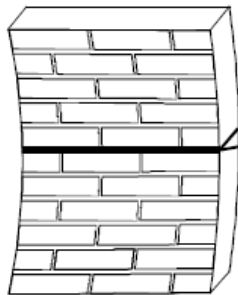
Tabel 3 — Karakteristieke waarde van de initiële afschuifsterkte van metselwerk, f_{vko} , in N/mm^2

Mortel en toepassing	f_{vko}
Minimumeis voor metsel- en lijm mortel in milieuklasse MX1 en MX2	0,20
Minimumeis voor metsel- en lijm mortel bij overige milieuklassen	0,30
Lijm mortel met baksteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60
Lijm mortel met kalkzandsteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60
Lijm mortel met betonsteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60
Lijm mortel met cellenbeton groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,45

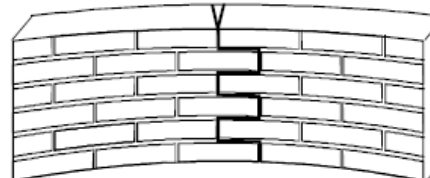
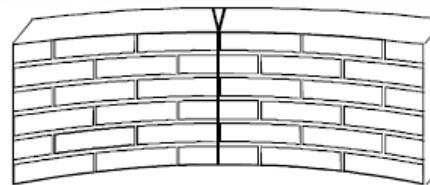
Steenconstructies: wat, hoe, waarvoor?

Tabel 4 — Karakteristieke waarde van de buigtreksterkte van metselwerk indien bezwijken optreedt in een vlak evenwijdig aan de lintvoeg en indien bezwijken optreedt in een vlak loodrecht op de lintvoeg, respectievelijk f_{xk1} en f_{xk2} , in N/mm²

Mortel en toepassing	f_{xk1}	f_{xk2}
Minimumeis voor metsel- en lijm mortel in milieuklasse MX1 en MX2	0,20	0,79
Minimumeis voor metsel- en lijm mortel bij overige milieuklassen	0,30	0,83
Lijmmortel met baksteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60	1,22
Lijmmortel met kalkzandsteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60	1,00
Lijmmortel met betonsteen groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,60	1,22
Lijmmortel met cellenbeton groep 1 bij aanvullende specificatie in bestek	0,45	0,45



a) plane of failure parallel to bed joints, f_{xk1}



b) plane of failure perpendicular to bed joints, f_{xk2}

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Table 2 — Coefficients of creep, moisture expansion or shrinkage, and thermal properties of masonry

Masonry unit	Final creep coefficient		Long term moisture expansion or shrinkage		Coefficient of thermal expansion α_t
	ϕ_∞		mm/m		
	General purpose mortar	Thin layer mortar	General purpose mortar	Thin layer mortar	
Clay	0,7	0,5	-0,1	-0,1	6×10^{-6}
Calcium silicate	1,1	0,8	-0,3	-0,3	8×10^{-6}
Aggregate concrete	1,9	1,7	-0,3	-0,3	10×10^{-6}
Lightweight aggregate concrete	2,0	2,0	-0,45	-0,45	10×10^{-6}
Autoclaved aerated concrete	0,6	0,5	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	8×10^{-6}

Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

EC6

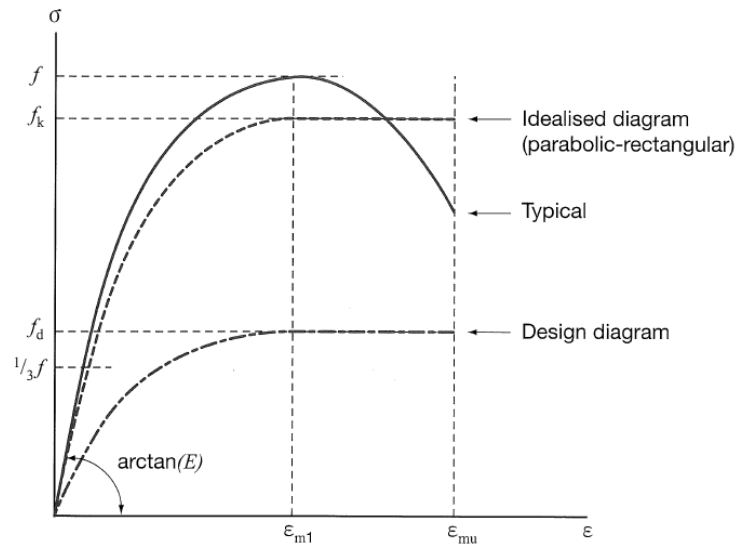
$$E = K_E \cdot f_k$$

E modulus of elasticity in N/mm^2 ;
 f_k characteristic value of compressive strength of masonry in N/mm^2 ;

NA NL: $K_E = 700$

voor CS44: $E = 13\,965 \text{ MPa}$

(NEN: $E = 900 \cdot f_k$)



Basiseigenschappen: sterkte - stijfheid

Proposal TU/e

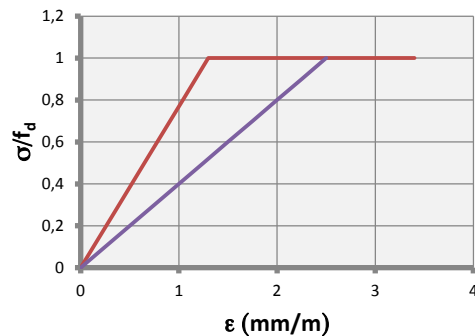
3.7.1. Stress-strain relationship

(1) For the analytical design of masonry cross-sections the stress-strain relationship may be taken as linear, bilinear, parabolic, parabolic- rectangular or rectangular (Figure 3.2 a). The choice of the design diagram depends on the unit materials used and the grouping of the units (table 3.x):

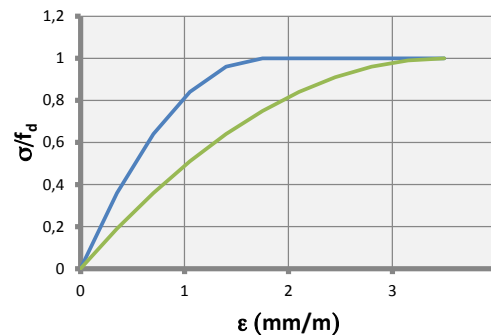
$$\sigma = f \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ml}} \right)^n \right] \quad \text{for} \quad 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{ml} \quad (3.x)$$

$$\sigma = f \quad \text{for} \quad \varepsilon_{ml} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{mu} \quad (3.x)$$

- σ : compressive stress in masonry (compressive stress is positive)
- f : compressive strength of masonry
- ε : strain of masonry corresponding to the compressive stress σ (contraction is positive)
- ε_{ml} : elastic strain of masonry according to table 3.x
- ε_{mu} : limiting compressive strain of masonry according to table 3.x
- n : exponent according to table 3.x (1 for linear behaviour; 2 for parabolic behaviour)



a.



b.

Figure 3.2.a Various stress-strain relationships for masonry loaded in compression according to formula 3.x and 3.x : (a) bilinear; (b) parabolic-rectangular

Berekening van steenconstucties

Jonge wetenschap

The first masonry standard was introduced as NZSS 95 Part X in 1948.

IB²MAC 1967

1st International Brick and Block Masonry Conference

Austin, Texas, U.S.A.

30-02 November-December 1967

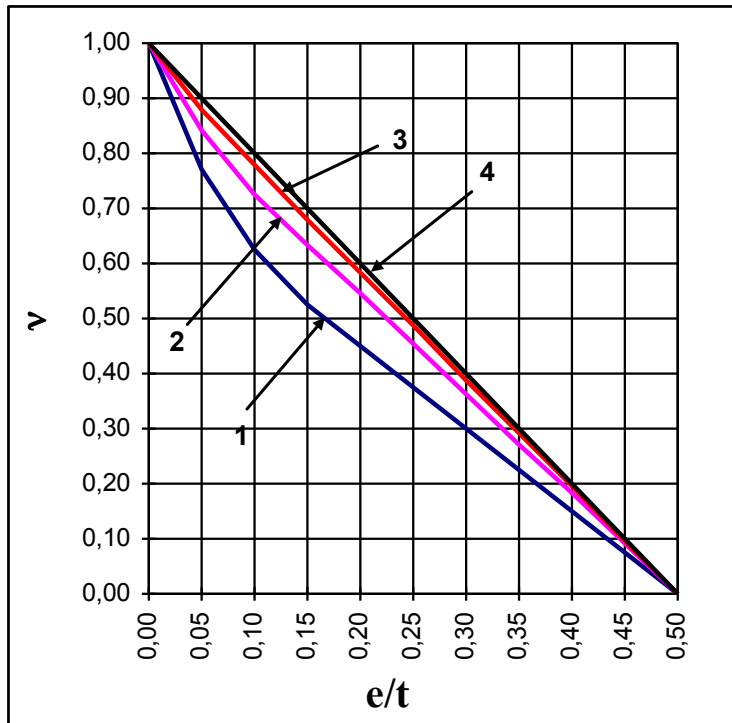
Veel parallellen met ongewapend beton: poging om berekeningen op elkaar af te stemmen: EC2-EC6

Veel meer variaties: σ - ε -diagram

Berekening van steenconstucties

Uitdagingen voor ongewapend metselwerk:

spanningsresultante binnen de doorsnede houden
(druksterkte is veelal niet zo maatgevend)



1: LE

2: bilinear

2,5-3,5‰

3. parabolic-rectangular

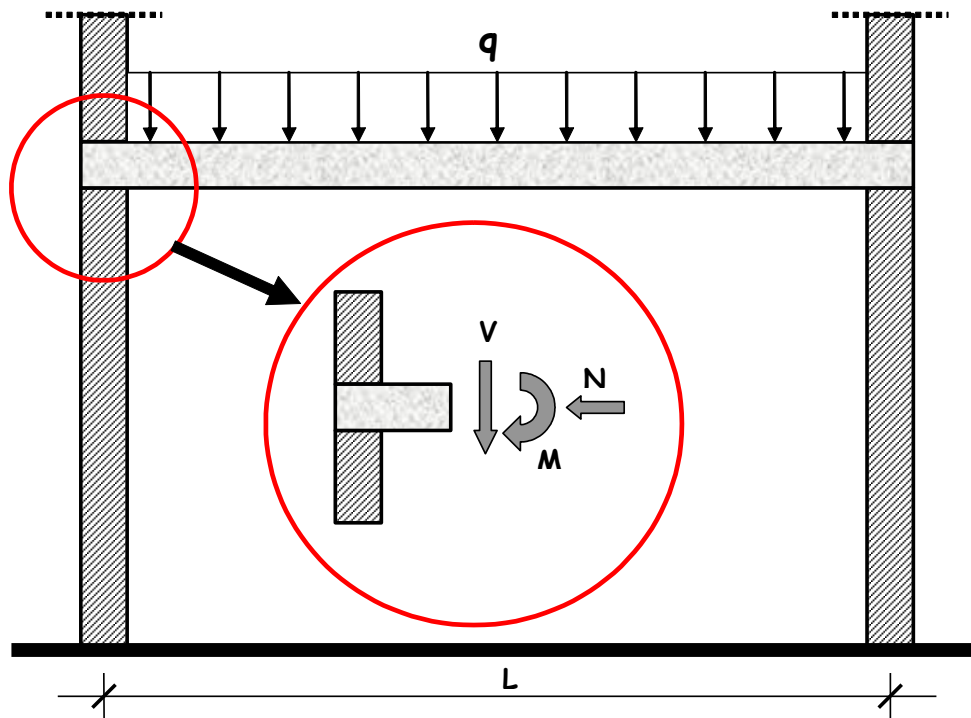
2,0-3,5‰

4. rectangular

Berekening van steenconstucties

bepalen van de excentriciteiten

= grootste uitdaging (invloed scheurvorming)

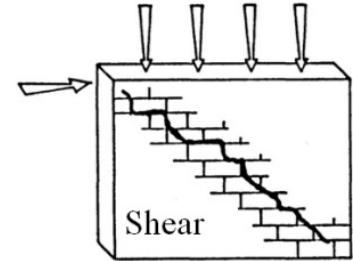
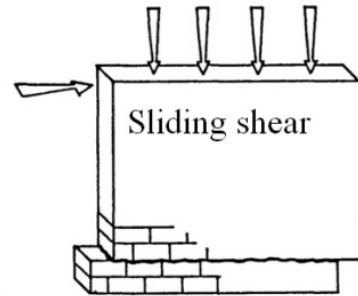
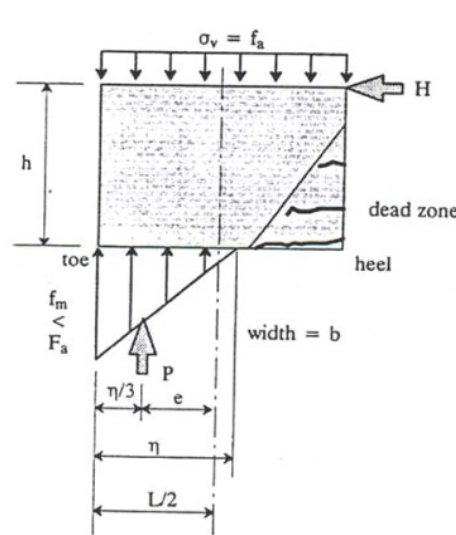


$$e = M/N$$

Berekening van steenconstucties

Schuifsterkte bepalen

Hoe initiële schuifsterkte verzekeren?

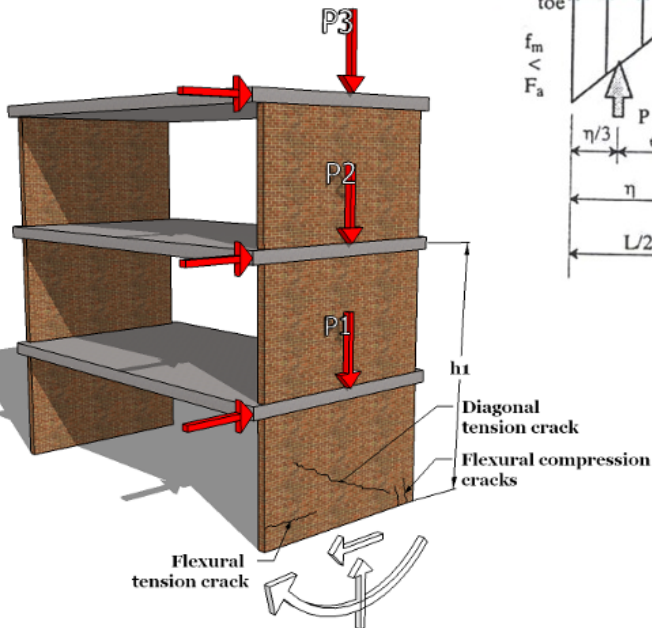


Design value of shear resistance:

$$V_{Sd} < V_{Rd} = f_{vd} \cdot t \cdot l_c$$

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \sigma_d$$

but not greater than $0,065 f_b$ or f_{vlt}



Berekening van steenconstructies

Limit state principle

EN 1991-1-7 Accidental actions from impact and explosions

EUROCODE 6 - ONTWERP EN BEREKENING VAN STEENCONSTRUCTIES

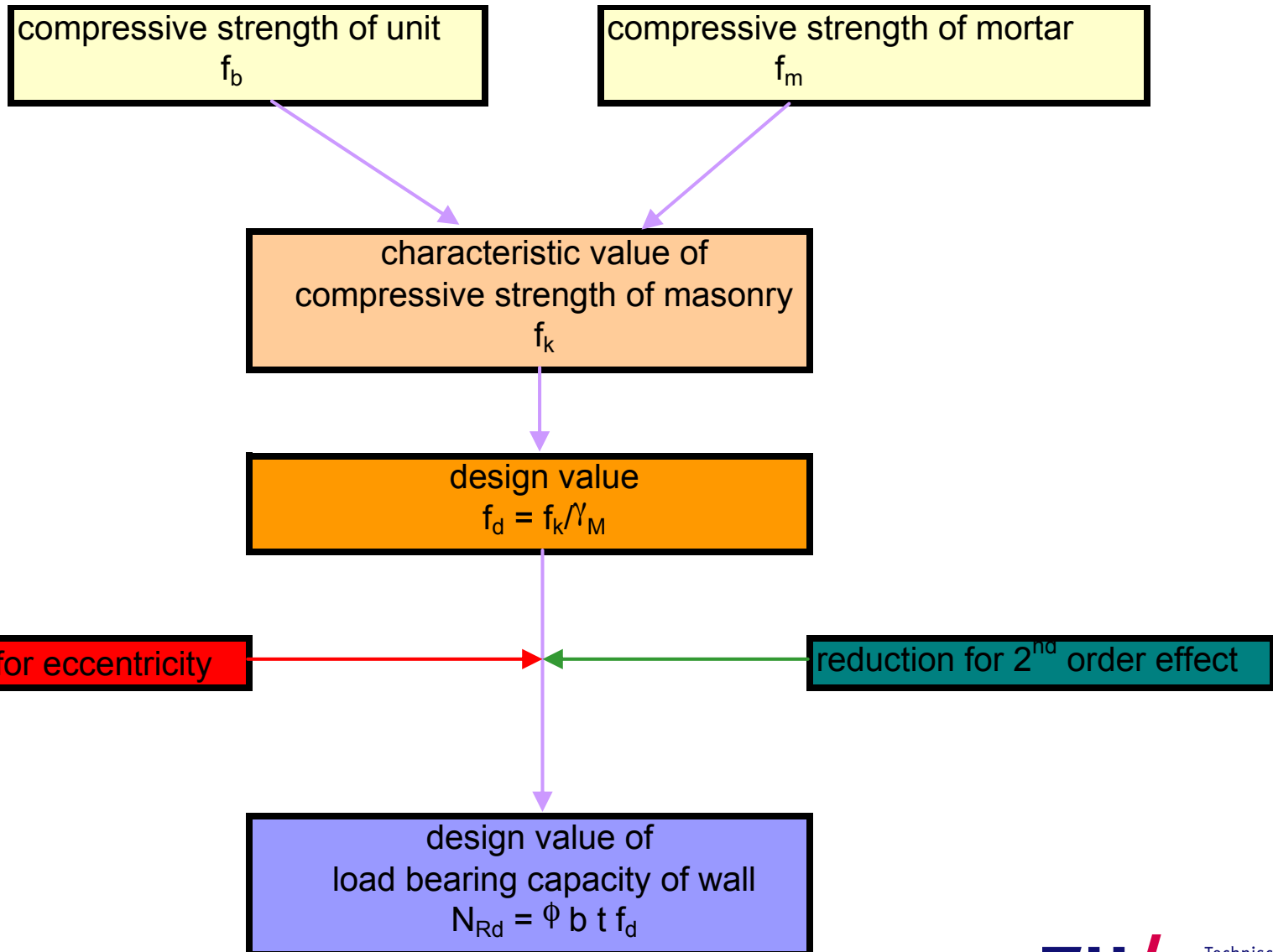
EN 1996-1-1	NEN-EN 1996-1-1 januari 2006	Eurocode 6 - Ontwerp en berekening van steenconstructies Deel 1-1 Algemene regels voor gebouwen - Regels voor gewapende en ongewapende steenconstructies
EN 1996-1-2	NEN-EN 1996-1-2 juni 2005	Eurocode 6 - Ontwerp en berekening van steenconstructies Deel 1-2 Algemene regels - ontwerp en berekening van constructies bij brand
EN 1996-2	NEN-EN 1996-2 januari 2006	Eurocode 6 - Ontwerp en berekening van steenconstructies Deel 2: Ontwerp, materiaalkeuze en uitvoering van constructies van metselwerk
EN 1996-3	NEN-EN 1996-3 januari 2006	Eurocode 6 - Ontwerp en berekening van steenconstructies Deel 3: Vereenvoudigde berekeningsmethoden voor constructies van ongewapend metselwerk

NPR 9096: NCCI for NL

Old Dutch Standard: NEN 6790 – NPR 6791

EN 1998: Earthquake resistant design of structures

Berekening van steenconstructies



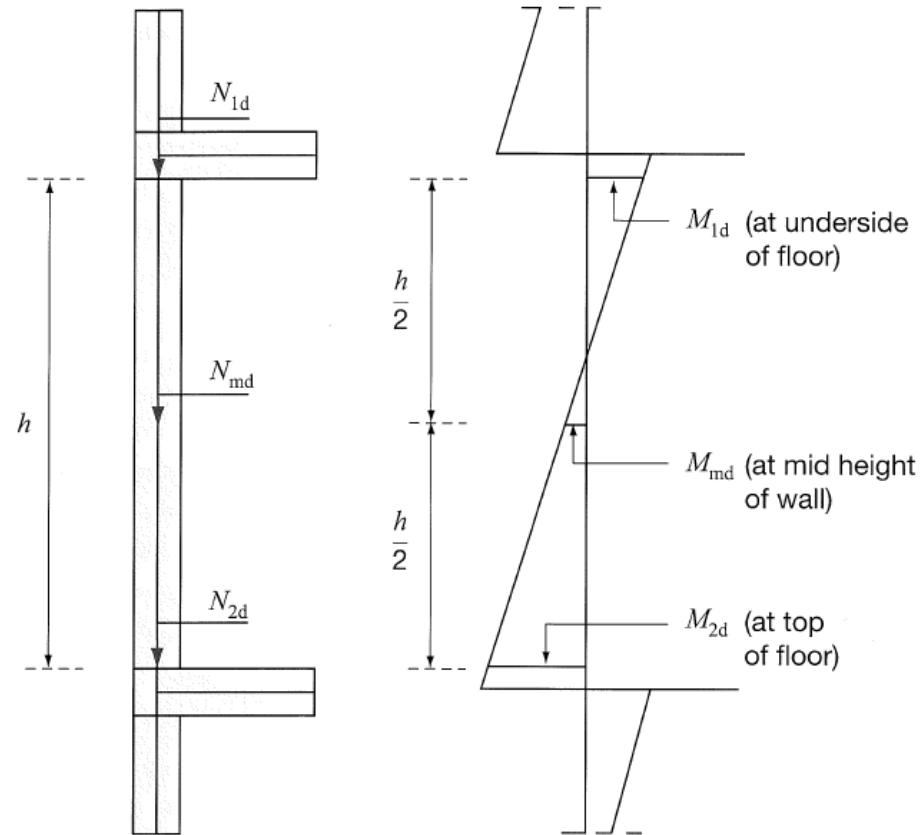
Berekening van steenconstructies

Verification at top and bottom

(1st order)

Verification at mid-height

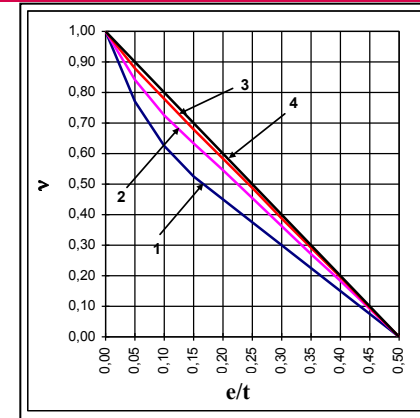
(2nd order effect)



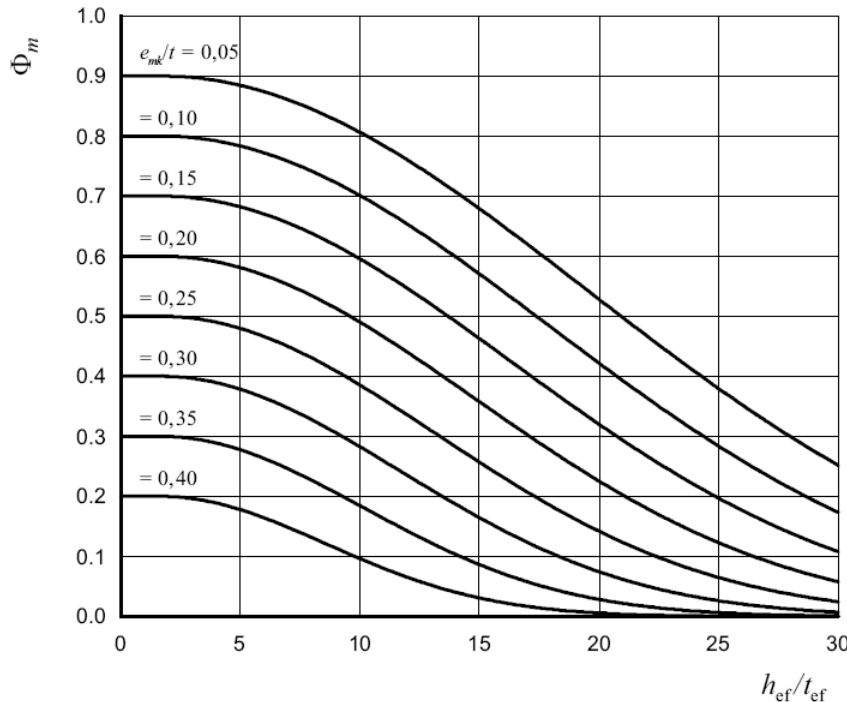
Berekening van steenconstructies

(i) At the top or bottom of the wall (Φ_i)

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t}$$



(ii) In the middle of the wall height (Φ_m)



$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}}$$

where:

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t}$$

$$u = \frac{\lambda - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e_{mk}}{t}}$$

where:

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{\frac{f_k}{E}}$$

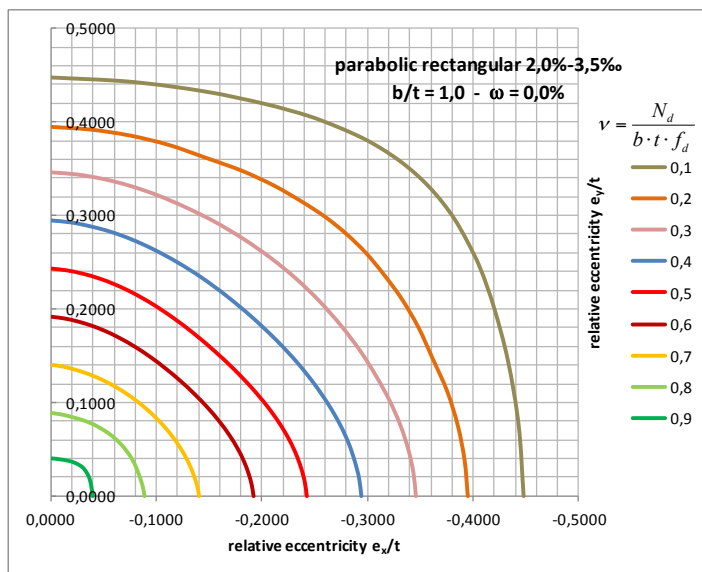
Berekening van steenconstucties

Biaxiale belasting kolommen in ongewapend metselwerk

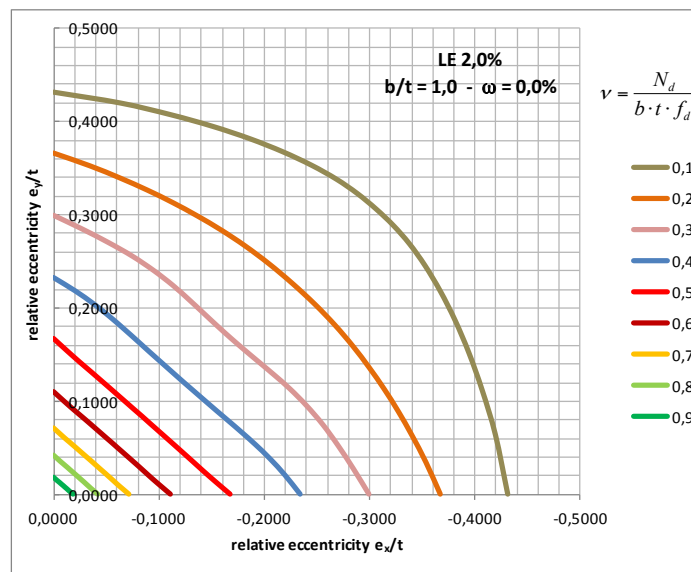
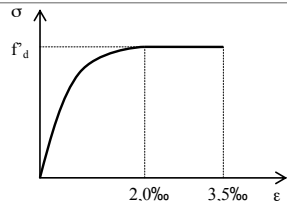
Unreinforced masonry in terms of eccentricity

Parabolic-rectangular σ - ϵ -diagram

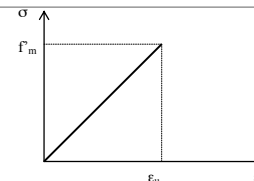
Linear elastic σ - ϵ -diagram



$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot t^2 \cdot f_d}$$



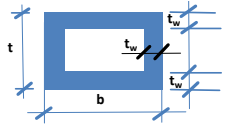
$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot t^2 \cdot f_d}$$



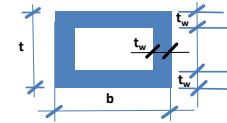
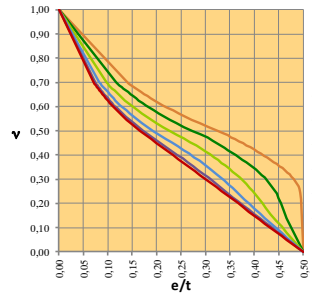
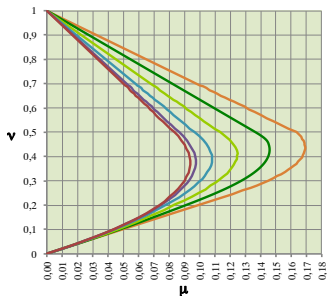
Berekening van steenconstucties

Complexe doorsneden

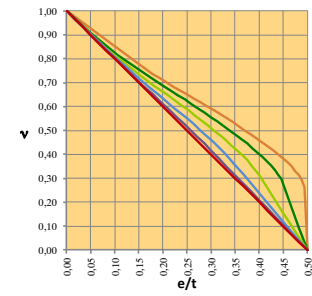
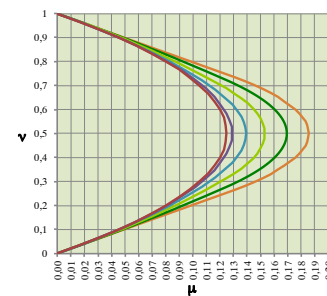
Hollow rectangular sections



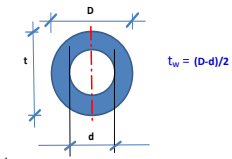
linear σ - ϵ -diagram
 $\epsilon_{t1} = 1,30 \text{ ‰}$
 $\epsilon_{u1} = 1,30 \text{ ‰}$
 $D = \epsilon_t / \epsilon_u = 1,00$



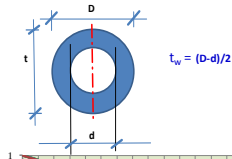
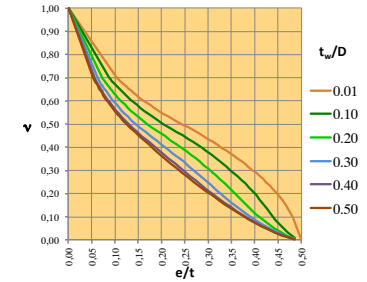
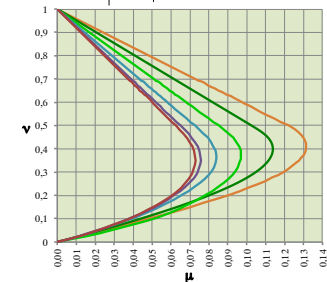
rectangular σ - ϵ -diagram (stress block)
 $\epsilon_{t1} = 0,00 \text{ ‰}$
 $\epsilon_{u1} = 3,50 \text{ ‰}$



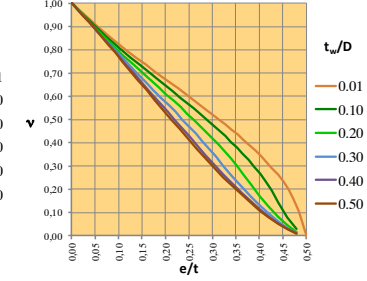
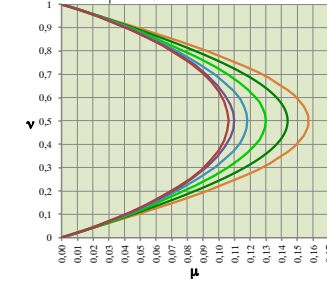
Hollow circular sections



$V = N / (A \cdot f_d)$ $H = M / (A \cdot f_b \cdot t)$
 linear σ - ϵ -diagram
 $\epsilon_{t1} = 1,30 \text{ ‰}$
 $\epsilon_{u1} = 1,30 \text{ ‰}$
 $D = \epsilon_t / \epsilon_u = 1,00$



$V = N / (A \cdot f_d)$ $H = M / (A \cdot f_b \cdot t)$
 rectangular σ - ϵ -diagram (stress block)
 $\epsilon_{t1} = 0,00 \text{ ‰}$
 $\epsilon_{u1} = 3,50 \text{ ‰}$



$$v = \frac{N}{A f_d}$$

$$\mu = \frac{M}{A t f_d}$$

Sterke en zwakke eigenschappen

Sterke punten

- Goedkoopste bouw materiaal
- Multifunctioneel: dragend, thermisch isolerend, thermische inertie, akoestisch isolerend (soms absorberend, visueel afscheidend (soms CO₂-absorberend), brandveilig, recycleerbaar
- Lokale productie: duurzaam, eenvoudig verkrijgbaar
- Geen bekisting nodig
- Eenvoudig aanpasbaar (verbouwingen)
- Intelligent materiaal (spanningsherverdeling door scheurvorming)
- grote sterktereserve (boogwerking)

Sterke en zwakke eigenschappen

Zwakke punten

- Mortelvoegen vereisen verhardingstijd
- Niet uitvoerbaar bij vriesweer
- Veel handenarbeid vereist (vakkennis vereist)
- Schuifsterkte is kritisch
- Gebrek aan kennis over constructieve eigenschappen van steenconstructie



Samenwerking met andere materialen

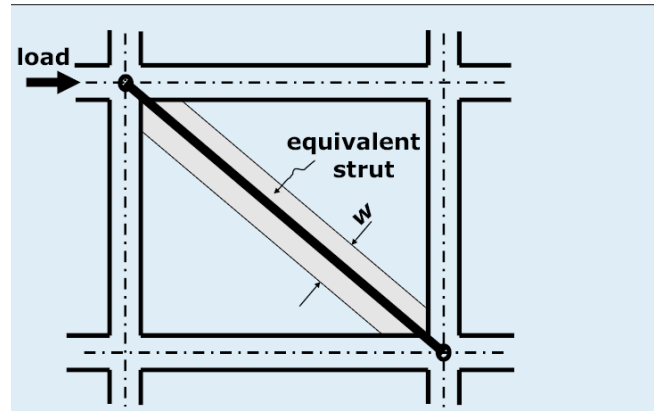
Invulwanden



Samenwerking met andere materialen

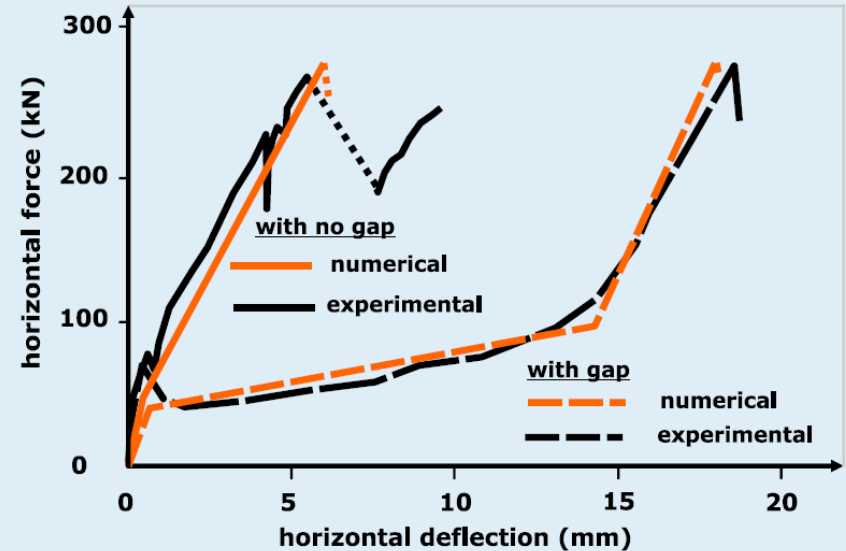
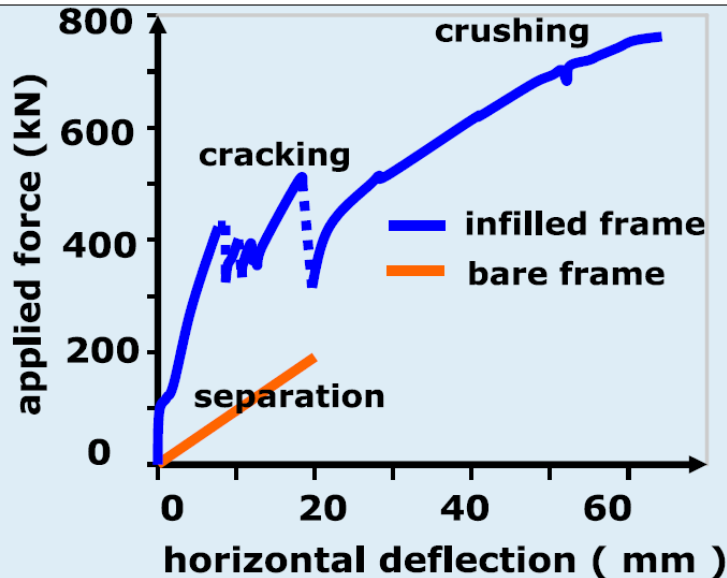
Invulwanden

analysis – diagonal strut model



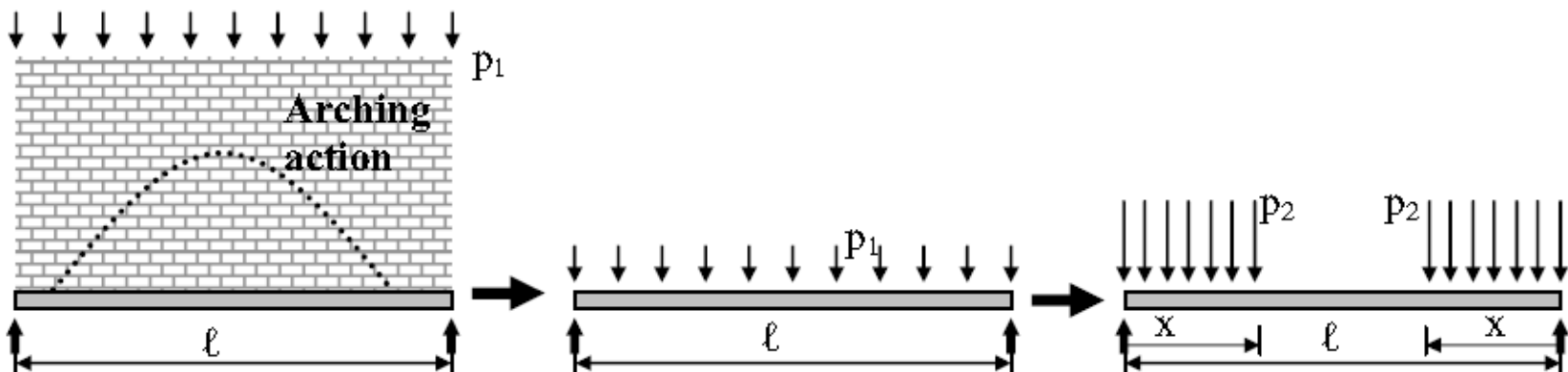
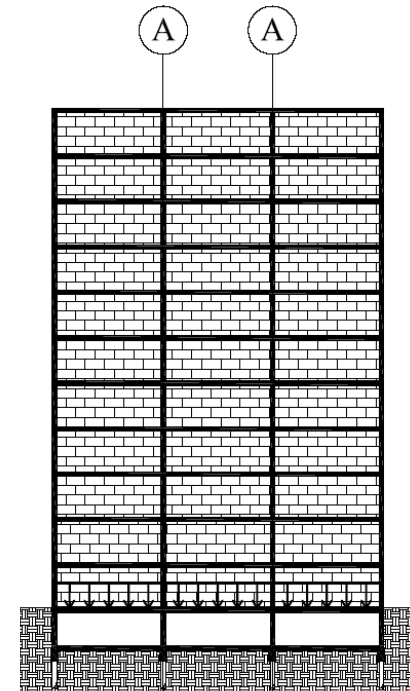
general behaviour : load defl. response

results – influence of interface gaps



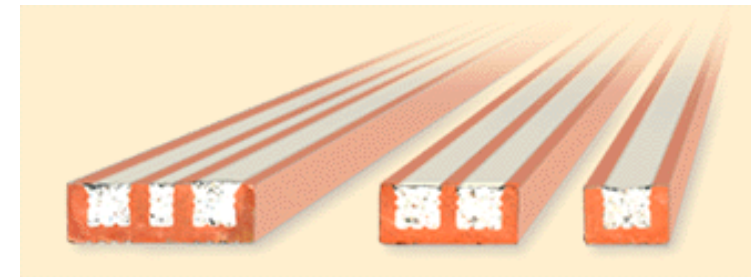
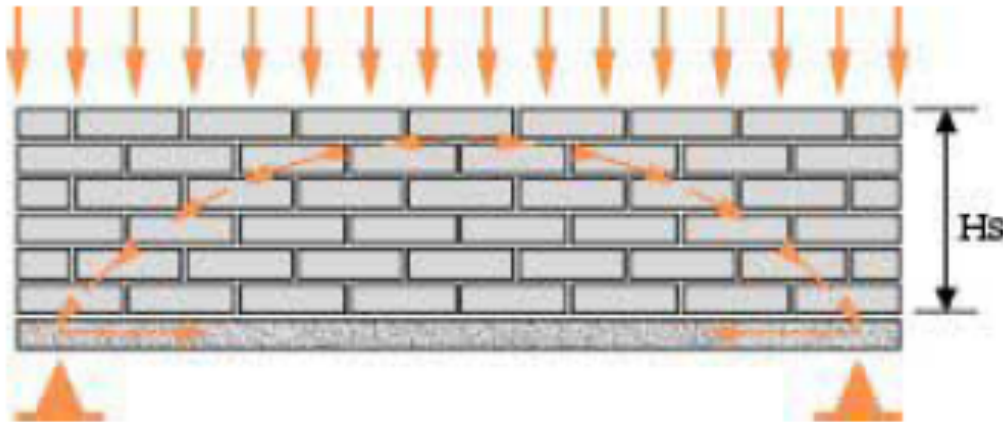
Samenwerking met andere materialen

Hoge wandliggers



Samenwerking met andere materialen

Samengestelde lateien



Nieuwe ontwikkelingen

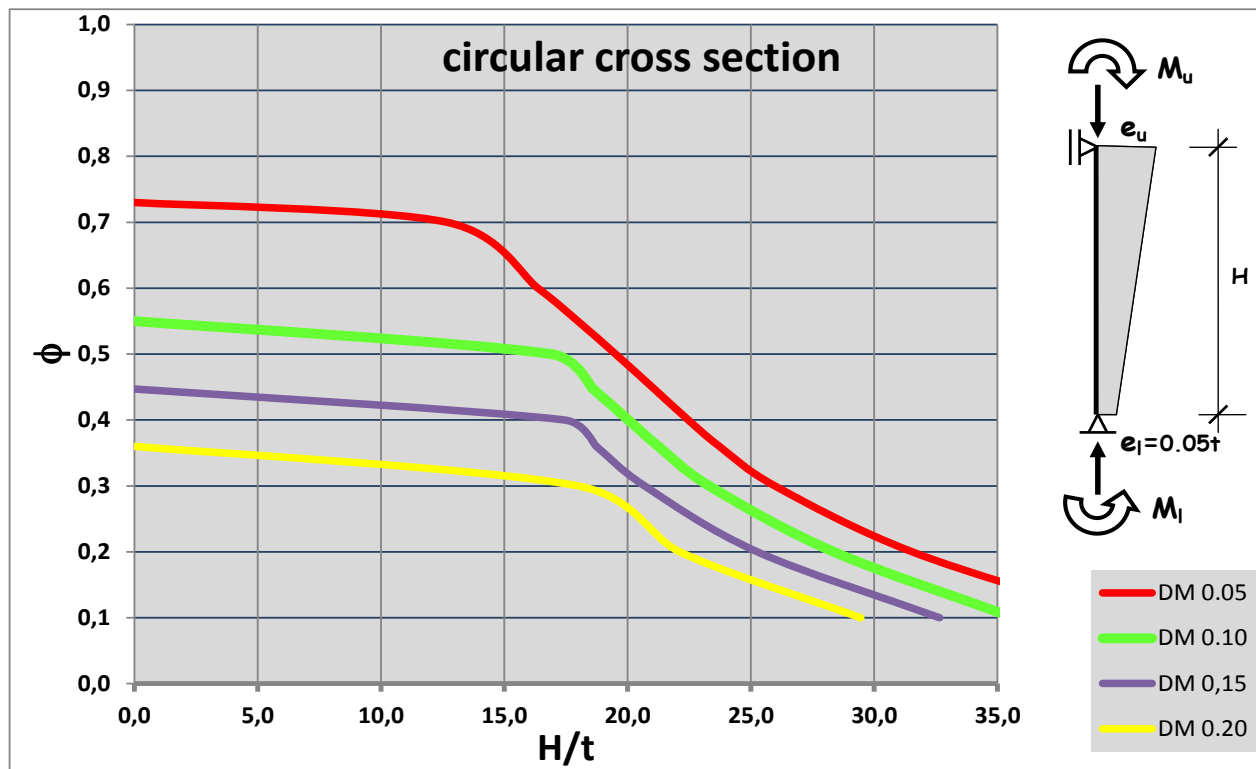
- new units for structural masonry
- new mortars for structural masonry
- new building techniques
- new structural systems
- new design rules



Nieuwe ontwikkelingen

Rekenmethoden:

Complexe doorsneden: 2^{de} orde effecten



Boogwerking bij laterale belasting

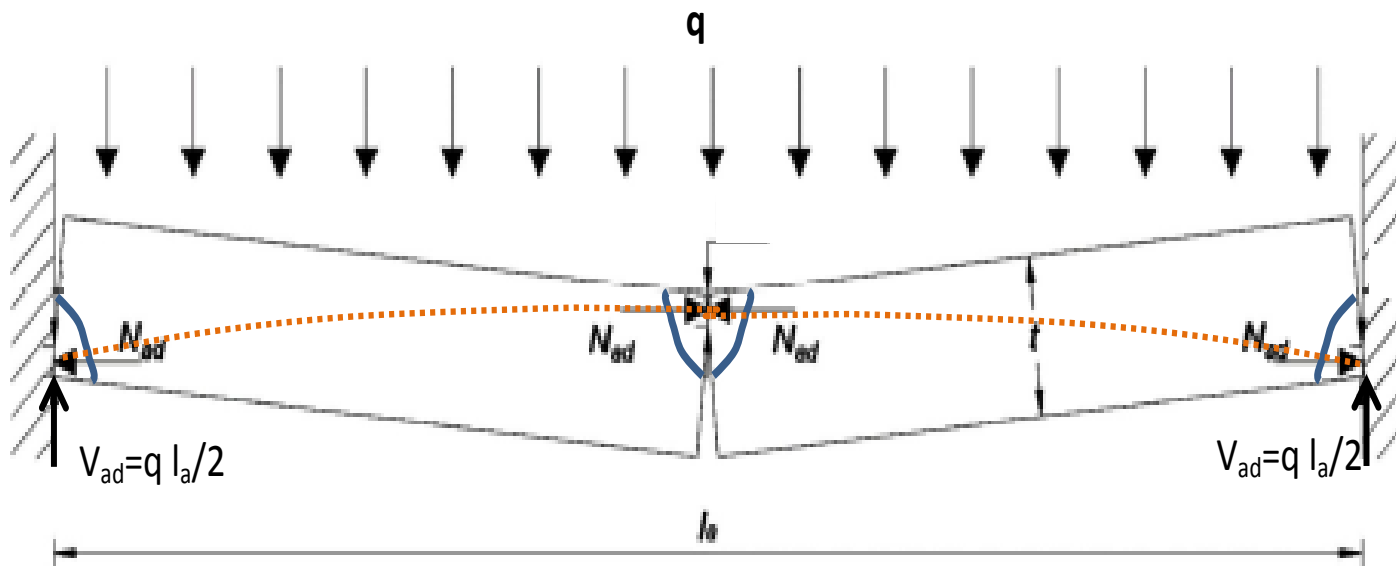


Figure 6.3 - Arch assumed for resisting lateral loads (diagrammatic)

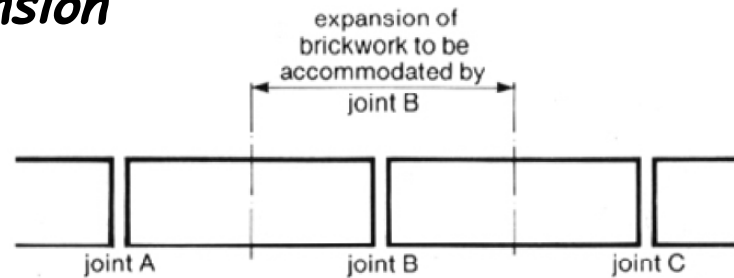
$$q = \frac{8N_{Rd}(t - 2\delta_G x)}{l^2}$$

Nieuwe ontwikkelingen

Nieuwe richtlijnen voor dilateren van ongewapende en gewapende wanden

Criterion 1: expansion

$$L_1 = \frac{\Delta v}{\varepsilon^+}$$



Criterion 2: contraction

$$L_2 = l_R \leq -\ln\left(1 - \frac{\beta_{Z,mw}}{E_{Z,mw} \cdot \text{ges} \varepsilon \cdot R}\right) \cdot \frac{h_W}{0,23}$$



Nieuwe ontwikkelingen



Nieuwe ontwikkelingen

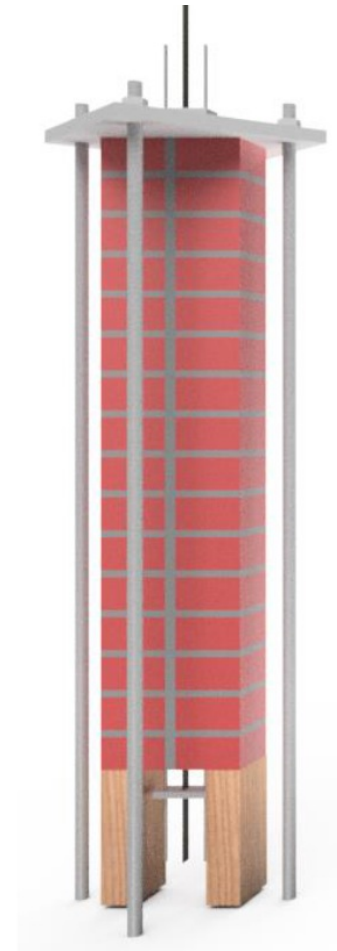
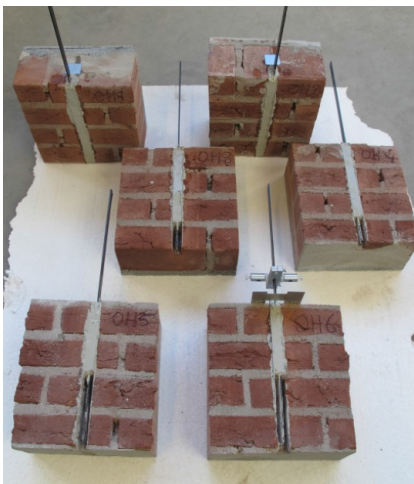
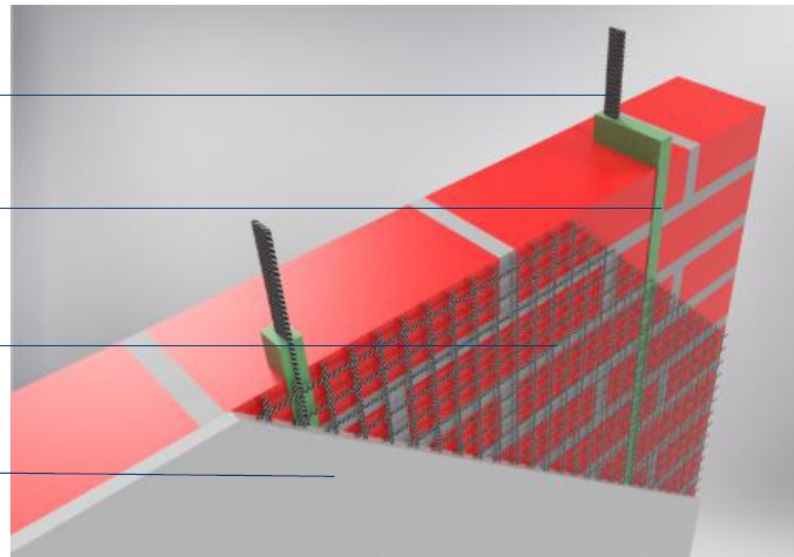
Versterking van ongewapend metselwerk om weerstand te bieden aan seismische belastingen

CFRP strips

Speciaal ontwikkelde
taai/elastische epoxy

Versterkingsvlies
CFRP wapeningsnet

Versterkingslaag
Cementeus of Polymeer



Nieuwe ontwikkelingen

Materialen - uitvoering

Prefabricage en robotisering



Nieuwe ontwikkelingen

3D Printing Robots are the Masons of the 21st Century **smart masonry**

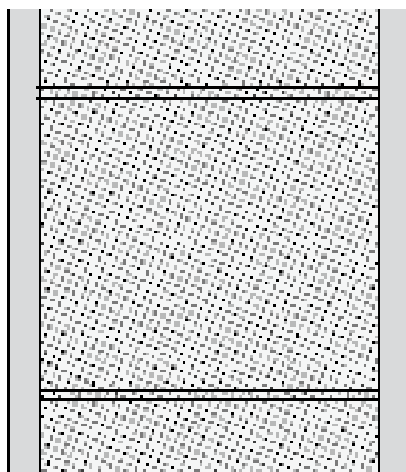
Sami Emory – Mar 13 2015

ZA's Smart Masonry method combines large, prefabricated elements with 3D-printed parts. Working out of a robotic construction station, the motorized appendage weaves a geometric stonework floor-by-floor in a “compact and labor-effective” method, according to its creators. This seamless mesh of beehive-like stone replaces traditional elements like walls, columns, and beams. Through digital optimization, the mesh increases the structure's load-bearing capacity while decreasing its overall surface area.



Toekomst voor steenconstructies?

Massieve buitenwanden versus spouwmuur



Massieve muur
uit gelijmde
cellenbetonblokken +
buitenpleister 12 mm en
binnenpleister 10 mm

