

De radioactiviteit die mogelijk wordt uitgestraald in constructies, is hoofdzakelijk te wijten aan de aanwezigheid van radium (Ra 226) en/of thorium (Th 232) in de kelder en in de gebruikte materialen. Uit de onderstaande tabel blijkt dat het cellenbeton het laagste gehalte aan deze radioactieve stoffen heeft.

Gemiddelde radioactieve straling van verschillende bouwmaterialen (pCi/g) [19]		
	Ra 226	Th 232
Blokken in gebakken aarde	2,5	2,3
Beton	0,8	1
Gips	19	0,7
Kalkzandsteen	0,7	0,7
Cellenbeton*	0,3	0,3

* Metingen in het laboratorium voor natuurwetenschappen van de universiteit van Gent

De zeer kleine radioactiviteit van cellenbeton is te danken aan zijn samenstelling uit zuiver zand ($\pm 70\%$), een grondstof met een zeer lage radioactiviteit (gemiddeld 3 keer minder dan die van klei waaruit baksteen wordt vervaardigd). Bovendien is er relatief weinig zand nodig om 1 m³ cellenbeton te maken (opnieuw 3 keer minder dan voor de meeste andere ruwbouwmaterialen).

4.8.7 Levenscyclus

“Een duurzame ontwikkeling is een ontwikkeling die beantwoordt aan de huidige eisen zonder de voldoening van de eisen van de toekomstige generaties in het gedrang te brengen.”

Duurzaam bouwen bevat verschillende hoofdlijnen:

- de energie-efficiëntie van gebouwen, die voornamelijk bepaald wordt door de thermische isolatie van de gebouwen
- het gebruik van materialen met weinig impact op het milieu, die dus de mens en zijn omgeving ontzien gedurende hun hele levenscyclus
- vermindering van de bouw- en sloopafval

De politiek evolueert vandaag naar een concept van duurzame ontwikkeling, naar een responsabilisering voor alle levensfasen van een product. Een nieuwe concept werd gedefinieerd: engineering van de levenscyclus. Dit ‘engineering’ gaat de milieu- en economische belangen verenigen, en gaat dus rekening houden met alle levenscycli van de materialen. Dat betekent minder grondstoffen, energie, afval, verpakking en meer recyclage, met als objectief de productiekosten te verminderen en een betere ecologische balans te krijgen. ‘Engineering’ van producten veronderstelt ook de creatie van ergonomische producten met meer comfort voor de gebruikers. Cellenbeton beantwoordt perfect aan de huidige vereisten, laat toe duurzaam te bouwen en toont een optimale levenscyclus.

4.9 Berekening van dragend metselwerk onderworpen aan verticale belasting

4.9.1 Volgens NBN B 24-301 (maart 1980)

De berekeningen worden uitgevoerd volgens de methode van de toelaatbare spanningen (elastische methode).

De sterkte van het metselwerk wordt afgeleid uit proeven op materialen of op constructieve bouwdelen.

4.9.1.1 f_k volgens proeven op bouwmaterialen

Cellenbetonblokken hebben het BENOR keurmerk.

a) Karakteristieke druksterkte: f_{bk}

Deze waarde wordt afgeleid uit de gemiddelde waarde f_{bm} verkregen na een reeks drukproeven op afzonderlijke blokken, conform NBN B 24-201.

b) Gecorrigeerde karakteristieke druksterkte: $(f_{bk})_{corr}$

Deze gecorrigeerde waarde wordt gebruikt om rekening te houden met het formaat van de verschillende blokken. Het standaard proefstuk is een kubus met een ribbe van 200 mm.

Deze waarde is het quotiënt van de deling van f_{bk} door een vormfactor c .

$$(f_{bk})_{corr} = \frac{f_{bk}}{c}$$

De vormfactor voor cellenbetonblokken bedraagt ongeveer 1.

Afmetingen (mm)	Vormfactor c
600 x 250 x 150	1,0017
600 x 250 x 200	1,0699
600 x 250 x 240	1,0819
600 x 250 x 300	1,0991

c) Mortelcategorieën

De verschillende mortelcategorieën worden bepaald op basis van de gemiddelde sterkte gemeten volgens NBN B 12-208. We onderscheiden vijf verschillende mortelklassen: M1 tot M5.

De lijm mortel voor cellenbeton behoort tot klasse M2 en heeft een druksterkte van 12 N/mm².



4.9.2 Volgens NBN ENV 1996-1-1, Eurocode 6 met NAD (juni 1998)

De Belgische norm NBN B 24-301 zal geleidelijk worden vervangen door de Europese norm. Sinds 1998 bestaat een NAD (Nationale Toepassingsrichtlijn) voor ENV 1996-1-1 (Design of masonry structures. General rules for buildings. Rules for reinforced and unreinforced masonry (1995)).

De ENV is drie jaar geldig. Deze geldigheidsduur kan eventueel met twee jaar worden verlengd, vanaf de publicatie. Intussen gebruiken de lidstaten de norm als zodanig, of dienen ze voorstellen tot wijziging van bepaalde voorschriften in. De wijzigingen worden voor elk land opgenomen in het NAD. In België wordt het NAD opgemaakt en gepubliceerd door het BIN.

Voorlopig zijn er dus twee normen van kracht in België:

- NBN B 24-301 (Definitief)
- het NAD betreffende ENV 1996-1-1.

nota: een NA bij EN 1996-1-1 is in voorbereiding en zal het NAD vervangen.

In de praktijk is het wenselijk het gebruik van het NAD voor Eurocode 6 aan te moedigen, omdat deze binnen afzienbare tijd de norm NBN B 24-301 zal vervangen.

Het NAD betreffende ENV 1996-1-1 wordt hierna uitvoerig beschreven, met rekenvoorbeelden voor cellenbeton.

We staan ook even stil bij ongewapende dragende muren die verticaal worden belast. In de praktijk is het raadzaam wapeningsmateriaal in de metselvoegen te plaatsen om de treksterkte en de buig- en druksterkte van het metselwerk te verbeteren. De bijzonderheden over de berekening van gewapend metselwerk zijn hier niet overgenomen, maar staan in Eurocode 6.

De berekening wordt uitgevoerd volgens de methode van de uiterste grenstoestanden. De sterkte van metselwerk wordt berekend op basis van proeven die op de materialen of op de bouwelementen worden uitgevoerd. Doorgaans worden berekeningen gebruikt die berusten op proeven uitgevoerd op de meest gebruikte materialen. Bijgevolg zullen we deze hier van naderbij bekijken.

4.9.2.1 Genormaliseerde druksterkte van metselwerkblokken: f_b

De gemiddelde sterkte wordt verkregen op luchtgedroogde kubussen met een ribbe van 100 mm.

d) Karakteristieke druksterkte van metselwerk: f_k
Op basis van de gecorrigeerde karakteristieke druksterkte ($f_{bk,corr}$) en de mortelsoort kan de f_k -waarde worden berekend met behulp van tabel 5 van de norm NBN B 24-301.

In de praktijk wordt aangenomen dat de sterkte van metselwerk uitgevoerd in cellenbetonblokken en lijmortel, niet vermindert als de blokken door middel van lijmortel worden verbonden. De druksterkte van de gebruikte mortel is immers 3 tot 4 keer groter dan die van de blokken.

Bijgevolg wordt aangenomen dat $f_k = (f_{bk,corr})$

4.9.1.2 f_k volgens proeven op muurtjes

De f_k -waarde kan ook rechtstreeks worden bepaald door proeven op muren of op muurtjes.

Na afleiding van f_k kan de eigenlijke berekening worden uitgevoerd.

De toelaatbare druksterkte f_{adm} is een fractie van f_k en wordt berekend door f_k te delen door een veiligheidscoëfficiënt 4,5.

Deze toelaatbare druksterkte wordt vermenigvuldigd met een verminderingcoëfficiënt Φ teneinde rekening te houden met de slankheid van de muur en de excentriciteit van de toegepaste belasting. Zo krijgen we de toelaatbare spanningen in de muur.

Ten slotte moeten we nog nagaan of:
de optredende spanning $\leq f_{adm} \cdot \Phi$

In België wordt de druksterkte doorgaans uitgedrukt als karakteristieke waarde f_{bk} die wordt afgeleid uit de gemiddelde waarde f_{bm} resulterend uit een reeks drukproeven op blokken volgens EN 772-1.

Willen we tot een equivalente gemiddelde sterkte $f_{bm, eq}$ komen, zoals bepaald in Eurocode 6, dan moeten we volgens het NAD de karakteristieke waarde vermenigvuldigen met factor 1,2.

$$f_{bm, eq} = 1,2 f_{bk}$$

Vervolgens wordt de equivalente gemiddelde sterkte omgerekend naar genormaliseerde druksterkte door omzetting naar drogeluchtconditie, voorzover dat nog niet gebeurd is, en door de waarde te vermenigvuldigen met de vormfactor δ .

$$\text{Zo krijgen we: } f_b = \delta \cdot f_{bm, eq}$$

De vormfactor δ wordt berekend op basis van de onderstaande tabel:

Hoogte [mm]	Horizontale afmetingen [mm]				
	50	100	150	200	≥250
50	0,85	0,75	0,70	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

4.9.2.2 Mortelcategorieën

De indeling van de mortelcategorieën berust op de gemiddelde sterkte gemeten volgens EN 1015-11. We onderscheiden vijf verschillende mortelklassen.

In tegenstelling tot NBN B 24-301 geeft het cijfer na de letter M de gemiddelde druksterkte van de mortel aan. In de onderstaande tabel wordt de oude indeling volgens NBN B 14-001 vergeleken met de nieuwe indeling volgens Eurocode 6.

Mortelklasse volgens NBN ENV 1996-1-1	Gemiddelde sterkte [N/mm ²]	Mortelklasse volgens NBN B 24-301
M20	20	M1
M12	12	M2
M8	8	M3
M5	5	M4
M2,5	2,5	M5

De lijm mortel voor cellenbeton valt nu onder klasse M12 en heeft een gemiddelde druksterkte na 28 dagen $f_m = 12 \text{ N/mm}^2$.

4.9.2.3 Karakteristieke druksterkte f_k van ongewapend metselwerk

Op basis van de genormaliseerde druksterkte f_b van de metselblokken en de sterkte f_m van de mortel kan de karakteristieke sterkte f_k van het metselwerk op basis van de volgende formules worden berekend:

a) Voor gewoon metselwerk, uitgevoerd met normale mortel, geldt:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad [\text{N/mm}^2]$$

waarbij K ligt tussen 0,40 en 0,60 afhankelijk van het type stenen. De vier groepen metselstenen worden ingedeeld volgens § 3.1.1 van Eurocode 6 (zie de onderstaande tabel).

Indeling van de groepen	Baksteen-blokken	Blokken van beton en kalkzandsteen
Groep 1	minder dan 25% holten	minder dan 25% holten
Groep 2a	25-45% holten	25-50% holten
Groep 2b	45-55% holten	50-60% holten
Groep 3	tot 70% holten	tot 70% holten

Als de muurbreedte gelijk is aan de dikte van de blokken:

- voor metselwerk van groep 1: $K = 0,60$
- voor metselwerk van groep 2a: $K = 0,55$
- voor metselwerk van groep 2b: $K = 0,50$
- voor metselwerk van groep 3: $K = 0,40$

b) Voor metselwerk van groep 1, vervaardigd met lijm mortel (dunne voegen van 1 tot 3 mm dik), hetgeen het geval is voor cellenbeton, wordt de f_k -waarde als volgt berekend:

$$f_k = 0,80 \cdot f_b^{0,85} \quad [\text{N/mm}^2]$$

4.9.2.4 f_k -waarde voor verschillende soorten metselwerk

De f_k -waarde voor een 200 mm dikke cellenbetonmuur van het type C3/450 wordt als volgt berekend (blokafmetingen: 600 x 250 x 200 mm):

$$f_{bk} = 3 \text{ N/mm}^2 \text{ (zie par. 4.2.)}$$

$$f_{bm, eq} = 1,2 \cdot f_{bk} = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_b = \delta \cdot f_{bm, eq} = 1,25 \cdot f_{bm, eq} = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 0,80 \cdot f_b^{0,85} = 2,87 \text{ N/mm}^2$$

De volgens Eurocode 6 berekende waarde $f_k = 2,87 \text{ N/mm}^2$ is te vergelijken met de waarde $f_k = 1,80 \text{ N/mm}^2$ berekend volgens NBN B 24-301. Op te merken valt dat de sterkte met ruim 50% toegenomen is vergeleken met de oude Belgische norm. De grotere sterkte is te danken aan de laatste onderzoeken die de uitstekende prestaties van gelijmd metselwerk hebben aangetoond.

In de onderstaande overzichtstabel staan de volgens Eurocode 6 berekende f_k -waarden voor de verschillende densiteiten van cellenbetonblokken.

f_k -waarde (N/mm ²) volgens NBN EN 1996-1-1 voor cellenbeton Blokafmetingen: L = 600 mm, H = 250 mm				
Dikte (mm)	f-klasse (+ type)			
	f2 (C2/400)	f3 (C3/450)	f4 (C4/550)	f5 (C5/550)
150	2,17	3,07	3,92	4,73
175	2,10	2,97	3,79	4,59
200	2,04	2,87	3,67	4,43
240	1,92	2,72	3,47	4,19
300	1,90	2,68	3,42	4,13
365	1,90	2,68	3,42	4,13

Cellenbetonmuren hebben hun grote sterkte te danken aan het feit dat de voegen gelijmd zijn met lijm mortel (dunne voegen) en dat de blokken niet hol zijn (geen perforaties).

Bij wijze van voorbeeld hebben we de f_k -waarden vergeleken voor metselstenen met dezelfde f_{bk} geplaatst met mortel, of met lijm mortel (voor cellenbeton).

- 1) 200 mm dikke cellenbetonblokken van het type C4/550, verwerkt met lijm mortel van klasse M12

$$f_k = 3,67 \text{ N/mm}^2$$

- 2) Metselblokken van groep 1 (minder dan 25% holten) vervaardigd met mortel van klasse M12 ($f_{bk} = 4 \text{ N/mm}^2$, blokafmetingen: L = 290, H = 140, B = 190 mm, zijnde $\delta = 1$)

$$f_b = 1,2 \cdot \delta \cdot f_{bk} = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

$$\text{met } K = 0,60 \text{ en } f_m = 12 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 3,09 \text{ N/mm}^2$$

- 3) Metselblokken van groep 3 (tot 70% holten) vervaardigd met mortel van klasse M12 ($f_{bk} = 4 \text{ N/mm}^2$, blokafmetingen: L = 290, H = 140, B = 190 mm, zijnde $\delta = 1$)

$$f_b = 1,2 \cdot \delta \cdot f_{bk} = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

$$\text{met } K = 0,40 \text{ en } f_m = 12 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 2,06 \text{ N/mm}^2$$

- 4) Metselblokken van groep 3 (tot 70% holten) vervaardigd met mortel van klasse M5 ($f_{bk} = 4 \text{ N/mm}^2$, blokafmetingen: L = 290, H = 140, B = 190 mm, zijnde $\delta = 1$)

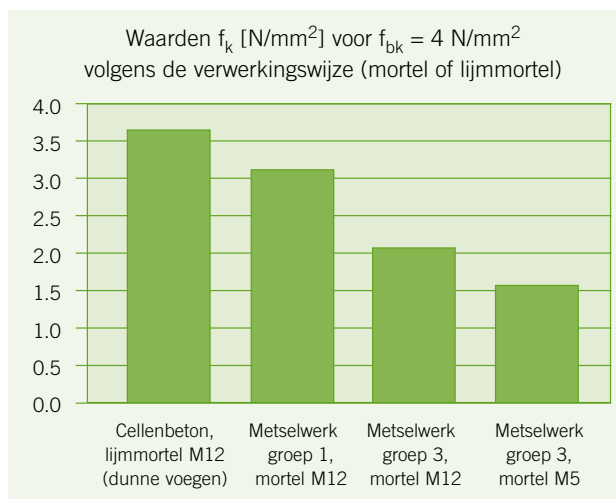
$$f_b = 1,2 \cdot \delta \cdot f_{bk} = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

$$\text{met } K = 0,40 \text{ en } f_m = 5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 1,66 \text{ N/mm}^2$$

Deze waarden zijn grafisch weergegeven in onderstaand diagram:



De grafiek toont duidelijk aan dat de muren die met lijm mortel zijn vervaardigd, de grootste sterkte hebben. Verder zien we de invloed van de druksterkte van de mortel, alsook de invloed van het holtepercentage in de blokken (groep 1 en 3).

4.9.2.5 Sterkteberekening van een muur volgens ENV 1996-1-1 met NAD

Om de sterkte van een muur te berekenen, passen we een verminderingsfactor Φ toe, die rekening houdt met de slankheid en excentriciteit. Deze rekenwijze volgt hetzelfde principe als NBN B 24-301, maar de formules om Φ te berekenen, zijn verschillend. De resultaten leunen dicht aan bij die van de NBN.

4.9.2.5.1 Slankheid van de muur

We bepalen h = hoogte van de muur
 L = afstand tussen verticale muren
 t = muurdikte

We bepalen de slankheid S van de muur:

$$S = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} < 27$$

waarbij h_{ef} = effectieve hoogte van de muur
 t_{ef} = effectieve dikte van de muur

Er geldt:

1) $h_{ef} = \rho_n \cdot h$ met $n = 2, 3$ of 4 afhankelijk van de manier waarop de muur gesteund is.

2) in ons geval is $t_{ef} = t$ want de blokken zijn even dik als de muur (zie Eurocode 6)

a. Muur gesteund aan boven- en onderzijde (niet aan de verticale kanten)

De verminderingsfactor $\rho_n = \rho_2$

waarbij $\rho_2 = 0,75$ als de muur in de vloer ingeklemd is
 $\rho_2 = 1$ in de andere gevallen

b. Muur gesteund aan twee horizontale zijden en aan één verticale zijde

De verminderingsfactor $\rho_n = \rho_3$

$$\text{met voor } h \leq 3,5 L \quad \rho_3 = \frac{\rho_2}{1 + \left[\frac{\rho_2 \cdot h}{3 \cdot L} \right]^2} > 0,3$$

$$\text{voor } h > 3,5 L \quad \rho_3 = \frac{1,5 \cdot L}{h}$$

c. Muur gesteund aan twee horizontale zijden en aan twee verticale zijden

De verminderingsfactor $\rho_n = \rho_4$

$$\text{met voor } h \leq L \quad \rho_4 = \frac{\rho_2}{1 + \left[\frac{\rho_2 \cdot h}{L} \right]^2}$$

$$\text{voor } h > L \quad \rho_4 = \frac{0,5 \cdot L}{h}$$

4.9.2.5.2 Excentriciteit van de belastingen

We berekenen de excentriciteit e_i aan de boven- en onderzijde van de muur, alsook de excentriciteit e_{mk} op halve muurhoogte:

$$e_i = \frac{M_i}{N_i} + e_{hi} + e_a \geq 0,05t$$

$$e_{mk} = \frac{M_m}{N_m} + e_{hm} + e_a + e_k \geq 0,05t$$

waarbij M_i = het buigmoment aan de boven- en onderzijde van de muur resulterend uit de excentriciteit van de verticale belasting

N_i = de verticale belasting in de beschouwde sectie

e_{hi} = de excentriciteit van de horizontale belastingen (bijvoorbeeld de winddruk)

e_a = de toevallige excentriciteit = $h_{ef} / 450$

M_m = het buigmoment in het midden van de muur resulterend uit de excentriciteit van de verticale belasting

- N_m = de verticale belasting in de beschouwde sectie
- e_{hm} = de excentriciteit van de horizontale belastingen (bijvoorbeeld de winddruk)
- e_k = de excentriciteit tengevolge van kruip

4.9.2.5.3 Controle van de sterkte van de muur (ongewapend metselwerk)

a. Controle van de bovenste en onderste sectie van de muur

De rekenwaarde van de belastingen in uiterste grenstoestand N_{Sd} moet kleiner zijn dan:

$$N_{Sd} < \frac{\Phi_i \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m}$$

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

b. Controle van de sectie op halve hoogte

De rekenwaarde van de belastingen in uiterste grenstoestand N_{Sd} moet kleiner zijn dan:

$$N_{Sd} < \frac{\Phi_m \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m}$$

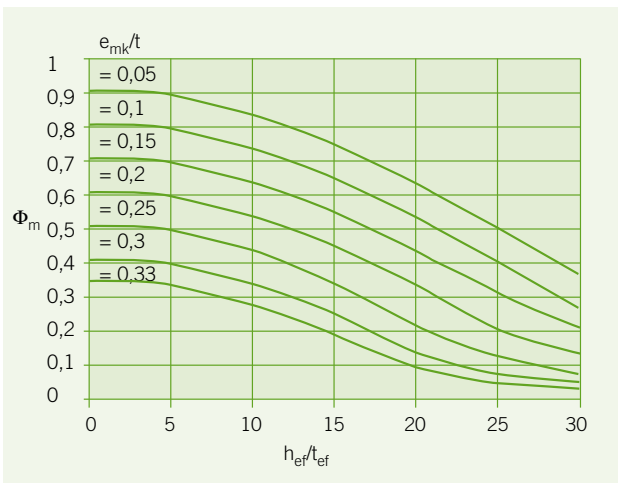
met Φ_m gegeven in de onderstaande tabel afhankelijk van de slankheid en de excentriciteit. [21]



De waarden van γ_m zijn gegeven in de onderstaande tabel:

γ_m	Uitvoeringscategorieën		
	A	B	C
Controlecategorie 1	1,7	2,2	2,7
Controlecategorie 2	2,0	2,5	3,0

Controlecategorie 1 komt overeen met een materiaal waarop een doorlopend toezicht wordt uitgeoefend met statistische interpretatie (BENOR-procedure of gelijkwaardig). Als geen doorlopend toezicht wordt uitgeoefend, neemt men controlecategorie 2. De Belgische cellenbetonfabrikanten hebben het BENOR-keurmerk gekregen en vallen dus in categorie 1.



Uitvoeringscategorieën	Minimale vereisten
A	<ul style="list-style-type: none"> • Voortdurend toezicht door gekwalificeerd en ervaren personeel van de firma • Regelmatige en veelvoudige controle door onafhankelijk personeel • Mechanisch aangemaakte en geteste mortel
B	<ul style="list-style-type: none"> • Voortdurend toezicht door gekwalificeerd en ervaren personeel van de firma • Mechanisch aangemaakte en geteste mortel
C	<ul style="list-style-type: none"> • "Normale" controle van de aangeleverde materialen en de uitvoering + 'courante' opvolging door de ontwerper van het project

4.9.2.5.4 Veiligheidsfactoren voor belastingen γ_f

γ_f	Ongunstig	Gunstig
Permanente belasting γ_g	1,35	1,0
Veranderlijke belasting γ_q	1,50	0

4.9.2.5.5 Rekenvoorbeelden volgens ENV 1996-1-1 met NAD

Voorbeeld 1

Sterkteberekening van een buitenmuur uit cellenbetonblokken met gevelsteen (cellenbetonmuur 200 mm + spouw + gevelsteen).

Gegevens: L = 5,00 m, h = 2,80 m,
 Blokken met densiteit C4/550,
 dikte 200 mm
 Excentriciteit te wijten aan de winddruk:
 5 mm
 Excentriciteit van de belasting (vloerplaat):
 20 mm
 Veiligheidscoëfficiënt op het metselwerk:
 $\gamma_m = 2,2$
 De muur is vierzijdig gesteund

Berekening:

a) $f_{bk} = 4 \text{ N/mm}^2$, dus $f_k = 3,67 \text{ N/mm}^2$
 (zie par. 4.9.2.4)

b) Slankheid:

$$\rho_4 = \frac{\rho_2}{1 + \left[\frac{\rho_2 \cdot h}{L} \right]^2} = 0,76 \quad \text{met } \rho_2 = 1$$

dus $h_{ef} = 0,76 \cdot h = 2,13 \text{ m}$

$$S = \frac{2,13}{0,2} = 10,66 < 27$$

c) Excentriciteit:

$e_a = \text{toevallige excentriciteit} = h_{ef} / 450 = 5 \text{ mm}$

$e = e_a + e_{wind} + e_{vl} = 30 \text{ mm} = e_i = e_{mk}$

d) Controle van de muur:

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} = 0,70$$

$\Phi_m = 0,62$ voor $\frac{e_{mk}}{t} = 0,15$

De sterkte van de muur in de uiterste grenstoestand N_{Rd} berekenen we dan als volgt:

$$N_{Rd} = \frac{\Phi_m \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m} = 207,6 \text{ kN/m}$$

Voorbeeld 2

We zullen voorbeeld 1 vergelijken met een gelijkaardige muur in snelbouwblokken. De muur is als volgt samengesteld: 140 mm dikke snelbouwblokken + isolatiemateriaal 60 mm + spouw + gevelsteen.

Gegevens: L = 5,00 m, h = 2,80 m
 $f_{bk} = 12 \text{ N/mm}^2$, mortel van klasse M8, groep 2b
 Blokafmetingen: H = 140, L = 190 mm
 Excentriciteit te wijten aan de winddruk:
 5 mm
 Excentriciteit van de belasting (vloerplaat):
 20 mm
 Veiligheidscoëfficiënt op het metselwerk:
 $\gamma_m = 2,2$
 De muur is vierzijdig gesteund

Berekening:

a) $f_{bk} = 12 \text{ N/mm}^2$

$$f_{bm \text{ eq}} = 1,2 f_{bk} = 14,4 \text{ N/mm}^2$$

$$f_b = \delta \cdot f_{bm \text{ eq}} = 1,10 f_{bm \text{ eq}} = 15,84 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 0,50 f_b^{0,65} f_m^{0,25} = 5,06 \text{ N/mm}^2$$

b) Slankheid:

$$\rho_4 = \frac{\rho_2}{1 + \left[\frac{\rho_2 \cdot h}{L} \right]^2} = 0,76 \quad \text{met } \rho_2 = 1$$

dus $h_{ef} = 0,76 \cdot h = 2,13 \text{ m}$

$$S = \frac{2,13}{0,14} = 15,2 < 27$$

c) Excentriciteit:

$e_a = \text{toevallige excentriciteit} = h_{ef} / 450 = 5 \text{ mm}$

$e = e_a + e_{wind} + e_{vl} = 30 \text{ mm} = e_i = e_{mk}$

d) Controle van de muur:

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} = 0,58$$

$\Phi_m = 0,39$ voor $\frac{e_{mk}}{t} = 0,21$

De sterkte van de muur in de uiterste grenstoestand N_{Rd} wordt dan:

$$N_{Rd} = \frac{\Phi_m \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m} = 126,9 \text{ kN/m}$$

Voorbeeld 3

We zullen voorbeeld 1 en 2 vergelijken met een gelijk-aardige muur in betonblokken. De muur is als volgt samengesteld: 140 mm dikke betonblokken + isolatiemateriaal 60 mm + spouw + gevelsteen.

Gegevens: $L = 5,00$ m, $h = 2,80$ m

$f_{bk} = 8$ N/mm², mortel van klasse M8, groep 3

Blokafmetingen: $H = 190$, $L = 290$ mm

Excentriciteit te wijten aan de winddruk: 5 mm

Excentriciteit van de belasting (vloerplaat): 20 mm

Veiligheidscoëfficiënt op het metselwerk:

$\gamma_m = 2,2$

De muur is vierzijdig gesteund

Berekening:

a) $f_{bk} = 8$ N/mm²

$$f_{bm\ eq} = 1,2 \cdot f_{bk} = 9,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_b = \delta \cdot f_{bm\ eq} = 1,25 \cdot f_{bm\ eq} = 12 \text{ N/mm}^2$$

$$f_k = 0,40 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} = 3,38 \text{ N/mm}^2$$

b) Slankheid:

$$\rho_4 = 0,76$$

$$\text{dus } h_{ef} = 0,76 \cdot h = 2,13 \text{ m}$$

$$S = \frac{2,13}{0,14} = 15,2 < 27$$

c) Excentriciteit:

$$e_a = \text{toevallige excentriciteit} = h_{ef} / 450 = 5 \text{ mm}$$

$$e = e_a + e_{wind} + e_{vl} = 30 \text{ mm} = e_i = e_{mk}$$

d) Controle van de muur:

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} = 0,58$$

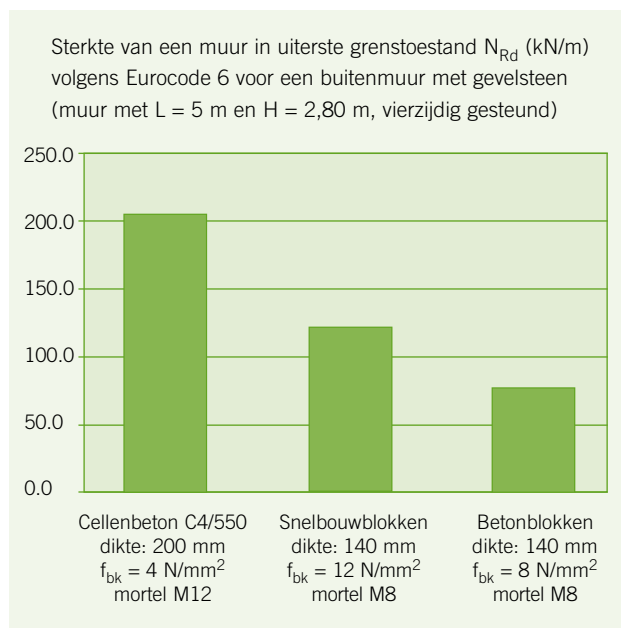
$$\Phi_m = 0,39 \quad \text{voor} \quad \frac{e_{mk}}{t} = 0,21$$

De sterkte van de muur in uiterste grenstoestand N_{Rd} wordt dan:

$$N_{Rd} = \frac{\Phi_m \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m} = 84,4 \text{ kN/m}$$



De resultaten van de drie voorbeelden worden hieronder grafisch voorgesteld. De drie voorbeelden gelden voor een welbepaald type blok, overeenstemmend met de meest gebruikte soort. De meeste bouwblokken hebben afwijkende kenmerken in termen van afmetingen en druksterkte.



Uit de resultaten blijkt duidelijk dat cellenbetonmuren sterker zijn dan andere traditionele bouwsystemen met een grotere druksterkte f_{bk} . De grotere druksterkte van de cellenbetonmuur is te danken aan de combinatie van drie factoren:

- Cellenbetonmuren worden geplaatst met lijm-mortel.
- Cellenbetonblokken zijn vol, in tegenstelling tot andere traditionele bouwsystemen die een variërend holtepercentage hebben.
- Bij cellenbeton wordt zonder isolatiemateriaal gewerkt, met iets dikkere muren (200 mm in plaats van 140 mm of 300 mm in plaats van 190 mm). Hierdoor kan de muur een grotere belasting opnemen.

De druksterkte van cellenbetonblokken is voldoende groot om de belasting van meerdere verdiepingen op te nemen. Deze cellenbetonblokken kunnen dan ook probleemloos worden ingezet als dragende blokken voor appartements- of kantoorgebouwen met meerdere verdiepingen.

Voorbeeld 4:

Appartementsgebouw met 6 bouwlagen
(begane grond + 5)

Zie schema

Gegevens: Buitenmuren uit cellenbeton van 300 mm dik + buitenpleister.
Dragende binnenmuren uit cellenbetonblokken van 200 mm dik.
Niet-dragende binnenmuren uit cellenbetonblokken van 100 mm dik.
Vloerplaat van gewapend beton (L = 5,5 m)
Hellend dak (houten spanten)

Berekeningen

a) Rekenwaarden van de belastingen:

- Vloerplaat + chape + afwerking:
 $4,5 \text{ KN/m}^2 \cdot 1,35 = 6 \text{ kN/m}^2$
- Veranderlijke belasting op vloerplaat:
 $2,5 \text{ KN/m}^2 \cdot 1,5 = 3,75 \text{ kN/m}^2$
- Totale rekenwaarde van de belasting (vloerplaat):
 $6 + 3,75 = 9,75 \text{ kN/m}^2$
- Dak: $1,5 \cdot 1,35 + 1,0 \cdot 1,5 = 3,52 \text{ kN/m}^2$

b) Sterkte van de muren N_{Rd} (uiterste grenstoestand):

- 300 mm dikke muur met densiteit C3/450 ($f_k = 2,68 \text{ N/mm}^2$)
We krijgen voor L = 10 m, h = 2,60 m, vierzijdig gesteunde muur, excentriciteit van de belastingen van 20 mm, $\gamma_m = 2,2$:
 $N_{Rd} = 289,6 \text{ kN/m}$
- 200 mm dikke muur met densiteit C4/550 ($f_k = 3,67 \text{ N/mm}^2$)
We krijgen voor L = 4 m; h = 2,60 m ; vierzijdig gesteunde muur; excentriciteit = 0,05.t ; $\gamma_m = 2,2$:
 $N_{Rd} = 283,7 \text{ kN/m}$
- Voor dezelfde muur (200 mm) met densiteit C5/650 ($f_k = 4,43 \text{ N/mm}^2$), krijgen we:
 $N_{Rd} = 342,5 \text{ kN/m}$

c) Lastendaling:

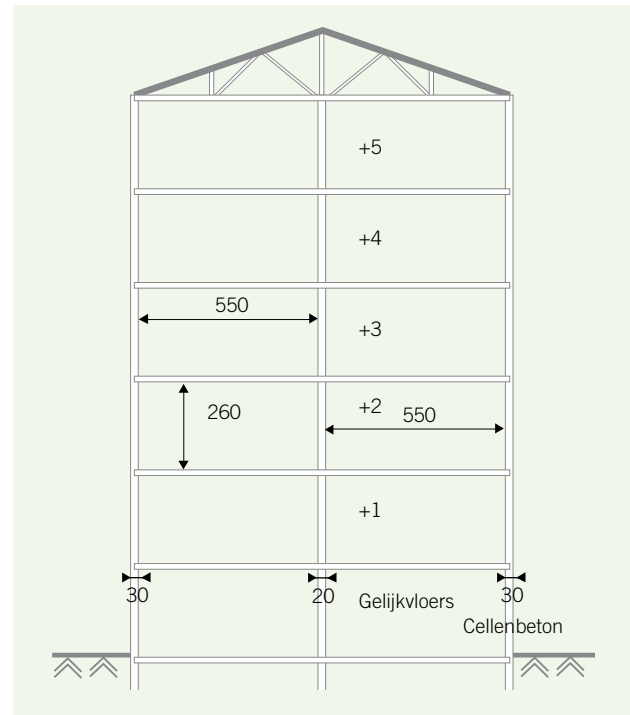
- centrale muur (200 mm dik):

Op het gelijkvloers, rekenwaarde optredende belasting N_{Sd}

$$N_{Sd} = 9,75 \cdot 5,5 \cdot 5 + 5,5 \cdot 3,52$$

$$+ 0,20 \cdot 6,35 \cdot 6 \cdot 2,6 \cdot 1,35$$

$$N_{Sd} = 314,2 \text{ kN/m} < N_{Rd} = 342,5 \text{ kN/m}$$



We zullen bijgevolg densiteit C5/650 gebruiken voor het gelijkvloers.

Voor de andere verdiepingen (1, 2, 3, 4, 5), nemen we densiteit C4/550.

- buitenmuur (300 mm dik):

Op het gelijkvloers, rekenwaarde optredende belasting N_{Sd}

$$N_{Sd} = 11,25 \cdot 5,5/2 \cdot 5 + 5,5/2 \cdot 3,52$$

$$+ 0,30 \cdot 3,35 \cdot 6 \cdot 2,6 \cdot 1,35$$

$$N_{Sd} = 185,5 \text{ kN/m} < N_{Rd} = 289,6 \text{ kN/m}$$

We zullen bijgevolg densiteit C3/450 gebruiken voor alle verdiepingen. Deze dichtheid is ruimschoots voldoende voor het draagvermogen en biedt een uitstekende warmte-isolatie ($U = 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$).

d) Conclusie:

Cellenbetonblokken zijn bijgevolg uitstekend geschikt om alle dragende en niet-dragende muren van dit appartementsgebouw met 6 verdiepingen te bouwen. Gelet op de plaatsingssnelheid van de blokken, gecombineerd met de uitstekende geluids- en warmte-isolerende eigenschappen, vormen cellenbetonblokken een economische en hoog kwalitatieve oplossing.