Notat

Statens Byggeforskningsinstitut
DANISH BUILDING RESEARCH INSTITUTE

Lodret belastet muret væg efter EC6

Afdelingen for Byggeteknik og Design
kfh

20. november 2006
Journal nr. 722-066

EC6 er den europæiske murværksnorm også benævnt
DS/EN 1996-1-1:2006

Programmodulet "Lodret belastet muret væg efter EC6" kan beregne en bærende væg som enten kan være en enkelt væg eller en af murene i en hul mur. Væggen skal mindst være fastholdt i vandret retning langs en vandret linie i toppen og i bunden. Væggen kan være afstivet langs den ene eller langs begge dens lodrette kanter. Væggen må kun indeholde små åbninger. En lille åbning er en åbning med en højde mindre end ¼ af væggens højde og en længde mindre end ¼ af væggens længde. Hvis en væg indeholder 2 eller flere små åbninger må deres samlede areal højst være 1/10 af væggens areal. Hvis disse betingelser ikke er opfyldt skal der tages hensyn til åbningerne fx ved at opdele væggen i flere vægge langs kanten af en eller flere åbninger. Væggene regnes ikke-afstivet langs disse kanter.
Ved bestemmelsen af bæreevnen af en lodret belastet muret væg med samtidig vandret last forudsættes at murværket ikke har trækstyrke. Dette betyder at for små lodrette laster fås næsten ingen bæreevne.
Hvis væggen ikke har tilstrækkelig bæreevne med ovenstående forudsætninger foretager programmet også en beregning af væggen, hvor væggens styrke ved bøjning om liggefugerne tages i regning. Denne beregning baseres på en elastisk model af væggen hvor søjlevirkning tages i regning som angivet i (M., P. Nielsen og L. Pilegaard Hansen. Mekanik 3.2 1973)
I appendiks er angivet hvorledes dette håndteres.

Slankhed og excentricitet

I EC6 tages der hensyn til lastexcentriciteter og søjlevirkning i en væg ved hjælp af en såkaldt kapacitetsreduktionsfaktor Φ idet væggens regningsmæssige bæreevne pr. længdeenhed for lodret last bestemmes som

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_d \tag{6.2}$$

Her er t væggens tykkelse og f_d er murværkets regningsmæssige trykstyrke. (indeks $_R$ står for resistance som på dansk er bæreevne og indeks $_d$ står for design value som på dansk er regningsmæssig værdi. Formelnummeret (6.2) er det som er anvendt i EC6).

Korrektion for lille tværsnit

Hvis væggens tværsnitsareal A er mindre end 0,1 m^2 skal den regningsmæssige trykstyrke f_d multipliceres med faktoren

$$0{,}7+3A \tag{6.3}$$

hvor A angives i m^2.

Tværsnitsundersøgelse i top, bund og midt

Væggens bæreevne skal undersøges i toppen, i bunden og i midthøjden. I top og bund afhænger Φ kun af excentriciteten, mens der i midtersnittet tages højde for søjlevirkning ved at Φ her, udover excentriciteten, også afhænger af væggens effektive højde h_{ef} og væggens effektive tykkelse t_{ef}. Den effektive højde er afledt af væggens geometriske højde h, som er afstanden fra underside af dækket over væggen til oversiden af dækket under væggen, ved at h ganges med en faktor ρ som afhænger af væggens fastholdelsesforhold i top og bund og hvordan den eventuelt er afstivet langs dens lodrette kanter. Der skelnes mellem 3 tilfælde

1. Væggen har ingen lodrette afstivninger. Her er $h_{ef} = \rho_2\ h$
2. Væggen har 1 lodret afstivning. Her er $h_{ef} = \rho_3\ h$
3. Væggen har 2 lodrette afstivninger. Her er $h_{ef} = \rho_4\ h$

Ad 1. En vægs understøtnings forhold i top og bund karakteriseres ved en faktor ρ_2 som i EC6 enten tillægges værdien 0.75 eller 1. Da der i dette program tages hensyn til understøtningsforholdene ved fastlæggelsen af væggens excentriciteteintervaller, sættes værdien af ρ_2 altid lig 1.

Ad 2. For vægge med 1 lodret afstivning haves

$$\rho_3 = \frac{1}{1+\left(\frac{\rho_2 h}{3l}\right)^2}\ \rho_2 \tag{5.6}$$

når $h \leq 3{,}5\ l$ hvor l er væggens længde.
For $h > 3{,}5\ l$ haves

$$\rho_3 = \frac{1{,}5l}{h} \geq 0{,}3 \qquad (5.7)$$

Ad 3. For vægge med 2 lodrette afstivninger haves

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{l}\right)^2} \rho_2 \qquad (5.8)$$

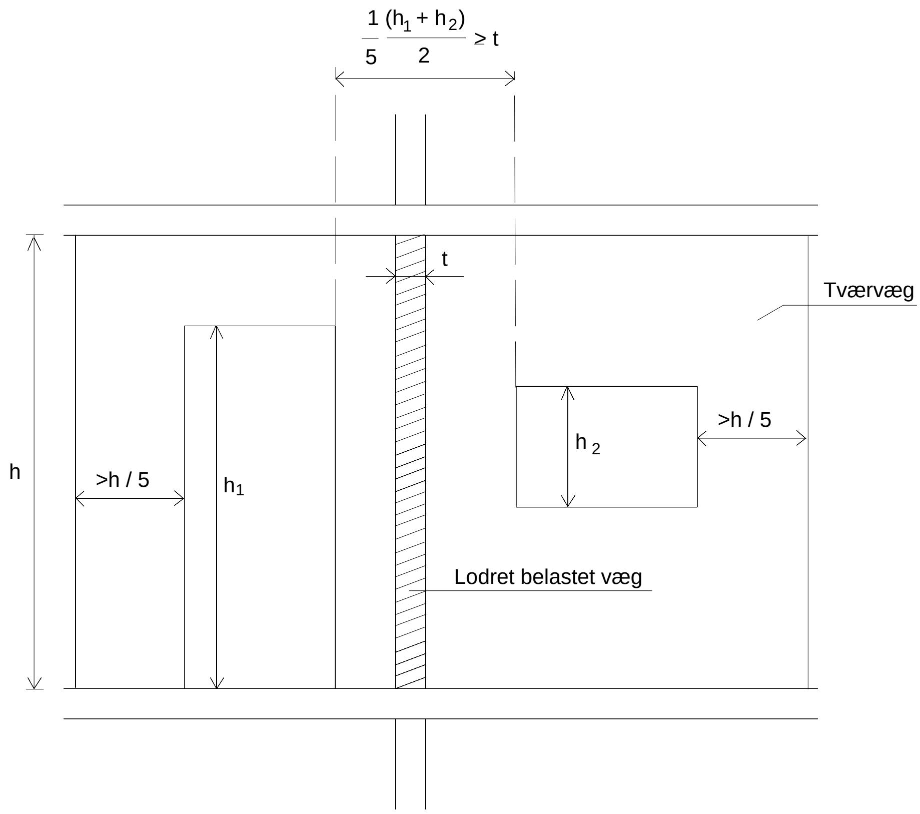
når $h \leq 1{,}15\ l$
For $h > 1{,}15\ l$ haves

$$\rho_4 = \frac{0{,}5l}{h} \qquad (5.9)$$

Hvornår kan tværvægge regnes afstivende?
En væg kan regnes afstivet af en tværvæg langs en lodret kant hvis væggene er muret i forbandt eller samlingen er sikret af stående fortanding og bindere og tværvæggens længde er mindst 1/5 af væghøjden *h* og tværvæggens tykkelse er mindst 0,3 gange den effektive tykkelse t_{ef} af den afstivede væg. Vedrørende bestemmelse af t_{ef} se næste afsnit.
Hvis tværvæggen indeholder huller på hver side af væggen skal den vandrette afstand mellem hullerne være større end

$$\frac{1}{5}\frac{(h_1 + h_2)}{2} \qquad \text{(formel fra figur 5.1)}$$

og tværvæggen skal fortsætte en strækning på mindst 1/5 af væghøjden *h* forbi hver åbning der er mindre end h som vist på figur 5.1 hvor h_1 og h_2 er højden af hullerne.



Figur 5.1. Minimum længde af tværvæg med åbninger.

En væg, afstivet af 2 tværvægge, med væglængde *l ≥ 30 t*, eller en væg, afstivet af 1 tværvæg, med væglængde *l ≥ 15 t* skal behandles som en væg kun fastholdt i top og bund. *(disse begrænsninger forekommer urimelige og der ses i programmet bort fra dem)*

Bestemmelse af væggens effektive tykkelse

Den effektive tykkelse er væggens tykkelse når det er en enkelt væg, dog fraregnet tilbageliggende fuger større end 3 mm.

Hvis væggen er en af murene i en hul mur fås den effektive tykkelse af:

$$t_{ef} = \sqrt[3]{\frac{E_1}{E} t_1^{\,3} + t^3} \qquad (5.11)^*$$

*) Denne formel er korrigeret i forhold til EC6.

hvor

- E er kort tids sekant elasticitetsmodulet af den betragtede væg.
- E_1 er kort tids sekant elasticitetsmodulet for formuren. (må dog højst sættes til $2{,}0 \cdot E$.
- t er tykkelsen af den betragtede væg og
- t_1 er tykkelsen af formuren.

Det er her forudsat, at de to vægge er tilstrækkeligt forbundet med bindere.

Kapacitetsreduktionsfaktor Φ

I snit i top og bund benyttes følgende udtryk for Φ

$$\Phi = 1 - 2\frac{e_r}{t} \qquad (6.4)$$

Her er e_r den resulterende excentricitet i top eller bund.

I midtersnittet benyttes følgende udtryk for Φ_m

$$\Phi_m = A_1 \cdot e^{-\frac{u^2}{2}} \qquad (G.1)$$

hvor:

$$A_1 = 1 - 2\frac{e_{mr}}{t} \qquad (G.2)$$

$$u = \frac{\lambda - 0{,}063}{0{,}73 - 1{,}17\frac{e_{mr}}{t}} \qquad (G.3)$$

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}}\sqrt{\frac{f_k}{E_k}} \qquad (G.4)$$

Her er f_k den karakteristiske trykstyrke af murværk og E_k den karakteristiske værdi for kort tids sekant elasticitetsmodulet. Den resulterende excentricitet e_{mr} i midten af væggen er:

$e_{mr} = \mathrm{abs}(e_m) + e_{mk} + e_i$, hvor

- $e_m = e_{mv} + e_{mh}$ er den lastafhængige excentricitet
- abs(e_m) er den numeriske værdi af e_m
- e_{mv} er excentriciteten af den lodrette last
- e_{mh} er excentriciteten hidrørende fra vandret last (tværlast / vind)
- e_{mk} er excentriciteten hidrørende fra krybning
- $e_i = h_{ef}$ / 450 er initialexcentriciteten hidrørende fra imperfektion ved væggens opførelse

$$e_{mk} = 0{,}002\phi_{\infty}\frac{h_{ef}}{t_{ef}}\sqrt{te_m} \qquad (6.8)$$

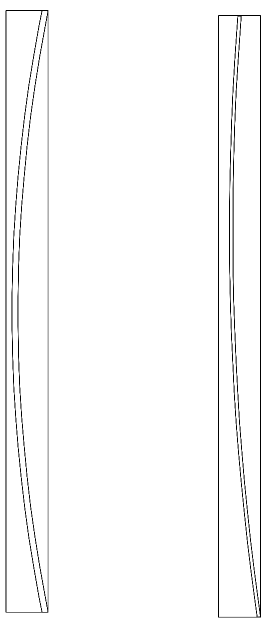
ϕ_{∞} er krybningskoefficienten som sættes til 1. Hvis slankhedsforholdet $\lambda = h_{ef}/t_{ef}$ er mindre end 15 er $e_{mk}=0$.

Strategi for håndtering af excentriciteter.

For at kunne bestemme værdien af kapacitetsreduktionsfaktoren Φ i de 3 snit som EC6 kræver undersøgt er det nødvendigt at bestemme den lodrette lasts excentricitet og excentricitetsbidraget fra den vandrette tværlast i de 3 snit.

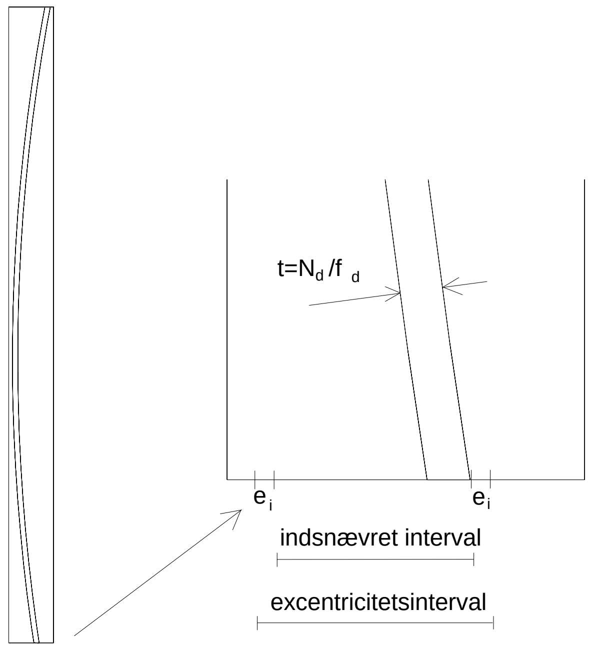
EC6 giver i anneks C en metode til bestemmelse af den lodrette lasts excentricitet i toppen og bunden af en væg baseret på en elastisk model af den betragtede væg og de tilstødende vægge og dæk. Denne fremgangsmåde er meget følsom overfor de stivhedsantagelser der benyttes og i mange tilfælde er resultatet uforeneligt med, at det er forudsat, at der ikke kan regnes med trækspændinger i væggen. Som følge heraf er der i annekset også angivet en metode til bestemmelse af excentriciteterne baseret på en antagelse om at spændingerne i væggen kan omlejres som følge af revnedannelse således, at der ikke optræder trækspændinger. Hvorledes disse metoder kan gøres operationelle fremgår ikke klart.

I programmet er valgt en anden fremgangsmåde der kort fortalt går ud på at undersøge om der i væggen er plads til en trykbue svarende til den normalkraft og den vandrette last som væggen påvirkes af. I væggens top og bund skal trykbuen ende således, at kraften kan overføres til de tilstødende konstruktioner. Når trykbuens ender er fastlagt, er trykbuens placering i midtersnittet bestemt og kapacitetsreduktionsfaktoren Φ_m og dermed bæreevnen svarende til dette snit kan bestemmes. På figur 1 er problemstillingen illustreret.



Figur 1. Placering af trykbue i væg.

I tilfælde 1 er trykbuen i top og bund placeret således at kraften skal kunne optages ved væggens øvre og nedre højre kant. I tilfælde 2 er trykbuen placeret således at kraften skal kunne optages i væggens nedre højre kant, mens trykbuen i toppen ender midt i snittet svarende til at kraften i toppen skal overføres til en smal toprem placeret midt på væggen.
Rent inddatamæssigt betyder det, at i stedet for at angive excentriciteten af den lodrette last i væggens top og bund, som man alligevel ikke kan bestemme med nogen grad af sikkerhed, skal man angive et interval i væggens top og bund inden for hvilket trykbuens ender skal befinde sig således at kraften kan optages af de tilstødende konstruktionsdele. Disse intervaller kaldes excentricitetsintervaller.
Når det undersøges om der er plads til en trykbue tages der hensyn til en tillægsexcentricitet e_i som tager højde for konstruktionsimperfektioner ved at indsnævre de angivne excentricitetsintervaller med størrelsen e_i i begge ender. Når retning og størrelse af tværlasten er kendt kan man umiddelbart bestemme placeringen af trykbuen som vist på figur 2.



Figur 2. Placering af trykbue med hensyntagen til imperfektion e_i.

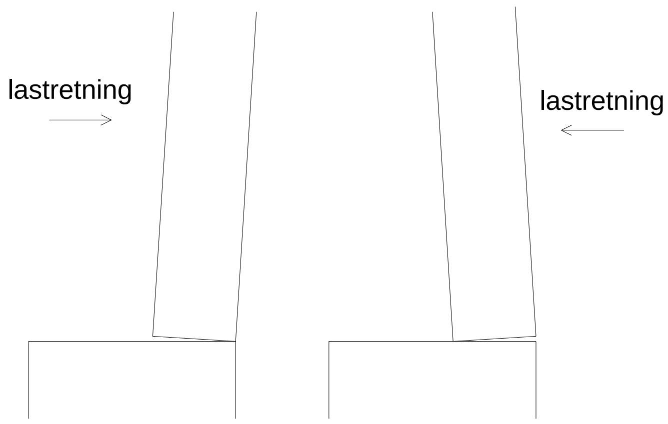
I midtersnittet er excentriciteten fra lasterne på væggen lig afstanden fra trykbuens midte til væggens midte. Den resulterende excentricitet i midtersnittet fås som summen af denne excentricitet og bidraget $e_i = h_{ef} / 450$ fra imperfektioner og et eventuelt bidrag e_k fra krybningen udregnet efter formel (6.8). Med denne resulterende excentricitet kan reduktionskapacitetsfaktoren Φ_m i væggens midte findes og det kan afgøres om væggen kan overføre de givne laster.

Bestemmelse af excentricitetsintervaller

Et excentricitetsinterval knyttet til toppen eller bunden af en væg angiver det område inden for hvilket den resulterende snitkraft i væggen skal befinde sig som vist på figur 2.

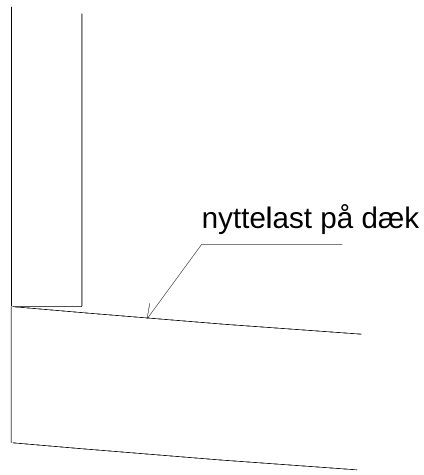
De excentricitetsintervaller der skal angives afhænger af væggens understøtningsforhold.

Betragtes en væg understøttet af et stift fundament vil væggen tendere mod at være understøttet enten på sit højre hjørne eller på sit venstre hjørne afhængig af retningen af tværlasten som vist på figur 3.



Figur 3. Væg på stift fundament.

Uanset tværlastens retning vil reaktionen fra fundamentet flytte sig så dens excentricitet virker til gunst for væggen. Excentricitetsintervallet kan i dette tilfælde sættes maksimalt til hele væggens tykkelse. Lignende betragtninger kan foretages hvis væggen hviler på et betondæk eller belastes via et betondæk som må forventes at være flere gange stivere end væggen.
Hvis væggen er understøttet af et forholdsvist slapt dæk vil væggen tendere mod at være understøttet som vist på figur 4 som følge af nyttelasten på dækket.



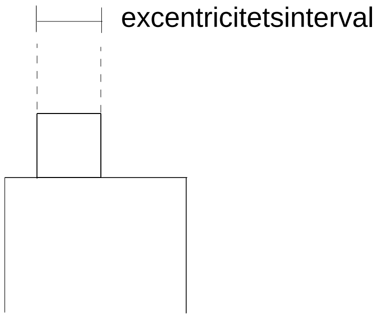
Figur 4. Væg understøttet af dæk påvirket af nyttelast.

Om en tværlast virkende fra venstre kan flytte væggens understøtning fra væggens venstre kant til den højre afhænger dels af forholdet mellem stivheden af dækket og stivheden af væggen over for vinkeldrejninger af samlingen mellem væg og dæk, dels af forholdet mellem den lodrette last på dækket og den vandrette last på væggen. Om denne flytning er mulig i fuldt omfang afhænger også af hvor store vinkeldrejninger et brud i væggen er forbundet med.

Hvis dækket er et træbjælkelag tages der højde for denne usikkerhed ved at regne med et excentricitetsinterval lig den halve vægtykkelse. En nærmere behandling af dette emne findes i:

http://www.murtag.dk/muc/laerebog/filer/laerebog_del_1_Afsnit%201-3.pdf side 57.

Hvis en væg er belastet via en toprem bliver excentricitetsintervallet som vist på figur 5.

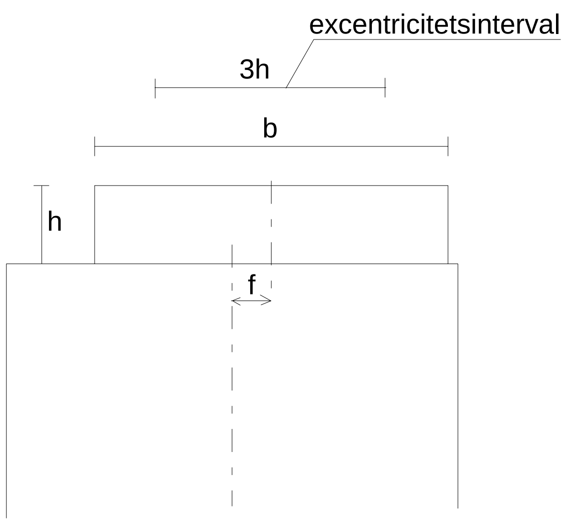


Figur 5. Excentricitetsinterval for væg belastet via en toprem.

Hvis topremmen ikke har et tværsnit som vist på figur 5 men nærmere er et bræt findes excentricitetsintervallet som

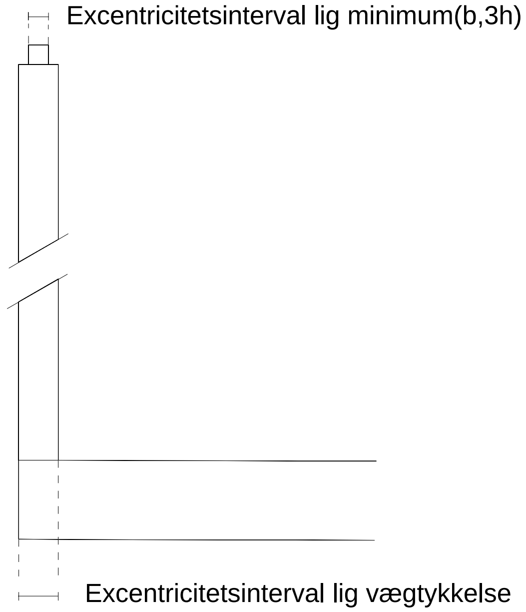
Intervalbredde=minimum(b,3h)

Her er *b* er remmens bredde og *h* dens højde. Se figur 6.

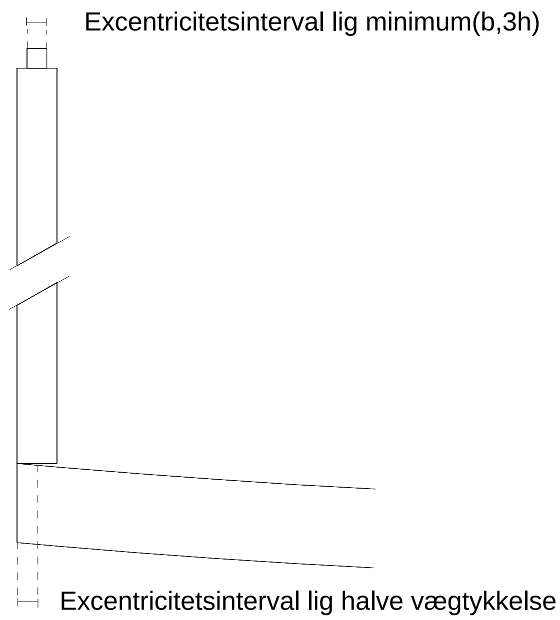


Figur 6. Angivelse af excentricitetsinterval ved brætformet toprem. *f* er afstanden mellem væggens midterlinie og topremmens.

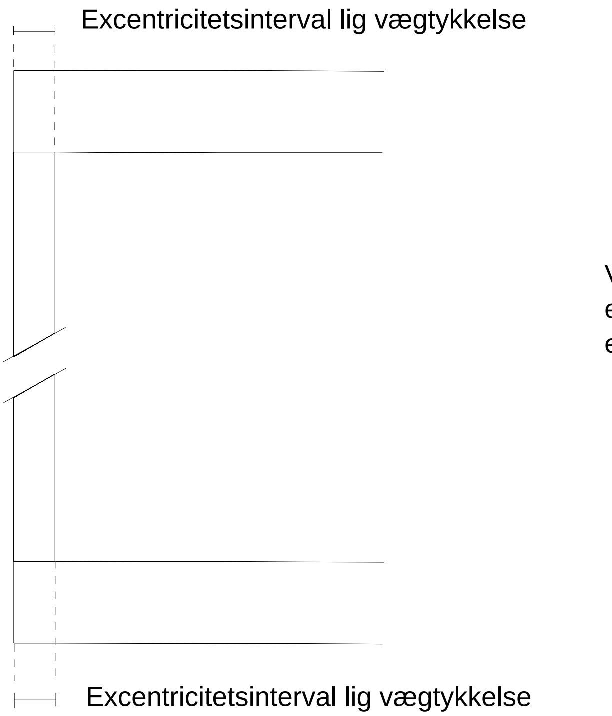
I det følgende er der givet eksempler på hvordan disse tilfælde kan kombineres.



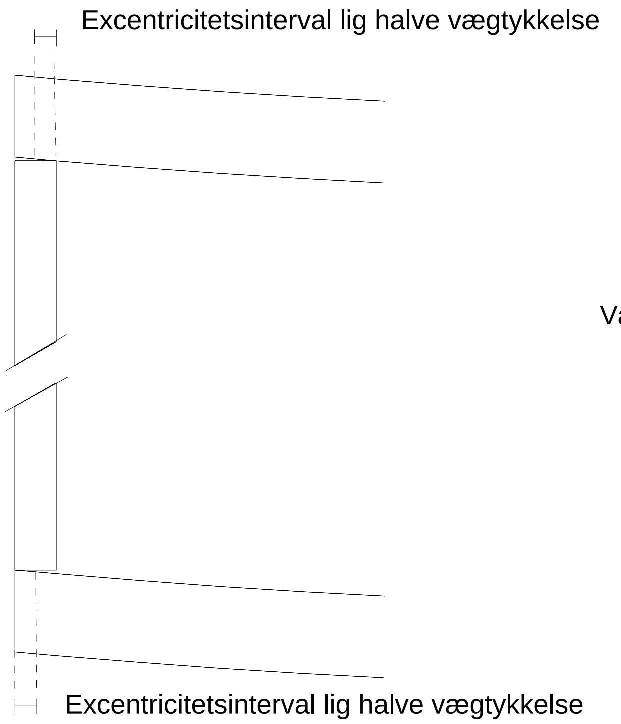
Væg belastet via en toprem og understøttet på et stift dæk eller et fundament



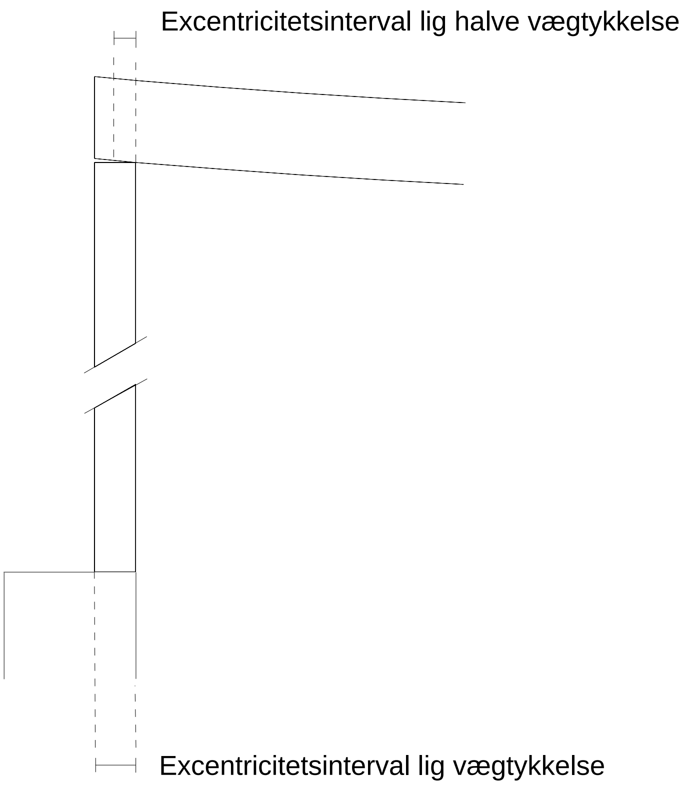
Væg belastet via en toprem og understøttet på et slapt dæk



Væg mellem to stive dæk eller mellem et stift dæk og et stift fundament



Væg mellem to slappe dæk



Væg mellem et slapt dæk og et stift fundament

Overgangskurve (lineærelastisk bjælkesøjle)

For en tværbelastet simpelt understøttet bjælkesøjle bliver det maksimale moment M_{max} midt i bjælken

$$M_{\max} = M_0 (1 + \frac{\pi^2}{\alpha} \frac{N}{N_{cr} - N}) \qquad (1)$$

her er

- M_0 er momentet fra tværlasten plus et bidrag fra excentrisk normalkraft
- N er søjlekraften
- N_{cr} er Eulerkraften bestemt ved $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$
- E er elasticitetskoefficienten
- I er bjælkens inertimoment
- l er søjlelængden
- α er en parameter svarende til krumningskurvens form.

For konstant krumning fås $\alpha=8$, for krumningen svarende til en sinuskurve fås $\alpha=\pi^2$ og for krumningen svarende til en parabel fås $\alpha=9,6$. Se M. P. Nielsen og L. Pilegaard Hansen, Mekanik 3.2, 1973.

Ved bestemmelsen af overgangskurven forudsættes det at væggen kan beregnes som en simpelt understøttet bjælkesøjle hvor det maksimale moment M_0 i midten af væggen bestemmes ved at regne med en excentricitet i væggens top svarende til midtpunktet af excentricitetsintervallet i væggens top og en excentricitet i væggens bund på t/6 virkende til gunst for væggen. Der tages hensyn til initialexcentriciteten e_i ved at forøge excentriciteter som virker til ugunst for væggen med e_i og på samme måde formindske excentriciteter der virker til gunst.

Der regnes med

$$\frac{\pi^2}{\alpha} = 1$$

Eulerkraften beregnes på basis af effektiv tykkelse (EC6, 5.5.1.3) og fuld højde samt regningsmæssigt E-modul. Det betyder at en eventuel formur giver et positivt bidrag til væggens stivhed og dermed til Eulerkraften. Det er valgt at regne med fuld højde og ikke med effektiv højde efter EC6, 5.5.1.2.

Efter Navier's formel bliver kantspændingerne

$$\sigma_{td} = \frac{M_{\max}}{Z} - \frac{N}{A} \quad \text{og} \quad \sigma_{cd} = \frac{M_{\max}}{Z} + \frac{N}{A}.$$

Her er

σ_{td} = den regningsmæssige trækspænding (pos som træk),

σ_{cd} = den regningsmæssige trykspænding (pos som tryk),

M_{max} og N er snitkræfterne pr. længdeenhed af væggen (N er pos som tryk),

Z = modstandsmomentet pr. længdeenhed af væggen = $\frac{t^2}{6}$, og

A = tværsnitsarealet pr. længdeenhed af væggen = t.

Hvis kantspændingerne er mindre end de tilsvarende regningsmæssige styrker, siges væggen at være OK efter en Navier-beregning. Hvis væggens bæreevne er tilstrækkelig efter metoden beskrevet i EC 6, formel (6.1) og (6.2), siges væggen at være OK efter en EC6-beregning.

Væggens bæreevne regnes tilstrækkelig hvis den er OK *enten* efter en Navier-beregning *eller* efter en EC6-beregning.