



HÆFTE #9

BRAND- MODSTANDSEVNE

For væg- og dækelementer i letbeton

FORORD

Letbetonelementgruppen under Betonelement-Foreningen, DI Byggeri har igennem en række år deltaget i et udviklingsarbejde sammen med afdelingen BYG-DTU på Danmarks Tekniske Universitet med det formål at opstille en beregningsmetode til bestemmelse af brandmodstandsevnen for vægge og dæk af letklinkerbeton.

Arbejdet er en del i et større udviklingsarbejde for letklinkerbeton, som også har omfattet letklinkerblokke.

Det opstillede beregningsgrundlag er blevet verificeret ved udførelse af fuldskalaforsøg på Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut.

Nærværende publikation angiver direkte brandmodstandsevnen for de mest almindelige væg- og dæktyper.

For andre væg- og dæktyper henvises der til et beregningsprogram, som kan hentes over internettet på letbetonelementgruppens hjemmeside www.di.dk.

ANVISNINGENS ANVENDELSE

De forskellige anvisninger i hæftet er primært udarbejdet som vejledende information til arkitekter og ingeniører i forbindelse med projektering af byggeri, hvor der anvendes dækelementer og helvægge af letklinkerbeton, og hvor der stilles brandkrav.

Ansvar for den korrekte projektering ligger hos den projekterende. Letbetonelementgruppen under Betonelement-Foreningen, DI Byggeri og medlemsvirksomhederne påtager sig således ikke noget juridisk ansvar i forbindelse med denne anvisnings information.

Vejledningen er udarbejdet af:

INGHOLT CONSULT
RÅDGIVENDE INGENIØRFIRMA ApS

Beregningsmetode og programmer er udviklet af

KRISTIAN D. HERTZ
Professor Emeritus, civ. ing., Lic. Techn.
DTU Construct

Brandforsøgene er udført på:

Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut,
Hvidovre

UDGIVER

Hæfte 9 er udgivet af Letbetonelementgruppen under Betonelement-Foreningen, DI Byggeri.

03-2023

BAGGRUND

INDLEDNING

Formålet med udviklingsprojektet har været at finde beregningsmetoder, hvorefter man vil kunne foretage en eftervisning af brandmodstandsevnen for vægge og dæk af letklinkerbeton.

Beregningsmetoderne udledes, udbygges og dokumenteres i lærebogen [1] både for elementer af normal beton og letbeton påvirket af både standardbrand og fuldt udviklede brandforløb. Metoderne er i overensstemmelse med DS/EN 1992, som bygger på den samme forskning og som prof. Hertz har deltaget i at udarbejde.

Materialeparametrene er tilpasset egenskaberne for letbeton.

For at verificere beregningsformlerne er der udført forsøg dels med små prøveemner til bestemmelse af temperaturgradienten og dels fuldskalaforsøg med hele vægge og dæk.

Brandforsøgene er udført på Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut. Brandforsøgene viste, at de udviklede beregningsformler var i god overensstemmelse med forsøgsresultaterne.

Ved udvikling af beregningsmetoderne er anvendt middelværdier for materialeegenskaberne for at kunne sammenligne direkte med resultaterne fra fuldskalaforsøgene. Ved dimensionering mod brand skal anvendes karakteristiske materialeværdier.

For nærmere dokumentation henvises til:

- [1] K. D. Hertz: Design of Fire-resistant Concrete Structures. ICE Publishing. 2019. 241p.
- [2] K. D. Hertz: Documentation for calculations of Standard Fire Resistance of Slabs and Walls of Concrete with expanded clay aggregates. Report R-048 DTU BYG, december 2002.

PRODUKTPROGRAM

Medlemmerne i Letbetonelementgruppen under Betonelement-Foreningen, DI Byggeri har et stort produktprogram af bærende og ikke bærende vægge og dæk af letklinkerbeton og kan levere vægge og dæk til alle typer byggeri.

Elementerne udføres i h.t. Norm for letbetonkonstruktioner af letbetonelementer, DS/EN 1520.

VÆGGE

For vægge omfatter produktprogrammet følgende:

Vægtykkelser: 100 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm, 200 mm, 220 mm og 240 mm.

Densiteter: 1350 kg/m³ - 2000 kg/m³.

Styrker: 6 MPa, 10 MPa, 15 MPa.

Brandforhold:

Væggene vil normalt kunne opfylde kravene til REI 60 og vil også kunne dimensioneres til at opfylde REI 120.

DÆK

For dæk omfatter produktprogrammet følgende:

Massive dæk:

Dæktykkelse: 140 mm - 280 mm

Dækbredder: 600 mm og 1200 mm

Dæklængder: Op til 7,20 m

Dækkene udføres i letklinkerbeton med densitet på ca. 1800 og 2000 kg/m³.

Dæk vil normalt kunne opfylde kravene til REI 60.

BEREGNINGSMETODE FOR VÆGGE

Temperaturen (T) i væggen til tiden t (min) i dybden x (m) fra en side påvirket af standardbrand kan bestemmes for den pågældende letklinkerbeton med det gratis program ConFire eller med det tilnærmede udtryk:

$$T(x,t) = 312 \cdot \log(8t + 1) \cdot e^{-1,9 \cdot K(t) \cdot x} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot K(t) \cdot x\right)$$

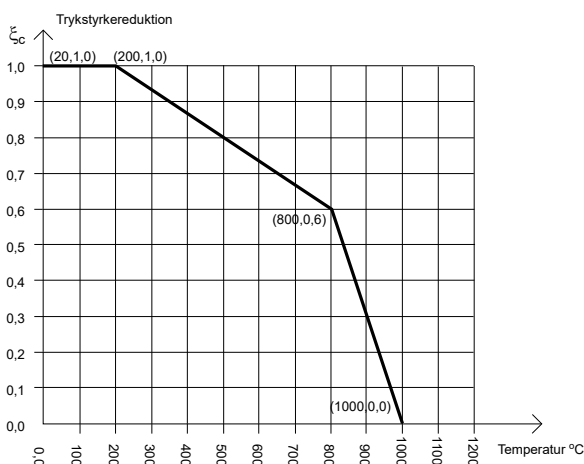
$$\text{hvor } K(t) = \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{750 \cdot \lambda \cdot t}}$$

For densiteten ρ (kg/m³) og varmeledningsevnen λ (W/m°C) indsættes de aktuelle værdier for letklinkerbetonen.

Den specifikke varmekapacitet c_p (kJ/kg°C) sættes som for beton.

Letklinkerbetonens trykstyrke og bøjningstrækstyrke reduceres som for beton med en temperaturafhængig reduktionsfaktor på ξ_c . Letklinkerbetonens elasticitetskoefficient reduceres med faktoren $(\xi_c)^2$.

Reduktionsfaktoren, der afviger lidt fra betons, er tilnærmet angivet i diagrammet nedenfor. Mere nøjagtige værdier og en formel findes i [1] eller gives for temperaturen ovenfor af programmet ConFire.



Reduktionsfaktor for trykstyrke

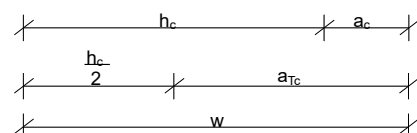
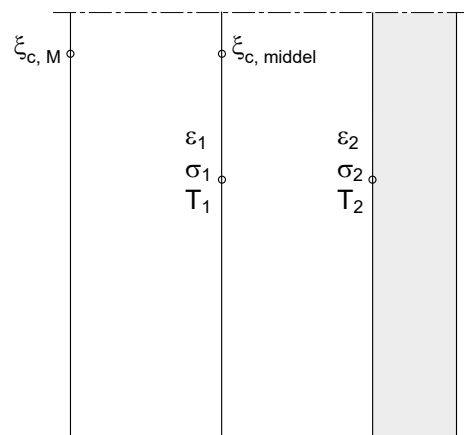
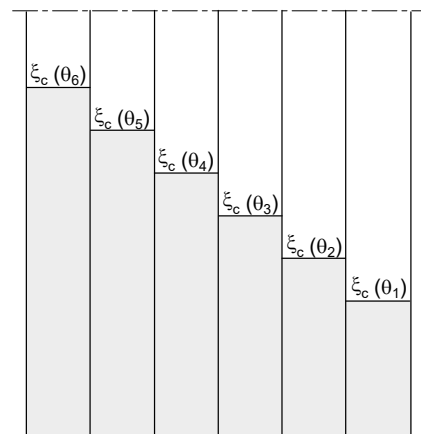
Hensyntagen til reduktionen i tværsnittets styrkeegenskaber under branden udføres ved at arbejde med et reduceret tværsnit med konstante parametre og en skadet randzone, som ikke tages i regning.

$$\xi_{c, \text{middel}} = \frac{1}{w} \cdot \int_0^w \xi_c \cdot (T(x)) dx$$

hvor w er vægtykkelsen.

$\xi_{c, \text{middel}}$ kan f.eks. bestemmes tilnærmet manuelt ved at opdele væggen i n lige tykke lag eller som et produkt af styrkereduktion på bagsiden af væggen ξ_{cM} og en spændingsfordelingsfaktor η ved hjælp af det gratis program ConFire.

$$\xi = \frac{(1-0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n \xi_c(\theta_i)$$



Opdeling af tværsnit

Da udbøjning og stabilitet er afgørende, sættes tykkelsen af den beskadigede randzone til

$$a_c = w \cdot \left(1 - \left(\frac{\xi_{c,middel}}{\xi_{c,M}} \right)^{1,3} \right)$$

Hvor $\xi_{c,M}$ svarer til temperaturen på bagsiden af væggen.

Trykstyrke, bøjningstrækstyrke og elasticitetsmodul sættes til 0 i den beskadigede randzone og i det reducerede tværsnit til:

$$f_{cd}(T) = \xi_{c,M}(T) \cdot f_{cd}(20^\circ)$$

$$f_{ctd}(T) = \xi_{c,M}(T) \cdot f_{ctd}(20^\circ)$$

$$E_{cd}(T) = (\xi_{c,M}(T))^2 \cdot E_{cd}(20^\circ)$$

Materialeparametre indsættes med de regningsmæssige værdier, der svarer til det pågældende lasttilfælde, d.v.s. i lasttilfælde 3.3, brand, skal anvendes karakteristiske værdier.

Bidraget til ekscentriciteten fra den termiske udbøjning bestemmes af følgende:

$$e_{termisk} = \frac{1}{8} \cdot \frac{2 \cdot (\varepsilon_2 \cdot k_2 - \varepsilon_1 \cdot k_1) \cdot a_{Tc}}{h_c^2} \cdot l_s^2$$

$$\varepsilon_1 = \beta \cdot \frac{T_1^2}{1000}$$

$$\varepsilon_2 = \beta \cdot \frac{T_2^2}{1000}$$

$$k_1 = \left(1 - 2,35 \cdot \frac{\sigma_1}{f_{cd}} \right) \text{ dog mindst } 0$$

$$k_2 = \left(1 - 2,35 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{cd}} \right) \text{ dog mindst } 0$$

ε_1 , σ_1 , T_1 : Den termiske tøjning, trykspænding og temperatur i midten af det reducerede tværsnit.

ε_2 , σ_2 , T_2 : Den termiske tøjning, trykspænding og temperatur ved kanten af den beskadigede randzone.

h_c : Tykkelsen af det reducerede tværsnit.

a_{Tc} : Afstanden fra midten af det reducerede tværsnit til vægsiden mod branden.

β : Temperaturudvidelseskoefficienten.

k_1 , k_2 : Faktor, der tager hensyn til den transiente tøjning, d.v.s. den del af den termiske udvidelse, som ikke finder sted p.g.a. trykspændingerne i væggen.

l_s : Søjlelængden

Bidraget til ekscentriciteten fra lasten og understøtningsforholdene bestemmes af følgende:

$$e_{last} = \frac{1}{16} \cdot \frac{(\chi_t + \chi_b)}{l_s^2}$$

Da $e_{termisk}$ er den dominerende udbøjning, er e_{last} bestemt som udbøjningen midt på væggen.

$$\chi_t = \frac{M_{top}}{E_{cd}(T) \cdot I_c}, \text{ krumning i top af væg}$$

$$\chi_b = \frac{M_{bund}}{E_{cd}(T) \cdot I_c}, \text{ krumning i bund af væg}$$

$$M_{top} = P \cdot e_{top}$$

$$M_{bund} = P \cdot e_{bund}$$

e_{top} : Ekscentriciteten på den påførte last

e_{bund} : Afhænger af understøtningsforholdene forveden, se næste side.

P : Den lodrette belastning på væggen inkl. halvdelen af væggens egenlast.

BEREGNINGSMETODE FOR VÆGGE

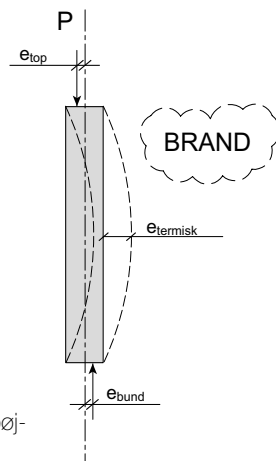
$$I_c = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h_c^3$$

b: Vægbredde

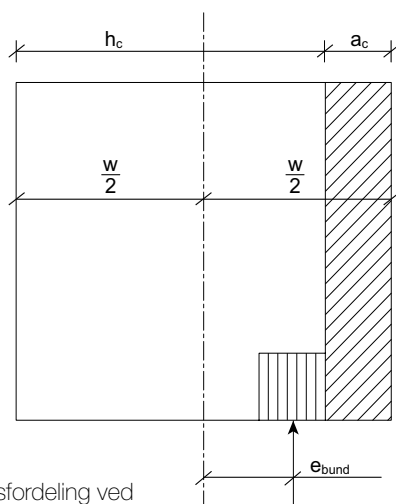
Væggene er regnet simpelt understøttet foroven og understøttet på et plant underlag for neden. Når væggen krummer ind mod branden, vil undersiden vippe, således at lasten står ude på kanten. Efterhånden som kanten knuses, vil reaktionen rykke indad mod midten.

Reaktionen regnes at virke i centerlinjen af trykzonen, der begynder ved kanten af den skadede zone.

$$e_{\text{bund}} = \frac{w}{2} - a_c - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{b \cdot f_{cd}}$$



Ekscentricitet og udbøjning for væg



Reaktionsfordeling ved bund af væg

Da lasten skal henføres til centerlinjen for det reducerede tværsnit, skal endvidere tillægges $\frac{1}{2} \cdot a_c$ til ekscentriciteten.

Herefter fås den samlede ekscentricitet

$$e_{\text{total}} = e_{\text{termisk}} + e_{\text{last}} + \frac{1}{2} a_c$$

Væggens brandmodstandsevne/bæreevne bestemmes herefter ved Navier's spændingsformler og Euler og Rankines søjleformler.

Tværsnittets trykbæreevne:

$$F_U = h_c \cdot b \cdot f_{cd}(T)$$

Tværsnittets søjlebæreevne efter Eulerformlen:

$$F_E = \pi^2 \cdot \frac{E_{cd}(T) \cdot I_c}{l_s^2}$$

Tværsnittets Rankine bæreevne:

$$F_R = \frac{1}{\left(\frac{1}{F_U} + \frac{1}{F_E}\right)}$$

Hensyntagen til søjlebæreevnen efter Rankine formelen kan fås ved at bestemme den regningsmæssige ekscentricitet i henhold til følgende:

$$e_d = (e_{\text{termisk}} + e_{\text{last}} + \frac{1}{2} \cdot a_c) \cdot \frac{\left(1 - \frac{P}{F_U}\right)}{\left(1 - \frac{P}{F_R}\right)}$$

Herefter fås Navierbæreevnen for henholdsvis maksimal trykspænding F_c og minimal trækspænding F_{ct} .

$$F_c = \frac{f_{cd}(T)}{\left(\frac{e_d \cdot h_c}{2 \cdot I_c} + \frac{1}{h_c \cdot b}\right)}$$

$$F_{ct} = \frac{f_{ctd}(T)}{\left(\frac{e_d \cdot h_c}{2 \cdot I_c} - \frac{1}{h_c \cdot b}\right)}$$

Væggens lodrette bæreevne fås herefter som den mindste af F_c og F_{ct} .

Beregningerne udføres i passende tidsstep. For hvert tidsinterval bestemmes udbøjningstillægget ud fra den bestemte spændingsfordeling.

Det er fundet, at et tidsstep på 10 min. giver tilstrækkelig nøjagtige resultater.

BEREGNINGSMETODE FOR DÆK

Temperaturfordelingen i dækket bestemmes som angivet for vægge.

Reduktionsfaktoren af letklinkerbetonens trykstyrke, bøjnings-trækstyrke og elasticitetsmodul bestemmes ligeledes som for vægge som ξ_c og $(\xi_c)^2$.

Reduktionsfaktoren på armeringens flydespænding ξ_s kan bestemmes med diagrammet nedenfor eller med diagrammer og formeludtryk i [1], der også giver værdier for de fleste andre armeringstyper.

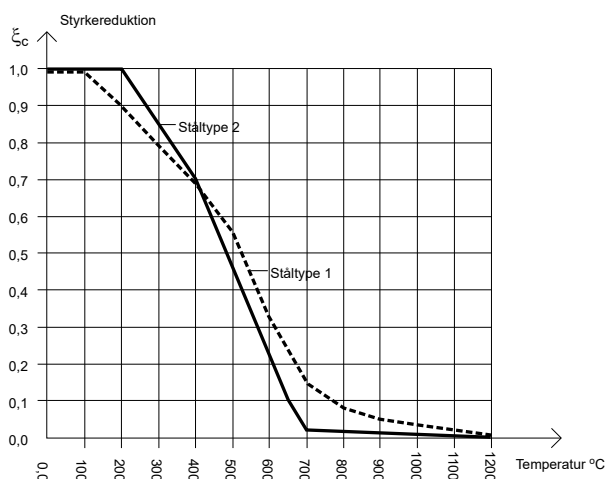
$$f_{sd} = \xi_s(T) \cdot f_{sd}(20^\circ)$$

I diagrammet er anført reduktionskurver for 3 typer stål:

Ståltipe 1: Kamstål KS 550 S, varmvalset, fri køling. (Betegnelse i h.t. DS 13080: B550 BR+Q). Stålet må svejdes. Værdierne svarer til CEN/TC 250 og forklares nærmere i [1]

Ståltipe 2: Kamstål K 550 TS, varmvalset, bratkølet, selvanløben. (Betegnelse i h.t. DS 13080: B550 BR+AC). Stålet må ikke svejdes. Værdierne er fundet ved forsøg, jf. afsnit 5.

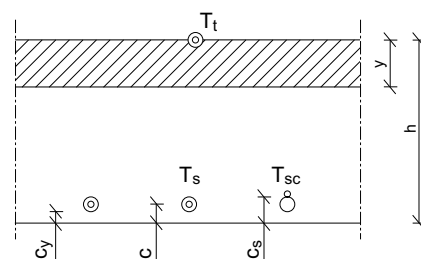
I letklinkerdækkene anvendes ståltipe 2.



Reduktionsfaktor for armering

Beregningerne af dækkenes bæreevne omfatter bøjning, forskydning og forankring. Forankringen opdeles i flækning og vedhæftningsbrud.

Beregningerne udføres ved at indsætte de temperaturafhængige materialeparametre i bæreevneformlerne.



Geometri for dæktværsnit

- h: Dæktykkelse
- y: Højde af trykzone
- b: Dækbredde
- D: Armeringsdiameter
- n: Antal armeringsstænger
- cy: Dæklag
- c: Dæklag til midte armering
- cs: Dæklag til o.s. armering

$$\text{Armeringsareal: } A_s = n \cdot \pi \frac{D^2}{4}$$

$T_t(t)$: Temperatur i top af dæk

$T_{sc}(t)$: Temperatur ved o.s. armering

$T_s(t)$: Temperatur ved midte af armeringen

Flydespænding af armering: $\xi_s(T_s(t)) \cdot f_{sd}(20^\circ)$

Trykspænding af beton: $\xi_c(T_t(t)) \cdot f_{cd}(20^\circ)$

Bøjningstrækstyrke: $\xi_c(T_{sc}(t)) \cdot f_{ctd}(20^\circ)$

Forskydningsspænding ved o.s. armering:

$$\tau_{cs} = \frac{1}{2} \cdot \xi_c(T_{sc}(t)) \cdot f_{ctd}(20^\circ)$$

$$\text{Trykzonehøjde: } y = \frac{A_s \cdot \xi_s \cdot f_{sd}(20^\circ)}{b \cdot \xi_c \cdot f_{cd}(20^\circ)}$$

$$\text{Momentbæreevne: } M_u = A_s \cdot \xi_s \cdot f_{sd}(20^\circ) \cdot \left(h - c - \frac{y}{2} \right)$$

$$\text{Forskydningsbæreevne: } Q_u = \tau_{cs} \cdot b \cdot \left(h - c - \frac{y}{2} \right)$$

$$\text{Flækkningsbrud: } Q_{uf} = 2\pi \cdot (\xi_c(T_1) + \xi_c(T_2) + \xi_c(T_3)) \cdot \frac{c_y}{3} \cdot f_{ctd} \cdot l_a \cdot n$$

l_a : Armeringens forankringslængde over vederlaget.

T_1, T_2 og T_3 : Temperaturen i midten af hvert af de lag, der fås når dæklaget opdeles i 3 lag.

$$\text{Vedhæftningsbrud: } Q_{uv} = 0,65 \cdot \pi \cdot D \cdot \xi_c(T_s) \cdot f_{cd} \cdot l_a \cdot n$$

Forskydningsbæreevnen bestemmes som den mindste af Q_u, Q_{uf} og Q_{uv} .

For massive dæk anvendes de samme materialeparametre for hele tværsnittet. For sandwichdæk anvendes toplagets materialeparametre for bøjning og mellemlagets materialeparametre for forskydning, og bundlagets materialeparametre for forankringsstyrke.

BRANDFORSØG

Brandforsøgene blev udført på Dansk Brand- og Sikrings-teknisk Institut.

Der udførtes først en række indledende forsøg med temperaturmålinger i 60 punkter af vægge i forskellige tykkelser for at bestemme temperaturfordelingen gennem væggen.

Forsøgene udførtes herefter i 2 faser.

Ved forsøgene varieredes på følgende parametre: Densitet, last, ekscentricitet og understøtningsforhold (plan understøtning og chamier).

Resultaterne af vægforsøgene:

Fase	Densitet kg/m ³	Last kN/m	Ekscentricitet mm	Brandmod- standtid min.
1	1200	35	+20	154
1	1800	70	+20	78
2	1200	25	-20	96
2	1800	40	-20	85

Ved brud havde væggene udbøjninger fra 130 - 170 mm.

Alle væggene havde en tykkelse på 100 mm og en højde på 3,00 m. Ekscentriciteten regnes positiv mod branden. I alle tilfælde stoppedes forsøgene inden brud i væg.

Resultaterne af dækforsøgene:

Fase	Dæktype	Dæk- tyk- kelse mm	Længde (lysvid- de) m	Last min. kN/m ²	Brand- mod- standtid min.
1	Sandwich	240	5,50	2,5	60
1	Massiv	200	5,50	4,0	61
2	Sandwich	240	5,63	2,4	70
2	Massiv	200	5,63	2,4	80

Ved alle forsøgene var dæklaget 15 mm. Armeringen i sandwichdæk var 8Y8 og i massive dæk 8Y10. Armeringskvaliteten var B550 BR+AC (varmvalset, bratkølet, selvanløben, tidligere handelsbetegnelse K 550 TS). Da der ikke var anført materialeparametre for denne ståltype i den daværende betonnorm DS 411 blev der udført forsøg til bestemmelse af ξ_s , jf. diagram side 7.

Forsøgene viste at for temperaturer op til ca. 400 °C ligger værdierne over det almindelige varmvalsede fritkølede kamstål, for temperaturer op til ca. 600 °C er værdierne ens, og for temperaturer over 600 °C ligger værdierne under.

Dette betyder, at for brandtider op til ca. 60 min. vil bæreevnerne være de samme, og ved brandtider over ca. 60 min. vil bæreevnerne være mindre.

Der blev også udført trækforsøg med den anvendte armering både før og efter forsøgene. Trækforsøgene viste ingen betydende svækkelse af armeringen efter brandpåvirkningen.

I fase 1 var vederlaget 200 mm, i fase 2 var vederlaget 70 mm.

Under alle forsøgene udførtes temperatur- og udbøjningsmålinger i en række punkter.

Ved forsøgenes afslutning havde dækkene betragtelige nedbøjninger.

Forsøgene viste god overensstemmelse med de beregnede resultater og har dermed bekræftet det opstillede beregningsgrundlag.

Da forankrings- og vederlagsproblematikken er væsentlig for dækkenes bæreevne under en brand, er der udført 2-dimensionelle temperaturberegninger omkring vederlaget, og temperaturerne er kontrolleret ved målinger under forsøgene.

MATERIALEPARAMETRE/BRANDKRAV

MATERIALEPARAMETRE

Materialeparametrene ved forsøgselementerne var følgende:

Helvægge	Helvæg 1200	Helvæg 1800
Densitet, ρ (kg/m ³)	1200	1800
Trykstyrke, middel, f_{cm} (MPa)	10,50	20,0
Trykstyrke karak., f_{ck} (MPa)	7,50	15,00
E-modul middel, E_{cm} (GPa)	8,00	18,00
E-modul karak., E_{ck} (GPa)	7,00	16,50
Bøjningstrækstyrke, middel, f_{ctm} (MPa)	2,20	3,20
Bøjningstrækstyrke, karak., f_{ctk} (MPa)	1,80	2,50
Varmedningsevne, λ (W/m°C)	0,45	0,90
Specifik varmekapac., c_p (kJ/kg°C)	1,00	1,00
Temperaturudvidelseskoefficient, $\beta \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	1,10	1,20

Sandwichdæk		
Densitet, ρ (kg/m ³)	bund	1500
Densitet, ρ (kg/m ³)	mellem	625
Densitet, ρ (kg/m ³)	top	1560
Trykstyrke middel, f_{cm} (MPa)	top	17,00
Trykstyrke karak., f_{ck} (MPa)	top	15,25
Bøjningstrækstyrke, middel, f_{ctm} (MPa)	bund	3,00
Bøjningstrækstyrke, karak., f_{ctk} (MPa)	bund	2,70
Bøjningstrækstyrke, middel, f_{ctm} (MPa)	mellem	0,30
Bøjningstrækstyrke, karak., f_{ctk} (MPa)	mellem	0,30
Varmedningsevne, λ (W/m°C)	bund	0,60
Specifik varmekapac., c_p (kJ/kg°C)	bund	1,00
Flydespænding af armering, f_{yk} (MPa)		550
Armeringstype: B550 BR+AC (Varmvalset, bratkølet, selvanløben)		

Massive dæk	
Densitet, ρ (kg/m ³)	1775
Trykstyrke middel, f_{cm} (MPa)	20,00
Trykstyrke karak., f_{ck} (MPa)	15,00
Bøjningstrækstyrke, middel, f_{ctm} (MPa)	3,20
Bøjningstrækstyrke, karak., f_{ctk} (MPa)	2,70
Varmedningsevne, λ (W/m°C)	0,60
Specifik varmekapac., c_p (kJ/kg°C)	1,00
Flydespænding af armering, f_{yk} (MPa)	550
Armeringstype: B550 BR+AC (Varmvalset, bratkølet, selvanløben)	

BRANDKRAV

I henhold til Bygningsreglementets (BR18) vejledninger og præ-accepterede løsninger stilles der brandkrav til bygningens bærende og brandadskillende konstruktioner.

Brandkravene til de bærende konstruktioner afhænger af bygningens anvendelse og højde fra terræn til gulv i øverste etage, mens brandkrav til brandadskillelser afhænger af om den brandadskillende bygningsdel er en brandvæg, brandsektionsadskillelse eller en brandcelleadskillelse.

Bærende konstruktioner

Brandkrav til bygningens bærende konstruktioner i henhold til Bygningsreglementets (BR18) vejledninger og præ-accepterede løsninger:

AK 1-5	1 etage	R 30
AK 6	1 etage	R 60
AK 1-6	Højst 5,1 m	R 60
AK 1-5	Højst 12,0 m	R 60 / A2-s1,d0
AK 1, 4	Højst 45,0 m	R 120 / A2-s1,d0

AK 1-5 Øverste etage, hvor gulv i øverste etage er højst 12,0 m over terræn R 30

AK 1, 4 Øverste etage, hvor gulv i øverste etage er mere end 12,0 m og højst 45,0 m over terræn R 60

Kældervægge og etageadskillelse over kælder R 60 / A2-s1,d0

Kældervægge og etageadskillelse over kælder i AK 1 og 4, hvor gulv i øverste etage er mere end 12,0 m over terræn og højst 45 m over terræn R 120 / A2-s1,d0

Brandadskillende bygningsdele

Brandvæg	REI 120 / A2-s1,d0
Brandsektionsadskillelse	EI 60 / A2-s1,d0
Brandcelleadskillelse	EI 60
Brandcelleadskillelse mod uudnyttet tagrum i AK 1-5 hvor gulv i øverste etage er højst 12,0 m over terræn	EI 30

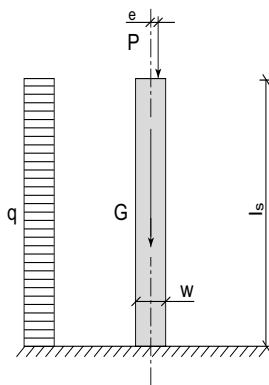
Forkortelser og europæiske klassifikationer

AK	Anvendelseskategori
R	Bæreevne
E	Integritet - tæthed over for varm røg
I	Isolation - varmeisolering
30, 60, 120	Tidsrummet i minutter hvor kriteriet skal være opfyldt
A2	Klasseinddelingreaktion på brand
s1	Meget begrænset røgudvikling
d0	Ingen brændende dråber eller partikler

ANVENDELSE AF VÆGDIAGRAMMER

Bæreevnen i brandtilfældet er bestemt som den karakteristiske bæreevne og skal sammenlignes med lasten i lastkombinationen for ulykkeslast – brand.

Diagrammerne må ikke anvendes til normal bæreevnebestemmelse.



Belastningsmodel for væg

P: Lodret last i lastkombination 3.3 (kN/m)
(inkl. halvdelen af væggens egenlast)

e: Ekscentricitet. Regnet positiv mod brand og negativ væk fra brand (m)

e₁: Størst mulig ekscentricitet regnet med fortegn
(positiv mod brand) (m)

e₂: Mindst mulig ekscentricitet regnet med fortegn
(negativ væk fra brand) (m)

q: Vandret last i lastkombination 3.3 (kN/m²)

q₁: Vandret last væk fra brand (kN/m²)

q₂: Vandret last mod brand (kN/m²)

w: Vægtykkelse (m)

l_s: Væghøjde/søjlelængde (m)

Herefter bestemmes den maksimale og minimale ekscentricitet.

$$e_{\max} = e_1 + \frac{q_1 \cdot l_s^2}{8 \cdot P}$$

$$e_{\min} = e_2 - \frac{q_2 \cdot l_s^2}{8 \cdot P}$$

Den karakteristiske bæreevne for den pågældende brandmodstandsevne aflæses herefter af diagrammerne som den mindste af bæreevnerne for henholdsvis e_{max} og e_{min}.

Der er udarbejdet diagrammer for REI 60 A2-s1,d0 vægge i tykkelserne 100 mm - 200 mm.

Diagrammerne er udarbejdet for vægge med densitet 1200 kg/m³. For vægge med større densitet end 1200 kg/m³ er bæreevnerne større og diagrammerne på den sikre side. For vægge med densitet mindre end 1200 kg/m³ er bæreevnerne mindre, og diagrammerne kan ikke anvendes.

For vægge, som er 3- eller 4-sidig understøttet kan søjlelængden/væghøjden reduceres efter følgende formler (fra DS 414, Tidligere norm for murværkskonstruktioner):

For et vægfelt understøttet på 4 sider:

$$l_s = \frac{H}{1 + \left(\frac{H}{B}\right)^2} \text{ for } B \geq H$$

$$l_s = \frac{B}{2} \text{ for } B < H$$

B = Afstand mellem tværunderstøtninger

H = væghøjde (m)

l_s = søjlelængde (m)

For et vægfelt understøttet på 3 sider:

$$l_s = \frac{H}{1 + \left(\frac{H}{3B}\right)^2} \text{ for } B \geq \frac{H}{3}$$

$$l_s = \frac{3}{2} \cdot B \text{ for } B < \frac{H}{3}$$

DÆKTABELLER OG ØVRIGE KONSTRUKTIONSELEMENTER

DÆKTABELLER

Dæk i efterfølgende tabeller opfylder alle kravene til REI 60.

Sandwichdæk Karakteristisk bæreevne i brandtilfældet (kN/m ²) (ekskl. egenlast af dæk)									
Spændvidde, m	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Tykkelse, mm									
120	4,2	2,7	1,8						
140	5,2	3,4	2,3	1,5					
160	6,2	4,1	2,8	1,9					
180	7,1	4,8	3,3	2,2	1,5				
200	14,5	10,3	7,5	5,5	4,1	3,1			
220	16,1	11,6	8,4	6,2	4,7	3,5	2,6		
240	18,0	12,8	9,3	6,4	5,2	4,0	3,0	2,2	
260	19,8	14,1	10,2	7,6	5,8	4,4	3,3	2,5	1,9
280	21,2	17,8	15,3	13,3	10,8	8,5	6,8	5,5	4,4

Bæreevne for sandwichdæk, REI 60.

Tabellen gælder under følgende forudsætninger:

Armeringsbetegnelse: Y-stål. K 550 TS
Type i h.t. DS 13080: B550 BR+AC
(Varmvalset, bratkølet, selvanløben).

120 - 180 mm: 6Y8 pr. 1,20 m
200 - 260 mm: 6Y10 pr. 1,20 m
280 mm: 6Y12 pr. 1,20 m
Dæklag: 15 mm
Vederlag: 70 mm

Massive dæk Karakteristisk bæreevne i brandtilfældet (kN/m ²) (ekskl. egenlast af dæk)									
Spændvidde, m	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Tykkelse, mm									
140	13,5	9,2	6,5	4,6	3,2				
160	15,9	10,9	7,7	5,5	3,9	2,7			
180	18,3	12,6	8,9	6,4	4,5	3,2			
200	32,9	23,2	17,0	12,6	9,6	7,3	5,5	4,2	3,1
220	36,8	26,0	19,0	14,2	10,7	8,2	6,2	4,7	3,5
240	40,7	28,8	21,1	15,7	11,9	9,1	7,0	5,3	4,0
260	44,7	31,6	23,1	17,2	13,1	10,0	7,7	5,8	4,4

Bæreevne for massive dæk, REI 60

Tabellen gælder under følgende forudsætninger:

Armeringsbetegnelse: Y-stål. K 550 TS
Type i h.t. DS 13080: B550 BR+AC
(Varmvalset, bratkølet, selvanløben).

120 - 180 mm: 8Y10 pr. 1,20 m
200 - 260 mm: 8Y12 pr. 1,20 m
Dæklag: 15 mm
Vederlag: 70 mm

ØVRIGE KONSTRUKTIONSELEMENTER

Armerede vægsøjler

Disse beregnes ved hjælp af eksisterende søjleprogrammer for beton, hvor der anvendes letbetonens materialeparametre.

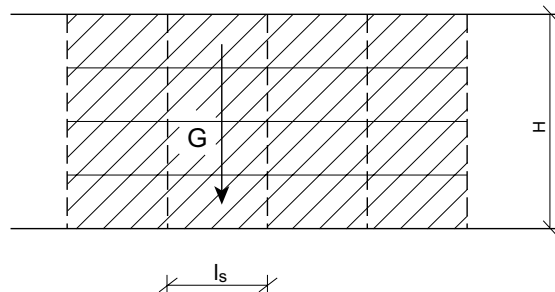
Armerede bjælker

Disse beregnes i princippet som for letbetondæk eller som betonbjælker med letbetonens parametre.

Brandsektionsvægge

Brandsektionsvægge der opføres af vandretliggende elementer lagt ovenpå hinanden og understøttet af søjler foreslås beregnet på følgende måde:

Søjlelængden fastsættes til væglængden. Væggen beregnes for indvendig vindlast i brandtilfældet og en lodret last på halvdelen af væggenes egenlast påført med en ekscentricitet svarende til 1/500 af væghøjden.



Eksempel på brandsektionsvæg

BEREGNINGSEKSEMPLER

EKSEMPEL 1

Indervæg med dæklast fra 2 sider.

Brandkrav, REI 60.

Vægtykkelse: $w = 0,20 \text{ m}$

Densitet: 1200 kg/m^3

Væghøjde: $l_s = 3,50 \text{ m}$

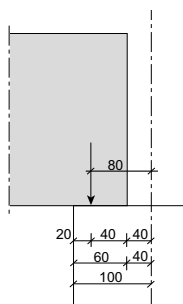
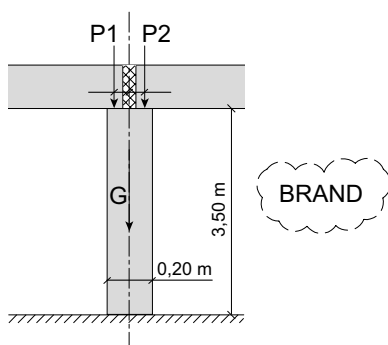
Karakteristiske laste i brandtilfældet, lasttilfælde 3.3:

Ingen vandret last

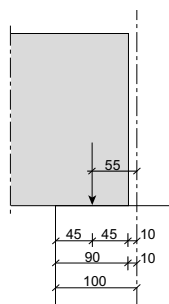
Laste: $P_1 = 20 \text{ kN/m}$

$P_2 = 35 \text{ kN/m}$

$P = P_1 + P_2 = 55 \text{ kN/m}$



Min. vederlag: 60 mm



Maks. vederlag: 90 mm

Belastningsmodel

$e_{1,1} = -55 \text{ mm}$

$e_{1,2} = -80 \text{ mm}$

$e_{2,1} = 80 \text{ mm}$

$e_{2,2} = 55 \text{ mm}$

$$e_{\max} = e_1 = \frac{20 \cdot (-55) + 35 \cdot 80}{55} = 31 \text{ mm}$$

$$e_{\min} = e_2 = \frac{20 \cdot (-80) + 35 \cdot 55}{55} = 6 \text{ mm}$$

Bæreevne aflæses af diagram 4.

$R_1 = 340 \text{ kN/m}$

$R_2 = 530 \text{ kN/m}$

Bæreevnen i brandtilfældet er den mindste af R_1 og R_2 .

$R_{d,\text{brand}} = 340 \text{ kN/m} > P = 55 \text{ kN/m}$

EKSEMPEL 2

Ydervæg

Brandkrav REI 60

Vægtykkelse: $w = 0,10 \text{ m}$

Densitet: 1800 kg/m^3

Væghøjde: $H = 2,60 \text{ m}$

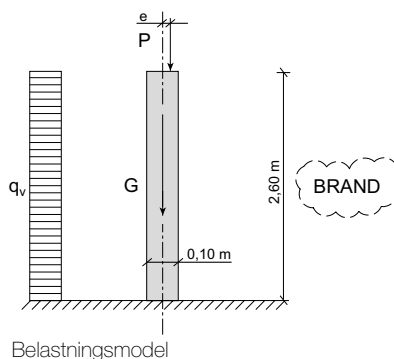
Max last: $P_{\max} = 20 \text{ kN/m}$

Min last: $P_{\min} = 5 \text{ kN/m}$

Ekscentricitet: $e_1 = 25 \text{ mm}$

Ekscentricitet: $e_2 = -10 \text{ mm}$

Karakteristisk vindlast: $q_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$



Vindlast:

$$q_{\text{vind}} = \gamma_{\text{brand}} \cdot c \cdot q_k$$

$$\gamma_{\text{brand}} = 0,25$$

$$q_1 = 0,25 \cdot 1,1 \cdot 0,75 = 0,21 \text{ kN/m}^2$$

$$q_2 = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 0,75 = 0,19 \text{ kN/m}^2$$

γ_{brand} = partialkoefficient i brandtilfældet

c = formfaktor

Tilfælde 1, $P_{\min} + \text{vind}$:

$$e_{\max} = 25 + \frac{0,21 \cdot 2,60^2}{8 \cdot 5,0} \cdot 10^3 = 25 + 35 = 60 \text{ mm}$$

$$e_{\min} = -10 - \frac{0,19 \cdot 2,60^2}{8 \cdot 5,0} \cdot 10^3 = -10 - 32 = -42 \text{ mm}$$

Af diagram 1 fås:

$R_1 = 77 \text{ kN/m}$

$R_2 = 41 \text{ kN/m}$

$R_{d,\text{brand}} = 41 \text{ kN/m} > P_{\min} = 5 \text{ kN/m}$

Tilfælde 2, $P_{\max} + \text{vind}$:

$$e_{\max} = 25 + \frac{0,21 \cdot 2,60^2}{8 \cdot 20} \cdot 10^3 = 25 + 9 = 34 \text{ mm}$$

$$e_{\min} = -10 - \frac{0,19 \cdot 2,60^2}{8 \cdot 20} \cdot 10^3 = -10 - 8 = -18 \text{ mm}$$

Af diagram 1 fås:

$R_1 = 108 \text{ kN/m}$

$R_2 = 51 \text{ kN/m}$

$R_{d,\text{brand}} = 51 \text{ kN/m} > P_{\max} = 20 \text{ kN/m}$

BEREGNINGSPROGRAMMER

Alternativt samt for de tilfælde, som ikke er dækket af diagrammerne, er det muligt selv at beregne brandmodstandstiden med et program. Programmerne LKVAEG og LKDAEK beregner bæreevnen af en væg eller et dæk af letklinkerbeton påvirket af en standardbrand efter ISO 834. Metoderne er underbygget af prøvninger, som bl.a. dokumenteres i [2]. Med metoder beskrevet i [1] og det mere generelle program ConFire kan alle betonkonstruktioner beregnes både for standardbrande og for fuldt udviklede brandforløb.

Beregningsprogrammerne er nemme at bruge og kan downloades fra Betonelement-Foreningens hjemmeside.

Anvendelse af programmerne er helt på eget ansvar, og hverken programmør eller distributør kan drages til ansvar i forbindelse med brug eller installation deraf.

PROGRAMBESKRIVELSE

Programmerne LKVAEG og LKDAEK beregner bæreevnen af en væg eller dæk af letklinkerbeton påvirket af en standardbrand efter ISO 834.

I programmet LKVAEG kan væggens tykkelse, højde, densitet og styrkeparametre varieres. Man kan vælge mellem beregning med middelværdier og karakteristiske værdier, og man kan påføre en linielast og en ekscentricitet for denne på væggens overside. Ved dimensionering skal anvendes karakteristiske værdier.

Linielastens ekscentricitet regnes negativ hvis den giver det største tryk på den side af væggen, der vender bort fra branden og positiv mod branden.

Beregningen giver brandmodstandstiden for den påførte linielast og samtidig oplyses bæreevnen og udbøjningen for hver 10. minut inden for fire timer af en standardbrand ved påvirkning af denne linielast, så man kan afgøre, hvor tæt man er på brud.

Linielasten, der står på væggen under branden, er bestemmende for udbøjningen og dermed for bæreevnen i udbøjet tilstand. Derfor er bæreevnen til den faste tid afhængig af, hvilken linielast, der har stået på væggen under opvarmningen. Ønsker man at bestemme den last, som væggen kan bære frem til et givet tidspunkt, må man iterere ved at variere lasten indtil brandmodstandstiden svarer til tidspunktet.

Programmet skriver endvidere filer med sit primære resultat og filer med tabeller over udviklingen i den beregnede bæreevne, udbøjning og indre ekscentricitet gennem fire timer af en standardbrand.

Beregningen udføres i tidsstep á 10 minutter, og i hvert tidsstep beregnes den akkumulerede udbøjning under hensyn til svækkelsen af tværsnittet og de transiente tøjningsforhold,

og der udføres en stabilitetsundersøgelse for denne tilstand. I dækprogrammet LKDAEK kan man vælge mellem sandwichdæk eller massive dæk. Herefter kan man vælge dæktykkelse, bredde, længde og armering.

Armeringen kan i programmet vælges enten som varmvalset, fritkølet Kamstål, B 550 BR+Q (tidligere handelsbetegnelse KS 550 S), eller som varmvalset, bratkølet, selvanløben Kamstål, B 550 BR+AC (tidligere handelsbetegnelse K 550TS).

Herefter påføres en fladelast, hvorpå programmet beregner maksimal moment og forskydningskraft og sammenholder dem med bæreevnen til en valgt brandmodstandstid.

Programmet tillægger selv dækkenes egenvægt til lasten.

Programmet udfærdiger filer af resultatet og udfærdiger tabeller af moment- og forskydningsbæreevnens udvikling gennem 4 timer af en standardbrand.

Beregningerne udføres som for vægge i tidsstep af 10 min.

Installation af programmerne

Programmerne downloades fra vores hjemmeside. Samme sted kan hentes en detaljeret vejledning om installation og brug af programmerne. Beregningsprogrammet for vægge hedder LKVAEG.exe. Udover beregningsprogrammet findes en række resultatfiler:

LKVAEG.RES: Der gemmer resultatet, som står på skærmen.

LKVAULT.RES: Med en tabel over bæreevnens udvikling fra 0 til 240 min.

LKVAUM.RES: Med en tabel over udbøjningen fra 0 til 240 min.

LKVAUNA.RES: Med en tabel over den indre ekscentricitet fra 0 til 240 min.

Beregningsprogrammet for dæk hedder: LKDAEK.exe. Udover beregningsprogrammet findes en række resultatfiler:

LKDAEK.RES: Der gemmer resultatet, som står på skærmen.

LKDAMULT.RES: Med en tabel over momentbæreevnen fra 0 til 240 min.

LKDAVULT.RES: Med en tabel over forskydningsbæreevnen fra 0 til 240 min.

DIAGRAMMER

BRANDMODSTANDSEVNE AF HELVÆGGE MED DENSITET MINDST 1200 KG/M³ - REI 60

DIAGRAM 1

Karakteristisk bæreevne
kN/m

100 MM HELVÆG 1200, REI 60

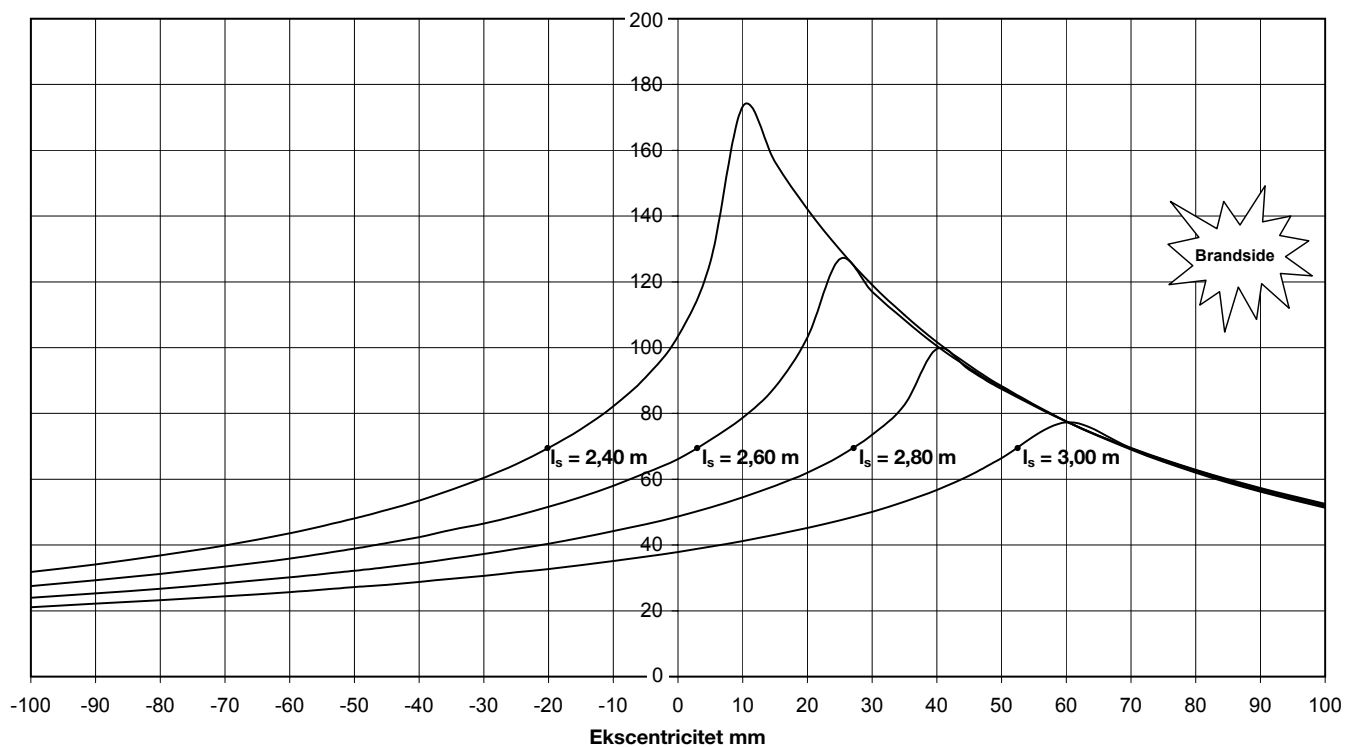


DIAGRAM 2

Karakteristisk bæreevne
kN/m

120 MM HELVÆG 1200, REI 60

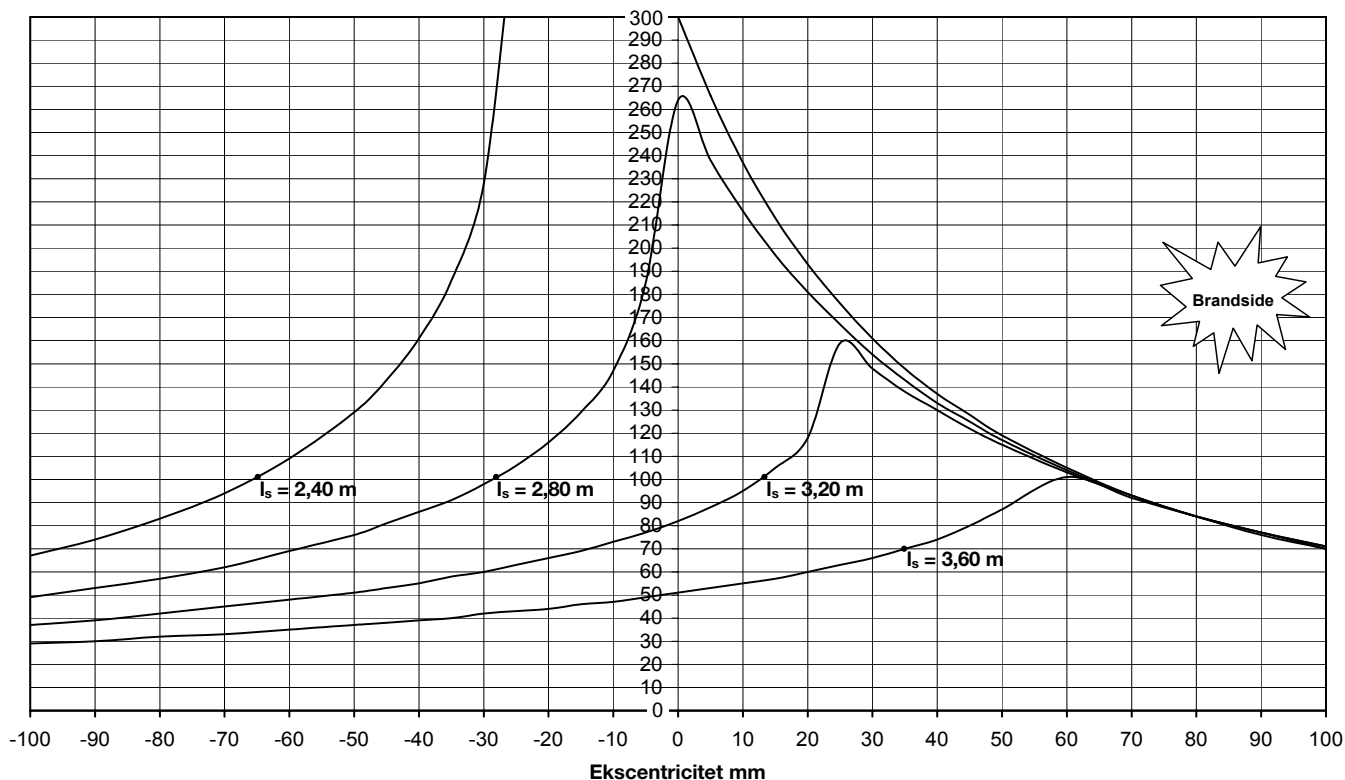


DIAGRAM 3

Karakteristisk bæreevne
kN/m

150 MM HELVÆG 1200, REI 60

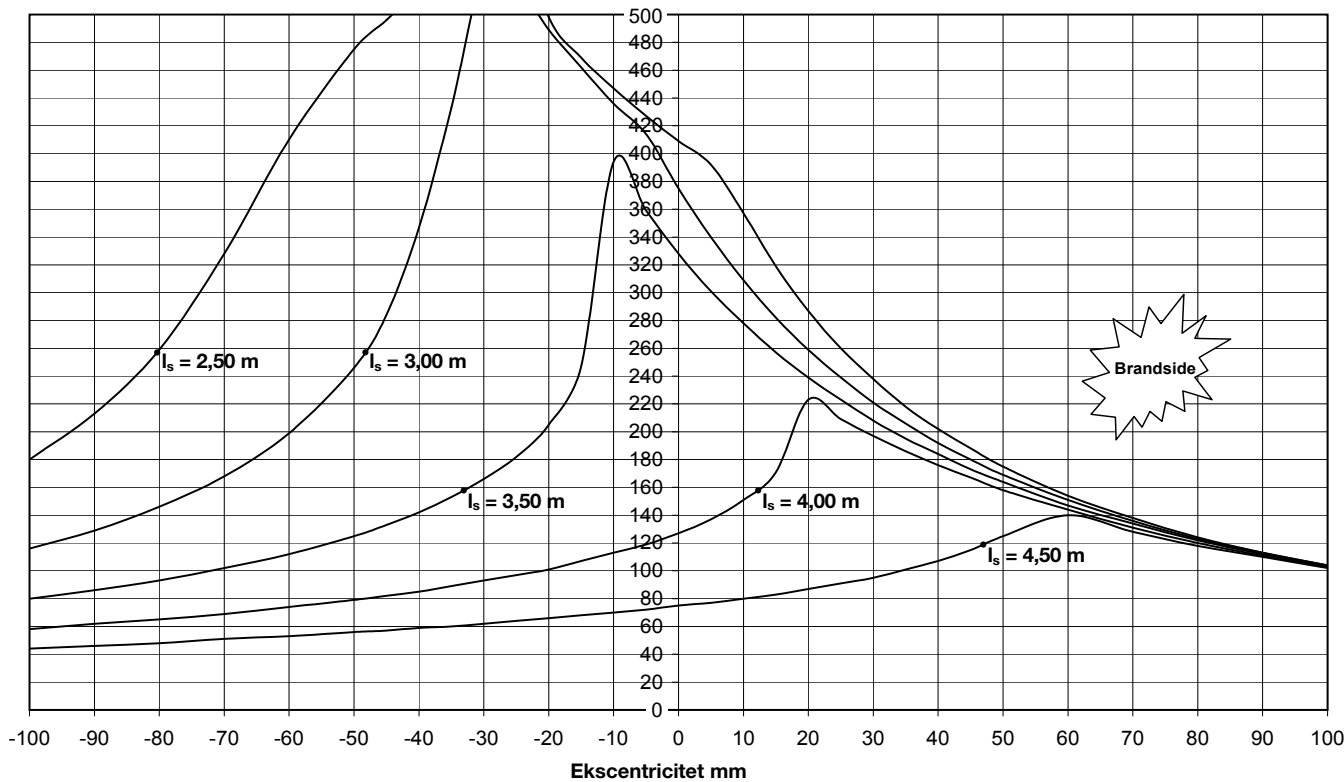
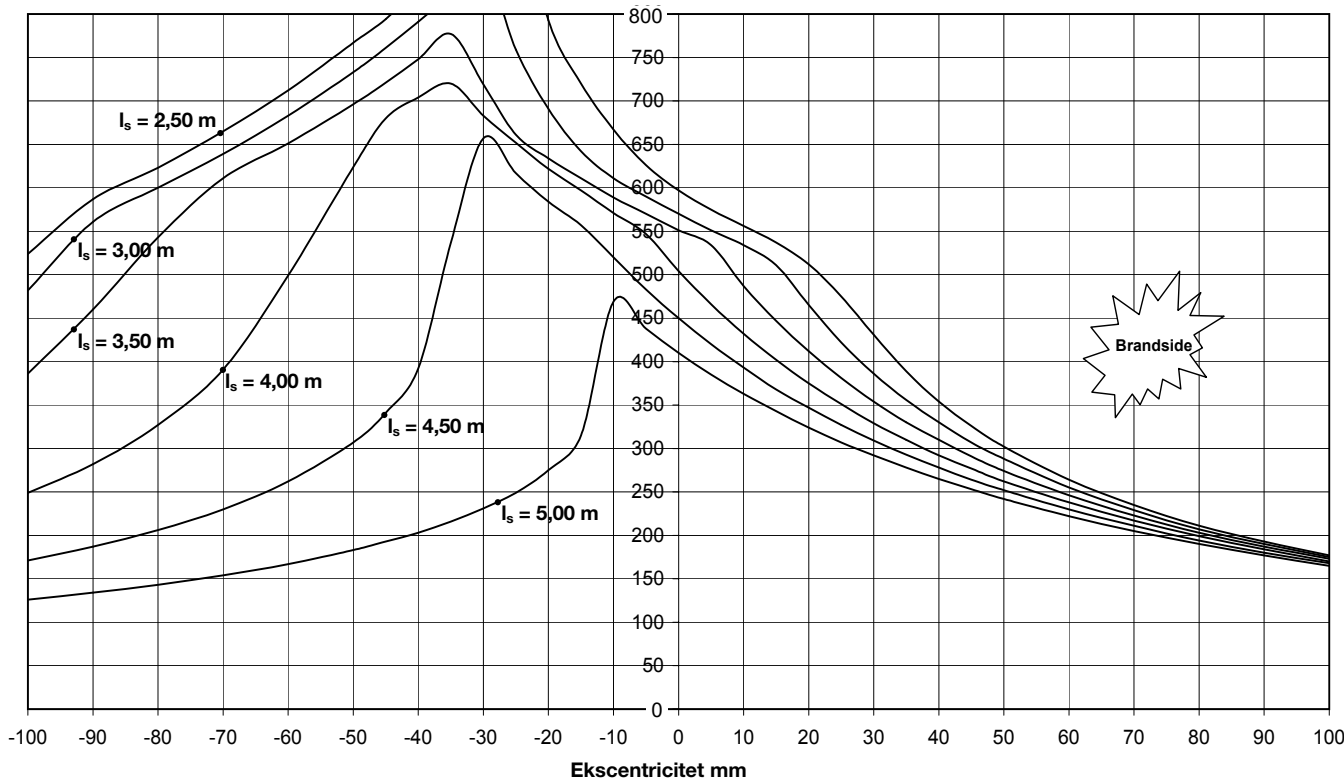


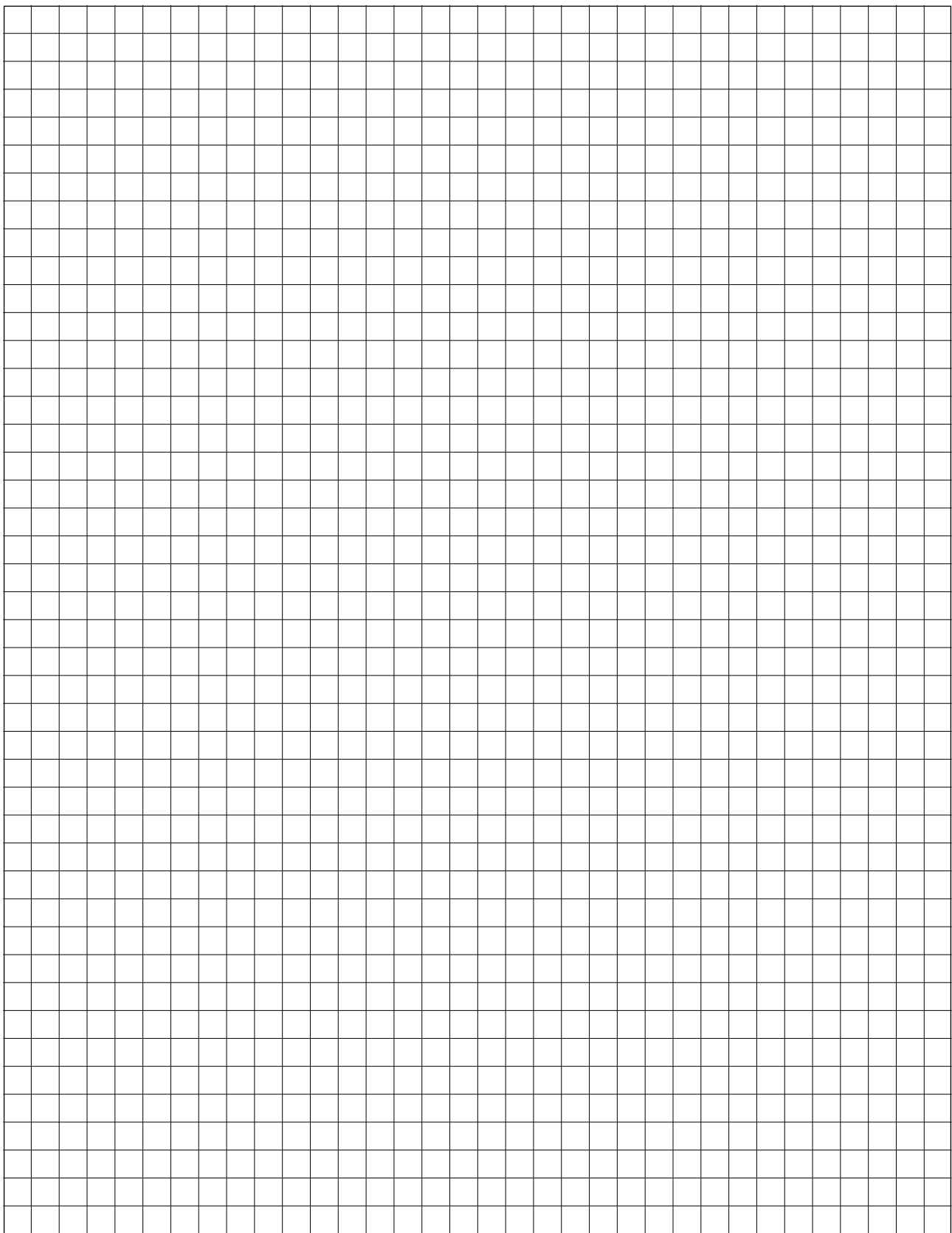
DIAGRAM 4

Karakteristisk bæreevne
kN/m

200 MM HELVÆG 1200, REI 60



NOTER



FÅ RÅD OG VEJLEDNING



Mange byggeprojekter kan med fordel realiseres med elementer af letbeton. Kontakt derfor en af producenterne for råd og vejledning på et tidligt stadie i projektet, så du får den bedste løsning til dit byggeri.

SEKRETARIAT

Betonelement-Foreningen, DI Byggeri
Letbetonelementgruppen
H. C. Andersens Blvd. 18
1553 København V
Telefon: 3377 3377
betonelementforeningen@di.dk
www.danskindustri.dk/brancher/di-byggeri

ELEMENTPRODUCENTER

EXPAN
Ribevej 45
6650 Brørup
Telefon: 7637 7000
post@expan.dk
www.expan.dk

EXPAN
Purhusvej 6, Linå
8600 Silkeborg
Telefon: 7637 7000
post@expan.dk
www.expan.dk

EXPAN
Bækgårdsvej 74
4140 Borup
Telefon: 7637 7000
post@expan.dk
www.expan.dk

EXPAN
Snavevej 23
5471 Søndersø
Telefon: 7637 7000
post@expan.dk
www.expan.dk

Heidelberg Materials Precast Denmark A/S
Mads Clausensvej 58
6360 Tinglev
Telefon: 7217 1000
info@heidelbergmaterials.dk
www.precast.heidelbergmaterials.dk

Gandrup Element A/S
Teglværksvej 35
9362 Gandrup
Telefon: 9654 3800
ge@gandrupelement.dk
www.gandrupelement.dk

Leth Beton A/S
Rishøjvej 26
7755 Bedsted Thy
Telefon: 9794 5511
post@lethbeton.dk
www.lethbeton.dk

thomas praefab Østervrå A/S
Høngårdsvej 30
9750 Øster Vrå
Telefon: 9895 1300
praefa@praefa.dk
www.thomas-gruppe.dk

Niss Sørensen & Søn A/S
Drosselvej 9, Balling
7860 Spøttrup
Telefon: 9756 4222
nes@nssas.dk
www.nssas.dk

SAMARBEJDSPARTNERE

Aalborg Portland
Rørdalsvej 44, Postboks 165
9100 Aalborg
Telefon: 9816 7777
sales@aalborg-portland.dk
www.aalborg-portland.dk



Scan og besøg vores site

Letbetonelementgruppen under Betonelement-Foreningen, DI Byggeri
H.C. Andersens Blvd. 18, 1553 København V

Tlf. 3377 3377

betonelementforeningen@di.dk

www.danskindustri.dk/medlemsforeninger/foreningssites/dansk-beton/betonelement-foreningen