

Dansk Beton

Letbetongruppen -BIH

Vurdering af uarmerede vægges bæreevne.
Lodret og vandret belastede vægge

RAPPORT

Sag BIH, Tværbelastede vægge
J.nr. GC2006_BIH_R_001E
Udg. E
Dato 23 August 2007

Indholdsfortegnelse

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | Introduktion | 1 |
| 2. | Dimensionering af uarmerede vægge | 2 |
| 2.1 | Lodret belastet væg | 2 |
| 2.1.1 | Ritter formlen for en uarmeret, excentrisk belastet væg (DS 420). | 2 |
| 2.1.2 | Baggrund for Ritter-formlen. | 3 |
| 2.2 | Lodret og vandret belastet væg | 5 |
| 2.2.1 | Navier formlen for uarmeret, tværbelastet væg (DS 420) | 5 |
| 2.2.2 | Baggrund for Navier formlen | 6 |
| 3. | Arbejdskurver og elasticitetsmodul | 7 |
| 3.1 | Bestemmelse af arbejdskurver | 7 |
| 3.2 | Bestemmelse af middelelasticitetsmodulet | 11 |
| 3.2.1 | Testning af materialeparametre | 11 |
| 3.2.2 | Beregning af elasticitetsmodulet | 12 |
| 4. | Alternative beregningsformler | 13 |
| 4.1 | Excentrisk belastet væg iflg. Eurocode 2, afsnit 12.6.1 | 13 |
| 4.2 | Excentrisk belastet væg med Eurocode arbejdskurve | 14 |
| 4.3 | Urevnede tværsnit i trykzonen taget i regning | 15 |
| 4.4 | Tværbelastede vægge | 16 |
| 5. | Eksperimentelle data for uarmerede vægge | 19 |
| 5.1 | Testmetoder ved fuldskalaprøvning | 19 |
| 5.2 | Data fra litteraturen og ældre typeprøvningsresultater | 19 |
| 5.3 | Nye typeprøvninger | 20 |
| 5.4 | Forsøg med lodret og vandret belastede vægge. | 20 |
| 6. | Sammenligninger | 22 |
| 6.1 | Lodret belastede elementer | 22 |
| 6.2 | Lodret og vandret belastede elementer | 24 |
| 7. | Konklusioner | 31 |
| 8. | Referencer | 33 |
| Annex A. | Typeprøvningsresultater | 35 |
| Annex B. | Lodret og vandret belastede elementer | 38 |

1. Introduktion

I forbindelse med sikkerhedskalibreringen i 2004 af DS/EN 1520 /7/ blev det vist at uarmerede letklinkerbetonvægge ligger med et højt sikkerhedsniveau, der langt overstiger det krævede niveau, primært i kraft af Ritter-formlens konservatisme. Det høje sikkerhedsniveau blev konstanteret for både Ritter og Navier-formlerne som er ens i DS/EN 1520 /4/ og i DS 420 /5/.

Det er derfor blevet besluttet af BIH at der skal gennemføres eksperimentelle og teoretiske undersøgelser med henblik på at opstille mere realistiske formler for de uarmerede vægges bæreevner.

Der blev derfor i fase 1 /27/ i 2004 gennemført en række typeprøvninger af letbetonvægge, som gjorde det muligt at vurdere sikkerheden og konservatismen i den nuværende dimensionering vha. Ritter-formlen.

Der blev derefter gennemført en fase 2 /28/ primo 2006 med en række prøvninger af elementer med både lodret og vandret last, for derved at kunne vurdere konservatismen i Navier-formlerne. Der opstilles desuden en række alternative formler for beregning af elementernes bæreevner.

Der er efterfølgende i 2006 gennemført en række ekstra forsøg i BIH-regi /28/, samt uafhængigt heraf også gennemført en række forsøg i et civilingeniøreksaminationsprojekt på BYG•DTU /32/.

Denne rapport er en opdatering af rapporten fra fase 1 og omfatter således både fase 1 og fase 2 undersøgelserne, samt de ekstra forsøg, der blev udført i 2006.

2. Dimensionering af uarmerede vægge

2.1 Lodret belastet væg

2.1.1 Ritter formlen for en uarmeret, excentrisk belastet væg (DS 420).

Dimensioneringen af uarmerede vægelementer med lodret, excentrisk belastning iflg. EN 1520 /4/, svarer til de danske regler fra DS 420:2003 /5/. Den eneste forskel er at der i Ritter-formlen anvendes det estimerede eller deklarerede middelelasticitetsmodul, som i den danske Ritter-formel var sat til 1000 gange trykstyrken. Dette forhold er rettet i DS420:2003 pr. juli 2004 /6/.

Den lodrette bæreevne (R_{sd}) beregnes efter Ritter-formlen som:

$$R_{sd} = k_s \cdot f_{cd} \cdot A_c \quad (2.1)$$

hvor

$$A_c = b \cdot (t - 2e_t) \quad (2.2)$$

$$k_s = \frac{1}{1 + 12 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\pi^2 \cdot E_{cm}}\right) \cdot \left(\frac{l_s}{t - 2e_t}\right)^2} \quad (2.3)$$

idet

b er tværsnittets bredde

E_{cm} er middelelasticitetsmodulet.

e_t er den resulterende excentricitet af den lodrette last i midten af elementet (DS 420 i den midterste 3-del, DS411 og Eurocode 2 i den midterste 5-del)

f_{cd} er den regningsmæssige trykstyrke

f_{ck} er den karakteristiske trykstyrke

l_s er den frie søjlelængde

t er tværsnittets tykkelse

2.1.2 Baggrund for Ritter-formlen.

Ritter-formlen blev i den nuværende form introduceret i DS 420.2:1977 /1/, som var den første danske norm for letbetonelementer, som fulgte de Nordiske retningslinier for normer for lodrette bærende elementer af letbeton. Retningslinierne, norm og kommentarer /2/ var iflg. DS 420.2:1977 baserede på de danske erfaringer med prøvning af etagehøje elementer og beskrev baggrunden for formelen ud fra at Euler lasten kunne beregnes som

$$N_{eu} = \frac{1}{12} \cdot E \cdot b \cdot t^3 \cdot (\pi / l_s)^2 \quad (2.4)$$

Ved anvendelse af materialer med krumme arbejdslinier (som beton og letbeton) kunne arbejdslinien dog ikke regnes retlinet, idet E-modulet afhang af lastniveauet som følger

$$E = E_o \cdot (1 - \sigma / f_c) \quad (2.5)$$

hvor

- E er elasticitetsmodulet
- E_o er begyndelseselasticitetsmodulet.
- f_c er trykstyrken
- σ er trykspændingen

Ved indsættelse af E(σ) i Euler-formlen finder man derefter bæreevnen N_{uc} som

$$N_{uc} = \frac{b \cdot t \cdot f_{ck}}{1 + 12 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\pi^2 \cdot E_o} \right) \cdot \left(\frac{l_s}{t} \right)^2} \quad (2.6)$$

Belastes en væg med en lodret last med excentricitet e_t, så tages kun en del af væggen i regning, nemlig den del der ligger symmetrisk om den lodrette last, så t reduceres til t - 2e_t og bæreevnen (N_{ue}) derefter beregnes som

$$N_{ue} = \frac{b \cdot (t - 2e_t) \cdot f_{ck}}{1 + 12 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\pi^2 \cdot E_o} \right) \cdot \left(\frac{l_s}{t - 2e_t} \right)^2} \quad (2.7)$$

Dette svarer til formlerne i DS 420 og i EN 1520, når der påføres en partialkoefficient og i øvrigt anvendes middelelasticitetsmodulet E_{cm} i stedet for begyndelseselasticitetsmodulet E_o.

Der er således indført to konservative antagelser, som kan lede til en kraftig undervurdering af bæreevnen:

1. En del af det trykkede tværsnit ignoreres, hvilket leder til en overvurdering af spændingerne og til en undervurdering af E-modulet.
2. Der anvendes E_{cm} , som ikke testes som begyndelses E-modulet, men derimod testes som et sekant E-modul. Dette leder til en lavere værdi af E-modulet.

Der er også indført et par andre antagelser, der kan have en positiv eller negativ effekt på vurderingen af bæreevnen:

3. Der er antaget en bestemt form af trykarbejdskurvens form, som leder til $E(\sigma)$.
4. Der skal naturligvis tages hensyn til langtidseffekter, som fx. krybning og revnedannelse. Dette sker ved at en del af tværsnittet ignoreres, så man kun regner med den del af tværsnittet, som er symmetrisk om den lodrette last. Herved forsvinder førsteordenens bøjningsmoment og dermed andenordenseffekterne, så det resulterende brud er et korttidsbrud ved tab af stabilitet.

Erfaringerne og den historiske udvikling af formlerne er beskrevet i detaljer i hæfte 8 fra BIH /3/, ligesom den teoretiske baggrund for Ritter-formlen er beskrevet i DS420:1977's kommentarer /1/

2.2 Lodret og vandret belastet væg

2.2.1 Navier formelen for uarmeret, tværbelastet væg (DS 420)

Dimensioneringen af den uarmerede væg, belastet med en vandret vindlast og en evt. lodret, excentrisk last iflg EN 1520 /4/ svarer stort set til de danske regler fra DS 420:2003 /5/ idet de eneste forskelle er i form af forskellige minimums excentriciteter i beregningen af N_{cr} .

Bæreevnen kontrolleres ved DS420's formler som

$$\begin{aligned}\sigma_{td} &= -\frac{N}{b \cdot t} + \frac{6 \cdot N_{cr}}{N_{cr} - N} \cdot \frac{N \cdot e_t}{b \cdot t^2} \leq f_{td} \\ \sigma_{cd} &= \frac{N}{b \cdot t} + \frac{6 \cdot N_{cr}}{N_{cr} - N} \cdot \frac{N \cdot e_t}{b \cdot t^2} \leq f_{cd}\end{aligned}\tag{2.8}$$

hvor

$$N_{cr} = k_s \cdot f_{cd} \cdot b \cdot (t - 2 \cdot e_{cr})\tag{2.9}$$

$$k_s = \frac{1}{1 + 12 \cdot \frac{f_{ck}}{E_{cm} \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{l_s}{t - 2 \cdot e_{cr}} \right)^2}\tag{2.10}$$

og

e_{cr} er lig med elementets afvigelse fra planen

$N \cdot e_t$ er det samlede førsteordens moment M_0 , dvs. momentet fra normallast og vindlast uden at tage udbøjningerne i regning.

f_{td} er den regningsmæssige bøjningstrækstyrke

f_{cd} er den regningsmæssige trykstyrke

2.2.2 Baggrund for Navier formlen

Bæreevnen beregnes ved brug af Navier som

$$\begin{aligned}\sigma_{td} &= -\frac{N}{A} + \frac{M_T}{W} \leq f_{td} \\ \sigma_{cd} &= \frac{N}{A} + \frac{M_T}{W} \leq f_{cd}\end{aligned}\tag{2.11}$$

hvor

A er tværsnitsarealet ($b \cdot t$)

W er det modstandsmomentet ($b \cdot t^3 / 6$)

N er den regningsmæssige normalkraft

M_T er det samlede moment incl. anden ordenseffekten

Ved beregningen af M_T anvendes

$$M_T = M_0 \cdot k_m = M_0 + N \cdot w\tag{2.12}$$

$$M_0 = N \cdot (e_0 + e_1) + M_v = N \cdot e_t\tag{2.13}$$

hvor

M_0 er førsteordens momentet, dvs. momentet fra normallast og vindlast uden at tage udbøjningerne i regning

M_v er momentet fra vindlasten på tværs af elementet

N er den lodrette last

e_0 er lastexcentriciteten i den midterste trediedel af væggen

e_1 er excentriciteten fra udførelsesunøjagtigheder i den midterste trediedel af væggen. Den sættes lig med elementets afvigelse fra planen.

Ved Navier formlens brug i DS 420 og EN 1520 har vi sat

$$k_m = \frac{N_{cr}}{N_{cr} - N}\tag{2.14}$$

hvor N_{cr} beregnes ud fra (2.9) og (2.10) med en excentricitet e_{cr} på 5 mm, dvs. at vi stort set medregner hele tværsnittets stivhed og derefter bruger hele tværsnittet til at optage det resulterende moment i. Det skal dog siges at formlerne til gengæld tager højde for 2.ordens effekten to gange, nemlig igennem (2.14) og (2.10), hvilket er meget på den sikre side.

Vi finder derefter DS420's formler ved indsættelse af k_m , A og W.

3. Arbejdskurver og elasticitetsmodul

3.1 Bestemmelse af arbejdskurver

Dansk Standard har haft finansieret en opmåling af trykarbejdskurver på repræsentative letklinkerbetontyper, som udførtes af BYG.DTU /9/. Det teknisk mest korrekte er at anvende disse arbejdskurver til vurdering af forholdet imellem begyndelseselasticitetsmodul og sekantelasticitetsmodul.

Ved udledelsen af Ritter-formlen har man antaget en krum arbejdslinie, svarende til den variation af E-modulet, som angives i (2.5):

$$E = E_o \cdot (1 - \sigma / f_c)$$

Denne variation kan dog ikke omstilles til en decideret arbejdskurve, da $\sigma = f_c$ først opnås ved uendeligt store tøjninger.

Eurocode 2 /10/ angiver en formel for arbejdskurven som

$$\sigma / f_c = 1 - (1 - \varepsilon / \varepsilon_{c2})^n \quad \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_{c2} \quad (3.1)$$

som kan omskrives til

$$E = E_o \cdot (1 - \varepsilon / \varepsilon_{c2})^{(n-1)/n} \quad \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_{c2} \quad \text{eller} \quad (3.2a)$$

$$E = E_o (1 - \sigma / f_c)^{(n-1)/n^2} \quad \text{for } \sigma \leq f_c \quad (3.3b)$$

hvor

E_o er begyndelseselasticitetsmodulet ved $\sigma = 0$.

f_c er trykstyrken.

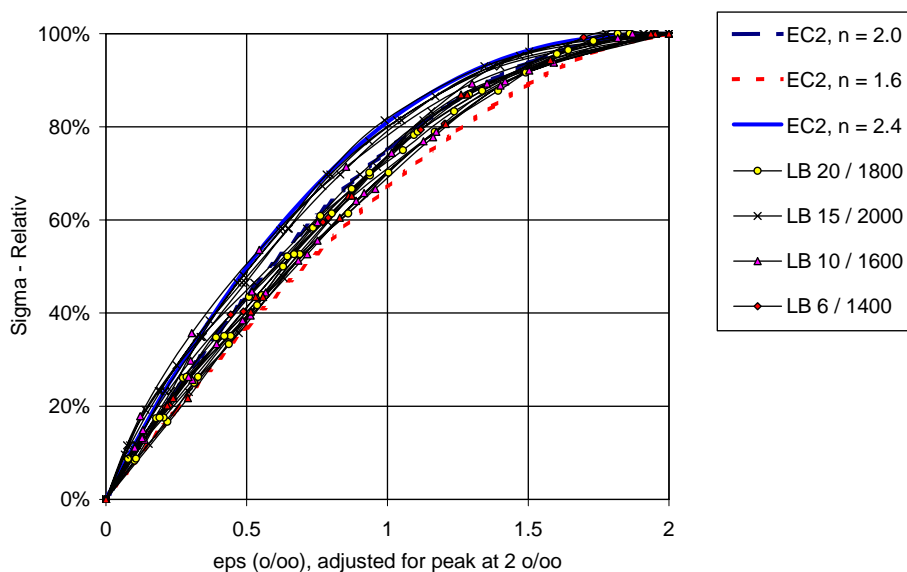
n er en konstant. Denne sættes for ordinær beton og let konstruktionsbeton til 2.

ε er tryktøjningen.

ε_c er den tøjning, hvor den maksimale styrke nås. Denne sættes for ordinær beton og let konstruktionsbeton til 2 o/oo.

σ er trykspændingen.

I figur 3.1 sammenlignes de normerede, målte arbejdskurver mod Eurocode's arbejdskurve med hhv. $n = 2$, $n=2.4$ og $n=1.6$. Det ses at der er en god overensstemmelse imellem formen af Eurocode 2's foreslåede arbejdskurve og de målte arbejdskurver former.



Figur 3.1. Normerede arbejdskurver mod teoretiske arbejdskurver.

Det skal dog påpeges at Eurocode's formel (3.1) reelt antager et $E_0/f_c = 1000$, hvilket ikke stemmer med virkeligheden. Det er derfor mere korrekt at anvende en styrkeafhængighed af elasticitetsmodulet som specificeret i (3.2) og så sætte $n = 2$ og $\varepsilon_c = 2$ o/oo i beregningen af de uarmerede vægges bæreevner.

Det mest korrekte er dog at beskrive arbejdskurven som EC2 foreskriver den

$$\sigma / f_c = \frac{k(\varepsilon / \varepsilon_c) - (\varepsilon / \varepsilon_c)^2}{1 + (k - 2)(\varepsilon / \varepsilon_c)} \quad (3.3)$$

som med $k=2$ og

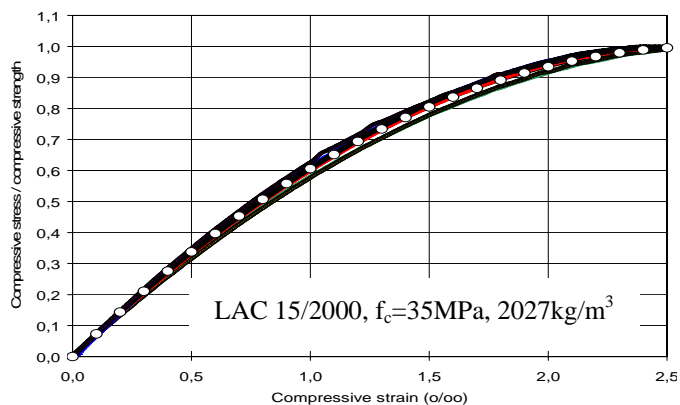
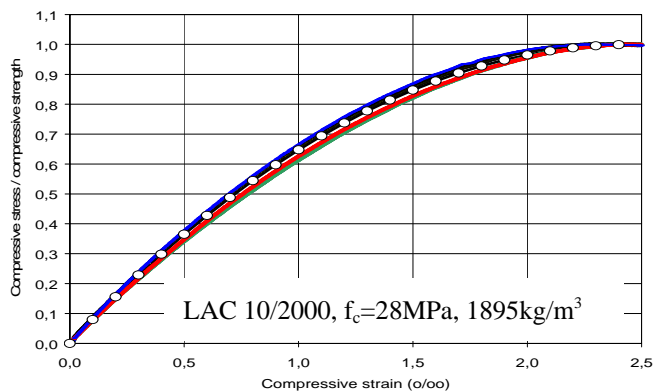
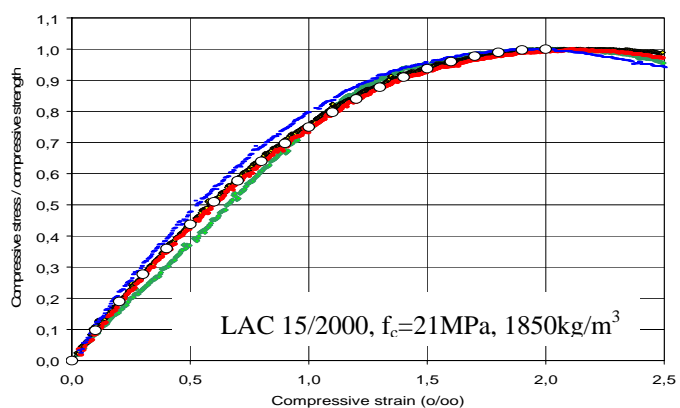
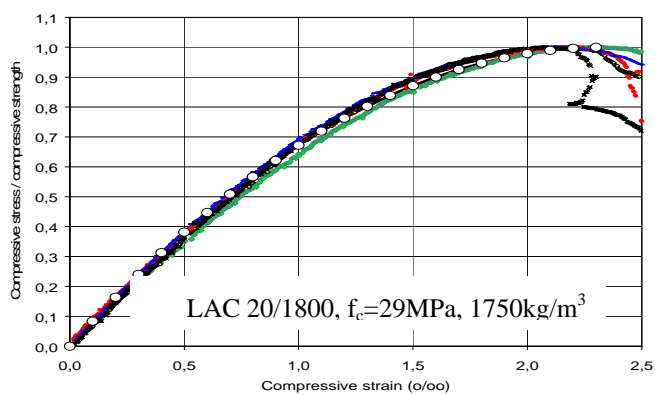
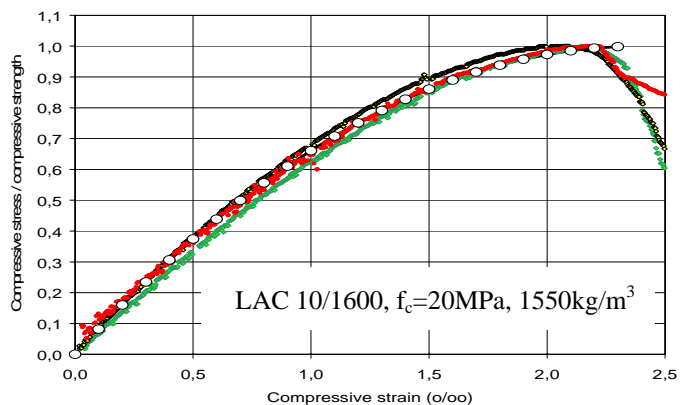
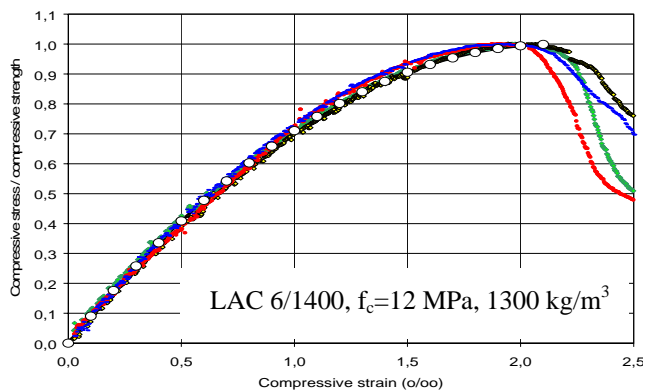
$$\varepsilon_c = 2f_c / E_0 \quad (3.4)$$

leder til

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right) \quad (3.5)$$

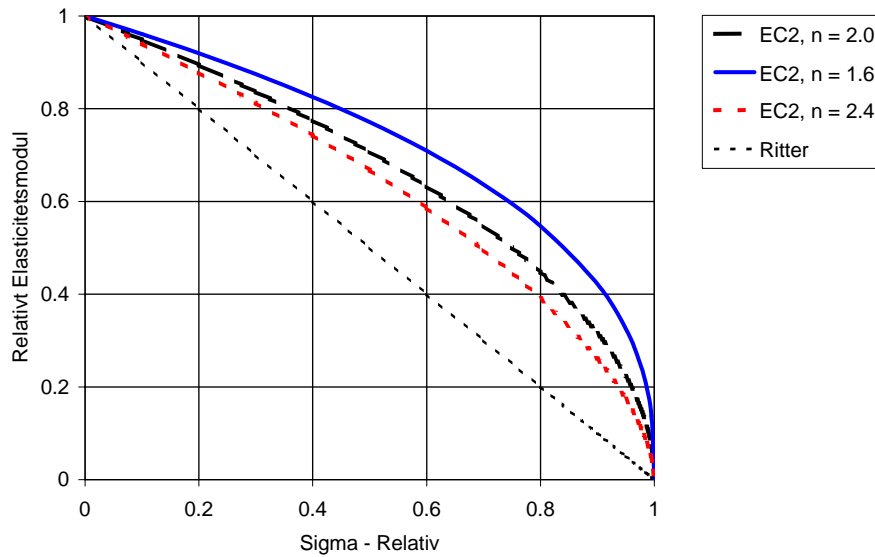
Denne funktion vil stemme godt overens med de målte arbejdskurver ($E_0=E_{cm}$) ved spændinger, således som det ses på figur 3.2 (hvor E_0 er sat til initialhældningen af arbejdskurven). Den gode overensstemmelse skyldes at der anvendes parametre (f_c og E_{cm}/f_c) som måles og som varierer for letklinkerbetonen. Kurvens form er i overensstemmelse med reglerne i EC2. Vi finder heraf at

$$E = E_0 \cdot \sqrt{1 - \sigma / f_c} \quad (3.6)$$



Figur 3.2. Målte arbejdskurver for 6 forskellige letklinkerbetoner fra tidligere undersøgelser /29,30,31/ og tilhørende arbejdskurve iflg. (3.5) markeret med fuldt optrukket kurve med ovale, hvide markører.

Den resulterende variation af det relative elasticitetsmodul med trykstyrken er vist på figur 3.3 nedenfor og stemmer overens med den variation, der findes i Beton-Bogen, figur 3.2-15 /8/. Formlen (3.6) svarer til kurven for EC2, $n=2,0$ på figur 3.2.



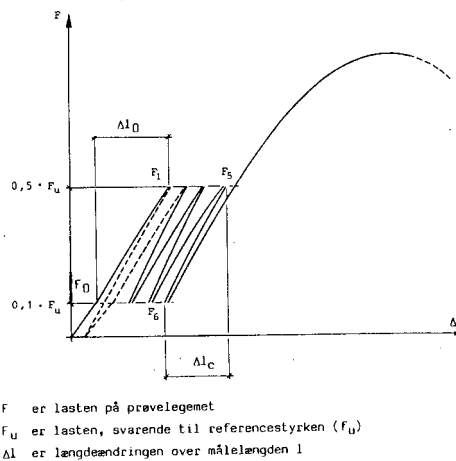
Figur 3.3. Variation af elasticitetsmodulet som funktion af lastniveauet.

3.2 Bestemmelse af middelelasticitetsmodulet

Middelelasticitetsmodulet kan fastlægges og deklarerer på basis af testning af sekantelasticitetsmodulet, eller det kan beregnes ud fra den karakteristiske trykstyrke og middeldensiteten (ρ).

3.2.1 Testning af materialeparametre

Materialeteststandarderne i DS434-serien stemmer rimeligt overens med metoderne i DS/EN-serien og der er ved indførelsen af disse i 2003 ikke konstanteret signifikante ændringer i de målte værdier.



Figur 3.4. Stiliseret belastningsforløb iflg. DS 434.5.

Teststandarderne DS 434.5 /12/, DS 423.25 /11/ og EN 1352 /13/ anvender alle samme type belastningsforløb, hvor sekantelasticitetsmodulet måles imellem σ_{mix} og σ_{max} ved tredje lastcyklus. Dette svarer reelt til elasticitetsmodulet ved det gennemsnitlige spændingsniveau $\sigma = (\sigma_{\text{min}} + \sigma_{\text{max}}) / 2$ under testningen.

Dette er en værdi, der ligger under begyndelseselasticitetmodulet E_0 iflg. både Ritter og Eurocode 2. Dette har en indflydelse på forholdet imellem E_0 , som indgår i den teoretiske model og det sekantelasticitetsmodul, der måles eksperimentelt (E_{exp}).

| Test standard | σ_{min} | σ_{max} |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| DS 434.5 | $0.1 \cdot f_c$ | $0.50 \cdot f_c$ |
| EN 1352 | $0.05 \cdot f_c$ | $0.33 \cdot f_c$ |
| DS 423.25 | 0.5 MPa | $0.4 \cdot f_c$ |

Tabel 1. Lastniveauer ved måling af elasticitetsmodulet.

3.2.2 Beregning af elasticitetsmodulet

Formlerne for elasticitetsmodulet i DS/EN 1520 svarer til DS 420:2003. Middel-elasticitetsmodulet kan derfor beregnes som:

$$E_{cm} = 10000 \cdot f_{cg}^{1/3} \cdot \eta_2 \quad (3.7)$$

hvor koefficienten η_2 beregnes som

$$\eta_2 = (\rho / 2200)^2 \quad \text{for } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (3.8a)$$

$$\eta_2 = (14 / 22) \cdot (\rho / 2200) \quad \text{for } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (3.8b)$$

Dette leder til en konservativ vurdering af elasticitetsmodulet, idet der for væg-lementer ved indsættelse af middeltrykstyrken beregnes en værdi af E_{cm} på ca. 86 % af den korrekte middelværdi /7,24,25/. Indsættes den karakteristiske styrke på typisk max. 75 % af middeltrykstyrken, findes der et endnu lavere estimat af elasticitetsmodulet på 75-80 % af det korrekte elasticitetsmodul.

Den karakteristiske værdi af elasticitetsmodulet ligger for en 5%-fraktil ca. 1.645 gange variationskoefficienten under middelværdien. Da den normale variationskoefficient er 10 % /7/, vil den karakteristiske værdi derfor ligge på 80-85 % af middelværdien, altså højere end den estimerede værdi.

I Eurocode 2 anvendes der en middelværdi af sekantelasticitetsmodulet E_{cm} , ligesom der anvendes nominelle tværsnitsdimensioner ved beregning af stabilitetsbæreevnen, der typisk indgår i vurderingen af 2. ordens effekterne.

Den anvendte fastlæggelse af middelværdien af sekantelasticitetsmodulet er derfor mere konservativ end Eurocode 2's almindelige principper. Formlen svarer dog nogenlunde til den formel, der angives i Eurocode 2 og skal derfor ikke umiddelbart ændres.

Eurocode 2 (afsnit 3.1.7) og DS 420 åbner dog også mulighed for at udføre beregninger med betonens aktuelle arbejdskurve eller den arbejdskurve, der specificeres i den pågældende norm. Denne mulighed vil blive overvejet i det efterfølgende.

4. Alternative beregningsformler

I det nedenstående er der angivet eller udledt enkelte alternative formler.

4.1 Excentrisk belastet væg iflg. Eurocode 2, afsnit 12.6.1

Dette afsnit i Eurocode 2 angiver bæreevnen som

$$N_c = \eta \cdot f_c \cdot b \cdot (t - 2e_t) \quad (4.1)$$

hvor η sættes til 1.0.

Det bemærkes at denne formel ikke tager hensyn til andenordens effekter eller til elementets slankhed, således at N_c reelt kan overstige stabilitetslasten.

4.2 Excentrisk belastet væg med Eurocode arbejdskurve

Anvendes der metode som i den nuværende Ritter-formel, blot med Eurocode 2's arbejdskurveformel (3.2), så finder vi for en centralt belastet væg at bæreevnen N_{uc} kan beregnes som

$$N_{uc} = N_{eu} \quad (4.2)$$

hvilket leder til

$$N_{uc} = b \cdot t \cdot \sigma = E(\sigma) \cdot I \cdot (\pi/l_s)^2 = E_o \cdot \sqrt{1 - \sigma/f_c} \cdot \frac{1}{12} \cdot b \cdot t^3 \cdot (\pi/l_s)^2 \quad (4.3)$$

For enkeltheden indføres nu

$$K_c = 12 \cdot \frac{f_c}{E_o \cdot \pi^2} \cdot (l_s/t)^2 \quad (4.4)$$

og ved indsættelse og noget omflytning findes

$$K_c \cdot (\sigma/f_c) = \sqrt{1 - \sigma/f_c} \quad (4.5)$$

Ved indsættelse findes

$$\sigma/f_c = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K_c^2}}{2 \cdot K_c^2} \quad (4.6)$$

og

$$N_{uc} = b \cdot t \cdot \sigma \quad (4.7)$$

Ved excentrisk belastede vægge anvendes $t - 2e_t$ i stedet for t i formlerne (4.4) og (4.7).

4.3 Urevnede tværsnit i trykzonen taget i regning

Det er en mulighed at udvide den del af tværsnittet, der tages i regning til, at omfatte hele den trykkede zone. I en kort, tyk væg, der belastes med $e/t = 1/6$ er der i virkeligheden således tryk over hele tværsnittet, men til gengæld er der et bøjende moment i væggen tværsnit.

Antages der en lineært elastisk materialemodel, så kan der opstilles enkle beregningsformler /23/ og opnås øgede bæreevner /26/ for uændret elasticitetsmodul. DS/EN 1520 foreskriver dog et lavere elasticitetsmodul ved den lineært elastiske materiale model end DS 420 foreskriver, hvilket vil reducere bæreevnen.

Det bøjende moment fremkalder i øvrigt udbøjninger, som specielt ved langtidlast vil kræve, at krybningen tages i regning for at langtidsudbøjningerne fra den excentriske lodrette last tages med i vurderingen af anden ordens momentet. Dette vil komplicere beregningerne betragteligt og kan medføre at det vil blive langtidsbelastningen der bliver dimensionsgivende (langtidbelastning i letbetonbyggeri er normalt 70-85 % af den dimensionsgivende korttidsbelastning).

4.4 Tværbelastede vægge

Som tidligere nævnt kan spændingerne i tværsnittet med givet maksimalt moment M_T beregnes vha. Naviers formler. Det er også muligt at beregne M_T ud fra første ordensmomentet M_0 som

$$M_T = M_0 \cdot k_m = M_0 + N \cdot w \quad (4.8)$$

$$M_0 = N \cdot (e_0 + e_1) + M_v = N \cdot e_t \quad (4.9)$$

Af disse formler kan man udlede at

$$w = \frac{M_T - M_0}{N} = (k_m - 1) \frac{M_0}{N} = (k_m - 1) \cdot e_t \quad (4.10)$$

hvilket for formlerne i DS420 svarer til

$$w = \frac{M_0}{N_{cr} - N} = \frac{N}{N_{cr} - N} \cdot e_t \quad (4.11)$$

En mere generel beregning af udbøjningen på midten (w) kan foretages som

$$w = k \cdot \frac{M_T}{EI} \cdot l^2 \quad (4.12)$$

hvor faktoren k er $1/8$ ved konstant moment, $1/\pi^2$ ved et parabolisk eller sinusformet moment, $1/12$ ved en trekantet momentfordeling osv. Indsættes dette udtryk for w in formlen for M_T , så kan der udledes at

$$k_m = \frac{1}{1 - N \cdot k \cdot \frac{L^2}{EI}} \quad (4.13)$$

I tilfældet med jævn fordelt vindlast finder vi typisk en parabolisk varierende momentkurve, ligesom udbøjningen som skyldes den excentriske normallast giver en sinus-formet momentkurve så k_m kan skrives som

$$k_m = \frac{1}{1 - (\pi^2 \cdot k) \cdot \frac{N}{N_B}} = \frac{N_B}{N_B - (\pi^2 \cdot k) \cdot N} \quad (4.14)$$

hvor N_B er stabilitetslasten (Euler-lasten), givet som

$$N_B = EI \cdot \left(\frac{\pi}{l_s} \right)^2 \quad (4.15)$$

Dette svarer til beregningerne i Eurocode 2, afsnit 5.8.7.3, som i øvrigt påpeger at der skal tages hensyn til effekterne af krybning, armering og revner i beregningen af N_B . Eurocode 2 tager ikke i sine formler hensyn til arbejdskurvens ulinearitet, men har dog andetsteds en angivelse af formen på den ulineære arbejdskurve.

Formlen (4.14) for k_m svarer meget til den formel, som tidligere (2.14) er vist for DS420's Navier-formel, idet DS 420 dog anvender N_{cr} i stedet for, da dette er mere konservativt, omend der ikke regnes med en større mængde revner i tværsnittet.

Er der derimod tale om en væsentlig lodret last, så skal der skelnes mere imellem de forskellige bidrag til udbøjningerne, der således bliver

$$w = \left(\frac{\pi^2}{8} \cdot N(e_0 + e_1) + M_y \right) / (N_B - N) \quad (4.16)$$

Tages der hensyn til betonens ulineære arbejdskurve, så kan det gøres ved at indsætte

$$E = E_0 \cdot \text{funktion}(\sigma / f_c) \quad (4.17)$$

som kommer ind i formlerne via indsættelse i formelen for N_B . Anvender vi har de forskellige udtryk for E-modulens afhængighed af spændingen, som er præsenterede i kapitel 3, så finder vi forskellige udtryk som er vist i det efterfølgende.

Ved sammenligning med korttidsforsøg vil der blive forsøgt at give den bedst mulige estimering af forsøgene, men ved projektering af et byggeri, skal man også vurdere effekterne af langtidsforholdene, som fx. krybning og revner i den del af tværsnittet, som er permanent i træk.

Dette kan gøres ved kun at medtage den del af tværsnittet, der er symmetrisk om den samlede lodrette last i den midterste 3-del (foreskrevet af DS 420) eller 5-del (foreskrevet i DS411 og Eurocode 2) af elementet.

Den samlede lodrette last er den ydre last plus 50 % af elementets egenvægt.

Ritter materiale, fuldt tværsnit

$$E = E_0(1 - \sigma / f_c) \quad (4.18)$$

$$k_m = \frac{1 - N / N_{pl}}{1 - N / N_{pl} - (\pi^2 \cdot k) \cdot N / N_{B0}} \quad (4.19)$$

$$w = \left(\frac{\pi^2}{8} \cdot N(e_0 + e_1) + M_y \right) / (N_{B0}(1 - N / N_{pl}) - N) \quad (4.20)$$

hvor

$$N_{B0} = E_0 I \left(\frac{\pi}{l_s} \right)^2 = \frac{1}{12} E_o b t^3 \left(\frac{\pi}{l_s} \right)^2 \quad (4.21)$$

$$N_{pl} = A \cdot f_c = b t \cdot f_c \quad (4.22)$$

Eurocode 2 materiale, fuldt tværsnit

$$E = E_0 \cdot \sqrt{1 - \sigma / f_c} \quad (4.23)$$

$$k_m = \frac{\sqrt{1 - N / N_{pl}}}{\sqrt{1 - N / N_{pl} - (\pi^2 \cdot k) \cdot N / N_{B0}}} \quad (4.24)$$

$$w = \left(\frac{\pi^2}{8} \cdot N(e_0 + e_1) + M_y \right) / (N_{B0} \sqrt{1 - N / N_{pl}} - N) \quad (4.25)$$

5. Eksperimentelle data for uarmerede vægge

I CEN-systemet kræves der et niveau 2⁺ for attestation af overensstemmelse. Dette indebærer en indledende typeprøvning, svarende til hvad der er blevet brugt i Danmark i over 40 år og der ligger derfor en del materiale for lodret, excentrisk belastede vægge.

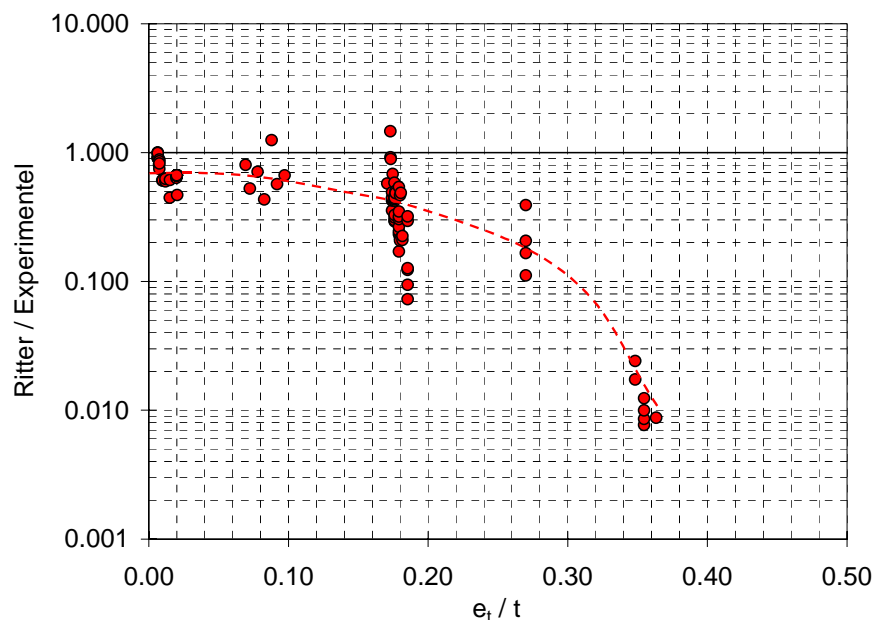
5.1 Testmetoder ved fuldskalaprøvning

Typeprøvningerne omfatter testning af lodret bæreevne af uarmerede elementer med excentrisk last iflg. DS/EN 1740 /15/ og testning af de relevante materialeparametre.

Testning før 2003 blev gennemført efter testmetoderne i DS 434-serien. Fuldskalatestningen efter DS 434.21 /14/ svarer til testning efter DS/EN 1740, idet denne testmetode er baseret på danske erfaringer.

5.2 Data fra litteraturen og ældre typeprøvningsresultater

I forbindelse med CEN-standardiseringen blev der samlet en række ældre forsøgsresultater sammen /26, 3/ som viste at DS420's Ritter-formel (1)-(3) var særdeles konservativ.



Figur 5.1. Vurdering af DS420's Ritter formel imod ældre resultater /26/.

I figur 5.1 skal det erindres at excentriciteten i praksis altid vil være mindst 10-15 % af væggenes tykkelse, og det ses at den beregnede bæreevne ved $e/t = 1/6$ er ca. 50 % af den eksperimentelle bæreevne.

Baggrundsdata fra denne undersøgelse /26/, stammer fra publikationerne /16, 17, 18, 19, 20, 21, 22/. Tallene gengives ikke i denne rapport.

5.3 Nye typeprøvninger

I forbindelse med re-certificeringen iht. DS420:2003 blev der i 2004 gennemført en række typeprøvninger af de danskproducerede, uarmerede letklinkerbetonelementer. Der er i løbet af perioden 1995-2004 desuden foretaget en række typeprøvninger på elementer fra enkelte andre danske produktioner.

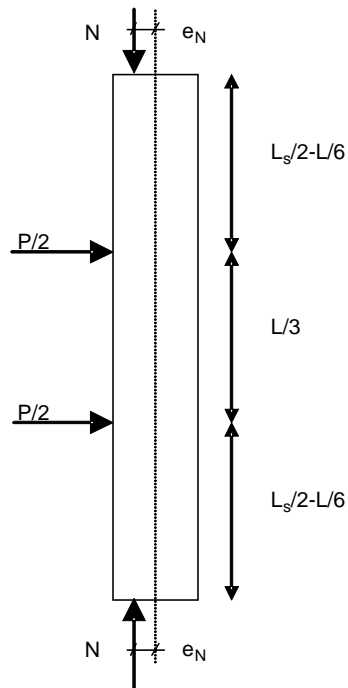
Resultaterne af disse prøvninger er angivet i Annex A.

5.4 Forsøg med lodret og vandret belastede vægge.

I fase 2 skal der opstilles en eksperimentel dokumentation for Navier-formlen, dvs. for brugen af bøjningstrækstyrken.

Dette gøres ved at lave forsøg med 3 typer vægelementer med repræsentative densiteter og styrker, typisk med tykkelser på 100 mm og højder (L) på 2330 mm. For hver type produceres der 9-12 elementer med en bredde på 500 mm.

Alle elementerne der belastes med en lodret last N, har en lastexcentricitet $e_N = 20 \text{ mm} = t/5$. De elementer, der udsættes for både lodret last (N) og tværlast (P) som vist på figur 5.2 har en lastexcentricitet e_N som varierer imellem ca. 15 og 25 mm, svarende til $t/7$ til $t/5$. Elementerne er simpelt understøttede i enderne med en afstand L_s imellem understøtningspunkterne.



Figur 5.2. Belastningsarrangement.

Under forsøgene påføres der først en mindre last N_1 (ca. svarende til 10 % af den beregnede Ritter-bæreevne), hvorefter den fulde tværlast P påføres. Herefter øges N i trin til brud ved N_{\max} . I samtlige vægforsøg registreres elementernes geometri og arbejdskurven opmåles (udbøjning), ligesom revnelasten (N_{revne}) og brudlasten (N_{ult}) registreres. Der måles densitet og fugt i alle elementer.

Der produceres desuden to ekstra vægelementer til at skære prøver ud af til at måle trykstyrke, bøjningstrækstyrke, elasticitetsmodul, densitet og fugtindhold på.

Resultaterne er angivet i annex B.

Der er senere udført en række ekstra forsøg i BIH-regi som angivet i annex C med en større tværlast, men til gengæld med en lastexcentricitet, der varierede.

Der blev også udført en række forsøg på BYG•DTU/32/ som er angivet i annex D med en anden excentricitet og en tværlast, der var placeret i de to fjerdedelspunkter.

6. Sammenligninger

6.1 Lodret belastede elementer

De indsamlede data kan vurderes ved at plote forholdet imellem fx. beregnet bæreevne og eksperimentel bæreevne imod excentriciteterne. I det efterfølgende benyttes forkortelserne:

| | |
|---------------------|--|
| N_{exp} | Experimentelt målt bæreevne. |
| N_{EC2} | Beregnet bæreevne iflg. Eurocode 2's arbejdskurve (9) og anvendelse af formlerne i afsnit 4.2. |
| N_{Ritter} | Beregnet bæreevne iflg. DS 420's Ritter formel. |

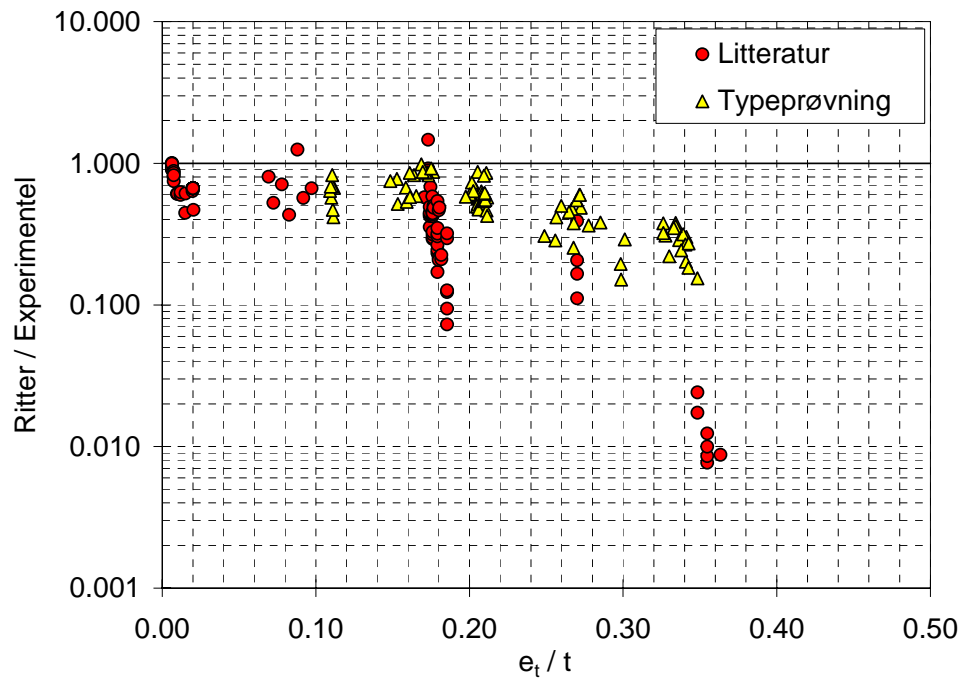
Der bruges i disse vurderinger udelukkende beregnede elasticitetsmoduler, idet ikke alle forsøgsprogrammer har bestemt elasticitetsmodulerne eksperimentelt.

På figur 6.1 bekræfter sammenligningen imellem eksperimentel bæreevne og beregnet bæreevne iflg. DS420 at bæreevneberegningen er konservativ og at konservatismen vokser med voksende excentricitet.

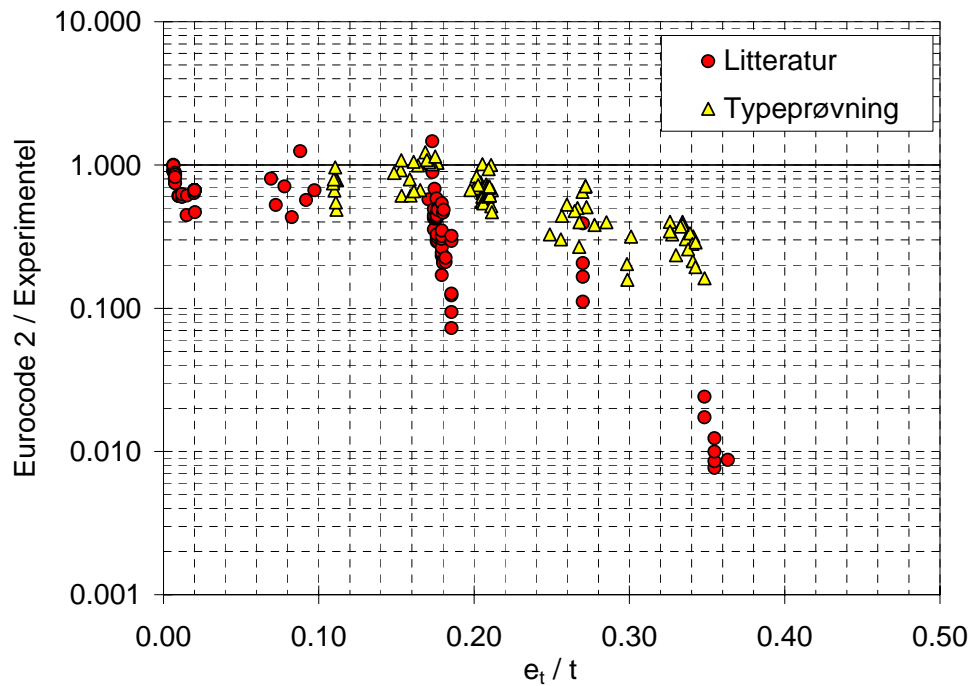
Det ses, at der er mindre spredning på de nye typeprøvningsresultater end der var på de ældre data fra litteraturen, hvilket bl.a. kan skyldes, at de ældre tal også omfatter forsøgsresultater fra andre letbetontyper.

Skiftes modelleringen af arbejdskurven ud fra Ritters model (5) til Eurocode 2's model (9) så stiger bæreevnen med 5 - 25 % som vist på figur 6.2.

Formlerne er i alle tre tilfælde konservative, hvilket nok primært skyldes, at kun den centralt belastede del af tværsnittet tages i regning.



Figur 6.1. N_{Ritter} / N_{exp} versus excentricitet e_t/t .

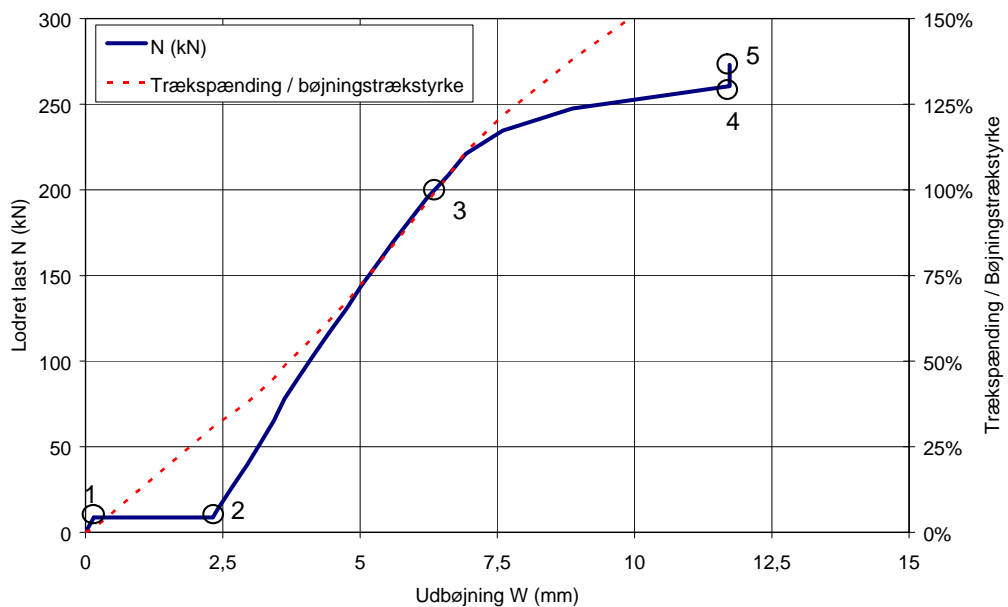


Figur 6.2. N_{EC2} / N_p versus excentricitet e_t/t .

6.2 Lodret og vandret belastede elementer

Ved beregning af lodret og vandret belastede elementer er det af stor betydning at fastlægge udbøjningen rimelig korrekt, da den er ansvarlig for den såkaldte 2.ordens effekt.

Ved forsøgene er der først påført en mindre last (N_1) som giver en beskeden udbøjning (W_{N1}). Derefter monteres måleudstyret for den videre registrering af deformationerne og der påføres en vandret last (P), hvorefter den lodrette last øges i trin til brud (N_{max}). Den resulterende, typiske arbejdskurve for et element ses på figur 6.3 hvor den målte deformation er korrigeret med de estimerede initialdeformation W_{N1} som opstår før deformationsmålingerne starter.



Figur 6.3. Arbejdskurve for element EX-7.

Punkt:

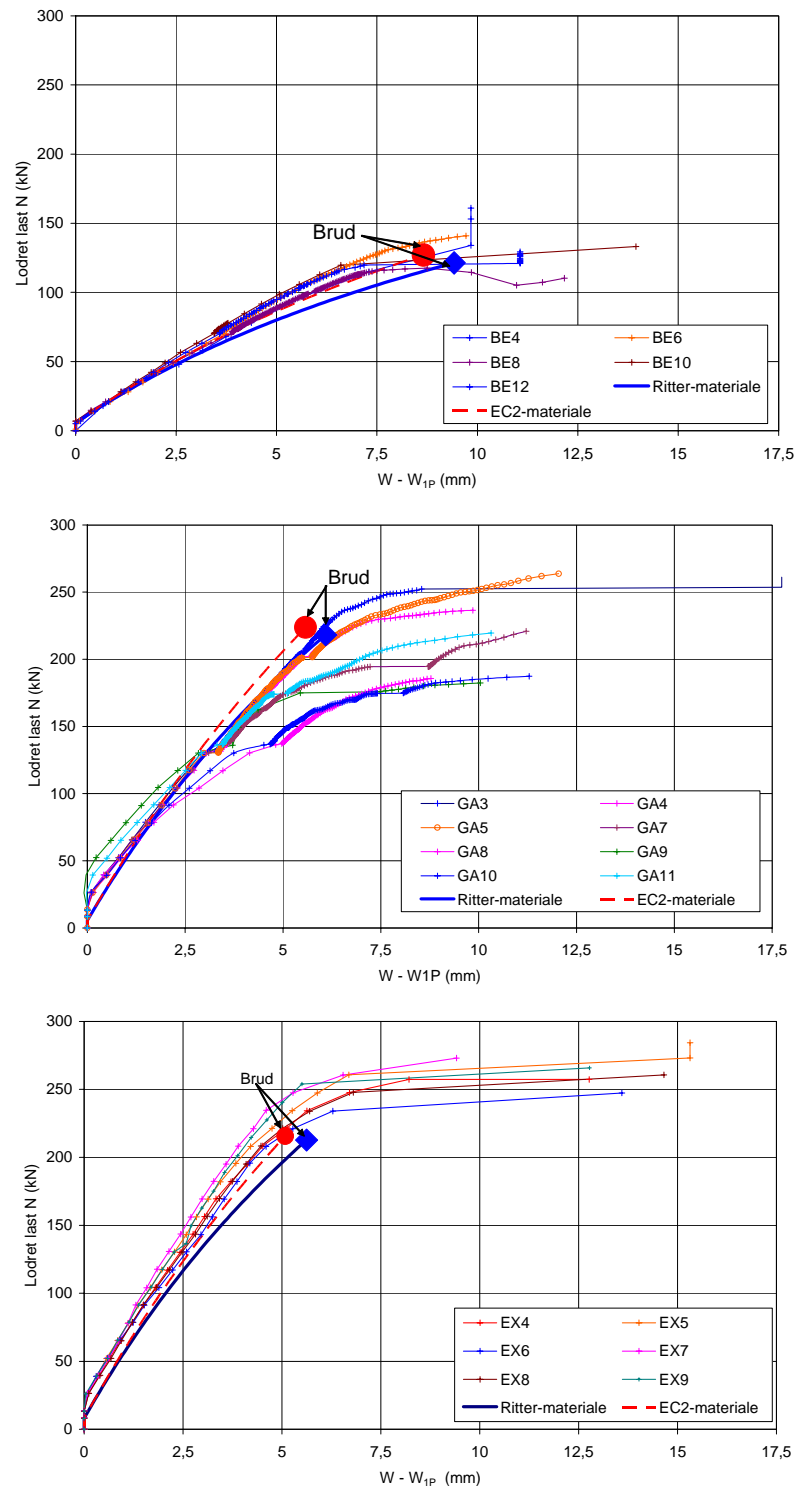
1. Der er påført den første lodrette last N_1 og deformationsmålerne monteres. Deformationen estimeres elastisk til W_{N1} .
2. Der er påført den vandrette last P , hvorefter den lodrette last N kan øges. Den samlede deformation er nu W_{1P} .
3. Trækspændingerne i elementet overstiger trækstyrken for elementserien og tværsnittet begynder at revne og elementets stivhed falder
4. Deformationsmålerne fjernes (for ikke at gå itu ved brud) og den lodrette last øges
5. Der opnås brud i elementet

Arbejdskurverne er tegnet op på figur 6.4 for alle 3 serier af forsøg, sammen med beregnede arbejdskurver for E-moduls variation svarende til Ritter's materiale model og svarende til Eurocode 2-materialemodellen. De beregnede kurver går kun op til den last, hvor trækspændingen når op på trækstyrken iflg. de teoretiske estimeringer.

Beregnes trækspændingerne i det kritiske snit i elementet (midten) ud fra de målte deformationer, lodrette og vandrette laste, så kan det konstanteres at trækspændingen er lige omkring 100 % af bøjningstrækstyrken, når elementernes stivhed falder på figur 6.4. Det er også interessant at observere at der er bæreevne tilbage efter at de første revner må være opstået, men det skal dog pointeres at disse revner er meget svære at observere visuelt.

Dette var et generelt træk ved alle elementer i BE og EX serierne, mens elementerne i GA-serien fik væsentlig større deformationer, muligvis fordi de var støbt med frosne tilslag (selvom dette dog ikke har givet anledning til større variationer i de testede materialeparametre).

Til brug i praksis, skal man dog også overveje andre modeller end de, der stemmer godt overens med resultaterne fra korttidsforsøgene, idet der skal tages hensyn til fx. krybning og revnedannelse, således som det tidligere er forklaret i kapitel 2 og 4.



Figur 6.4. Experimentelle og beregnede arbejdskurver og bæreevner iflg. Ritter-materialemodellen og efter Eurocode 2-modellen for BE-serien (øverst), GA-serien (midten) og EX-serien (nederst).

Der er i figur 6.5 vist et N-P diagram for hver forsøgsserie med angivelse af kurver for følgende teoretiske modeller:

1. Navier-Ritter modellen
2. Model med Ritter-materiale og fuldt tværsnit
3. Model med Eurocode 2-materiale og fuldt tværsnit

samt angivelse af den gennemsnitlige, eksperimentelle bæreevne i de 3 serier.

Til brug i design skal de påpeges at både Navier-Ritter modellen (1) og modellerne (4) og (5) med hhv. Ritter og Eurocode 2 materiale modellen og tværsnit symmetrisk om den lodrette last giver konservative værdier. Ved beregningerne af diagrammerne i figur 6.5 er der benyttet $k=1/\pi^2$ for enkelthedens skyld, fordi at førsteordensudbøjningerne er lig med 0 pga det reducerede tværsnit og fordi det bliver gjort i en række normer og standarder for at forenkle tingene.

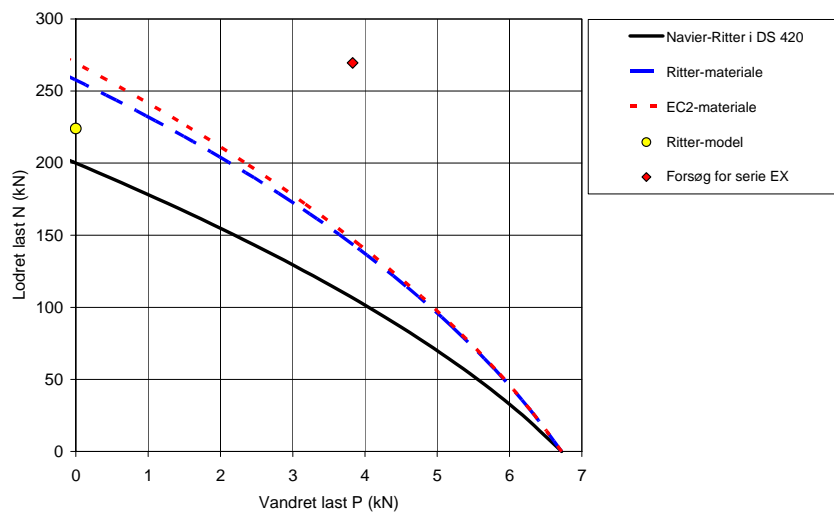
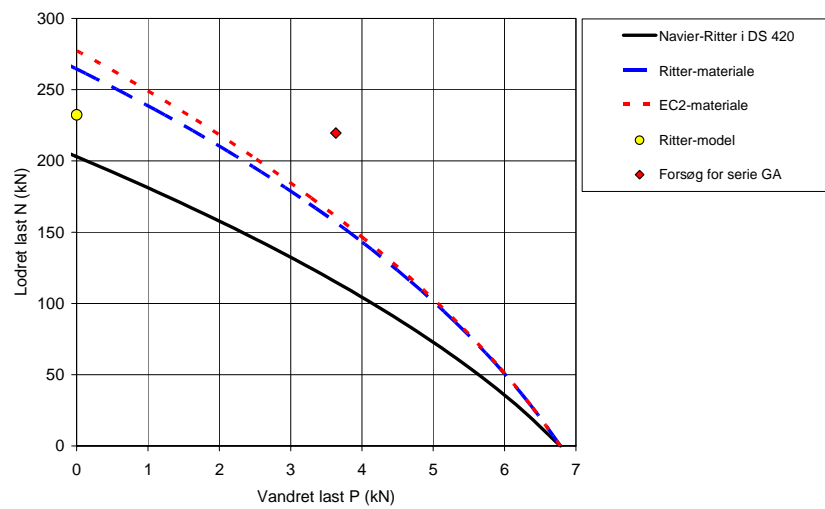
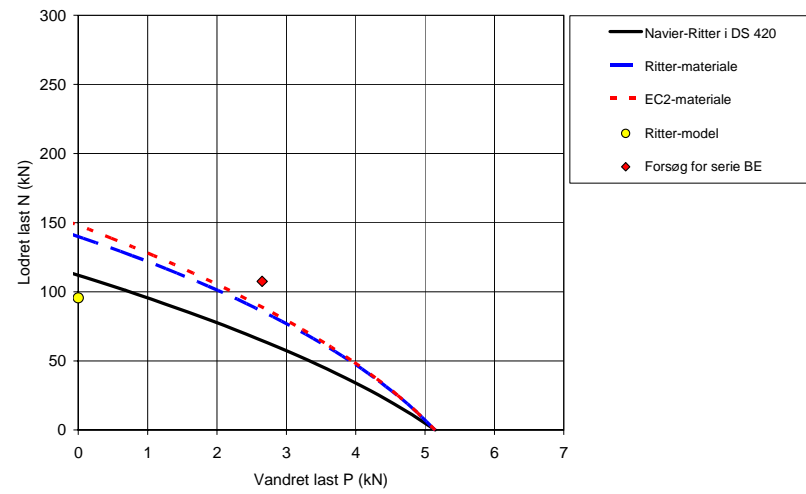
Modellen med Eurocode-2 materialet giver som forventet altid samme eller højere bæreevne som modellen med Ritter-materialet, men det varierer noget om disse modeller giver højere eller lavere bæreevner end den traditionelle Navier-Ritter model.

Der skal her gøres opmærksom på at modellernes bæreevner er særdeles følsomme overfor variationer i excentriciteterne og at der ved forskellige excentriciteter for den lodrette last kan være forskelle på hvilken af modellerne (1), (4) og (5), der giver den største bæreevne.

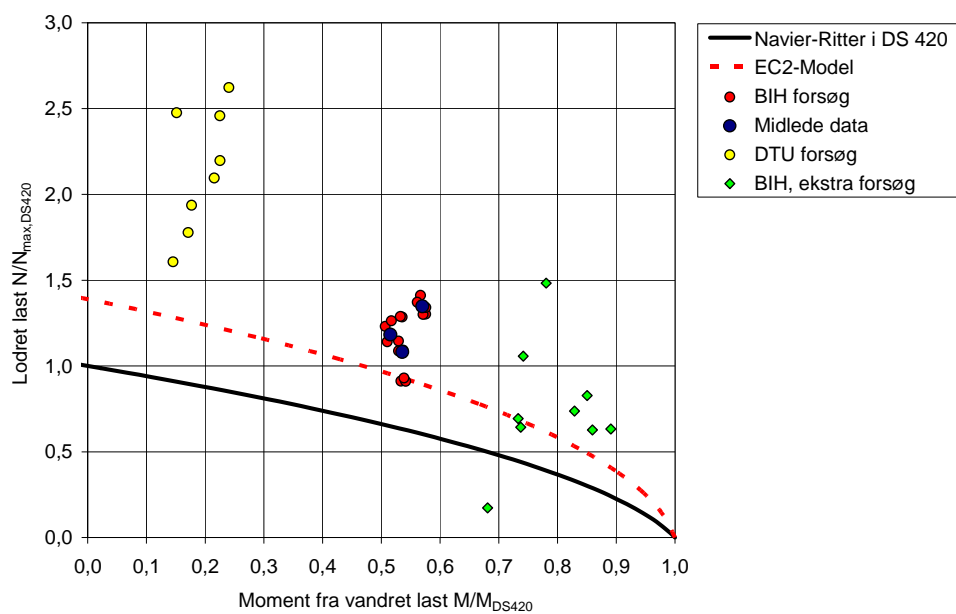
Ved optegningen af diagrammerne i figur 6.5 er der ikke taget hensyn til egenlastens bidrag til N. Dette vil man nok gøre i praksis, hvilket gør at bæreevnen overfor ren vandret last vil vokse, da der i et element med ren egenlast kan regnes med tryk over hele tværsnittet. Dette har dog kun betydning ved meget lave lodrette laste, nærmest kun ved rene udfyldningsvægge.

På figur 6.6 er de individuelle bæreevner sammenlignet med de estimerede bæreevner, ligesom der er optegnet kurver for de mulige bæreevner iht. DS 420 og iht. bæreevneberegningen med Eurocode 2 materiale modellen, beregnet med en lodret lastexcentricitet på $e=20\text{mm}$. Figur 6.6 viser at de anvendte beregningsmodeller er konservative, men viser også at der er en variation i sikkerheden ved lave lodrette laste.

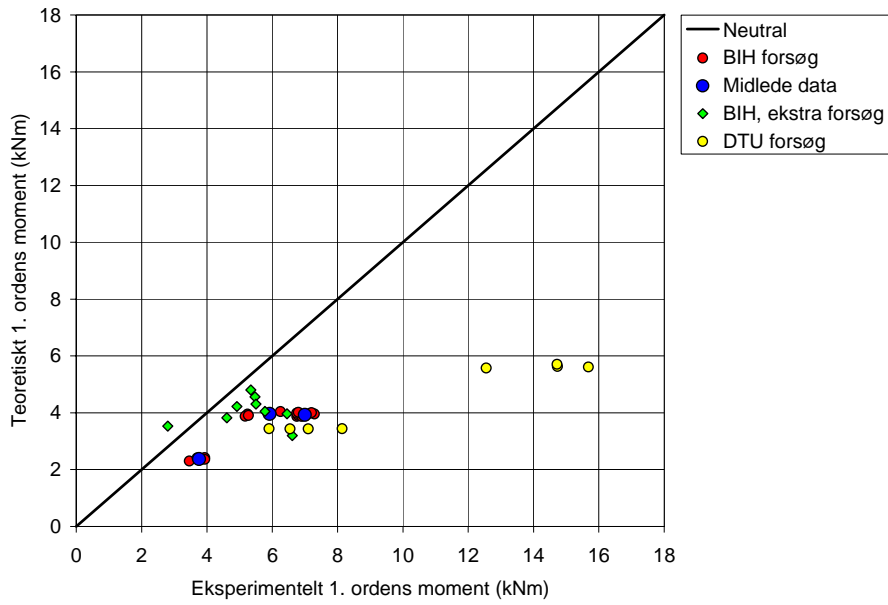
For bedre at illustrere konservatismen i beregningerne er de eksperimentelle 1. ordens momenter på figur 6.7 sammenlignet med de teoretiske 1. ordens momenter. Disse er beregnede ved de excentriciteter, der forekom ved forsøgene, dvs. summen af bidragene fra den lodrette og vandrette last.



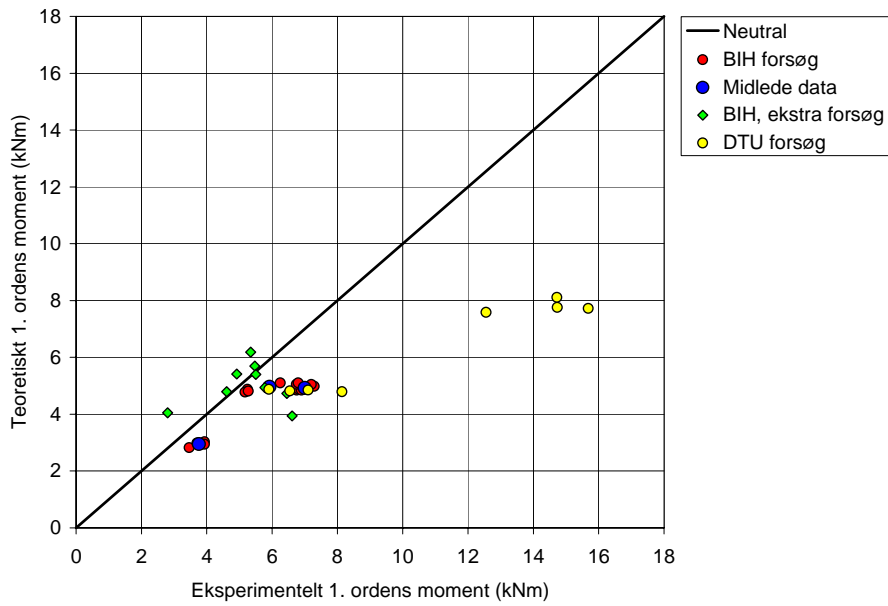
Figur 6.5. Beregnede N-P diagrammer for de midlede resultater i BE-serien (øverst), GA-serien (midten) og EX-serien (nederst).



Figur 6.6 Experimentelle bæreevner divideret med beregnede bæreevner iflg Navier-Ritter formlerne i DS 420.



Figur 6.7. Experimentelle og teoretiske 1. ordens momenterne iflg. DS 420's Navier-Ritter formler.



Figur 6.8. Experimentelle og teoretiske 1. ordens momenterne iflg. EC2-modellen.

7. Konklusioner

Lodret belastede elementer

De fremsendte typeprøvningsresultater fra Give, Expan, Betonelement, Leth Beton og Gandrup er vurderet i rapporten og bekræfter Ritter-formlens konservatisme.

Ritter-formlens udledning antager en variation af elasticitetsmodulet, der betyder at begyndelseselasticitetsmodulet må forventes at være 70 – 80 % af sekantelasticitetsmodulet. Der er desuden foretaget en vurdering af de estimerede elasticitetsmoduler, som viser, at disse er konservativt fastlagte sekantelasticitetsmoduler (estimat ca. 86 % af korrekt værdi). Dette bidrager til Ritter-modellens konservatisme.

Sammenlignes tidligere målte arbejdskurver for letklinkerbeton, så ses det at der kan overvejes en ændret arbejdskurve (baseret på Eurocode 2 i stedet for Ritter's model for E-modul som funktion af spænding) og man kan komme frem til en alternativ formel for bæreevnen af et excentrisk, lodret belastet vægelement, som øger bæreevnen 5-25 %.

En meget stor del af Ritter formlens konservatisme stammer fra at en del af trykzonen i tværsnittet ignoreres – nemlig den del der er i tryk, men ikke ligger centralt placeret om den lodrette last. Ønskes dette bidrag taget i regning, skal man dog også vurdere effekterne af krybning på anden-ordens effekten og effekten af revnedannelse, hvilket kan blive ganske kompliceret.

Lodret og vandret belastede elementer

De gennemførte forsøg i fase 2 viste af Navier-Ritter formlen var konservativ,. Dette skyldes specielt at anden-ordens effekterne bliver taget i regning flere gange, hvilket klart leder til en øget konservatisme.

De nye modeller som tager hele tværsnittet i regning og som anvender Ritter's eller Eurocode 2's E-moduls variation gav en god overensstemmelse med forsøgene, selvom arbejdskurvernes form og bestemmelse af trækspændinger viste at der er bæreevne tilbage efter at elementerne begynder at udvikle revner.

Anbefalinger

Det anbefales klart at udskifte Ritter's model for E-modulets variation med spændingen med en model baseret på Eurocode 2. Dette vil i alle tilfælde give en øget bæreevne, da E-modulet altid vil blive estimeret til samme eller højere værdi end efter Ritter's model.

Det anbefales klart at excentriciteten skal vurderes i den midterste 5.del af elementet i stedet for den midterste 3.del. Dette vil øge bæreevnen noget og give en bedre overensstemmelse med den traditionelle betonteori.

Det nuværende forsøgsmateriale dækker tværbelastninger på op til 80-90 % af den tværbelastning som væggene kan bære ved lave lodrette laste iflg. den traditionelle Navier-model. Man kan derfor overveje at udskifte den traditionelle Navier-model med den nye model, baseret på Eurocode 2's materialemodel.

8. Referencer

1. DS 420.2:1977 "Dansk Ingeniørforenings norm for letbeton, bærende vægelementer", 1. udgave, juli 1977.
2. NA 15.3:1977 "Kommentarer til Dansk Ingeniørforenings norm for letbeton bærende vægelementer", september 1977.
3. Goltermann, P.: "Helvægge af letklinkerbeton. Udvikling, erfaring og sikkerhed vedrørende dimensionering af uarmerede vægelementer", BIH, Hæfte 8, Oktober 2003.
4. EN 1520:2002 "Præfabrikerede armerede elementer af letklinkerbeton med åben struktur, 2002.
5. DS420:2003 "Norm for letbetonkonstruktioner af letbetonelementer", Dansk Standard, August 2003.
6. DS420, Ret. 1: 2004 "Rettelsesblad nr. 1 til Norm for letbetonkonstruktioner af letbetonelementer", Dansk Standard, September 2004. 1
7. Dalsgaard Sørensen, J. og Goltermann, P.: "Calibration of partial safety factors for EN 1520", Dansk Standard, August 2004.
8. Beton-Bogen, 2.udg. 1985, Aalborg Portland
9. Larsen, H.: "Bestemmelse af arbejdslinier for letklinkerbeton og porebeton", BYG.DTU, August 2002.
10. Eurocode 2: "Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings", December 2003.
11. DS 423.25 "Betonprøvning. hærnet beton. Elasticitetsmodul".
12. DS 434.5 "Bærende elementer af letbeton med porøse tilslag. Elasticitetsmodul".
13. EN 1352 " Bestemmelse af statisk trykelasticitetsmodul for autoklaveret porebeton eller letbeton med porøse tilslag og åben struktur.
14. DS 434.21 "Bærende elementer af letbeton med porøse tilslag. Funktionsprøvning af bjælke- og pladelementer".
15. EN 1740, "Performance test for prefabricated reinforced components made of autoclaved aerated concrete or lightweight aggregate concrete with open structure under predominantly longitudinal load (vertical components)".
16. "Armerede Søjler, Forsøgsrapport", Ingholt Consult, BIH-Basis Håndbog, 1990.
17. "Prøvningsattest, FIBO 75mm", Dantest, BIH-Basis Håndbog, 1987
18. "Laboratorieundersøgelse af kombinationsvægge af Gasbeton. Forsøgsrapport", AEC, 1991
19. A.Efsen and O.Glarbo: "Sammenlignede Gasbetonblokke", Lab. Bygningsteknik (ABK), DTH, 1961
20. A.Efsen and O.Glarbo: "Vægelementer af Gasbeton", Lab. Bygningsteknik (ABK), DTH.

21. S. Ø. Olesen: "Strength of Lightweight Concrete Wall Panels", CEB/FIP-Colloquium on Lightweight Concrete, Copenhagen, 1971.
22. Private communication with Torben Poulsen, 1992.
23. Poulsen, E. og Risager, S.: "The bearing capacity of linear elastic brittle columns", Bygningsstatistiske meddelelser, Nr. 3, 1995.
24. Goltermann, P., Larsen, H. and Ingholt, N.U.: "Strength and Stiffness Relations in Lightweight Aggregate Concrete with Open Structure", Nordic Concrete Research, pp.35-46, No.15, 1994.
25. Goltermann, P.; Larsen, H. og Ingholt, N.U.: "Udredningsarbejde vedr. DS420. Materialeformler og bjælkeformler. Letklinkerbeton. Estimering af elasticitetsmodulet", G. M. Idorn Consult A/S; Institutet for Husbygning, DTU og Ingholt Consult Aps, februar 1996.
26. Goltermann, P.: "Lightweight Concrete Walls and Columns: Determining the Load-carrying Capacity", Nordic Concrete Research, pp.10-26, No.16, 1995.
27. Goltermann, P.: "Vurdering af uarmerede vægges bæreevne. Fase 1. Lodret belastede vægge", RAMBØLL 9 December 2004.
28. Grundvad, M.: "Funktionsprøvning af vægelementer for BIH. Februar – Maj 2006", Rapport og 3 bilag 19.06.2006 fra EXPAN.
29. Larsen, H.: "Bestemmelse af arbejdslinier for letklinkerbeton og porebeton", BYG-DTU, August 2002, Danmarks Tekniske Universitet.
30. Holm, R.W.; Haugaard-Jensen, L.P. og Jensen, H.P.: "Letbetons arbejdslinie" BYG-DTU, juni 2004
31. Wetche, J.A.P. og Kragh-Poulsen, J.-C.: "Letbetons arbejdslinie" juni 2006
32. Jónsson, J.P. og Thorsteinsson, I.: "Load bearing walls of lightweight aggregate concrete with combined axial and transverse loading", BYG•DTU, August 2006.

Annex A. Typeprøvningsresultater

| Nr | L (mm) | t (mm) | b (mm) | l _s (mm) | e _N (mm) | e _p (mm) | N _{exp} (kN) | ρ (kg/m ³) | f _c (Mpa) | E (Mpa) | Brud |
|----|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|------|
| 1 | 3000.0 | 121.9 | 603.8 | 3050.0 | 20.5 | 1 | 355.0 | 1885 | 17.1 | | S |
| 2 | 2999.0 | 122.3 | 598.1 | 3049.0 | 20.1 | 0 | 375.0 | 1859 | 15.4 | | S |
| 3 | 2998.0 | 122.4 | 600.6 | 3048.0 | 21.1 | 0 | 385.0 | 1885 | 18.4 | | S |
| 4 | 3001.0 | 149.9 | 588.2 | 3051.0 | 25.2 | -1 | 625.0 | 1850 | 18.7 | | S |
| 5 | 3000.0 | 151.3 | 601.9 | 3050.0 | 25.7 | 0.5 | 673.0 | 1879 | 20.3 | | S |
| 6 | 3002.0 | 151.4 | 602.6 | 3052.0 | 26.0 | 0 | 664.0 | 1868 | 20.9 | | S |
| 7 | 3000.0 | 201.1 | 600.3 | 3050.0 | 33.9 | 0 | 1000.0 | 1775 | 21.6 | | T |
| 8 | 2999.0 | 200.5 | 601.9 | 3049.0 | 33.0 | 1 | 1158.0 | 1773 | 22.6 | | S |
| 9 | 3001.0 | 201.4 | 601.4 | 3051.0 | 34.3 | 1 | 1000.0 | 1739 | 21.1 | | T |
| 10 | 2330.5 | 102.6 | 501.3 | 2520.1 | 20.0 | 1 | 171.9 | 1362 | 14.0 | 11523 | S |
| 11 | 2332.0 | 102.3 | 498.3 | 2521.6 | 20.0 | 1 | 178.7 | 1352 | 14.0 | 11523 | S |
| 12 | 2330.0 | 102.4 | 501.3 | 2519.6 | 20.0 | 1 | 208.2 | 1363 | 14.0 | 11523 | S |
| 13 | 2352.5 | 102.5 | 500.7 | 2542.1 | 20.0 | 1 | 362.4 | 1652 | 25.4 | 23288 | S |
| 14 | 2351.5 | 102.8 | 502.0 | 2541.1 | 20.0 | 1 | 352.5 | 1942 | 25.4 | 23288 | S |
| 15 | 2351.0 | 102.4 | 501.7 | 2540.6 | 20.0 | 1 | 385.9 | 1944 | 25.4 | 23288 | S |
| 16 | 2358.0 | 100.7 | 498.3 | 2547.3 | 20.0 | 1 | 196.4 | 1436 | 14.4 | 12826 | S |
| 17 | 2345.0 | 101.9 | 498.3 | 2534.6 | 20.0 | 1 | 182.7 | 1420 | 14.4 | 12826 | S |
| 18 | 2336.0 | 101.4 | 499.3 | 2525.6 | 20.0 | 1 | 174.8 | 1406 | 14.4 | 12826 | S |
| 19 | 2324.0 | 100.8 | 500.7 | 2513.6 | 20.0 | 1 | 385.9 | 1916 | 20.2 | 22885 | S |
| 20 | 2325.0 | 102.3 | 501.3 | 2514.6 | 20.0 | 1 | 225.9 | 1895 | 20.2 | 22885 | S |
| 21 | 2317.0 | 102.3 | 500.3 | 2506.6 | 20.0 | 1 | 385.9 | 1908 | 20.2 | 22885 | S |
| 22 | 2344.5 | 101.9 | 500.7 | 2534.1 | 20.0 | 1 | 163.0 | 1317 | 9.0 | 8842 | S |
| 23 | 2349.5 | 101.4 | 500.7 | 2539.1 | 20.0 | 1 | 144.4 | 1310 | 9.0 | 8842 | S |
| 24 | 2347.0 | 102.0 | 500.0 | 2536.6 | 20.0 | 1 | 165.0 | 1313 | 9.0 | 8842 | S |
| 25 | 2348.5 | 101.1 | 501.3 | 2538.1 | 20.0 | 1 | 318.2 | 1919 | 23.1 | 24615 | S |
| 26 | 2332.0 | 100.9 | 499.7 | 2521.6 | 20.0 | 1 | 328.0 | 1904 | 23.1 | 24615 | S |
| 27 | 2329.0 | 100.2 | 500.0 | 2518.6 | 20.0 | 1 | 318.2 | 1913 | 23.1 | 24615 | S |
| 28 | 2329.0 | 100.2 | 499.7 | 2518.6 | 20.0 | 1 | 206.2 | 1472 | 19.3 | 14713 | S |
| 29 | 2332.0 | 100.0 | 500.0 | 2521.6 | 20.0 | 1 | 221.0 | 1490 | 19.3 | 14713 | S |
| 30 | 2334.0 | 99.5 | 498.7 | 2523.6 | 20.0 | 1 | 255.3 | 1491 | 19.3 | 14713 | S |
| 31 | 2345.0 | 99.6 | 499.7 | 2534.6 | 20.0 | 1 | 211.1 | 1989 | 19.2 | 19805 | S |
| 32 | 2320.5 | 99.3 | 501.7 | 2510.1 | 20.0 | 1 | 303.4 | 1928 | 19.2 | 19805 | S |
| 33 | 2329.0 | 100.2 | 497.3 | 2518.6 | 20.0 | 1 | 298.5 | 1933 | 19.2 | 19805 | S |
| 34 | 2328.0 | 100.2 | 501.3 | 2517.6 | 20.0 | 1 | 323.1 | 1896 | 19.2 | 19805 | S |
| 35 | 2330.5 | 100.5 | 500.0 | 2520.1 | 20.0 | 1 | 189.5 | 1392 | 16.0 | 12849 | S |
| 36 | 2328.0 | 100.0 | 501.3 | 2517.6 | 20.0 | 1 | 182.7 | 1381 | 16.0 | 12849 | S |
| 37 | 2334.0 | 99.9 | 500.0 | 2523.6 | 20.0 | 1 | 176.8 | 1355 | 16.0 | 12849 | S |

Tabel A.1a. Typeprøvningsresultater.

| Nr | L (mm) | t (mm) | b (mm) | l _s (mm) | e _N (mm) | e _p (mm) | N _{exp} (kN) | ρ (kg/m ³) | f _c (Mpa) | E (Mpa) | Brud |
|----|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|------|
| 38 | 2348.0 | 100.1 | 498.3 | 2537.6 | 20.0 | 1 | 328.0 | 1905 | 25.2 | 22298 | S |
| 39 | 2347.0 | 100.0 | 497.3 | 2536.6 | 20.0 | 1 | 328.0 | 1933 | 25.2 | 22298 | S |
| 40 | 2350.5 | 100.3 | 500.3 | 2540.1 | 20.0 | 1 | 250.4 | 1924 | 25.2 | 22298 | S |
| 41 | 2337.0 | 104.2 | 501.0 | 2526.6 | 20.0 | 1 | 225.0 | 1605 | 19.9 | 17685 | S |
| 42 | 2334.5 | 104.9 | 501.7 | 2524.1 | 20.0 | 1 | 284.8 | 1619 | 19.9 | 17685 | S |
| 43 | 2336.0 | 103.7 | 500.3 | 2525.6 | 20.0 | 1 | 255.3 | 1613 | 19.9 | 17685 | S |
| 44 | 2337.5 | 106.3 | 501.3 | 2527.1 | 20.0 | 1 | 318.2 | 1643 | 19.9 | 17685 | S |
| 45 | 2851.0 | 100.5 | 507.6 | 3017.0 | 32.0 | 1 | 76.6 | 1359 | 17.3 | | D |
| 46 | 2851.0 | 100.3 | 498.9 | 3017.0 | 27.0 | 1 | 117.1 | 1304 | 15.6 | | C |
| 47 | 2842.0 | 98.2 | 500.4 | 3008.0 | 27.0 | 1 | 83.4 | 1359 | 17.4 | | - |
| 48 | 2853.0 | 101.4 | 502.0 | 3019.0 | 26.0 | 1 | 156.0 | 0 | 14.8 | | C |
| 49 | 2856.5 | 100.9 | 501.9 | 3022.5 | 27.0 | 1 | 102.2 | 1355 | 16.9 | | - |
| 50 | 2858.0 | 99.1 | 500.9 | 3024.0 | 26.0 | 1 | 109.3 | 1514 | 26.4 | | - |
| 51 | 2856.5 | 101.3 | 497.3 | 3022.5 | 26.0 | 1 | 133.2 | 1553 | 26.7 | | - |
| 52 | 2857.0 | 102.0 | 495.9 | 3023.0 | 26.0 | 1 | 131.9 | 1497 | 24.6 | | - |
| 53 | 2843.5 | 149.6 | 505.6 | 3009.5 | 50.0 | 1 | 203.1 | 1280 | 15.8 | | - |
| 54 | 2856.0 | 149.3 | 510.0 | 3022.0 | 51.0 | 1 | 229.8 | 1277 | 15.5 | | - |
| 55 | 2847.0 | 149.5 | 505.4 | 3013.0 | 50.0 | 1 | 130.1 | 1246 | 15.3 | | - |
| 56 | 2826.5 | 151.6 | 500.7 | 2992.5 | 50.0 | 1 | 152.6 | 1228 | 15.3 | | - |
| 57 | 2839.5 | 150.4 | 501.5 | 3005.5 | 50.0 | 1 | 133.5 | 1281 | 15.2 | | - |
| 58 | 2855.5 | 152.7 | 505.5 | 3021.5 | 51.0 | 1 | 248.6 | 1519 | 25.7 | | - |
| 59 | 2861.5 | 152.7 | 501.8 | 3027.5 | 49.0 | 1 | 269.5 | 1535 | 25.7 | | - |
| 60 | 2846.5 | 152.6 | 497.5 | 3012.5 | 50.0 | 1 | 197.0 | 1531 | 26.3 | | - |
| 61 | 2843.5 | 151.6 | 502.0 | 3009.5 | 50.0 | 1 | 194.0 | 0 | 27.3 | | - |
| 62 | 2843.5 | 152.6 | 499.0 | 3009.5 | 50.0 | 1 | 210.0 | 1538 | 26.3 | | - |
| 63 | 2853.0 | 103.7 | 502.8 | 3019.0 | 26.8 | 1 | 234.3 | 1516 | 21.4 | | - |
| 64 | 2851.5 | 103.8 | 509.0 | 3017.5 | 30.0 | 1 | 236.5 | 1446 | 19.6 | | - |
| 65 | 2855.0 | 103.9 | 503.0 | 3021.0 | 30.0 | 1 | 192.5 | 1496 | 19.1 | | - |
| 66 | 2875.0 | 103.0 | 500.4 | 3023.0 | 25.8 | 1 | 144.5 | 1566 | 25.6 | | - |
| 67 | 2849.0 | 104.5 | 503.1 | 3015.0 | 25.0 | 1 | 273.0 | 1579 | 23.3 | | - |
| 68 | 2851.5 | 103.3 | 502.8 | 3017.5 | 25.5 | 1 | 176.7 | 1579 | 22.5 | | - |
| 69 | 2858.5 | 103.6 | 501.8 | 3024.5 | 26.8 | 1 | 182.4 | 1583 | 26.1 | | - |
| 70 | 2857.0 | 102.6 | 493.7 | 3023.0 | 25.3 | 1 | 253.2 | 1564 | 24.4 | | - |
| 71 | 2836.0 | 151.5 | 497.9 | 3002.0 | 49.0 | 1 | 252.2 | 1394 | 16.6 | | - |
| 72 | 2849.0 | 151.8 | 498.8 | 3015.0 | 51.0 | 1 | 242.7 | 1391 | 16.2 | | - |
| 73 | 2843.5 | 151.0 | 501.6 | 3009.5 | 50.0 | 1 | 201.0 | 1382 | 17.2 | | - |
| 74 | 2859.5 | 152.8 | 501.6 | 3025.5 | 45.0 | 1 | 301.8 | 1416 | 16.3 | | - |

Tabel A.1b. Typeprøvningsresultater.

| Nr | L (mm) | t (mm) | b (mm) | l_s (mm) | e_N (mm) | e_p (mm) | N_{exp} (kN) | ρ (kg/m ³) | f_c (Mpa) | E (Mpa) | Brud |
|----|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|-------------------|--------------------------------|----------------|------------|------|
| 75 | 2852.5 | 153.3 | 499.1 | 3018.5 | 49.0 | 1 | 245.6 | 1590 | 26.5 | | - |
| 76 | 2852.0 | 154.7 | 501.5 | 3018.0 | 52.0 | 1 | 257.9 | 1587 | 24.7 | | - |
| 77 | 2849.5 | 153.3 | 499.3 | 3015.5 | 49.0 | 1 | 295.3 | 1617 | 26.3 | | A |
| 78 | 2853.0 | 153.2 | 500.0 | 3019.0 | 50.0 | 1 | 249.4 | 1625 | 27.2 | | - |
| 79 | 2813.0 | 104.7 | 499.4 | 2979.0 | 15.0 | 1 | 169.1 | 1611 | 10.0 | | S |
| 80 | 2827.0 | 104.5 | 506.0 | 2993.5 | 15.0 | 1 | 144.1 | 1611 | 10.0 | | T,F |
| 81 | 2820.5 | 104.4 | 497.0 | 2986.5 | 15.0 | 1 | 249.7 | 1611 | 10.0 | | S |
| 82 | 2822.5 | 104.0 | 499.5 | 2988.5 | 15.5 | 1 | 183.9 | 1611 | 10.0 | | S |
| 83 | 2817.0 | 104.4 | 501.0 | 2983.0 | 14.5 | 1 | 178.4 | 1554 | 10.8 | | S |
| 84 | 2823.0 | 100.5 | 497.8 | 2989.0 | 15.0 | 1 | 267.2 | 1619 | 15.2 | | S |
| 85 | 2829.0 | 99.9 | 496.8 | 2995.0 | 15.5 | 1 | 228.9 | 1619 | 15.2 | | S |
| 86 | 2820.0 | 151.0 | 498.5 | 2986.0 | 40.0 | 1 | 251.4 | 1789 | 12.5 | | T |
| 87 | 2815.5 | 152.0 | 503.5 | 2981.5 | 40.0 | 1 | 287.3 | 1789 | 12.5 | | A |
| 88 | 2820.5 | 153.5 | 502.3 | 2986.5 | 39.8 | 1 | 141.2 | 1789 | 12.5 | | T,D |
| 89 | 2815.5 | 151.8 | 500.8 | 2981.5 | 40.3 | 1 | 254.8 | 1824 | 11.9 | | S |
| 90 | 2730.0 | 98.4 | 500.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 95.2 | 937 | 5.2 | | T |
| 91 | 2730.0 | 98.8 | 498.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 154.0 | 937 | 5.2 | | T |
| 92 | 2730.0 | 99.1 | 501.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 139.2 | 937 | 5.2 | | S |
| 93 | 2730.0 | 100.0 | 499.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 183.6 | 1213 | 8.6 | | T |
| 94 | 2730.0 | 100.8 | 500.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 168.4 | 1213 | 8.6 | | T |
| 95 | 2730.0 | 99.4 | 503.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 150.3 | 1213 | 8.6 | | T |
| 96 | 2730.0 | 100.4 | 500.0 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 155.1 | 1213 | 8.6 | | T |
| 97 | 2730.0 | 99.5 | 500.5 | 3030.0 | 10.0 | 1 | 295.4 | 1754 | 19.7 | | - |
| 98 | 2730.0 | 99.3 | 498.5 | 3030.0 | 15.0 | 1 | 298.5 | 1754 | 19.7 | | - |
| 99 | 2730.0 | 99.3 | 498.5 | 3030.0 | 20.0 | 1 | 270.5 | 1754 | 19.7 | | T |

Tabel A.1c. Typeprøvningsresultater.

I søjlen ”Brud” er den opgivne brudform angivet som

- T Afskalmingsbrud i top eller bund
- S Søjlebrud
- A Afbrudt før brud, da lastudstyr ikke kunne laste højere
- D Defekt fra start (forsøget udgår af vurderingerne)
- C Træk i formsiden (forsøget udgår af vurderingerne)
- Brudform ikke oplyst og fremgår ikke af rapporteringen

Annex B. Lodret og vandret belastede elementer

| Id | L _s (mm) | L (mm) | b (mm) | t (mm) | fugt (%) | Rho (kg/m ³) | e _N (mm) | P (kg) | N ₁ (kN) | N _{max} (kN) | Alder (døgn) | Brud/ Note |
|----------------|------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------------|------------------------|------------|------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| BE-3 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 100,1 | | | 20 | 300 | | 8,0 | 29 | 1) |
| BE-4 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 99,5 | 11,99 | 1181 | 20 | 0 | | 161,0 | 29 | B |
| BE-5 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 100,7 | 7,70 | 1215 | 20 | 270 | 4,30 | 140,8 | 91 | B,5 |
| BE-6 | 2519,6 | 2330 | 499,0 | 99,8 | 7,19 | 1244 | 20 | 270 | | 140,9 | 91 | B |
| BE-7 | 2519,6 | 2330 | 502,0 | 100,2 | | | 20 | 270 | | 3,0 | 91 | 1) |
| BE-8 | 2519,6 | 2330 | 500,3 | 98,5 | 2,75 | 1237 | 20 | 270 | 6,77 | 117,5 | 92 | B |
| BE-9 | 2519,6 | 2330 | 499,3 | 100,0 | | | 20 | 270 | | 3,0 | 29 | 1) |
| BE-10 | 2519,6 | 2330 | 499,3 | 100,0 | 6,85 | 1195 | 20 | 270 | 6,96 | 133,1 | 92 | B |
| BE-11 | 2519,6 | 2330 | 499,7 | 100,4 | 9,63 | 1197 | 20 | 270 | 5,04 | 5,2 | 92 | 1) |
| BE-12 | 2524,6 | 2335 | 501,7 | 100,3 | | | 20 | 270 | 5,01 | 129,4 | 92 | B |
| BE-snit | 2519,6 | 2330 | 499,7 | 99,9 | 6,82 | 1218 | 20 | 270 | 5,77 | 107,5 | | S |
| EX-3 | 2519,6 | 2330 | 500,7 | 99,7 | 4,30 | 1894 | | 390 | 8,28 | 357,0 | 81 | 2) |
| EX-4 | 2519,6 | 2330 | 500,3 | 99,3 | 3,60 | 1905 | 20 | 390 | 8,02 | 257,3 | 81 | B |
| EX-5 | 2519,6 | 2330 | 502,7 | 99,8 | 4,56 | 1902 | 20 | 390 | 8,25 | 284,2 | 81 | B |
| EX-6 | 2519,6 | 2330 | 502,0 | 99,5 | 4,57 | 1900 | 20 | 390 | 8,39 | 259,2 | 81 | B |
| EX-7 | 2519,6 | 2330 | 502,0 | 99,8 | 4,34 | 1903 | 20 | 390 | 8,65 | 273,0 | 81 | B |
| EX-8 | 2519,6 | 2330 | 502,0 | 99,1 | 4,19 | 1871 | 20 | 390 | 8,28 | 264,4 | 81 | B |
| EX_9 | 2519,6 | 2330 | 503,7 | 100,2 | 4,27 | 1904 | 20 | 390 | 8,02 | 279,7 | 81 | B |
| EX-snit | 2519,6 | 2330 | 502,1 | 99,6 | 4,26 | 1898 | 20 | 390 | 8,27 | 269,6 | | S |
| GA-3 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 100,3 | 4,20 | 1827 | 20 | 370 | 8,43 | 261,1 | 76 | B |
| GA-4 | 2519,6 | 2330 | 498,7 | 101,0 | 3,96 | 1828 | 20 | 370 | 8,58 | 236,4 | 76 | B |
| GA-5 | 2519,6 | 2330 | 499,7 | 100,6 | 4,85 | 1826 | 20 | 370 | 8,47 | 263,6 | 77 | B |
| GA-6 | 2519,6 | 2330 | 497,0 | 101,7 | | | 20 | 370 | 8,02 | 135,0 | 77 | 3) |
| GA-7 | 2519,6 | 2330 | 498,0 | 100,3 | 4,06 | 1824 | 20 | 370 | 8,36 | 220,9 | 77 | B |
| GA-8 | 2519,6 | 2330 | 501,7 | 100,3 | 4,05 | 1839 | 20 | 370 | 8,25 | 185,9 | 77 | B |
| GA-9 | 2519,6 | 2330 | 498,3 | 99,9 | 4,38 | 1833 | 20 | 370 | 8,21 | 182,4 | 79 | B |
| GA-10 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 100,0 | 4,61 | 1851 | 20 | 370 | 8,80 | 187,3 | 79 | B |
| GA-11 | 2519,6 | 2330 | 500,0 | 100,2 | 4,07 | 1856 | 20 | 370 | 8,47 | 219,5 | 82 | B |
| GA-snit | 2519,6 | 2330 | 499,6 | 100,3 | 4,27 | 1836 | 20 | 370 | 8,44 | 219,6 | | S |

Tabel B.1. Testresultater.

Noter og brudformer i tabel B.1. I søjlen ”Brud/Note” angiver symbolet

- B Bøjnings og stabilitetsbrud som forventet
 1 Brud ved påføring af lasten.
 Elementet formodes skadet under transporten og forsøget udgår.
 2 Fejl i excentriciteten. Forsøget udgår.
 3 Kantbrud i toppen af elementet. Forsøget udgår.
 4 Excentricitet 0 mm er anvendt. Forsøget udgår.
 5 Måleur gave problemer med deformationsmålingen.
 S Gennemsnit for alle forsøgene i serien minus de forsøg, der udgår.

| ID | Type | f_c (MPa) | Rho (kg/m ³) | f_{bt} (MPa) | E (MPa) |
|----------------|--------------------|----------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| BIH-1 | LAC 6/1200 | 15,2 | 1170 | 2,6 | 8876 |
| BIH-2 | LAC 6/1200 | 13,4 | 1160 | 2,6 | 8794 |
| BE-Snit | LAC 6/1200 | 14,3 | 1165 | 2,6 | 8835 |
| EX-1 | LAC 15/1850 | 30,4 | 1870 | 3,4 | 22896 |
| EX-2 | LAC 15/1850 | 27,2 | 1850 | 3,3 | 21066 |
| EX-Snit | LAC 15/1850 | 28,8 | 1860 | 3,4 | 21981 |
| GA-1 | LAC 10/1850 | 30,2 | 1840 | 3,4 | 23784 |
| GA-2 | LAC 10/1850 | 25,6 | 1800 | 3,4 | 21474 |
| GA-Snit | LAC 10/1850 | 27,9 | 1820 | 3,4 | 22629 |

Tabel B.2. Materialedata fra slaveelementer.

| Id | Type | Alder ved test | Fugt ved testning (%) | | |
|----------------|--------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------|
| | | | f_c -emne | f_{bt} -emne | E-emne |
| BIH-1 | LAC 6/1200 | 28-40 døgn | 9,0 | 18,7 | 9,6 |
| BIH-2 | LAC 6/1200 | 29-40 dage | 9,0 | 18,3 | 9,4 |
| BE-Snit | LAC 6/1200 | | 9,0 | 18,5 | 9,5 |
| EX-1 | LAC 15/1850 | 28-35 døgn | 4,3 | 6,7 | 4,8 |
| EX-2 | LAC 15/1850 | 28-35 døgn | 4,3 | 6,7 | 4,8 |
| EX-Snit | LAC 15/1850 | | 4,3 | 6,7 | 4,8 |
| GA-1 | LAC 10/1850 | 28-35 døgn | 3,7 | 8,0 | 3,7 |
| GA-2 | LAC 10/1850 | 28-41 døgn | 3,7 | 8,7 | 2,9 |
| GA-Snit | LAC 10/1850 | | 3,7 | 8,4 | 3,3 |

Tabel B.3. Modenhed og fugtindhold ved testning.

Annex C. Lodret og vandret belastede elementer – ekstra BIH forsøg

| Id | L _s (mm) | L (mm) | b (mm) | t (mm) | fugt (%) | Rho (kg/m ³) | e _N (mm) | P (kg) | N ₁ (kN) | N _{max} (kN) | Alder (døgn) | Slave Id. | Brud/ Note |
|-------|------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|------------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|---------------|
| EX-14 | 2506,6 | 2317 | 498,3 | 101,8 | 4,61 | 1933 | 20,0 | 500 | 25,00 | 37,4 | 42 | EX-13 | B |
| EX-15 | 2509,6 | 2302 | 499,7 | 101,6 | 4,63 | 1916 | 20,0 | 500 | 25,00 | 25,0 | 42 | EX-13 | 1 |
| EX-16 | 2509,6 | 2320 | 500,3 | 103,1 | 4,62 ²⁾ | 1901 ²⁾ | 20,0 | 500 | 25,00 | 25,0 | 42 | EX-13 | 1 |
| EX-18 | 2509,6 | 2320 | 501,7 | 103,3 | 4,62 ²⁾ | 1918 ²⁾ | 20,0 | 600 | 30,00 | 30,0 | 42 | EX-17 | 1 |
| EX-19 | 2509,6 | 2320 | 502,7 | 103,0 | 4,62 ²⁾ | 1912 ²⁾ | 20,0 | 600 | 30,00 | 30,0 | 42 | EX-17 | 1 |
| EX-20 | 2509,6 | 2320 | 504,3 | 101,8 | 4,62 ²⁾ | 1933 ²⁾ | 20,0 | 600 | 30,00 | 30,0 | 42 | EX-17 | 1 |
| EX-22 | 2509,6 | 2320 | 502,0 | 102,2 | 4,62 ²⁾ | 1898 ²⁾ | 20,0 | 450 | 22,50 | 22,5 | 39 | EX-21 | 1 |
| EX-23 | 2508,6 | 2319 | 502,0 | 103,0 | 4,62 ²⁾ | 1892 ²⁾ | 20,0 | 450 | 22,50 | 22,5 | 39 | EX-21 | 1 |
| EX-24 | 2509,6 | 2320 | 509,7 | 102,0 | 4,62 ²⁾ | 1879 ²⁾ | 20,0 | 450 | 22,50 | 22,5 | 39 | EX-21 | 1 |
| EX-25 | 2508,6 | 2319 | 500,0 | 106,6 | 5,47 ²⁾ | 1920 ²⁾ | 15,0 | 318 | 16,00 | 350,0 | 45 | EX-25 | B |
| EX-26 | 2508,6 | 2319 | 500,7 | 102,7 | 5,72 | 1916 | 19,9 | 318 | 16,00 | 267,0 | 45 | EX-26 | B |
| EX-27 | 2508,6 | 2319 | 500,3 | 104,9 | 5,39 | 1919 | 14,8 | 418 | 20,00 | 196,0 | 48 | EX-27 | B |
| EX-28 | 2509,1 | 2319,5 | 501,0 | 106,6 | 5,47 ²⁾ | 1917 ²⁾ | 13,5 | 518 | 17,00 | 17,0 | 48 | EX-28 | 1 |
| EX-29 | 2508,6 | 2319 | 500,3 | 105,7 | 5,30 | 1929 | 14,2 | 468 | 18,00 | 211,7 | 48 | EX-29 | B |
| EX-31 | 2508,6 | 2319 | 500,7 | 105,6 | 4,76 | 1924 | 14,1 | 518 | 30,00 | 229,0 | 28 | EX-30 | B |
| EX-32 | 2509,1 | 2319,5 | 500,0 | 104,3 | 4,49 | 1920 | 15,8 | 518 | 20,00 | 20,0 | 28 | EX-30 | 1 |
| EX-33 | 2509,6 | 2320 | 498,7 | 100,3 | 4,72 | 1963 | 19,3 | 468 | 17,00 | 234,5 | 28 | EX-30 | B |
| EX-37 | 2507,6 | 2318 | 500,0 | 104,3 | 4,62 | 1914 | 15,6 | 518 | 30,00 | 215,0 | 28 | EX-34 | B |
| EX-39 | 2508,6 | 2319 | 499,3 | 103,6 | 4,62 | 1911 | 16,3 | 518 | 20,00 | 223,9 | 28 | EX-38 | B |
| EX-40 | 2509,6 | 2320 | 498,0 | 105,1 | 4,59 | 1920 | 14,6 | 518 | 30,00 | 231,0 | 28 | EX-38 | B |

Tabel C.1. Testresultater.

Noter og brudformer i tabel C.1:

- B Bøjnings og stabilitetsbrud som forventet
1 Brud ved påføring af lasten.
Elementet formodes skadet under transporten og forsøget udgår.
2 Data er estimeret fra elementets egne data samt data fra andre elementer,
hvis fx. fugtindholdet ikke er blevet registreret.

| Id. | f_c (MPa) | f_{bt} (MPa) | E (MPa) |
|---------------------|----------------|-------------------|------------|
| EX-13 | 27,9 | 3,5 | 23629 |
| EX-17 | 28,0 | 3,6 | 23395 |
| EX-21 | 26,5 | 3,0 | 21158 |
| EX-25 ³⁾ | 37,6 | 2,3 | 26200 |
| EX-26 ³⁾ | 32,6 | 1,9 | 27000 |
| EX-27 ³⁾ | 36,9 | 2,1 | 27600 |
| EX-28 ³⁾ | 38,3 | 2,4 | 25800 |
| EX-29 ³⁾ | 36,0 | 2,4 | 26800 |
| EX-30 | 36,5 | 3,1 | 25000 |
| EX-34 | 35,0 | 3,2 | 24561 |
| EX-38 | 36,2 | 2,8 | 22467 |

Tabel C.2. Materialedata fra slaveelementer.

Note 3): Disse prøver er taget fra elementer, efter de var testet til brud.

Annex D. Lodret og vandret belastede elementer – BYG•DTU forsøg.

| Id | L_s (mm) | b (mm) | t (mm) | f_c (MPa) | f_{bt} (MPa) | E (MPa) | e_N (mm) | N_{max} (kN) | P (kN) |
|-------|---------------|-----------|-----------|----------------|-------------------|------------|---------------|-------------------|-----------|
| 6-01 | 2932 | 600 | 120 | 10,3 | 1,79 | 11850 | 24,75 | 223,30 | 1,02 |
| 6-03 | 2945 | 600 | 120 | 10,3 | 1,79 | 11850 | 25,18 | 242,46 | 1,20 |
| 6-04 | 2945 | 600 | 120 | 10,3 | 1,79 | 11850 | 24,85 | 267,53 | 1,24 |
| 6-08 | 2934 | 600 | 120 | 10,3 | 1,79 | 11850 | 25,57 | 295,70 | 1,58 |
| 15-01 | 2945 | 600 | 120 | 22,4 | 2,31 | 22700 | 23,61 | 630,20 | 2,17 |
| 15-06 | 2930 | 600 | 120 | 22,4 | 2,31 | 22700 | 23,58 | 593,00 | 2,05 |
| 15-09 | 2934 | 600 | 120 | 22,4 | 2,31 | 22700 | 22,23 | 639,50 | 1,37 |
| 15-10 | 2945 | 600 | 120 | 22,4 | 2,31 | 22700 | 24,17 | 489,70 | 1,95 |

Table D.1. Testresultater fra DTU-projekt /32/. Materialeparametrene er målt på slaveelementer.