

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **165**

HENNING LARSEN
**BÆREEVNE AF
MØRTELFUGER MELLEM BETONSØJLEELEMENTER**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1983

Henning Larsen

Bæreevne

af

mørtelfuger mellem betonsøjleelementer

Instituttet for Husbygning Rapport nr. 165

Danmarks tekniske Højskole 1983

FORORD

Projektet, der er beskrevet i denne rapport, er udført ved Instituttet for Husbygning.

Tak til Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd for økonomisk støtte til projektet.

Også tak til de mange af instituttets medarbejdere, der har hjulpet med at gennemføre projektet.

Supplerende oplysninger til visse områder af projektet er samlet i et supplement til denne rapport, se [6] i litteraturfortegnelsen.

Lyngby, 1983

Henning Larsen

INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
RESUME	IV
SYMBOLLISTE	VI
SÆRLIGT DEFINEREDE VÆRDIER	VIII
SKRIVEMÅDE FOR FORMLER	X
1. INDLEDNING	1
2. TEORI	5
2.1 Brudtilfælde urevnet søjle	14
2.2 Brudtilfælde revnet søjle	21
2.2.1 Uarmeret fugemørtel	21
2.2.2 Armeret fugemørtel	27
2.3 Søjleelementendens bæreevne	31
2.4 Oversigt. Beregningsformler	33
3. FORSØG	37
3.1 Forsøgsprogram og forsøgsemner	37
3.2 Forsøgsopstilling	43
3.3 Forsøgene	45
4. RESULTATER	57
4.1 Observerede og beregnede bæreevner	58
4.2 Særlige forhold	86
4.3 Søjleelementstykkeernes bæreevne	88
5. KONKLUSION	89
6. LITTERATURFORTEGNELSE	91

RESUME

Rapporten behandler bæreevnen af mørtelfuger mellem betonsøjleelementer.

Det særlige ved samlingen - i bæreevnemæssig henseende - er, at det er en konstruktion af to forskellige materialer, betinget af udformning og udførelse af samlingen: dels en elementsøjle af beton, fremstillet under gode produktionsforhold på fabrik, dels en mørtelfuge, hvor materialet er bestemt af, at det skal kunne anbringes i en fuge med forholdsvis små dimensioner, - og udført på byggeplads under forhold, der kan gøre det vanskeligt at opnå en god kvalitet af mørtlen i fugen.

Fugemørtlen vil typisk - med en trykstyrke mindre end betonens - komme under treakset tryk, når samlingen udsættes for en trykbelastning, og få en forøget bæreevne i forhold til den almindelige trykstyrke.

Der er betragtet en idealiseret samlingsudformning med en central trykbelastning.

Der er undersøgt betydningen af geometrien, specielt fugens højde/bredde forhold, mørtlens henholdsvis betonens trykstyrke, elasticitetskoefficient og tværudvidelseskoefficient, mørtlens sand og mørtlens konsistens i forbindelse med mørtelfugens udførelse (udstøbning henholdsvis indstopning). Endvidere er undersøgt betydningen af armering af mørtelfugen med en ringarmering.

Der præsenteres brudbæreevneformler, opstillet på teoretisk grundlag. For at nå frem til enkle og operationelle formler er foretaget mange tilnærmelser; men formlerne indeholder de parametre, der er fundet af betydning for samlingens bæreevne.

Der er betragtet følgende brudtilfælde: brud i mørtelfugen uden søjleelement-enderne er revnede forinden, brud i mørtelfugen efter at søjleelement-enderne er revnede og brud i søjleelement-enderne uden brud i mørtelfugen.

For brud i mørtelfugen med urevnede søjleelementer er opstillet et formelsæt, der giver bæreevnen som funktion af mørtelfugens tværsnitsareal, mørtelfugens højde/bredde forhold, mørtel-trykstyrken, forholdet mellem mørtlens og betonens elasticitetskoefficient og endelig en dimensionsløs størrelse, hvori indgår tværudvidelseskoefficienten og elasticitetskoefficienten for mørtlen og for betonen.

For brud i mørtelfugen med revnede søjleelement-ender er opstillet et formelsæt, der giver bæreevnen som funktion af et effektivt areal, der bestemmes som det mindste af mørtelfugens tværsnitsareal og det areal bøjlerne i søjleelementet omslutter, endvidere forholdet mellem mørtelfugens

højde og bredden i det effektive tværsnit, mørtel-trykstyrken, mørtlens tværudvidelseskoefficient og endelig en dimensionsløs størrelse, hvori indgår tværsnitsarealet og elasticitetskoefficienten for bøjlerne i søjleelement-enderne, mørtlens elasticitetskoefficient, mørtelfugens højde samt bredden i det effektive tværsnit.

Specielt for den armerede mørtelfuge fås bæreevnen som funktion af et effektivt areal, der bestemmes som det mindste af de arealer, bøjlerne omslutter i henholdsvis mørtelfugen og søjleelementet, endvidere mørtel-trykstyrken, mørtlens tværudvidelseskoefficient og endelig en dimensionsløs størrelse defineret som for uarmeret mørtel.

For brud i søjleelement-enderne uden brud i mørtelfugen beregnes bæreevnen som funktion af søjleelementets tværsnitsareal, mørtelfugens højde/bredde forhold, beton-trykstyrken, forholdet mellem mørtlens og betonens elasticitetskoefficient og endelig den dimensionsløse størrelse, hvori indgår tværudvidelseskoefficienten og elasticitetskoefficienten for mørtlen og for betonen.

Som samlingens teoretisk beregnede bæreevne regnes med den største af værdierne i de to første brudtilfælde (brud i mørtelfugen med urevnede henholdsvis revnede søjleelement-ender), idet bæreevnen dog ikke kan overstige værdien i det tredje tilfælde: brud i søjleelement-enderne.

Med det formål at undersøge brugbarheden af den opstillede teori, er gennemført en forsøgsrække med forsøgsemner af varierende udformning.

Det er fundet, at inden for de grænser, undersøgelsen afstikker, er den opstillede teori brugbar til beregning af bæreevnen af uarmerede og armerede mørtelfuger mellem betonsøjleelementer, - dog ikke for andet sand i mørtlen end bakkesand af almindelig, god kvalitet.

Beregningsformlerne er fundet brugbare for såvel kvadratiske som ottekantede tværsnit.

Fugens højde/bredde forhold har ligget på ca. $1/6$ til $1/4$.

Mørtlens trykstyrke har ligget på ca. $1/3$ af betonens trykstyrke og op til betonens trykstyrke.

Mørtlens elasticitetskoefficient har ligget på ca. $1/3$ til $2/3$ af betonens elasticitetskoefficient, og mørtlens tværudvidelseskoefficient har ligget på ca. 1 til 2 gange betonens.

Der er opnået gode bæreevner med armering af mørtelfugen med ringarmeringer - og fugen udstøbt med letflydende mørtel.

SYMBOLLISTE

A_c	tværsnitsareal af søjle (betontværsnittet)
A_m	tværsnitsareal af mørtelfuge
A_r	effektivt areal af samling ^{x)}
A_{st}	tværarmeringsareal ^{x)}
E_c	elasticitetskoefficient for beton ^{x)}
E_m	elasticitetskoefficient for mørtel ^{x)}
E_{st}	elasticitetskoefficient for tværarmering
$N_{j,u}$	samlingens bæreevne
$N_{j,u}^{cal}$	teoretisk beregnet værdi for bæreevnen
$N_{j,u}^{obs}$	observeret værdi (forsøgsværdi) for bæreevnen
$N_{j,u,c}$	samlingens bæreevne, tilfælde søjleendebrud
$N_{j,u,m}$	samlingens bæreevne, tilfælde urevnet søjle
$N_{j,u,r}$	samlingens bæreevne, tilfælde revnet søjle
a	søjleelementtværmål ¹⁾
b	mørtelfugens tværmål ¹⁾
b_r	tværmål ¹⁾ i effektivt areal ^{x)}
$b_{r,st}$	tværmål for bøjler (side for kvadratiske bøjler, ringdiameter for armeringsringe)
d	regningsmæssig højde i søjleelementende
f_c	betontrykstyrke (ø15 cm x 30 cm cylinder)
$f_{c,3}$	betontrykstyrke i treakset spænding med tværtrækspændinger
f_m	mørteltrykstyrke (ø10 cm x 20 cm cylinder)
$f_{m,3}$	forøget mørteltrykstyrke i treakset tryk

h	mørtelfugens højde
t	trykbuetykkelse i randzone i mørtelfuge
w	trykbuepilhøjde i randzone i mørtelfuge
α	dimensionsløs størrelse (definition formel (8))
β	dimensionsløs størrelse (definition formel (3))
ϵ_{st}	tøjning i tværarmering
ξ	dimensionsløs størrelse (definition formel (2))
$\mu_{nødv}$	nødvendig friktionskoefficient
ν_c	beton-tværudvidelseskoefficient ^{x)}
ν_m	mørtel-tværudvidelseskoefficient ^{x)}
σ_{st}	spænding i tværarmering (positiv som træk)
σ_x	tværspænding i mørtel vinkelret på længdeakse (positiv som tryk)
$\sigma_{x,c}$	tværspænding i søjleelementende (positiv som tryk)
σ_z	axialspænding i længdeaksens retning (positiv som tryk)

x) særligt defineret værdi

1) tværmål = diameter af indskreven cirkel i tværsnittet

SÆRLIG DEFINEREDE VÆRDIER

- A_r Effektivt areal med tværmål b_r , se definitionen af b_r . - Arealet skal være omsluttet af armering enten i mørtelfugen eller i søjlen. - Arealets form er ligesådan som mørtelfugens tværsnitsareal eller det areal, der er omsluttet af armering, afhængig af hvad der bestemmer b_r .
- A_{st} Samlet areal af tværarmering (bøjler) i begge søjleender og eventuelle bøjler eller ringarmring i mørtelfugen. Der medregnes bøjler i søjlerne inden for en afstand d fra søjlens endeflade. Bemærk, at hver bøjle og ring skal medregnes med $2 \times$ tværsnitsarealet af armeringsjernet, når den er en "2-snitsbøjle" (der går igennem det lodrette snit 2 gange).
- E_c Formel elasticitetskoefficient for beton, bestemt som hældning af linien gennem arbejdskurvens begyndelsespunkt og det punkt på arbejdskurven, der har $\sigma = 0,9 \cdot f_c$, dog $\sigma = 0,5 \cdot f_c$ for brudtilfælde urevnet søjle. Arbejdskurven refererer til betoncylindre med diameter 15 cm og højde 30 cm.
- E_m Formel elasticitetskoefficient for mørtel, bestemt som hældningen af linien gennem arbejdskurvens begyndelsespunkt og det punkt på arbejdskurven, der har $\sigma = 0,9 \cdot f_m$. Arbejdskurven refererer til mørtelcylindre med diameter 10 cm og højde 20 cm.
- b_r Tværmål af effektivt areal A_r , bestemt som mindste værdi af:
- mørtelfugens tværmål b
 - bøjletværmålet $b_{r,st,søj}$ i søjleelementenden
 - bøjletværmålet $b_{r,st,fug}$ i mørtelfugen.
- Uden armering i fugen bortfalder den sidste grænse; - med armering i fugen er den første grænse ikke aktuel ($b_{r,st,fug} < b$).
- Tværmål = diameter af indskreven cirkel i tværsnittet.

ν_c

Formel tværudvidelseskoefficient for beton, bestemt som den numeriske værdi af forholdet mellem tværtøjningen $\epsilon_{\text{tværs}}$ og længdetøjningen ϵ_{langs} målt på arbejdskurven for spændingen $\sigma = 0,9 \cdot f_c$, dog $\sigma = 0,5 \cdot f_c$ for brudtilfælde urevnet søjle. Arbejdskurven refererer til betoncylindre med diameter 15 cm og højde 30 cm.

 ν_m

Formel tværudvidelseskoefficient for mørtel, bestemt som den numeriske værdi af forholdet mellem tværtøjningen $\epsilon_{\text{tværs}}$ og længdetøjningen ϵ_{langs} målt på arbejdskurven for spændingen $\sigma = 0,9 \cdot f_m$. Arbejdskurven refererer til mørtelcylindre med diameter 10 cm og højde 20 cm.

SKRIVEMÅDE FOR FORMLER

Formlerne er skrevet fortløbende på linie.

Tegnet / er brugt for division med efterfølgende størrelse (eller parentes med flere led) frem til næstfølgende tegn for en af regningsarterne.

Nedenfor er vist nogle eksempler, der skulle belyse den anvendte skrivemåde.

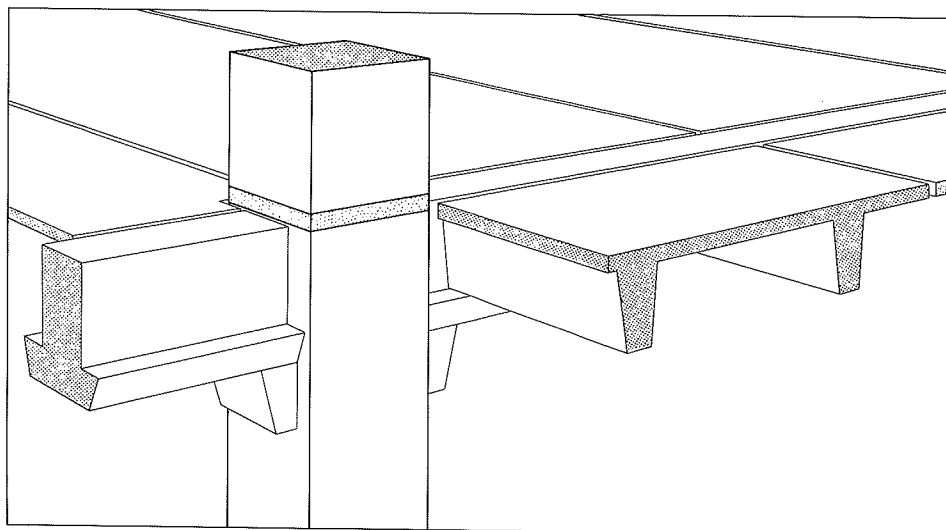
$A/B/C$	identisk med	$\frac{A}{B \cdot C}$
$A/(B \cdot C)$	-	$\frac{A}{B \cdot C}$
$A/B \cdot C$	-	$\frac{A}{B} \cdot C$
$A/B \cdot C/D$	-	$\frac{A}{B} \cdot \frac{C}{D}$
$A/(B/C)$	-	$\frac{A}{\frac{B}{C}}$

1. INDLEDNING

I præfabrikerede fleretages bygninger med betonsøjler som bærende, lodrette bygningsdele ses dels hushøje søjleelementer, gående i én længde igennem alle etagerne (maksimalt omkring 4-5 etager), dels etagehøje søjleelementer med en samling (stød) for hver etage. Denne samling udformes som oftest som en mørtelfuge.

Det er kun sidstnævnte løsning, nærværende rapport behandler.

Figur 1.



I tilfældet etagehøje søjleelementer skal lasten fra det område, søjlen dækker i etagerne op igennem bygningen, overføres gennem samlingen (mørtelfugen) imellem søjleelementerne, - på et areal, der er lig med søjletværsnittet eller mindre.

I mange tilfælde har man behov for optimal udnyttelse af bæreevnen af denne samling.

Der findes en del formler - for det meste opstillet på empirisk grundlag - til beregning af bæreevnen af denne samling.

Her præsenteres (brud)bæreevneformler, opstillet på teoretisk grundlag, omend med mange tilnærmelser.

Det særlige ved samlingen - i bæreevnemæssig henseende - er, at det er en konstruktion med to forskellige materialer, betinget af udformning og udførelse af samlingen:

dels en elementsøjle af beton, fremstillet under gode produktionsforhold på fabrik,

dels en mørtelfuge, hvor materialet er bestemt af, at det skal kunne anbringes i en fuge med forholdsvis små dimensioner, - og udført på byggeplads under forhold, der kan gøre det vanskeligt at opnå en god kvalitet af mørtlen i fugen.

Med forskellig elasticitetskoefficient og tværuddvidelseskoefficient i betonen og i mørtlen - hvilket typisk vil være tilfældet (selv med samme trykstyrke for beton og mørtel) - fremkommer modsat rettede tværspændinger i mørtlen og betonen.

Disse tværspændinger vil have en væsentlig indflydelse på samlingens bæreevne.

Bæreevneformlen for samlingen må derfor indeholde de væsentlige af de parametre, der bestemmer størrelsen af disse tværspændinger og dermed bæreevnen af samlingen.

Det vil typisk være sådan, at de tværspændinger, der optræder i mørtelfugen er trykspændinger, når samlingen udsættes for en last fra søjlen, der giver tryk over tværsnittet.

Disse tværtrykspændinger betyder, at fugemørtlen får en forøget bæreevne i forhold til den normale trykstyrke, som i praksis vil være lavere end betonens trykstyrke.

Der redegøres i denne rapport for en undersøgelse af en idealiseret samlingsudformning med en central belastning.

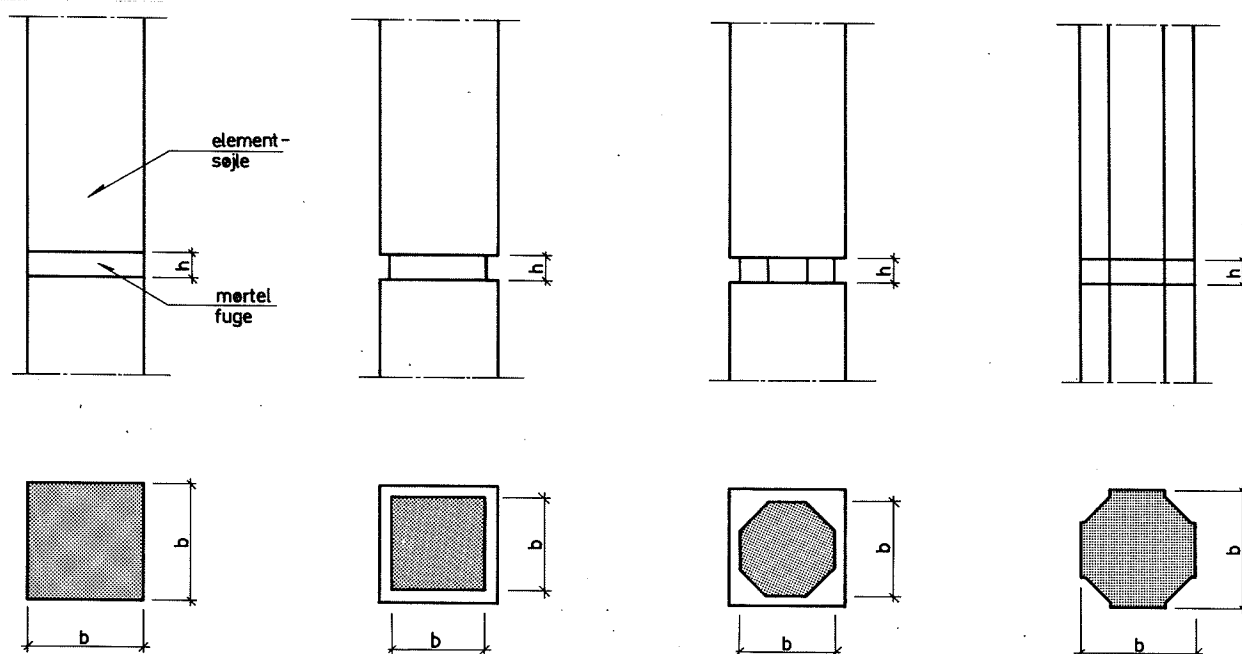
Den betragtede samling er en mørtelfuge mellem to betonsøjleelementer. Udformningen er symmetrisk om en plan gennem midtpunktet af fugen vinkelret på længdeaksen gennem søjleelementer og fuge, og både søjleelementets tværsnit og fugetværsnittet er (punkt)symmetrisk om midtpunktet af tværsnittet.

Inden for disse rammer undersøges forskellige udformninger af samlingen. Se figur 2.

Der undersøges betydningen af parametre som geometrien specielt fugens højde/bredde forhold h/b , ruheden af søjleelementfladen imod fugemørtlen, mørtlens henholdsvis betonens trykstyrke f_m henholdsvis f_c , elasticitetskoefficient E_m henholdsvis E_c , tværuddvidelseskoefficient ν_m henholdsvis ν_c , mørtlens sand, mørtlens konsistens i forbindelse med mørtelfugens udførelse (udstøbning ctr. indstopning) og armering af mørtlen (eksempelvis ringarmering).

I og med der behandles en idealiseret samlingsudformning med en central belastning, kommer rapporten kun til direkte at omhandle en lille del af de i praksis forekommende tilfælde.

Figur 2.



Hvad angår udformningen, forekommer den i praksis; men mere almindeligt er det, at der oven på et søjleelement foretages en udstøbning med beton i en højde svarende til etageadskillelsen og herovenpå en understopning med mørtel under næste etages søjleelement.

Den samling, der er behandlet i rapporten, kan betragtes som en grundudgave for den ovenfor omtalte mere almindelige samling. Den opstillede bæreevneteorier kan danne grundlag for opstilling af bæreevneteorier for andre udgaver af samlinger mellem betonsøjlelementer.

Hvad angår belastningen, der er regnet virkende centralt, indgår en sådan situation som en del af den normale undersøgelse af bæreevnen af en konstruktion som den her foreliggende. Den opstillede bæreevneteorier kan danne grundlag for opstilling af bæreevneteorier for excentrisk virkende belastning af samlinger mellem betonsøjlelementer.

Afgrænsningen til en idealiseret samlingsudformning med en central belastning skal således ses som et første skridt henimod enkle og operationelle formler til teoretisk bestemmelse af (brud)bæreevnen (fra ellers empiriske formler). Der kan så udbygges med beregningsformler for excentrisk belastning og asymmetriske samlingsudformninger af forskellig art.

Modellen, der benyttes for samlingens virkemåde, er beskrevet i afsnit 2. For at nå til enkle og operationelle formler foretages mange tilnærmelser; men formlerne indeholder de parametre, der er fundet af betydning for samlingens bæreevne.

2. TEORI

Flere har opstillet formler til beregning af bæreevnen af mørtelsamlinger mellem betonsøjler.

Det er empiriske formler, der er opstillet på grundlag af en række udførte forsøg.

Nedenfor anføres nogle eksempler.

I. Somerville angiver i [2] bæreevneformlen

$$N = N_0 \cdot R$$

$$N_0 = 0,67 \cdot f_{c,1} \cdot A_c + f_{a,1} \cdot A_1$$

$$R = 1 - (1 - f_{m,1}/f_{c,1}) \cdot (0,22 + \sqrt{h/a - 0,08})$$

hvor de indgående parametre er:

$f_{c,1}$	betontrykstyrken af en 150 mm terning
$f_{m,1}$	mørteltrykstyrken af en 70 mm terning
$f_{a,1}$	trykstyrken (flydespændingen) af søjlens hovedarmering
A_1	arealet af søjlens hovedarmering
A_c	arealet af søjletværsnittet
a	søjledimensionen (bredden)
h	fugehøjden

II. Grassier og Daschner angiver i [3] en tilladelig spænding (efter division med en sikkerhedsfaktor på 3)

$$\sigma_{till} = (f_{c,1} + 5 \cdot (f_{m,1} - f_{c,1}) \cdot (h/a)^2) / 3$$

hvor de indgående parametre er:

$f_{c,1}$	betontrykstyrken (terningstyrken)
$f_{m,1}$	mørteltrykstyrken (terningstyrken)
a	søjledimensionen (bredden)
h	fugehøjden

III. Paschen og Zillich angiver i [5] en formel for den tilladelige normalkraft (efter division med en sikkerhedsfaktor på 2,1)

$$N_{till} = k \cdot (A_c \cdot f_{cl} + A_{al} \cdot f_{al}) / 2,1$$

hvor de indgående parametre er:

f_{cl}	betonstyrken (i søjlen)
f_{al}	armeringsstyrken
A_c	betonarealet (søjletværsnittet)
A_{al}	armeringsarealet

k er en dimensionsløs reduktionsfaktor, afhængig af længdearmeringsforholdet og fugehøjden.

I det følgende opstilles et formelsæt til beregning af brudbæreevnen, der i modsætning til de ovenfor nævnte rent empiriske har grundlag i en teoretisk brudmodel for samlingen.

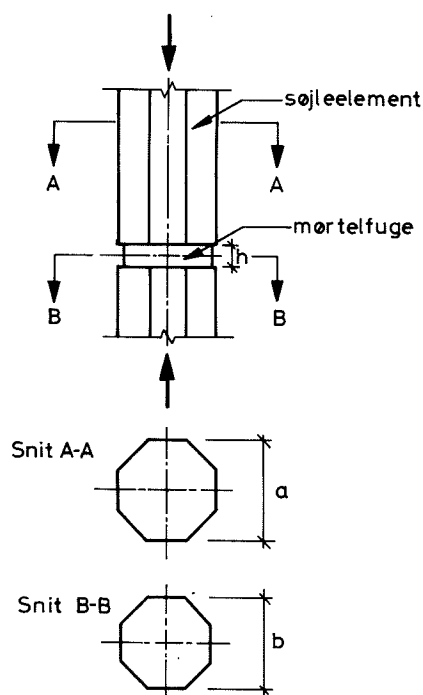
Opstilling af bæreevneteori

Der betragtes en samling med en mørtelfuge imellem søjleelementer af beton og med en længdeakse gående gennem søjleelementerne og fugen. Samlingen forudsættes symmetrisk om en plan gennem midtpunktet af fugen vinkelret på længdeaksen. Både søjleelementets tværsnit og fugetværsnittet forudsættes (punkt)symmetrisk om længdeaksen. Og både søjleelementtværsnittet og fugetværsnittet forudsættes at være regulære polygoner (f.eks. et kvadrat eller en ottekant), - søjleelementtværsnittet med tværmål a , fugetværsnittet med tværmål b , se figur 3; tværsnittet kan også være en cirkel.

Samlingen forudsættes belastet med en centralt virkende axial-tryk-kraft.

Det forudsættes, at de to materialer mørtel og beton har forskellig styrke, elasticitetskoefficient og tværudvidelseskoefficient. Styrken kan eventuelt være den samme.

Figur 3.



Bæreevneteorien er opstillet på grundlag af en model, som beskrevet i det følgende.

Med forskellig elasticitetskoefficient og forskellig tværudvidelseskoefficient for mørtlen og betonen vil der, når samlingen belastes, komme tværtøjninger, der er forskellige i mørtelfugen og i betonsøjleelementet, hvis intet hindrer disse deformationer. Sammenhængen i konstruktionen bevirker, at der kommer modsat rettede tværspændinger i mørtelfugen og i søjleelementenden, og forskydningskræfter i skillefladen mellem fugemørtlen og søjleelementenden.

Idet det forudsættes, at mørtlens elasticitetskoefficient E_m er mindre end betonens E_c , og at mørtlens tværudvidelseskoefficient ν_m er større end betonens ν_c , vil mørtlen blive presset udad i forhold til betonen, når samlingen belastes med en axial-tryk-kraft, og der kommer tvær-tryk-spændinger i mørtlen.

I denne treaksede trykspændingstilstand har mørtlen en bæreevne, der er større end mørtelstyrken, fundet ved énakset trykprøvning.

Samlingens største bæreevne nås efter flydning i mørtlen og omfordeling af forskydningskræfterne i skillefladen mellem fugemørtlen og søjleelement og af tværspændingerne i mørtlen. Denne største bæreevne af mørtelfugen fås med mest muligt af mørtlen i fugen under størst muligt tværtryk.

Forskydningskræfterne imellem fugemørtlen og søjleelementet regnes i brudsituationen alene overført ved friktion i en randzone.

Og i mørtlen i fugen inden for denne randzone regnes med en konstant tværtrykspænding og en forøget mørteltrykstyrke $f_{m,3}$, - se herom nedenfor.

Som "modhold" for tværtrykket i mørtelfugen antages i brudsituationen dannet en trykbue i randzonen af mørtlen, gående fra søjleelement til søjleelement.

Anbringes en ringarmering i mørtelfugen (i randzonen), vil denne kunne udgøre modholdet for tværtrykket i mørtlen.

I søjleelementenden kommer der tvær-træk-spændinger som reaktion for de udadrettede kræfter fra trykbuen i fugemørtlen.

Trækspændingerne vinkelret på længdeaksen i søjleelementenden forårsager en reduktion af søjleelementendens bæreevne.

Elasticitetskoefficienterne E_m og E_c samt tværuddvidelseskoefficienterne ν_m og ν_c skal være repræsentative for brudsituationen. Forrest i rapporten er angivet de benyttede særlige definitioner for disse materialekarakteristika. Med disse definitioner er E_m henholdsvis E_c den koefficient, der ved division op i spændingen giver tøjningen i brudsituationen, og ν_m henholdsvis ν_c forholdet mellem tværtøjningen og tøjningen i længdeaksens retning i brudsituationen.

Følgende brudsituationer kan nu være bestemmende for bæreevnen:

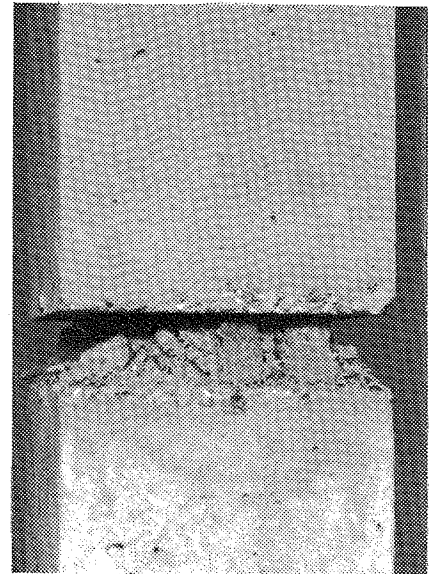
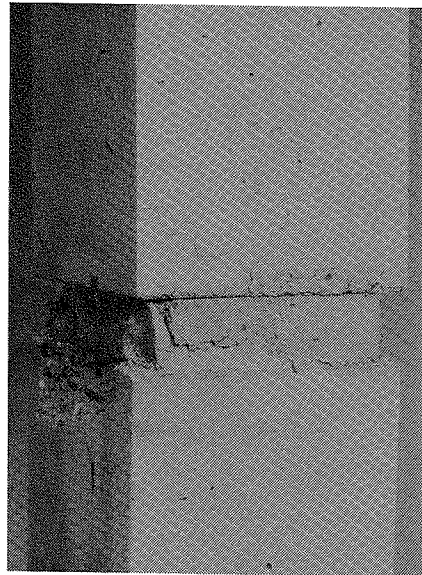
- | | |
|----------------------------|---|
| brudtilfælde urevnet søjle | 1) Brud i mørtelfugen, uden søjleelementenderne er revnede forinden. Denne situation er benævnt "brudtilfælde urevnet søjle". |
| brudtilfælde revnet søjle | 2) Brud i mørtelfugen, efter at søjleelementenderne er revnede. Denne situation er benævnt "brudtilfælde revnet søjle". |
| søjleende brudbæreevne | 3) Brud i søjleelementenderne, uden brud i mørtelfugen. |

Som en given samplings teoretisk beregnede bæreevne regnes med den største af værdierne i de to første tilfælde: brudtilfælde urevnet søjle og brudtilfælde revnet søjle, idet dog bæreevnen ikke kan være højere end værdien i det tredje tilfælde: brud i søjleende.

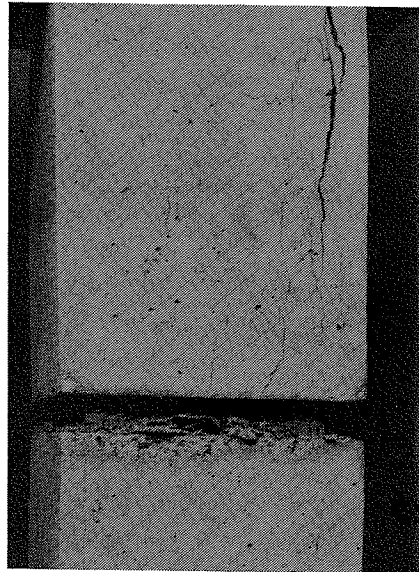
brudtilfælde urevnet søjle	For brud i mørtelfugen med urevnede søjleelementer er opstillet et formelsæt, der giver bæreevnen som funktion af mørteltværsnittets areal A_m , mørtelstyrken f_m , mørtelfugens højde/bredde forhold h/b , forholdet mellem elasticitetskoefficienterne E_m/E_c og en dimensionsløs størrelse β , hvori indgår tværudvidelseskoefficienterne v_m og v_c for henholdsvis mørtel og beton samt elasticitetskoefficienterne E_m og E_c for henholdsvis mørtel og beton.
----------------------------	--

Det skal bemærkes, at betegnelsen brudtilfælde urevnet søjle refererer til søjleelementendens tilstand umiddelbart inden brud; i forbindelse med selve bruddet kan der ske det, at søjlen revner.

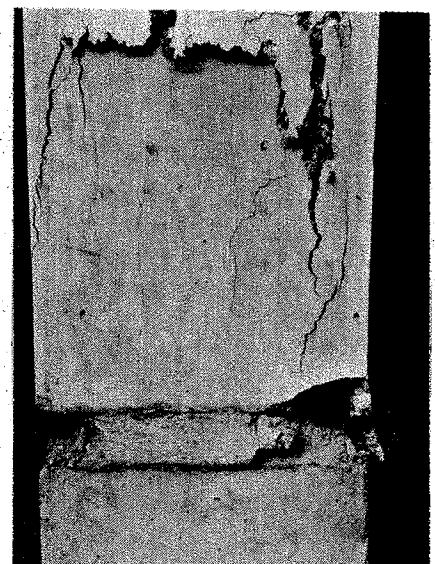
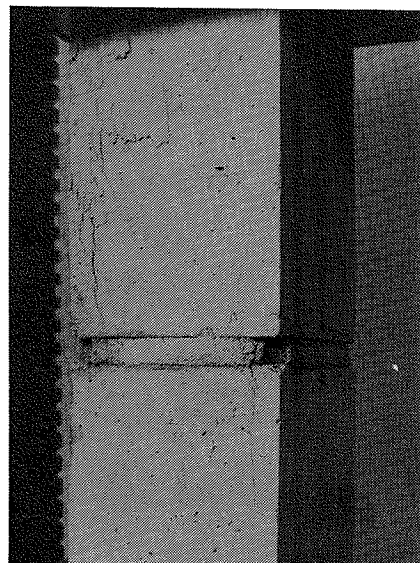
Figur 4. Eksempler på brud i mørtelfugen uden søjleelementerne er revnede forinden.



Figur 5. Eksempler på brud i mørtelfugen efter at søjleelementerne er revnede.



Figur 6. Eksempler på brud i søjleelementenden uden brud i mørtelfugen.



brudtilfælde For brud i mørtelfugen med revnede søjleelementen-
 revnet der er opstillet 2 forskellige formelsæt til be-
 søjle regning af bæreevnen: 1 for en samling med uarme-
 ret mørtel og 1 for en samling med armeret mørtel.

Med uarmeret mørtel fås bæreevnen som funktion af mørtelfugens effektive areal A_r med tværmål b_r , hvor b_r bestemmes som den mindste af: fugens tværmål b og tværmålet for bøjlerne i søjleelementenden $b_{r,st,søj}$, mørtelstyrken f_m , mørtlens tværudvidelseskoefficient v_m , mørtelfugens højde/bredde forhold h/b_r og en dimensionsløs størrelse α , hvori indgår tværarmeringsarealet A_{st} , armeringens elasticitetskoefficient E_{st} , mørtlens elasticitetskoefficient E_m , fugens højde h og effektive bredde b_r .

Med armeret mørtel fås bæreevnen som funktion af mørtelfugens effektive areal A_r med tværmål b_r , hvor b_r bestemmes som den mindste af: tværmålet for bøjlerne i mørtelfugen $b_{r,st,fug}$ og tværmålet for bøjlerne i søjleelementenden $b_{r,st,søj}$, mørtelstyrken f_m , mørtlens tværudvidelseskoefficient v_m og en dimensionsløs størrelse α - tilsvarende ovenfor under uarmeret mørtel, men med b_r bestemt for armeret mørtel og med A_{st} også indeholdende armeringen i mørtelfugen.

søjleende For brud i søjleelementenderne uden brud i mørtel-
 brudbæreevne fugen beregnes bæreevnen som funktion af søjlens (beton)tværsnitsareal A_c , betonstyrken f_c , mørtelfugens højde/bredde forhold h/b , forholdet mellem elasticitetskoefficienterne E_m/E_c og den dimensionsløse størrelse β (se ovenfor under brudtilfælde urevnet søjle).

Treakset mørtelstyrke $f_{m,3}$

Mørtlen i fugen kommer - som tidligere nævnt - under treakset tryk, og den får derfor en forøget styrke $f_{m,3}$ i forhold til den énaksede trykstyrke f_m afhængig af størrelsen af tværspændingen σ_x i forhold til trykspændingen på mørtelfugen (axialspændingen σ_z).

Efter Coulomb, se f.eks. [4], kan denne forøgede styrke beregnes af

$$\sigma_1/f_m - \sigma_3/f_m/4 = 1$$

hvor σ_1 er største hovedspænding

og σ_3 er mindste hovedspænding;

spændingerne er positive som tryk;

eller - omskrevet - af

$$f_{m,3}/f_m = 1/(1 - 4 \cdot \sigma_x/\sigma_z)$$

K.W. Johansen fremlægger i [1] brudhypoteser for mørtel. Som (matematisk) brudbetingelse gennemgås bl.a. kurverne ret linie og hyperbel med parametrene σ_{mid} og τ_{mid} , hvor $\sigma_{mid} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ og $\tau_{mid} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$; σ_1 og σ_3 er største og mindste hovedspænding.

Forsøgsresultater med treaksede trykforsøg for mørtel er vist i et τ_{mid}/f_m - σ_{mid}/f_m diagram.

K.W. Johansen konkluderer, at man kan anvende friktionshypotesen

$$\sigma_1 = f_m + 4 \cdot \sigma_3$$

som er den samme som Coulombs brudhypotese.

I udledningen på de efterfølgende sider af samlingens bæreevne antages det, at styrkeforøgelsen $f_{m,3}/f_m$ som følge af, at mørtlen kommer under trekantet tryk, kan beregnes af nedenstående udtryk (1), der er opstillet som en hyperbel-tilnærmelse til de i [1] anførte forsøgsresultater. I øvrigt henvises til [6]. For små værdier af tværspændingen σ_x (mindre end ca. 0,15 gange axialspændingen σ_z) giver (1) omtrent samme værdi for styrkeforøgelsen $f_{m,3}/f_m$ som friktionshypotesen. For større værdier af σ_x/σ_z giver (1) i forhold til friktionshypotesen en mere moderat styrkeforøgelse.

Den benyttede sammenhæng mellem tværspænding og styrkeforøgelse er

$$(1) \quad \left((f_{m,3}/f_m) \cdot (1 + \sigma_x/\sigma_z) / 2 + 2,35 \right)^2 / 6,25 \\ - \left((f_{m,3}/f_m) \cdot (1 - \sigma_x/\sigma_z) / 2 \right)^2 / 0,835 = 1$$

gældende for $\sigma_x/\sigma_z \geq 0$ og $f_{m,3}/f_m > 0$.
Spændingerne regnes positive som tryk.

Figur 7 viser en tabel med sammenhørende værdier af σ_x/σ_z og $f_{m,3}/f_m$ efter ovenstående udtryk (1).

Figur 7.

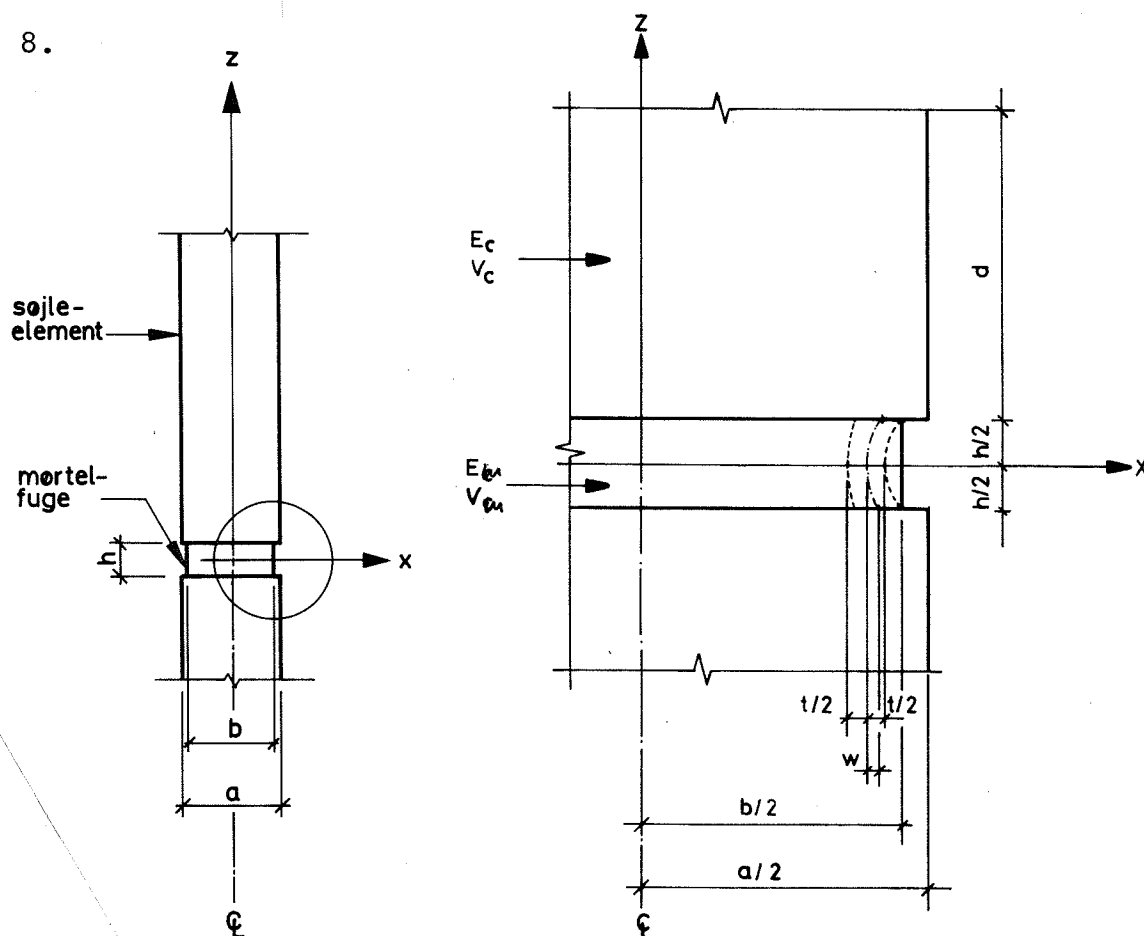
σ_x/σ_z	$f_{m,3}/f_m$
0,000	1,00
0,025	1,18
0,050	1,37
0,075	1,57
0,100	1,80
0,125	2,05
0,150	2,34
0,175	2,68
0,200	3,09
0,225	3,58
0,250	4,18

2.1 Brudtilfælde urevnet søjle

Det antages, at der sker brud i mørtelfugen, uden søjleelementenderne er revnede forinden.

Der betragtes en samling med en almindelig mørtelfuge (uden armering), - se figur 8.

Figur 8.



Mørtelfugen har højde h og tværmål b .

Søjlen har tværmål a.

Mørtlen har styrken f_m , søjlebetonen styrken f_c .

Elasticitetskoefficient og tværudvidelseskoefficient for henholdsvis mørtel og beton er E_m og v_m henholdsvis E_c og v_c . For disse størrelser gælder særlige definitioner, jævnfør foran, med det formål, at de kan bruges til at beskrive sammenhængen mellem tøjninger og spændinger i brudsituationen.

Det forudsættes, at $E_m < E_c$ og $\nu_m > \nu_c$.

Der regnes med en model som beskrevet tidligere.

Samlingen er belastet med axial-tryk-spændingen σ_z .

Mørtelfugen får tvær-tryk-spændingen σ_x .

I randzonen af mørtlen regnes med en trykbue som "modhold" for tværtrykket.

Tværkræfterne imellem fugemørtlen og søjleelement regnes overført ved friktion i randzonen.

Det er således nødvendigt, at friktionskoefficienten mellem fugemørtlen og betonelementet er stor nok, til at buekraftens komponent i skillefladens plan kan overføres. Der regnes med, at der i en skilleflade som den her foreliggende maximalt kan regnes med en friktionskoefficient på omkring $3/4$, hvorved trykbuen bliver forholdsvis flad.

I mørtelfugen forudsættes deformationsforholdene i et plan vinkelret på længdeaksen at være sådan, at i ethvert punkt inden for randzonen er tøjningen den samme og ens i alle retninger; den resulterende flytning er i ethvert punkt rettet radiært væk fra længdeaksen.

Tilsvarende antages at gælde for deformationsforholdene i søjleelementenderne i et plan vinkelret på længdeaksen. Men tøjningerne har forskellig størrelse i mørtelfugen og i søjleelementenderne.

Et punkt i mørtelfugen i afstanden s fra længdeaksen vil - når samlingen udsættes for axialspændingen σ_z - få nettoflytningen ("uddrivningen") Δs_0 væk fra længdeaksen, hvis det uhindret kan blive flyttet.

Uddrivningen Δs_0 beregnes som tværudvidelsen i mørtlen minus tværudvidelsen i betonen:

$$\Delta s_0 = v_m \cdot \sigma_z / E_m \cdot s - v_c \cdot \sigma_z / E_c \cdot s$$

I randzonen, der virker som "modhold", i mørtelfugen, står en trykbue med spændvidden h og pilhøjden w samt tykkelsen t midt i spændet.

Buelængden ℓ_{bue} for en flad parabel er med tilnærmelse

$$\ell_{bue} = h \cdot (1 + 8/3 \cdot (w/h)^2)$$

Idet der for en parabelbue gælder, at tangens til vinklen mellem buens retning i vederlagspunktet og linien gennem vederlagspunkterne er 4 gange pilhøjdeforholdet w/h , fås at w/h bliver $1/4$ gange friktionskoefficienten mod vederlaget, når buekraften skal overføres til vederlaget (søjleelementet) alene ved friktion. Med en maximal friktionskoefficient på $3/4$ kan w/h således højst være $3/16$.

Buen bærer tværtrykspændingen σ_x i mørtelfugen.

Spændingen σ_{bue} i trykbuen er

$$\sigma_{bue} = \sigma_x \cdot h^2 / 8w/t$$

Denne spænding er konstant over buelængden, når tykkelsen varierer sådan, at projektionen vinkelret på buespændet er konstant. Det forudsættes, at buespændingen kan regnes konstant over længden.

Buelængden sammentrykkes længden $\Delta \ell_{bue}$

$$\Delta \ell_{bue} = \sigma_{bue} / E_m \cdot \ell_{bue}$$

Trykbuens eftergiven Δs_1 findes som forskellen mellem pilhøjden w for den udeformerede bue og den pilhøjde $w - \Delta s_1$, en bue med længden $\ell_{bue} - \Delta \ell_{bue}$ har for samme spændvidde h .

Δs_1 findes af

$$h \cdot (1 + 8/3 \cdot (w/h)^2) \cdot (1 - \sigma_{bue}/E_m) =$$

$$h \cdot (1 + 8/3 \cdot ((w - \Delta s_1)/h)^2)$$

Vi får

$$\Delta s_1 = h/16 \cdot (1 + 3/8 \cdot (w/h)^2) / (t/h) \cdot \sigma_x/E_m$$

Søjleelementenderne, der virker som understøtninger for trykbuen, får udadrettede påvirkninger. Der kommer således tvær-træk-spændinger i søjleelementenderne.

Der regnes som en tilnærmelse med, at tværtrækspændingerne er konstante over højden d i hver søjleelementende og ellers lig nul.

Et punkt i søjleelementenden i afstanden s fra længdeaksen vil i henhold til de tidligere nævnte forudsætninger få flytningen Δs_2 radiært væk fra længdeaksen.

$$\Delta s_2 = -\sigma_{x,c} \cdot (1 - \nu_c) / E_c \cdot s$$

eller - på den sikre side -

$$\Delta s_2 = -\sigma_{x,c} / E_c \cdot s$$

hvor $\sigma_{x,c}$ er tværspændingen - positiv som tryk - i søjleelementenden, og E_c er betonens elasticitetskoefficient som særligt defineret foran (der regnes med, at denne E_c kan bruges som en tilnærmelse).

Af ligevægtsligningen projektion vinkelret på z -aksen for en løsskåret halvdel af samlingen med en udstrækning i z -aksens retning på $d+h+d$ fås

$$\sigma_x \cdot b^* \cdot h + \sigma_{x,c} \cdot a \cdot d \cdot 2 = 0$$

b^* er den bredde, som tværtrykspændingen i mørtlen regnes virkende over. b^* vil for en geometri som for de aktuelle forsøgsemner typisk være omkring 0,9 gange b .

Som tilnærmelse regnes her med $b^* = b$.

Figur 9.

Bæreevnetabel.

 $N_{j,u,m}/A_m/f_m$

Brudtilfælde urevnet søjle. Uarmeret fugemørtel.

 $\xi = 0,5$. $w/h \leq 3/16$ ($\mu_{n\odot dv} = 3/4$). $E_m/E_c = 0,5$. $N_{j,u,m}/A_m/f_m$ β

	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
h/b					
0,12	1,34	1,60	1,92	2,33	2,88
0,16	1,23	1,44	1,68	1,98	2,36
0,20	1,14	1,30	1,49	1,71	1,98
0,24	1,06	1,19	1,33	1,49	1,69
0,30	1,00	1,05	1,15	1,26	1,38

Vi får

$$\Delta s_2 = 1/2 \cdot h/d \cdot b/a \cdot \sigma_x / E_c \cdot s$$

eller, idet der indføres

$$(2) \quad \xi = d/b \cdot a/b$$

$$\Delta s_2 = 1/2 \cdot h/b \cdot \xi \cdot \sigma_x / E_c \cdot s$$

Sammentrykningen Δs_3 vinkelret på z-aksen af mørtlen i fugen oven længden s for tvær-tryk-spændingen σ_x er

$$\Delta s_3 = \sigma_x \cdot (1 - \nu_m) / E_m \cdot s$$

eller - på den sikre side -

$$\Delta s_3 = \sigma_x / E_m \cdot s$$

Sammenhængen mellem Δs_0 , Δs_1 , Δs_2 og Δs_3 er givet ved

$$\Delta s_0 - \Delta s_1 - \Delta s_2 = \Delta s_3$$

Med s sat til

$$s = b/2 - w - t/2$$

og idet der indføres

$$(3) \quad \beta = \nu_m \cdot (1 - \nu_c / \nu_m \cdot E_m / E_c)$$

fås af ovenstående

$$(4) \quad \sigma_x / \sigma_z = \beta / \left(1 + h/b \cdot \xi \cdot E_m / E_c + (1 + 3/8 \cdot (w/h)^2) / 16 \cdot (t/h) / (b/h \cdot 2 - w/h - t/h \cdot 2) \right)$$

Med den foretagne tilnærmelse, hvorved der ikke tages hensyn til virkningen af tværspændingen vinkelret på den betragtede x-akse, fås en mindre værdi for den til gunst for bæreevnen virkende tværspænding σ_x .

Med det tidligere opstillede udtryk (1) for sammenhængen mellem styrkeforøgelse $f_{m,3}/f_m$ og tværspænding σ_x/σ_z kan nu beregnes styrkeforøgelsen af fugemørtelstyrken over et areal med tværmål $2 \cdot s$.

Samlingens bæreevnekraft $N_{j,u,m}$ beregnes på grundlag af et reduceret areal med tværmål $b-2 \cdot w$ med brudspændingen $f_{m,3}$, idet der dog kun regnes med f_m på en randstrimmel med bredden $t/2$ inden for det reducerede areal.

(5)

Vi får da - for en fuge med tværsnitsareal A_m

$$N_{j,u,m} = A_m \cdot f_m \cdot \left((1-2 \cdot w/h \cdot h/b)^2 + (f_{m,3}/f_m - 1) \cdot (1-2 \cdot w/h \cdot h/b - t/h \cdot h/b)^2 \right)$$

Som bæreevne $N_{j,u,m}$ bestemmes maximumværdien for varierende værdier af w/h og t/h , idet dog w/h som nævnt ovenfor ikke kan regnes større end $1/4$ gange friktionskoefficienten mellem mørtel og elementbeton.

Det er også en forudsætning, at buespændingen σ_{bue} ikke overstiger mørtelstyrken f_m :

(6)

$$\begin{aligned} \sigma_{bue}/f_m &= \sigma_x/f_m \cdot h^2/8/w/t \\ &\approx \sigma_x/\sigma_z \cdot f_{m,3}/f_m / 8 / (w/h) / (t/h) \leq 1 \end{aligned}$$

Den teoretisk beregnede bæreevne $N_{j,u,m}$ i "urevnet tilfælde" kan angives i bæreevnetabeller.

Figur 9 viser en sådan bæreevnetabel, - med $E_m/E_c = 0,5$ og $\xi = 0,5$ i formel (4) samt med $w/h \leq 3/16$ (svarende til, at der regnes med en friktionskoefficient i skellet mellem fugemørtel og elementbeton på højst $3/4$).

2.2 Brudtilfælde revnet søjle

Det antages her, at der sker brud i mørtelfugen, efter at søjleelementenderne er revnede.

Tværarmeringen i søjleelementenderne - og armering i mørtelfugen, hvor en sådan forekommer - tages i regning.

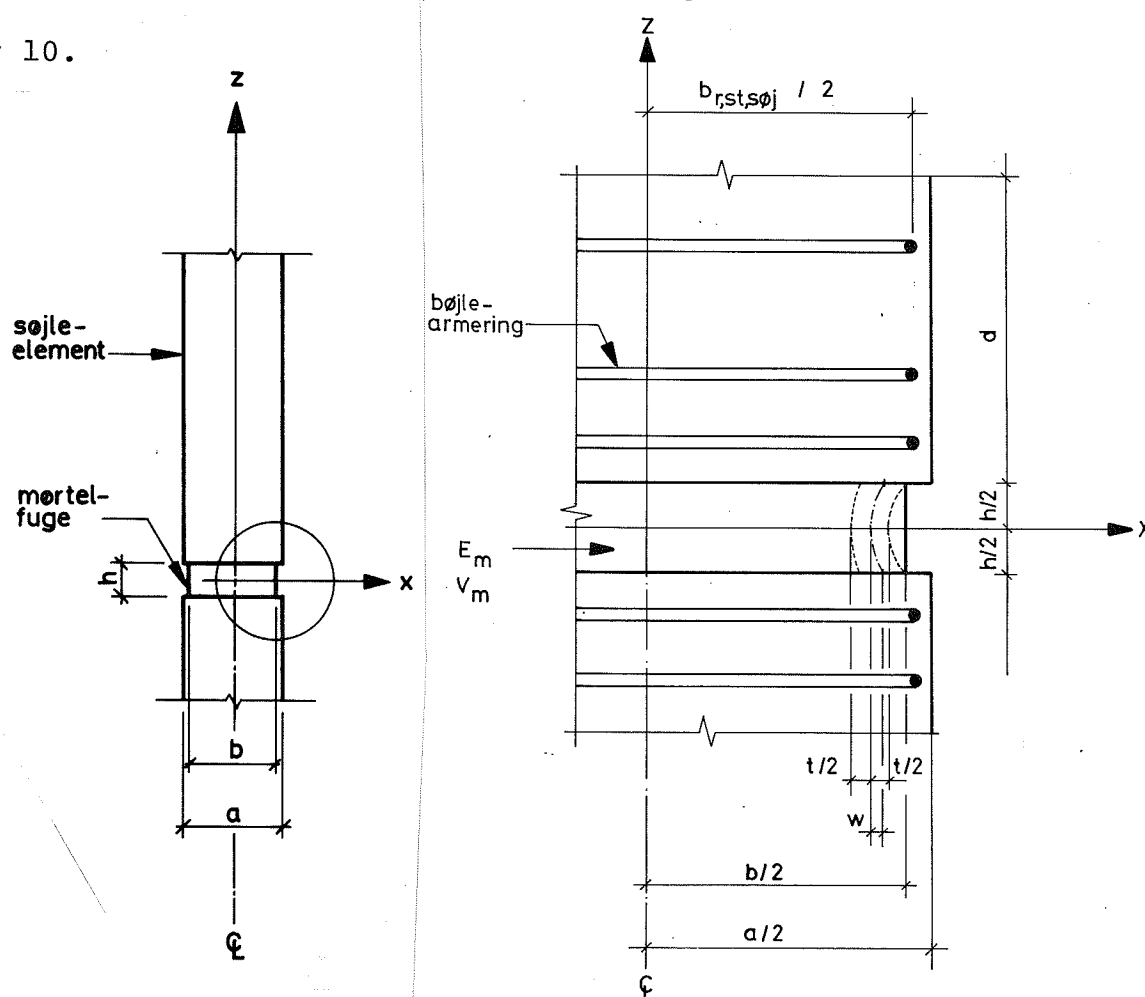
2.2.1 Uarmeret fugemørtel.

Der betragtes en samling med en mørtelfuge med højde h og tværmål b . Søjlen har tværmål a .

Mørtlen har styrken f_m , elasticitetskoefficienten E_m og tværudvidelseskoefficienten ν_m . (Se de særlige definitioner af E_m og ν_m).

Søjleelementenderne har en tværarmering (bøjlearmering) med en udstrækning (bøjletværmål) vinkelret på z -aksen på $b_{r,st,søj}$.

Figur 10.



Modellen, der benyttes, og herunder tøjningsforholdene, er i princippet som i brudtilfældet urevnet søjle, dog med den ændring, at der ikke regnes med nogen tværspændinger i betonen i søjleelementenderne; her regnes tværarmeringen virksom til optagelse af tværtrækket.

Som virksomt areal af samlingen til optagelse af axialbelastning regnes et reduceret areal A_r med tværmål b_r , hvor b_r bestemmes som den mindste af værdierne for mørtelfugens tærmål b og bøjletværmålet $b_{r,st,søj}$ i søjleelementenden, dvs.

$$(7) \quad b_r \leq \begin{cases} b \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

Et punkt i mørtelfugen i afstanden s fra længdeaksen vil - når samlingen udsættes for axialspændingen σ_z - få flytningen ("uddrivningen") Δs_o væk fra længdeaksen, hvis det uhindret kan blive flyttet.

Vi får her

$$\Delta s_o = v_m \cdot \sigma_z / E_m \cdot s$$

Trykbuen, der virker som "modhold", i mørtelfugens randzone med spændvidden h og pilhøjden w samt tykkelsen t midt i spændet, har en buespænding σ_{bue}

$$\sigma_{bue} = \sigma_x \cdot h^2 / 8w/t$$

og en eftergiven Δs_1

$$\Delta s_1 = h/16 \cdot (1 + 3/8 \cdot (w/h)^2) / (t/h) \cdot \sigma_x / E_m$$

når den udsættes for tværtrykspændingen σ_x - (jævnfør brudtilfældet urevnet søjle).

Et punkt i søjleelementenden i afstanden s fra længdeaksen får, som følge af de udadrettede påvirkninger fra trykbuen i mørtlen, en flytning

Δs_2 væk fra længdeaksen, som her bestemmes af

$$\Delta s_2 = \sigma_{st} / E_{st} \cdot s$$

hvor σ_{st} er spændingen (positiv som træk) i tværarmeringen i søjleelementenden, og E_{st} er elasticitetskoefficienten for armeringsstålet.

Det forudsættes her, at spændingen i tværarmeringen er mindre end proportionalitetsgrænsen for armeringsstålet.

Af ligevægtsligningen projektion vinkelret på z-aksen for en løsskåret halvdel af samlingen med en udstrækning i z-aksens retning på $d+h+d$ fås

$$\sigma_x \cdot h \cdot b_r^* - \sigma_{st} \cdot A_{st} = 0$$

A_{st} er arealet af den tværarmering, der går gennem det lodrette (midter)snit.

b_r^* er den bredde, som tværtrykspændingen i mørtlen regnes virkende over. b_r^* vil for en geometri som for de aktuelle forsøgsemner typisk være omkring 0,9 gange b_r .

Som tilnærmelse regnes her med $b_r^* = b_r$.

Stålspændingen σ_{st} antages at kunne regnes til samme værdi i tværarmering inden for en afstand d fra mørtelfugen.

Vi får

$$\Delta s_2 = \sigma_x / E_{st} \cdot h \cdot b_r / A_{st} \cdot s$$

eller - idet der indføres

$$(8) \quad \alpha = A_{st} \cdot E_{st} / b_r \cdot h / E_m$$

$$\Delta s_2 = \sigma_x / E_m \cdot l / \alpha \cdot s$$

Sammentrykningen Δs_3 vinkelret på z-aksen af mørtlen i fugen over længden s for tværtrykspændingen σ_x er

$$\Delta s_3 = \sigma_x \cdot (1 - \nu_m) / E_m \cdot s$$

eller - på den sikre side -

$$\Delta s_3 = \sigma_x / E_m \cdot s$$

idet der herved fås en mindre værdi for den til gunst for bæreevnen virkende tværspejnding σ_x .

Sammenhængen mellem Δs_0 , Δs_1 , Δs_2 og Δs_3 er givet ved

$$\Delta s_0 - \Delta s_1 - \Delta s_2 = \Delta s_3$$

Med s sat til

$$s = b/2 - w - t/2$$

fås af ovenstående

$$(9) \quad \sigma_x / \sigma_z = \nu_m / \left(1 + 1/\alpha + (1 + 3/8 \cdot (w/h)^2) / 16 \cdot (t/h) / (b_r/h \cdot 2 - w/h - t/h \cdot 2) \right)$$

Med det tidligere opstillede udtryk (1) for sammenhængen mellem styrkeforøgelse $f_{m,3}/f_m$ og tværspejnding σ_x/σ_z kan nu beregnes styrkeforøgelsen af fugemørtelstyrken over et areal med tværmål $2 \cdot s$.

Samlingens bæreevnekræft $N_{j,u,r}$ beregnes på grundlag af et reduceret areal med tværmål $b_r - 2 \cdot w$ med brudspændingen $f_{m,3}$, idet der dog kun regnes med f_m på en randstrimmel med bredden $t/2$ inden for det reducerede areal.

Vi får da - for en fuge med effektivt areal A_r med tværmål

$$b_r \leq \begin{cases} b \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

$$(10) \quad N_{j,u,r} = A_r \cdot f_m \cdot \left((1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b_r)^2 + (f_{m,3}/f_m - 1) \cdot (1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b_r - t/h \cdot h/b_r)^2 \right)$$

Som bæreevne $N_{j,u,r}$ bestemmes maximumværdien for varierende værdier af w/h og t/h , idet dog w/h ikke kan regnes større end $1/4$ gange friktionskoefficienten mellem mørtel og elementbeton (jfr. afsn. 2.1).

Det er også en forudsætning, at buespændingen σ_{bue} ikke overstiger mørtelstyrken f_m :

$$\begin{aligned} \sigma_{bue}/f_m &= \sigma_x/f_m \cdot h^2 / 8w/t \\ (6) \quad &\simeq \sigma_x/\sigma_z \cdot f_{m,3}/f_m / 8 / (w/h) / (t/h) \leq 1 \end{aligned}$$

Ligeledes er det en forudsætning, at spændingen σ_{st} ligger under proportionalitetsgrænsen for armeringsstålet.

Der gælder

$$\begin{aligned} \sigma_{st} &= \sigma_x \cdot h \cdot b_r^* / A_{st} \\ (11) \quad &\simeq \sigma_x/\sigma_z \cdot h \cdot b_r \cdot f_{m,3} / A_{st} \end{aligned}$$

Er kravet til σ_{st} ikke opfyldt, må i stedet for den konstante elasticitetskoefficient E_{st} indføres en variabel, og det må så kontrolleres, at brudspændingen (og brudtøjningen) ikke overskrides.

Den teoretisk beregnede bæreevne $N_{j,u,r}$ i "revnet tilfælde" for en samling med uarmeret mørtel, kan angives i bæreevnetabeller.

Figur 11 viser sådanne bæreevnetabeller, - med $w/h \leq 3/16$ (svarende til, at der regnes med en friktionskoefficient i skellet mellem fugemørtel og elementbeton på højst $3/4$). Fig. a viser bæreevnen for een værdi af v_m og forskellige værdier af h/b_r og α . Fig. b viser bæreevnen for een værdi af h/b_r og forskellige værdier af v_m og α .

Figur 11.

Bæreevnetabel.

$$N_{j,u,r}/A_r/f_m$$

Brudtilfælde revnet søjle. Uarmeret fugemørtel.

$$w/h \leq 3/16 \quad (\mu_{n\ddot{o}dv} = 3/4).$$

a)

$$N_{j,u,r}/A_r/f_m$$

$$v_m = 0,30$$

	α				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
h/b_r					
0,12	1,76	1,97	2,11	2,22	2,31
0,16	1,61	1,76	1,87	1,95	2,02
0,20	1,47	1,59	1,67	1,73	1,77
0,24	1,35	1,44	1,50	1,54	1,57
0,30	1,19	1,25	1,29	1,31	1,33

b)

$$N_{j,u,r}/A_r/f_m$$

$$h/b_r = 0,20$$

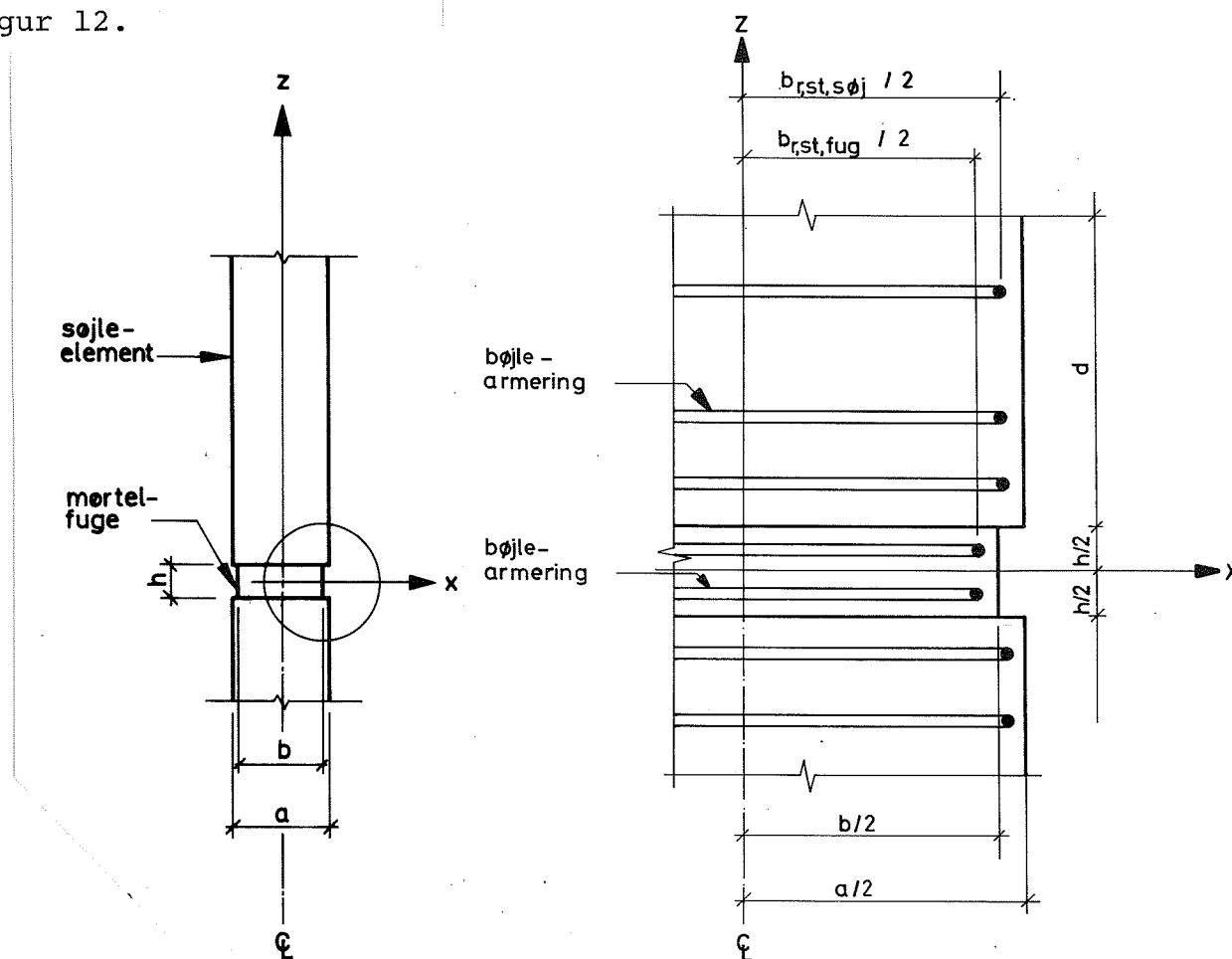
	α				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
v_m					
0,40	1,76	1,96	2,11	2,22	2,31
0,35	1,61	1,76	1,87	1,95	2,01
0,30	1,47	1,59	1,67	1,73	1,77
0,25	1,35	1,44	1,50	1,54	1,57
0,20	1,24	1,30	1,34	1,37	1,39

2.2.2 Armeret fugemørtel

Der betragtes en samling som den i det forrige afsnit, men her med en bøjlearmering (eller en ringarmering) i mørtelfugen.

Armeringen i fugen har en udstrækning (bøjletværmål) vinkelret på z-aksen på $b_{r,st,fug}$.

Figur 12.



Modellen, der benyttes, og herunder tøjningsforholdene, er i princippet som i forrige afsnit, dog med den ændring, at trykbuen som modhold i mørtelfugen er erstattet af fugearmeringen.

Tværmålet b_r for det effektive areal A_r til optagelse af axialbelastning bestemmes her som den mindste af værdierne for bøjletværmålet $b_{r,st,fug}$ i mørtelfugen og bøjletværmålet $b_{r,st,søj}$ i søjleelementen, dvs.

$$(12) \quad b_r \leq \begin{cases} b_{r,st,fug} \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

Et punkt i mørtelfugen er afstanden s fra længdeaksen vil for axialbelastningen σ_z få flytningen ("ud-drivningen") Δs_o væk fra længdeaksen, hvis det uhin-dret kan blive flyttet

$$\Delta s_o = v_m \cdot \sigma_z / E_m \cdot s$$

Flytningen Δs_2 af et punkt i afstanden s fra længdeaksen som følge af armeringens eftergiven er

$$\Delta s_2 = \sigma_x / E_m \cdot l / \alpha \cdot s$$

hvor

$$(8) \quad \alpha = A_{st} \cdot E_{st} / b_r \cdot h / E_m$$

ligesom i forrige afsnit.

I A_{st} skal dog her indregnes armeringen både i søj-leelementenderne (på en strækning d fra mørtelfugen) og i mørtelfugen.

b_r bestemmes af (12).

Sammentrykningen Δs_3 af mørtlen i fugen over længden s for tværtrykspændingen σ_x er

$$\Delta s_3 = \sigma_x \cdot (1 - v_m) / E_m \cdot s$$

eller - på den sikre side -

$$\Delta s_3 = \sigma_x / E_m \cdot s$$

ligesom i de forrige afsnit.

Sammenhængen mellem Δs_o , Δs_2 og Δs_3 er givet ved

$$\Delta s_o - \Delta s_2 = \Delta s_3$$

Af ovenstående fås

$$(13) \quad \sigma_x / \sigma_z = v_m / (1 + l / \alpha)$$

Med det tidligere opstillede udtryk (1) kan nu be-regnes styrkeforøgelsen af fugemørtelstyrken.

Samlingens bæreevnekraft $N_{j,u,r}$ beregnes på grundlag af et reduceret areal med tværmål b_r med den forøgede brudspænding $f_{m,3}$.

Vi får da - for en fuge med effektivt areal A_r med tværmål

$$b_r \leq \begin{cases} b_{r,st,fug} \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

$$(14) \quad N_{j,u,r} = A_r \cdot f_{m,3}$$

Det er en forudsætning, at spændingen σ_{st} ligger under proportionalitetsgrænsen for armeringsstålet.

Der gælder

$$(11) \quad \sigma_{st} = \sigma_x / \sigma_z \cdot h \cdot b_r \cdot f_{m,3} / A_{st}$$

Er kravet til σ_{st} ikke opfyldt, må i stedet for den konstante elasticitetskoefficient E_{st} indføres en variabel, og det må så kontrolleres, at brudspændingen (og brudtøjningen) ikke overskrides.

Det er også en forudsætning, at der i randen af skillefladen mellem fugemørtel og elementbeton kan overføres den del af tværkræfterne i samlingen, som armeringen i søjleelementenden skal optage.

Strækningen d , inden for hvilken armeringen i søjleelementenden regnes med i A_{st} , skal afpasses, så det ovenfor anførte kan regnes opfyldt.

Den teoretisk beregnede bæreevne $N_{j,u,r}$ i "revnet tilfælde" for en samling med armeret mørtel, kan angives i bæreevnetabel for forskellige værdier af v_m og α .

Figur 13 viser en sådan bæreevnetabel.

Figur 13.

Bæreevnetabel.

 $N_{j,u,r}/A_r/f_m$

Brudtilfælde revnet søjle. Armeret fugemørtel.

 $N_{j,u,r}/A_r/f_m$

	α				
	1	2	3	4	5
v_m					
0,40	3,09	4,66	5,94	6,98	7,86
0,35	2,68	3,76	4,54	5,12	5,57
0,30	2,34	3,09	3,58	3,92	4,18
0,25	2,05	2,56	2,88	3,09	3,24
0,20	1,80	2,14	2,34	2,47	2,56

2.3 Søjleelementendens bæreevne

Søjleelementendens bæreevne sætter en øvre grænse for samlingens bæreevne.

Idet der forudsættes tværtryk i mørtlen, når søjlen og samlingen udsættes for en axiallast, kommer der tvær-træk-spændinger i søjleelementenderne. Herved reduceres styrken af betonen i elementenden i forhold til den eenaksede trykstyrke. Der regnes her med følgende reduktion

$$(15) \quad f_{c,3}/f_c = 1/(1+4 \cdot \sigma_x/\sigma_z \cdot h/b)$$

hvor

$f_{c,3}$ er betontrykstyrken under treakset spænding med tvær-træk-spændinger

f_c er betontrykstyrken (eenakset)

σ_x er tværspændingen, positiv som tryk

σ_z er axialspændingen, positiv som tryk

h er fugehøjden

b er fugebredden

Der tages ikke særskilt hensyn til virkningen af armeringen i søjleelementenden.

Ovenstående reduktionsformel er udledt ved at anvende Coulombs brudhypotese

$$f_{c,3}/f_c = 1/(1-4 \cdot \sigma_{x,c}/\sigma_z)$$

hvor $\sigma_{x,c}$ er tværspændingen i søjleelementenden regnet positiv som tryk,

- og endvidere ligevægtsligning for tværkræfter (i mørtelfuge og i søjleelementender)

$$\sigma_x \cdot b \cdot h + \sigma_{x,c} \cdot a \cdot d \cdot 2 = 0$$

hvor

- b^* er mørtelfugens regningsmæssige bredde i denne sammenhæng
- a er søjlens bredde
- d er søjleelementendens regningsmæssige udstrækning (højde)

Idet der i denne sammenhæng regnes med tilnærmelsen $b^* = b$, og idet $d/b \cdot a/b = \xi$ regnes lig med 0,5 fås

$$\sigma_{x,c}/\sigma_z = -\sigma_x/\sigma_z \cdot h/b$$

og derefter fås umiddelbart (15).

I (15) regnes med σ_x/σ_z værdien fra brudtilfælde urevnet søjle, - også i de tilfælde hvor brudtilfælde revnet søjle giver den højeste brudværdi.

Værdien af σ_x/σ_z fra brudtilfælde urevnet søjle med bæreevnen $N_{j,u,m}$ nedsættes med faktoren $1/(N_{j,u,m}/A_c/f_c)$, hvis $N_{j,u,m}/A_c/f_c$ er større end 1, - inden værdien bruges i (15).

De her foretagne tilnærmelser anses for rimelige, da reduktionen af f_c ikke er særlig stor (i størrelsesordenen 5-10%) i de her forekommende tilfælde.

Søjleelementendens bæreevne bliver

$$(16) \quad N_{j,u,c} = A_c \cdot f_{c,3}$$

hvor

- A_c er søjleelementets tværsnitsareal
- $f_{c,3}$ er reduceret betonstyrke, som beskrevet ovenfor.

2.4 Oversigt. Beregningsformler

Samling med uarmeret mørtel.

Bæreevnen af en samling med uarmeret mørtel er den største af bæreevnerne i henholdsvis tilfældet uarmeret søjle $N_{j,u,m}$ efter (5) m.fl. og i tilfældet revnet søjle $N_{j,u,r}$ efter (10) m.fl., - dog ikke større end søjleelementendens bæreevne $N_{j,u,c}$ efter (16) m.fl., d.v.s.

$$N_{j,u}^{cal} \leq \begin{cases} \max \begin{cases} N_{j,u,m} \\ N_{j,u,r} \end{cases} \\ N_{j,u,c} \end{cases}$$

$N_{j,u,m}$ beregnes af

$$(5) \quad N_{j,u,m} = A_m \cdot f_m \cdot ((1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b)^2 + (f_{m,3}/f_m - 1) \cdot (1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b - t/h \cdot h/b)^2)$$

$f_{m,3}/f_m$ bestemmes af

$$(1) \quad \begin{aligned} & ((f_{m,3}/f_m) \cdot (1 + \sigma_x/\sigma_z) / 2 + 2,35)^2 / 6,25 \\ & - ((f_{m,3}/f_m) \cdot (1 - \sigma_x/\sigma_z) / 2)^2 / 0,835 = 1 \end{aligned}$$

for

$$(4) \quad \begin{aligned} \sigma_x/\sigma_z &= \beta / \\ & (1 + h/b / 2 / \xi \cdot E_m/E_c \\ & + (1 + 3/8 / (w/h)^2) / 16 / (t/h) / \\ & (b/h / 2 - w/h - t/h / 2)) \end{aligned}$$

$$(3) \quad \beta = v_m \cdot (1 - v_c / v_m \cdot E_m / E_c)$$

$$(2) \quad \xi = d/b \cdot a/b$$

Som bæreevne $N_{j,u,m}$ bestemmes maximumværdien for varierende værdier af w/h og t/h , idet dog w/h ikke kan regnes højere end $1/4$ gange friktionskoefficienten mellem mørtel og elementbeton. Buespændingen σ_{bue} skal undersøges, jfr. afsnit 2.1.

$N_{j,u,r}$ beregnes af

$$(10) \quad N_{j,u,r} = A_r \cdot f_m \cdot (1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b_r)^2 + (f_{m,3}/f_m - 1) \cdot (1 - 2 \cdot w/h \cdot h/b_r - t/h \cdot h/b_r)^2$$

$f_{m,3}/f_m$ bestemmes af (1) for

$$(9) \quad \sigma_x / \sigma_z = v_m / (1 + 1/\alpha + (1 + 3/8 \cdot (w/h)^2) / 16 \cdot (t/h) / (b_r/h \cdot 2 - w/h - t/h \cdot 2))$$

$$(8) \quad \alpha = A_{st} \cdot E_{st} / b_r \cdot h / E_m$$

$$(7) \quad b_r \leq \begin{cases} b \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

Som bæreevne $N_{j,u,r}$ bestemmes maximumsværdien for varierende værdier af w/h og t/h , idet dog w/h ikke kan regnes højere end $1/4$ gange friktionskoefficienten mellem mørtel og elementbeton. Buespændingen σ_{bue} og spændingen i tværarmeringen σ_{st} skal undersøges, jfr. afsnit 2.2.1.

$N_{j,u,c}$ beregnes af

$$(16) \quad N_{j,u,c} = A_c \cdot f_{c,3}$$

$$(15) \quad f_{c,3}/f_c = 1/(1+4 \cdot \sigma_x/\sigma_z \cdot h/b)$$

σ_x/σ_z bestemmes af (4); hvis $N_{j,u,m}/A_c > f_c$

multipliseres værdien for σ_x/σ_z med $1/(N_{j,u,m}/A_c)$.

Samling med armeret mørtel.

Bæreevnen af en samling med armeret mørtel er den største af bæreevnerne i henholdsvis tilfældet revnet søjle $N_{j,u,r}$ efter (14) m.fl. og i tilfældet urevnet søjle $N_{j,u,m}$ efter (5) m.fl., - dog ikke større end søjleelementernes bæreevne $N_{j,u,c}$ efter (16) m.fl., d.v.s.

$$N_{j,u}^{cal} \leq \begin{cases} \max \begin{cases} N_{j,u,r} \\ N_{j,u,m} \end{cases} \\ N_{j,u,c} \end{cases}$$

$N_{j,u,c}$ bestemmes, som anført under uarmeret mørtel.

Kun ved meget svagt armerede samlinger vil $N_{j,u,m}$ være bestemmende.

$N_{j,u,r}$ beregnes af

$$(14) \quad N_{j,u,r} = A_r \cdot f_{m,3}$$

$f_{m,3}/f_m$ bestemmes af (1) for

$$(13) \quad \sigma_x/\sigma_z = v_m/(1+1/\alpha)$$

$$(8) \quad \alpha = A_{st} \cdot E_{st} / b_r / h / E_m$$

$$(12) \quad b_r \leq \begin{cases} b_{r,st,fug} \\ b_{r,st,søj} \end{cases}$$

Overføringen af tværkræfter til armering i søjle-elementender og spændingen i tværarmeringen σ_{st} skal undersøges, jfr. afsnit 2.2.2.

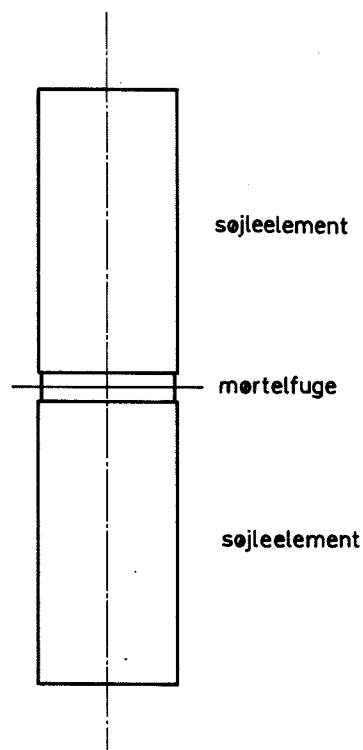
$N_{j,u,m}$ bestemmes som anført under uarmeret mørtel.

3. FORSØG

3.1 Forsøgsprogram og forsøgsemner

Med det formål at undersøge om den opstillede teori kan benyttes til beregning af bæreevnen af mørtelfuger imellem søjleelementer i beton, er der gennemført en række belastningsforsøg med forskellige forsøgsemner, hvor disse belastes i deres længdeakse, indtil bæreevnen er udtømt.

Figur 14.



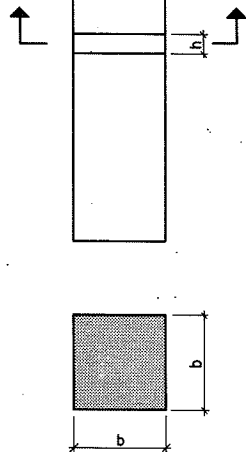
Forsøgsemnerne er i princippet opbygget som vist på figur 14 med en mørtelfuge imellem 2 søjleelementstykker. Forsøgsemnerne er symmetrisk opbygget om et plan, vinkelret på forsøgsemnets længdeakse gennem midtpunktet af fugen.

På figur 15 ses en oversigt over de forskellige forsøgsemner.

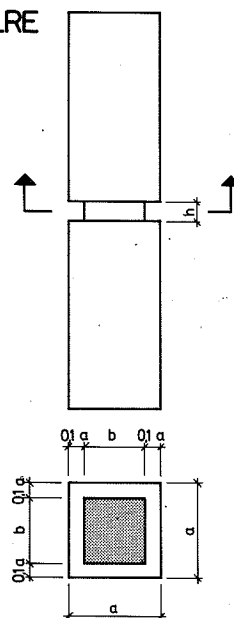
Forsøgsemnerne er karakteriseret med en bogstavbetegnelse, dækkende hovedudformningen.

Figur 16 viser en oversigt med en beskrivelse af udformningerne.

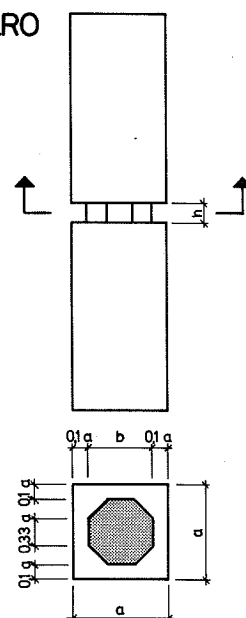
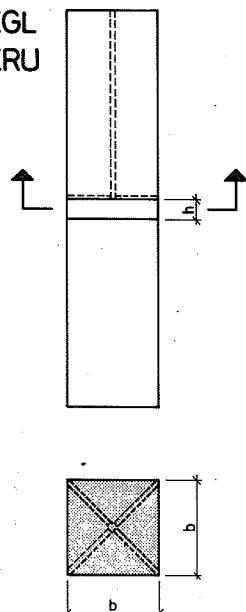
Figur 15.

Forsøgs-
emner.ALGL
ALRU

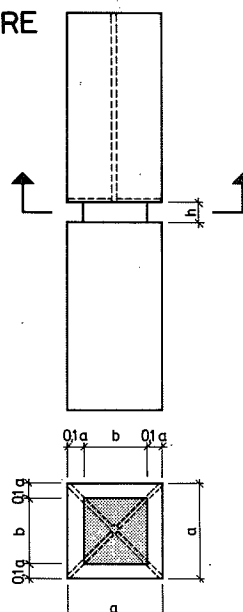
ALRE



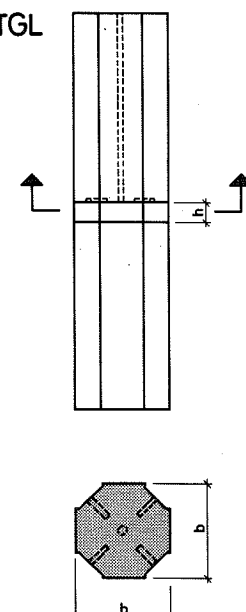
ALRO

FIGL
FIRU

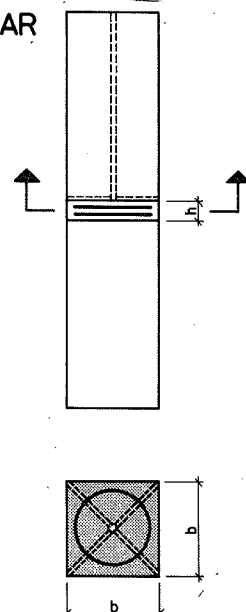
FIRE



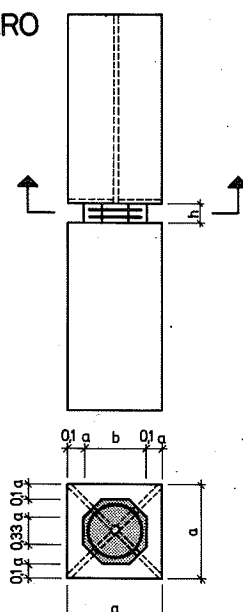
OTGL



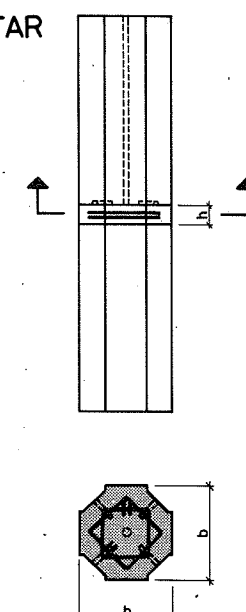
FIAR



FIARO



OTAR



Figur 16.

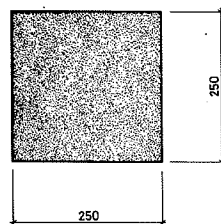
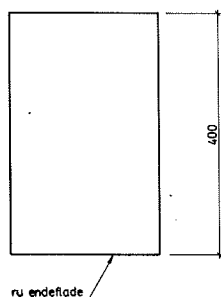
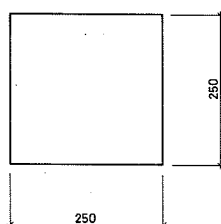
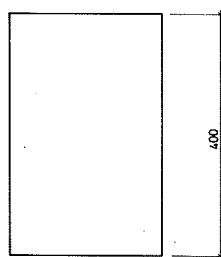
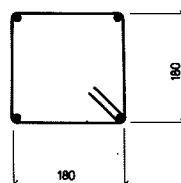
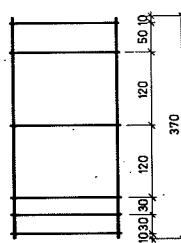
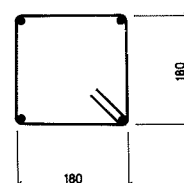
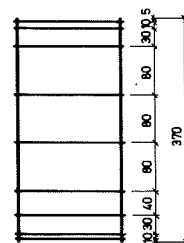
Betegnelse, forsøgsemner.

ALGL	Kvadratisk søjletværsnit jordfugtig mørtel stoppet ind
ALRU	Kvadratisk søjletværsnit, ru endeflade jordfugtig mørtel stoppet ind
ALRE	Kvadratisk søjletværsnit reduceret fugetværsnit, jordfugtig mørtel stoppet ind
ALRO	Kvadratisk søjletværsnit reduceret ottekantet fugetværsnit jordfugtig mørtel stoppet ind
FIGL	Kvadratisk søjletværsnit udstøbt letflydende mørtel
FIRU	Kvadratisk søjletværsnit, ru endeflade udstøbt letflydende mørtel
FIRE	Kvadratisk søjletværsnit reduceret fugetværsnit, udstøbt letflydende mørtel
OTGL(A)	Ottekantet søjletværsnit jordfugtig mørtel stoppet ind
OTGL	Ottekantet søjletværsnit udstøbt letflydende mørtel
OTAR	Ottekantet søjletværsnit armeret mørtel, udstøbt letflydende mørtel
FIARO	Kvadratisk søjletværsnit armeret mørtel, reduceret ottekantet fugetværsnit udstøbt letflydende mørtel
FIAR	Kvadratisk søjletværsnit armeret mørtel udstøbt letflydende mørtel

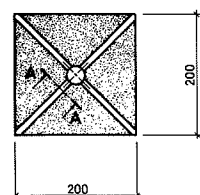
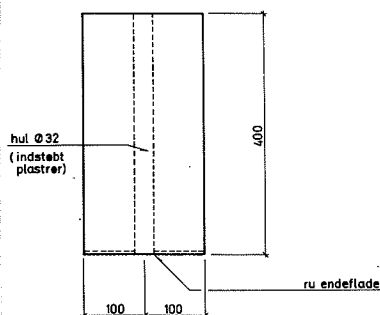
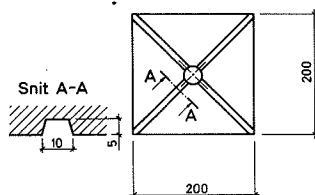
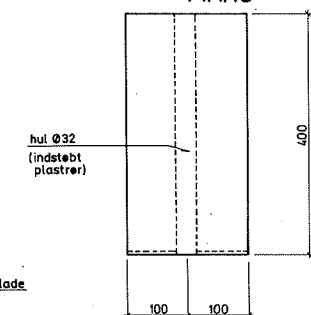
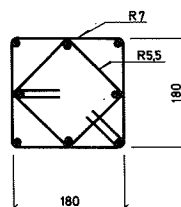
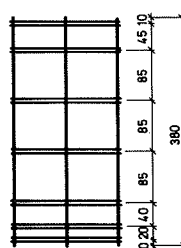
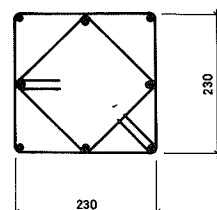
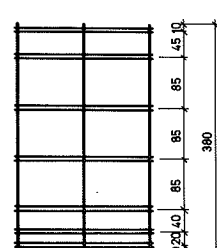
Bem.: Hvor intet andet er angivet gælder:
 glat endeflade
 uarmeret mørtel
 fugetværsnit lig med søjletværsnit

Figur 17.

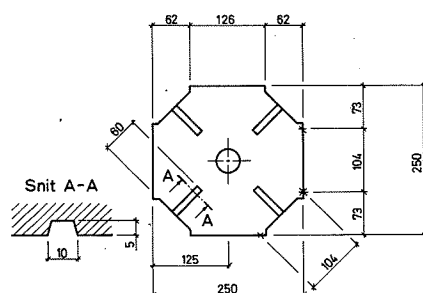
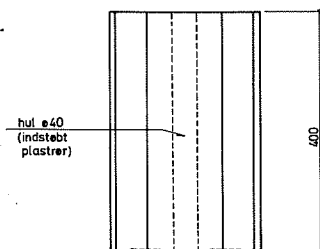
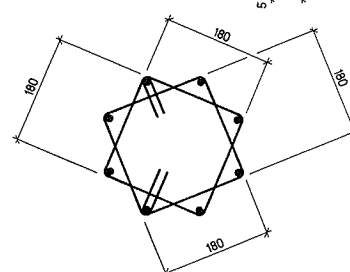
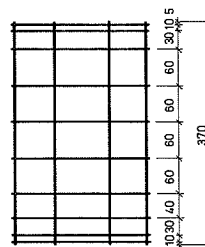
ALRU

ALGL
ALRE, ALROAR 20-2
4 R16 6bjl R7AR20-4
4 R16 9bjl R7

FIRU

FIGL
FIAR, FIRE,
FIAROAR 20-5
8 R10 7bjl R7 + 7bjl R5.5AR25-4
8 R12 7+2bjl R7

OTGL, OTAR

AR 25-83
8 R10 10bjl R7

Søjleelementstykkerne er udført med kvadratisk tværsnit 20 cm x 20 cm og 25 cm x 25 cm samt med ottekantet tværsnit med tværmål 25 cm. Søjleelementstykkerne er udført 40 cm lange.

Højden af fugen er varieret fra 24 mm til 48 mm.

Fugen er udført med tværsnit lig med søjletværsnittet og med reduceret tværsnit, dels kvadratisk dels ottekantet, med tværmål på 0,8 gange søjletværmålet.

Søjleelementstykkerne er armeret med længdearmering og tværarmering (bøjler).

Søjleelementerne er støbt "stående" og anbragt med endefladen, der er støbt mod bundform, vendende imod mørtelfugen.

Elementoverfladen i skellet mellem søjleelement og mørtelfuge er almindelig glat (støbt mod form af glat støbeplade) eller ru (støbt mod form med groft sandpapir (med kornstørrelse på 0,35 til 0,50 mm)).

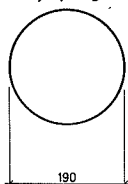
Figur 17 viser søjleelementstykkerne og armeringen i dem.

Mørtelfugen er uarmeret eller armeret med kvadratiske bøjler, indbyrdes drejet 1/8 omgang om forsøgsemnets længdeakse, eller med ringarmering (sammensvejste armeringsringe).

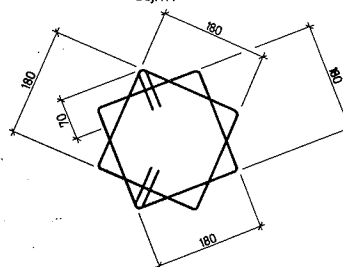
Figur 18 viser armering i mørtelfugen.

r 18.

ARF 190
R 10, svejst ring



ARF 80
2 bøj R 7



Mørtelfugen er udført enten med jordfugtig mørtel, der er stoppet ind mellem søjleelementerne anbragt på små træklodder i hjørnerne, eller med letflydende mørtel, udstøbt gennem et plastrør, indstøbt i søjleelementet over fugen.

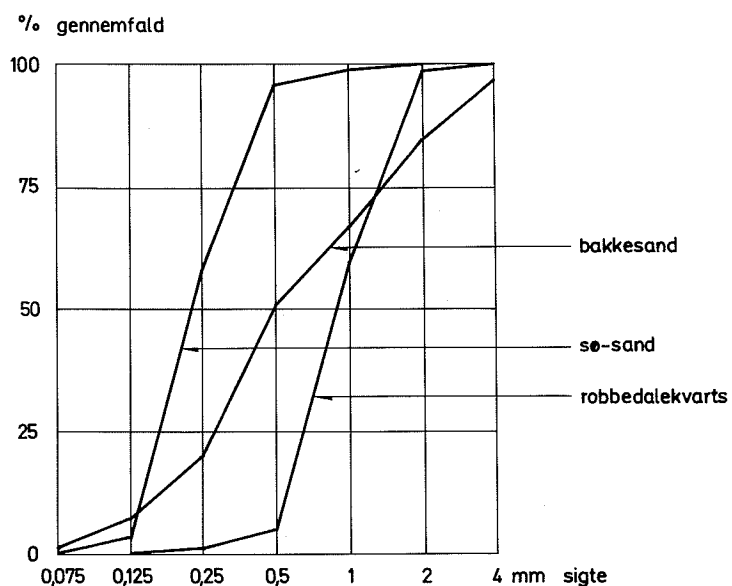
Betonen er fremstillet af rapid-cement, bakkesand (0 - 4 mm), perlesten (4 - 8 mm) og ærtesten (8 - 16 mm).

Mørtlen er fremstillet af rapid-cement og enten bakkesand 0 - 4 mm, søsand 0 - 2 mm eller robbedalekvarts 0,5 - 2,5 mm.

Bakkesandet har en god kornkurve, mens søsandet og robbedalekvartsen har en stejl (mindre god) kornkurve, se figur 19.

Der henvises iøvrigt til [6].

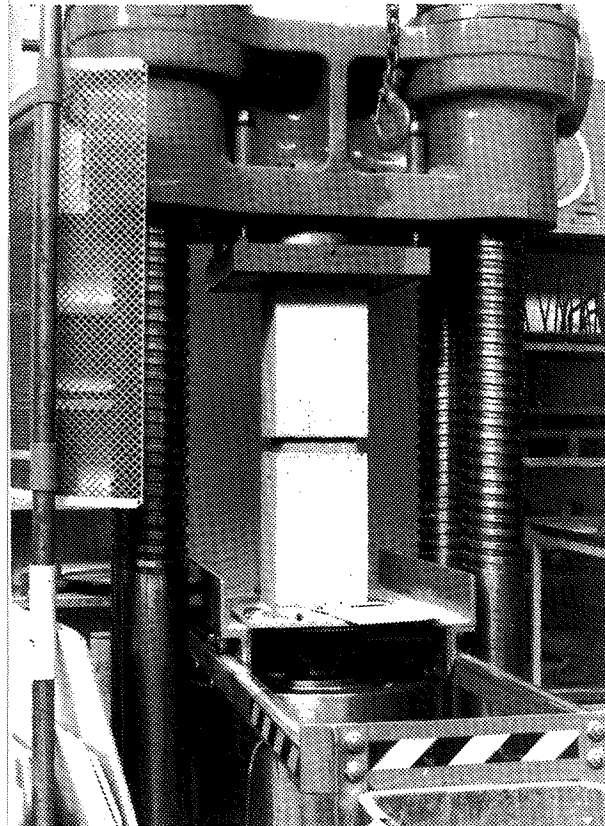
Figur 19.



3.2 Forsøgsopstilling

Forsøgene er udført med en hydraulisk 10 MN Amsler Prøvemaskine. Se foto, figur 20.

Figur 20.



Princippet i forsøgsopstillingen er vist på figur 21.

Forsøgsemnet anbringes så dets længdeakse falder sammen med prøvemaskinens symmetrilinie, hvori den påførte kraft ligger.

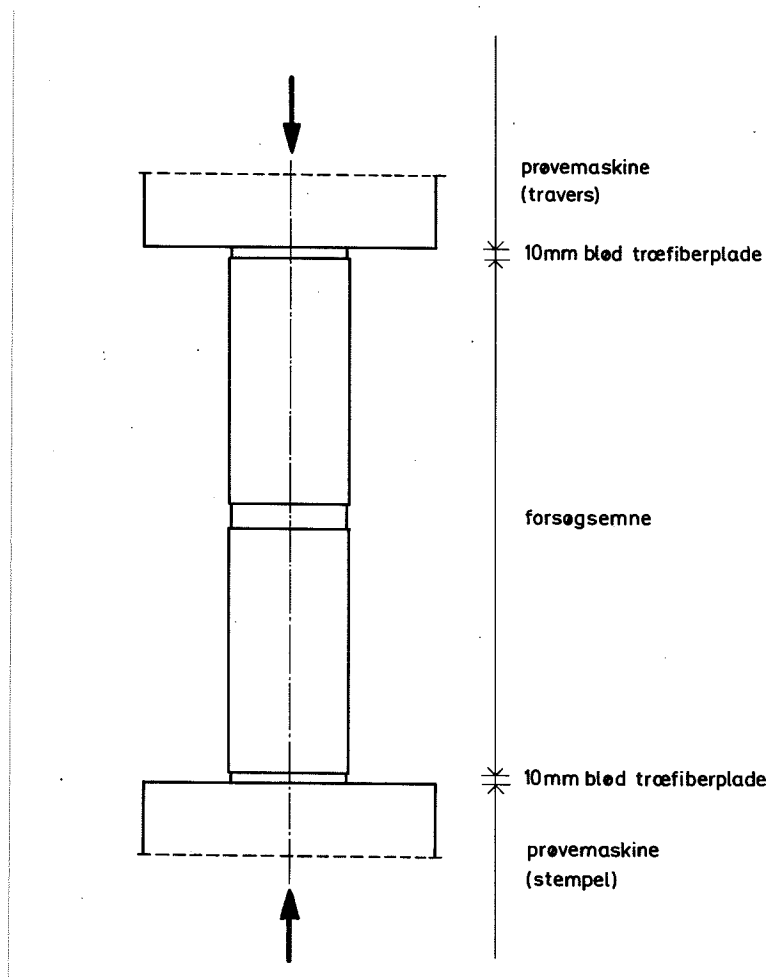
Både i prøvemaskinens øvre del (travers) og i den nedre del (stempel) findes vippeplader, der virker som charnieres.

Imellem forsøgsemnet og prøvemaskinen anbringes der bløde træfiberplader med samme areal som søjleelementets tværsnitsareal.

I øvrigt henvises til [6].

Kraften på forsøgsemnet reguleres manuelt. Den påførte kraft aflæses på skala. Der anvendes dels 2000 kN måleområde, dels 5000 kN måleområde.

Figur 21.



Sammentrykningen af mørtelfugen måles - i en del af forsøgene - med Phender-måler. Målingerne foretages mellem to punkter - afsat på søjleelementerne - med en afstand på 60 mm. Der foretages målinger på to modstående sider af forsøgsemnet.

I øvrigt henvises til [6].

3.3 Forsøgene

Forsøgsemnet påvirkes med trinvis stigende last. Og brududviklingen i forsøgsemnet følges trin for trin. Maksimumslasten noteres som brudbelastning.

Brudbelastningerne er anført i tabellen i figur 23. Udvalgte fotos fra forsøgene ses i figur 24.

Forsøgene har en betegnelse bestående af en bogstavbetegnelse, dækkende forsøgsemnets hovedudformning, efterfulgt af søjleelementets tværsnitsmål i cm, og efter en skråstreg fugens højde i mm, samt endelig et løbenummer (A-numre har fugemørtlen stoppet ind, B-numre har udstøbt mørtelfuge).

Forsøgene er udført 3 uger efter, at mørtelfugen er udstøbt, henholdsvis udstoppet. Fugeudstøbningen, henholdsvis fugeudstopningen, er foretaget 1 uge efter, at søjleelementerne er støbt; søjleelementerne er således 4 uger gamle, når forsøgene udføres.

Sideløbende med at forsøgene udføres, foretages materialeprøvning af betonen og mørtlen med betoncylindre med diameter 15 cm og højde 30 cm og mørtelcylindre med diameter 10 cm og højde 20 cm.

Figur 22 viser et par typiske arbejdskurver.

Der bestemmes trykstyrke og E-modul samt tværuddvidelseskoefficient ν . Vedrørende definitioner af E og ν , som de er benyttet i resultatbehandlingen, henvises til afsnittet forrest i rapporten.

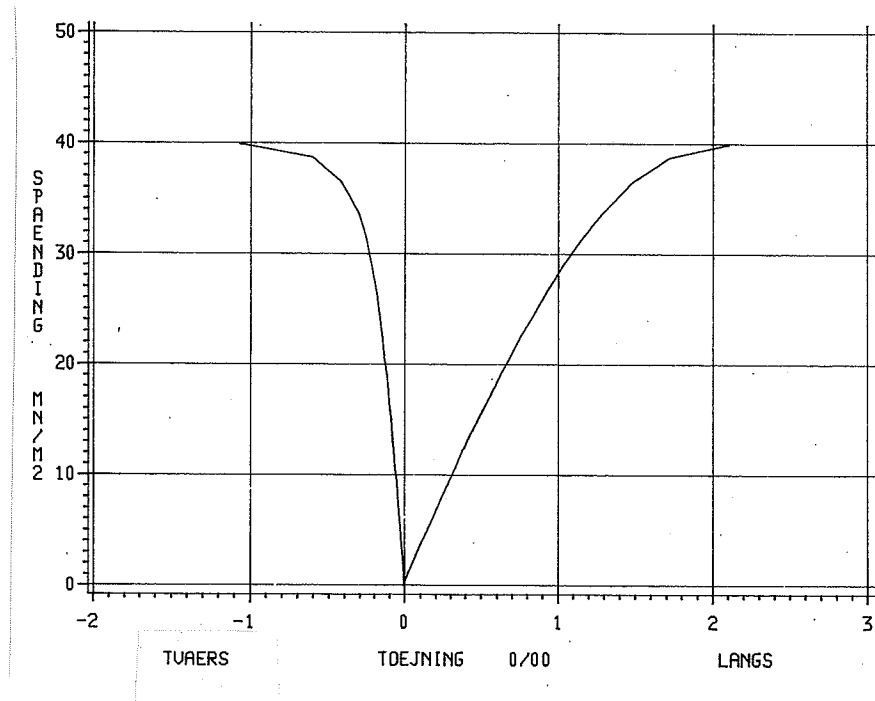
Materialeprøvningen har givet følgende orienterende værdier:

betontrykstyrke $f_c \approx 35 \text{ à } 45 \text{ MN/m}^2$
 mørteltrykstyrke $f_m \approx 15 \text{ à } 30 \text{ MN/m}^2$
 beton E-modul $E_c \approx 25.000 \text{ à } 30.000 \text{ MN/m}^2$
 mørtel E-modul $E_m \approx 10.000 \text{ à } 20.000 \text{ MN/m}^2$
 beton-tværuddvidelseskoeff. $\nu_c \approx 0,2 \text{ à } 0,25$
 mørtel-tværuddvidelseskoeff. $\nu_m \approx 0,2 \text{ à } 0,4$

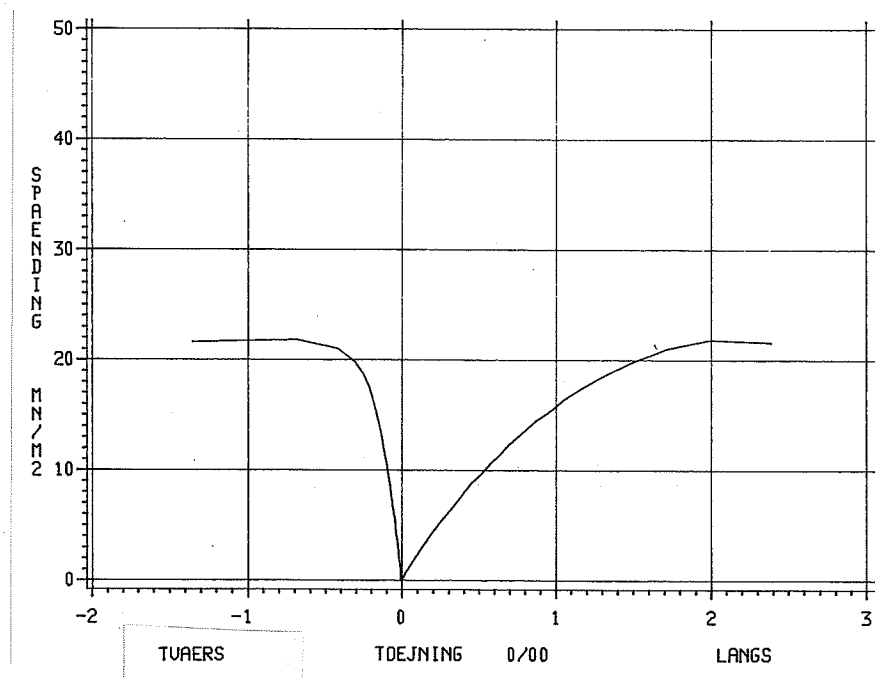
I [6] er redegjort udførligt for forsøgene og materialeprøvningen.

Figur 22.

a) Arbejdskurve for beton, eksempel



b) Arbejdskurve for mørtel, eksempel



Figur 23.

		observeret brudlast			bemærkninger
		$N_{j,u}^{obs}$ [kN]	$N_{j,u}^{obs}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	
ALGL	20 x 20/32	A1	690	1,19	0,39
		A2	690	1,19	0,39
		A3	565	0,97	0,31
		A48	1295	0,90	1,01
		A49	1300	0,90	1,01
	20 x 20/40	A7	735	1,02	0,42
		A8	730	1,01	0,42
		A9	655	0,91	0,37
		A36	1185	1,54	0,76
		A37	1150	1,50	0,74
		A38	1155	1,51	0,74
		A50	1650	1,14	1,08
		A51	1525	1,05	1,00
		A42	750	1,53	0,40
		A43	795	1,62	0,42
		A44	925	1,88	0,49
	20 x 20/48	A60	890	1,04	0,60
		A61	985	1,14	0,66
		A62	2310	0,95	0,98
		A63	2360	0,97	1,01
		A10	2080	1,75	0,80
	25 x 25/40	A11	2000	1,68	0,77
		A12	2040	1,72	0,79
		A19	1460	2,45	0,56
		A20	1355	2,27	0,52
		A21	1400	2,35	0,53
		A25	1535	4,10	0,58
		A26	1420	3,78	0,54
		A27	1555	4,15	0,59
ALRU	20 x 20/32	A4	905	1,26	0,52
		A5	900	1,25	0,51
		A6	655	0,91	0,37
		A22	1015	2,66	0,60
		A23	915	2,40	0,55
		A24	890	2,34	0,53
		A28	915	3,82	0,53
		A29	950	3,97	0,55
		A30	870	3,62	0,51
		A39	1195	1,56	0,77
	20 x 20/40	A40	1280	1,67	0,82
		A41	1200	1,56	0,77
		A13	1465	1,93	0,83
		A14	1395	1,84	0,79
		A15	1460	1,92	0,82
	25 x 25/30	A45	2195	2,86	0,66
		A46	2255	2,94	0,68
		A47	2205	2,87	0,66
	25 x 25/40	A31	1725	1,44	0,68
		A32	2040	1,70	0,80

fortsættes

Figur 23, fortsat

		observeret brudlast			bemærkninger
		$N_{j,u}^{obs}$ [kN]	$N_{j,u}^{obs}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	
ALRE	20 x 20/32	A64	795	1,44	0,53
		A65	730	1,33	0,49
		A77	1080	1,90	0,70
		A78	1200	2,12	0,79
		A84	1400	2,42	0,92
		A85	1270	2,19	0,83
	20 x 20/38	A72	1365	1,25	0,86
		A73	1180	1,08	0,88
		A74	1115	1,02	0,84
	20 x 20/48	A79	650	1,14	0,45
		A80	750	1,32	0,52
	25 x 25/24	A75	1900	1,11	0,91
		A76	1850	1,08	0,89
	25 x 25/32	A52	1335	1,98	0,66
		A53	840		exc
		A66	1975	1,27	0,86
		A67	1920	1,23	0,84
		A86	1980	2,19	0,83
		A87	1900	2,10	0,80
	25 x 25/40	A54	1405	2,08	0,69
		A55	1300	1,94	0,64
ALRO	20 x 20/32	A56	1080	1,41	0,83
		A57	1040	1,36	0,80
		A68	775	1,70	0,53
		A69	860	1,89	0,59
	25 x 25/24	A81	1545	2,09	0,68
		A82	1640	2,22	0,68
		A83	1710	2,32	0,72
	25 x 25/32	A58	1280	2,27	0,54
		A59	1480	2,63	0,62
		A70	1595	1,23	0,68
		A71	1705	1,32	0,73
FIGL	20 x 20/32	B19	1055	2,13	0,66
		B20	1090	2,20	0,68
		B21	1070	2,15	0,66
FIRU	20 x 20/32	B16	1205	2,44	0,76
		B17	1135	2,29	0,71
		B18	1130	2,28	0,71
		B25	1275	2,16	0,62
		B26	1105	1,87	0,59
		B27	1170	1,97	0,62
FIRE	20 x 20/32	B47	1100	2,05	0,86
		B48	990	1,84	0,78

fortsættes

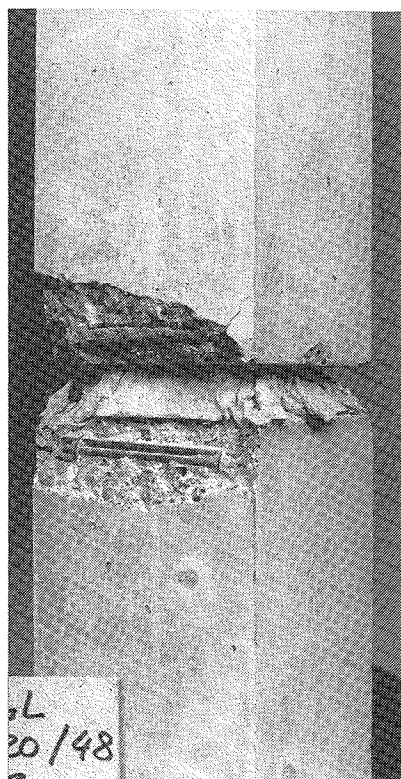
Figur 23, fortsat

		observeret brudlast			bemærkninger
		$N_{j,u}^{obs}$ [kN]	$N_{j,u}^{obs}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	
OTGL (A)	25 x 25/40	A33	1745	1,75	0,79
		A34	1665	1,67	0,76
		A35	1580	1,58	0,72
OTGL	25 x 25/40	B1	1740	1,37	0,72
		B2	1745	1,38	0,72
		B3	1855	1,46	0,77
		B22	1205	1,87	0,56
		B23	1310	2,03	0,61
		B24	1305	2,02	0,61
OTAR	25 x 25/40	B10	1275	2,16	0,63
		B11	1470	2,49	0,72
		B12	1375	2,33	0,67
					sø
		B13	1445	3,41	0,68
		B14	1305	3,08	0,62
		B15	1360	3,21	0,64
					sø
		B28	1880	2,44	0,70
		B29	1930	2,51	0,72
FIARO	20 x 20/32	B30	2135	2,78	0,80
		B33	1200	3,27	0,78
		B34	1200	3,27	0,78
		B37	1000	2,52	0,78
		B38	1070	2,70	0,83
		B41	1185	2,66	0,82
		B42	1190	2,67	0,82
	25 x 25/24	B43	1750	2,50	0,77
		B44	1690	2,42	0,74
	25 x 25/32	B35	1920	3,34	0,78
		B36	1920	3,34	0,78
		B39	1655	2,66	0,82
		B40	1590	2,55	0,79
	25 x 25/32	B45	1500	2,14	0,75
		B46	1640	2,34	0,82
FIAR	25 x 25/40	B31	2000	2,80	0,84
		B32	2000	2,80	0,84

Bemærkninger

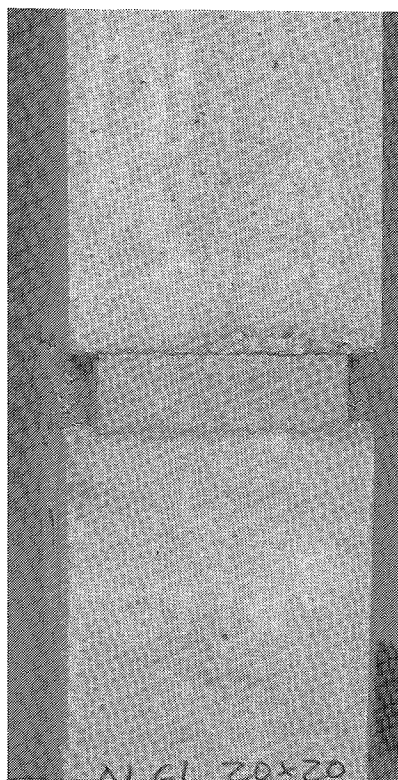
- sø angiver, at sandet i mørtlen er sø-sand
- rb angiver, at sandet i mørtlen er robbedalekvarts
- l angiver, at $f_m/f_c \approx 1$
- exc angiver, at forsøget ikke er medtaget i resultatbehandlingen i afsnit 4 p.g.a. utilsigtet excentrisk belastning
- o angiver, at A_m er regnet til arealet med diameter lig med ringarmeringens tværmål (p.g.a. manglende fugeudstøbning uden for ringarmeringen).

Figur 24. Fotos for forsøgene. Belastning i kN og i % af observeret brudlast.



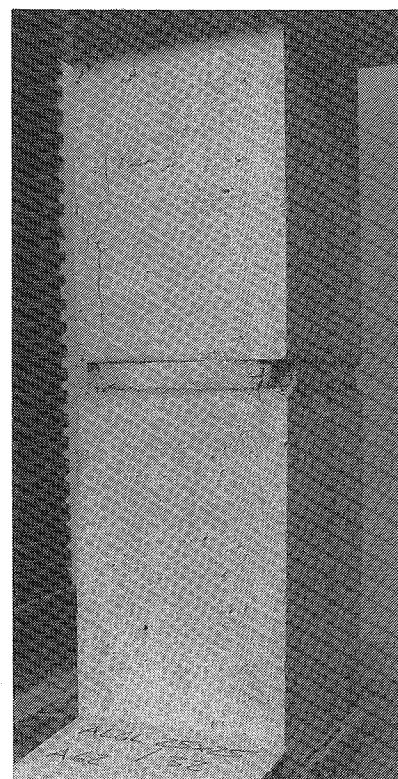
brud

ALGL 20x20/48 A43



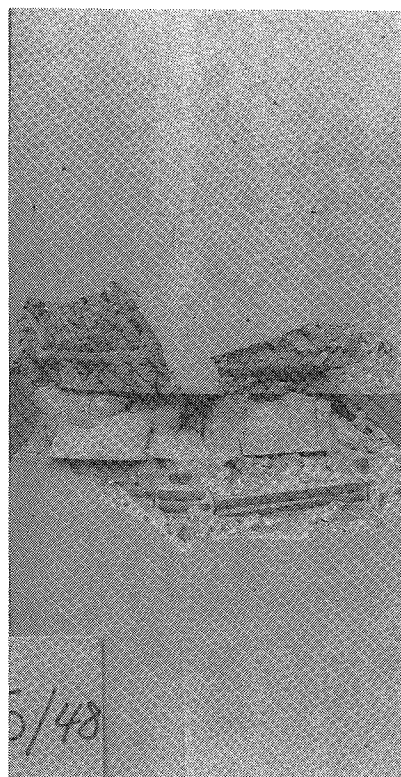
800kN = 90%

ALGL 20x20/48 A60



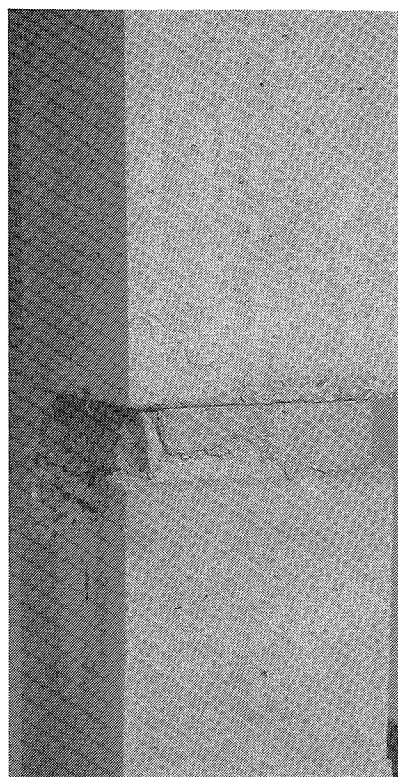
2250kN = 97%

ALGL 25x25/30 A62



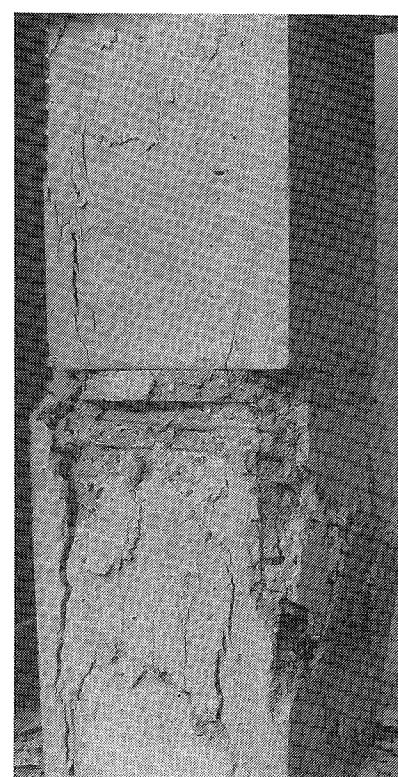
brud

ALGL 20x20/48 A44



brud

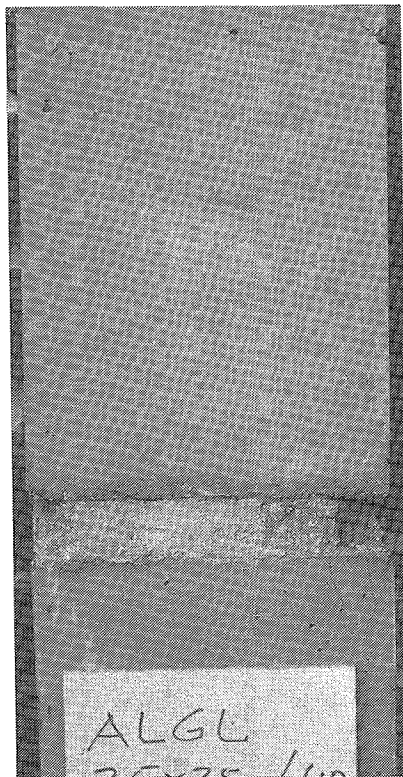
ALGL 20x20/48 A60



brud

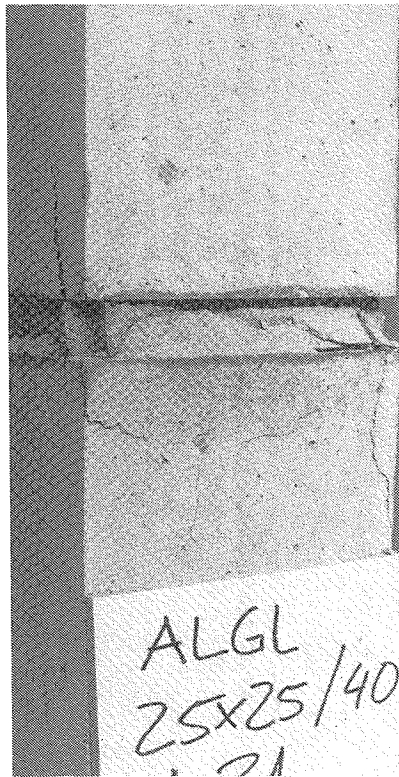
ALGL 25x25/30 A62

Figur 24 (b)



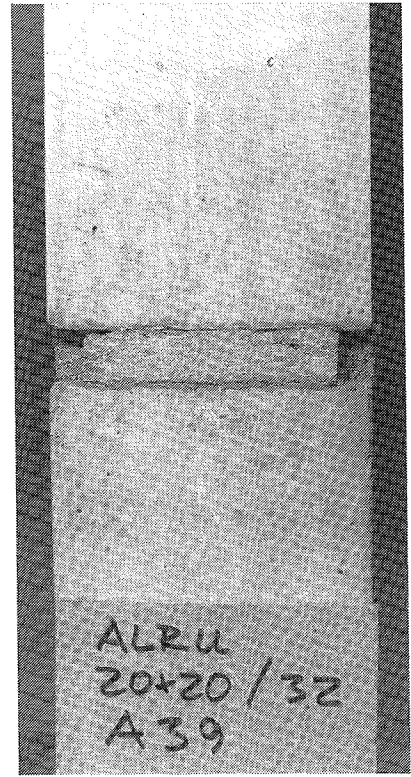
brud

ALGL 25x25/40 A10



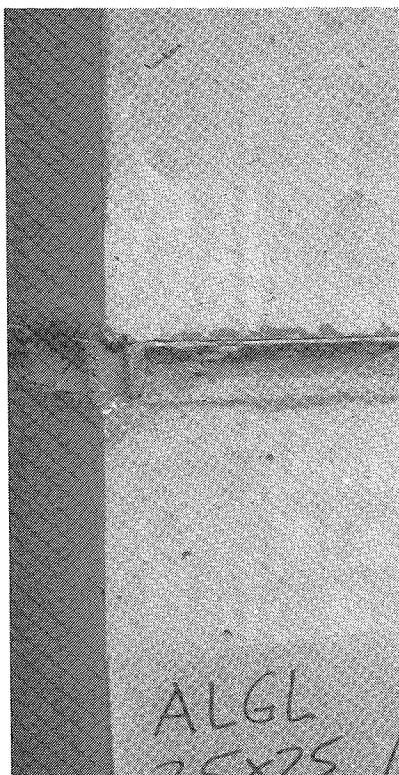
brud

ALGL 25x25/40 A21



1000kN = 83%

ALRU 20x20/32 A39

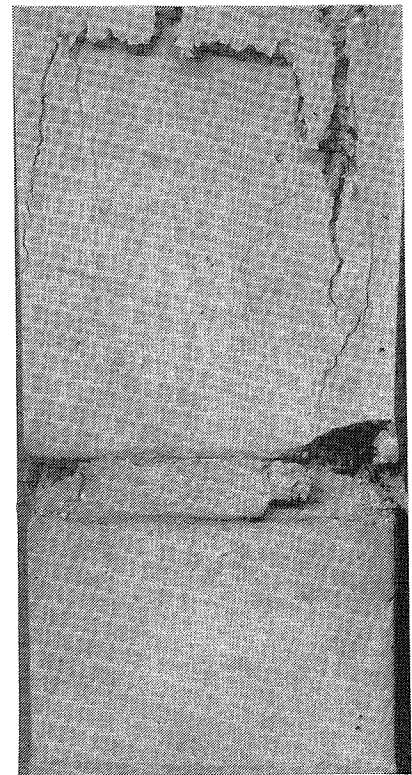


1300kN = 96%

ALGL 25x25/40 A20



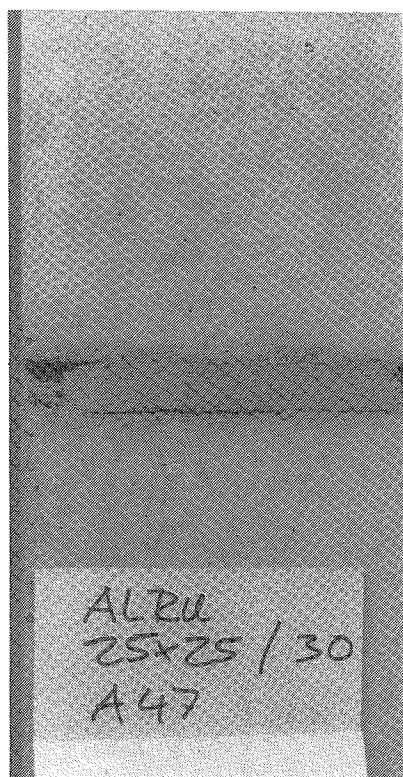
ALGL 25x25/40 A20



1200kN=100%

ALRU 20x20/32 A39

Figur 24(c)



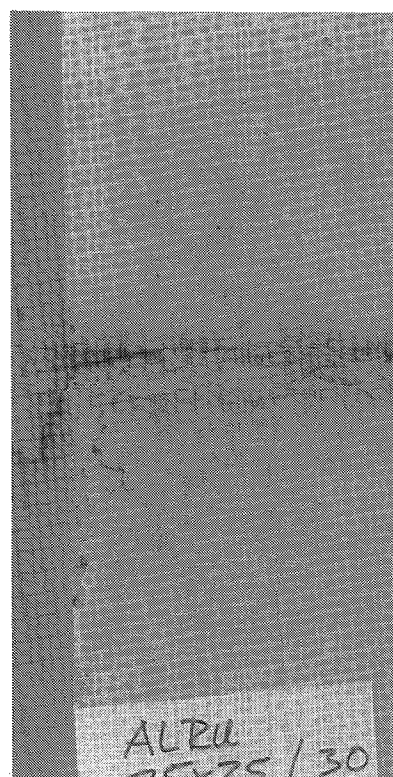
1900kN = 86%

ALRU 25x25/30 A47



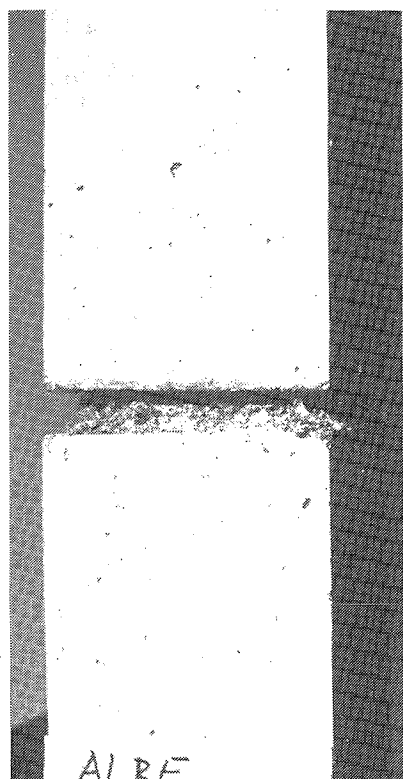
2100kN = 95%

ALRU 25x25/30 A47



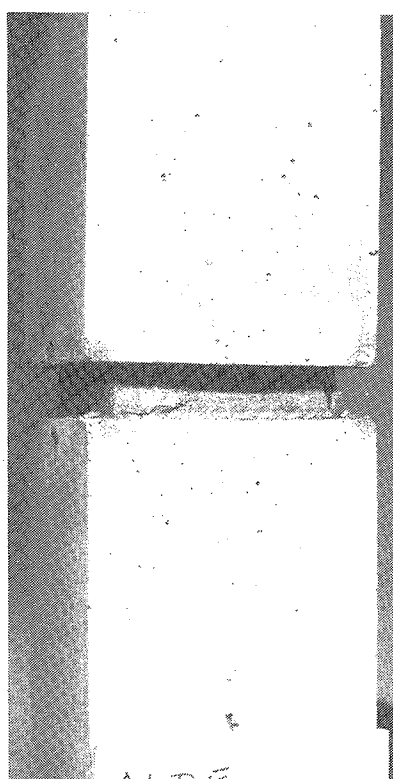
brud

ALRU 25x25/30 A47



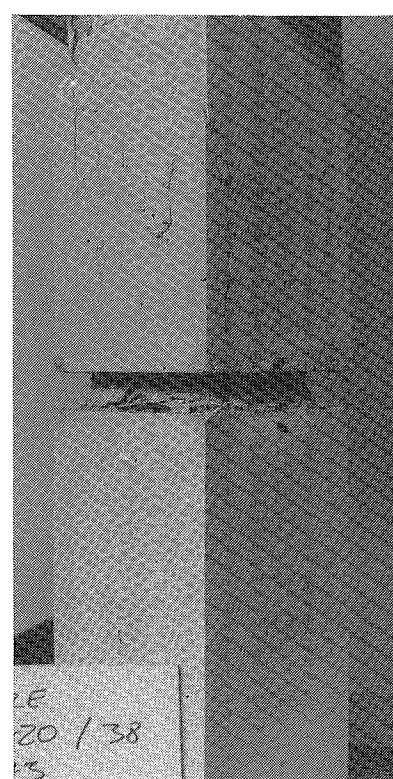
brud

ALRE 20x20/32 A65



1100kN = 93%

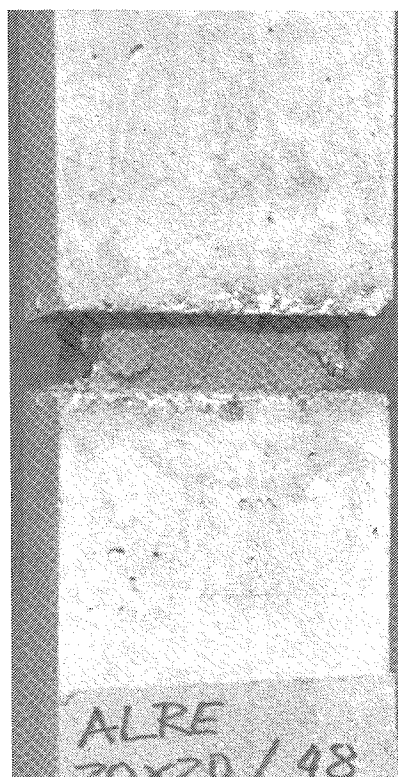
ALRE 20x20/38 A73



brud

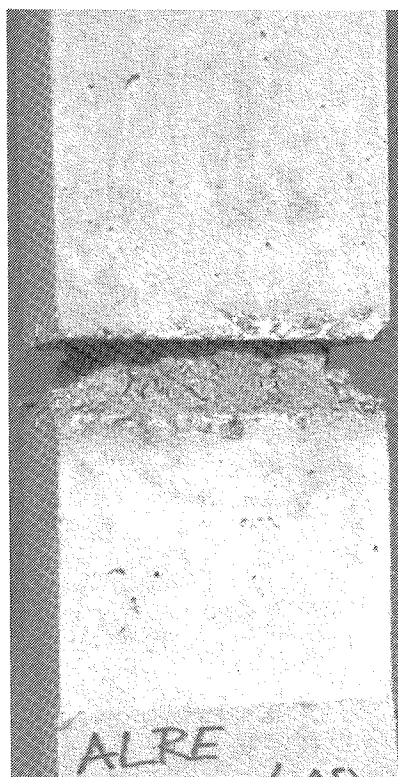
ALRE 20x20/38 A73

Figur 24(d)



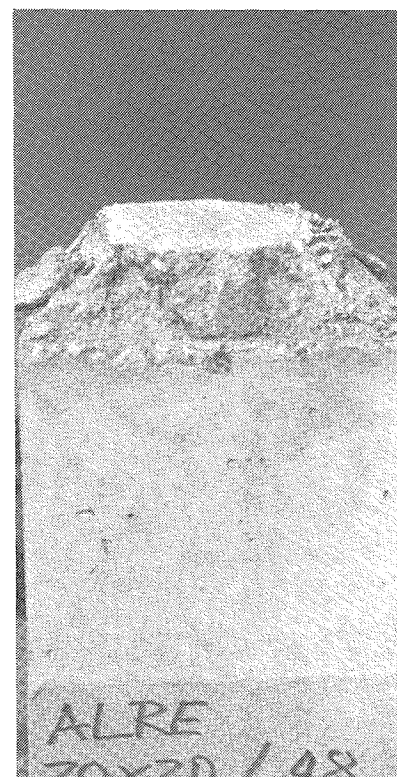
700kN = 93%

ALRE 20x20/48 A80

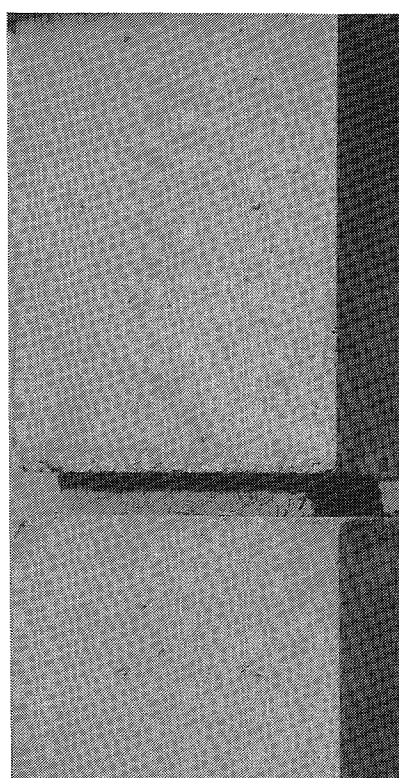


750kN=100%

ALRE 20x20/48 A80

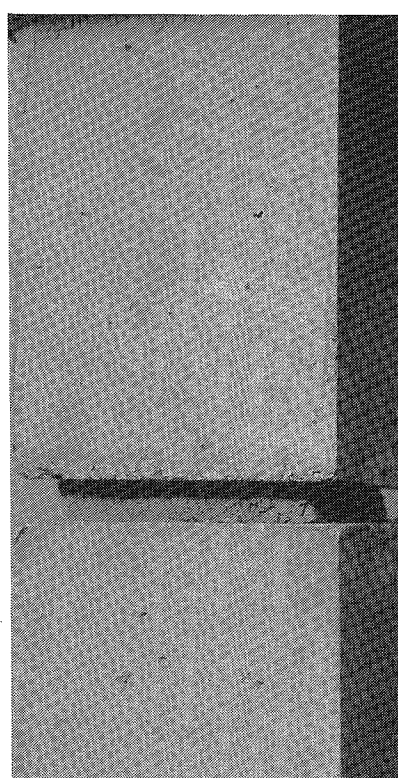


ALRE 20x20/48 A80



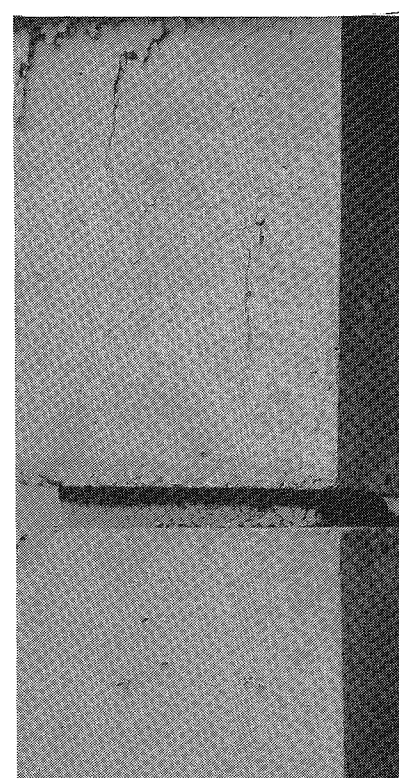
1600kN = 83%

ALRE 25x25/32 A67



1800kN = 94%

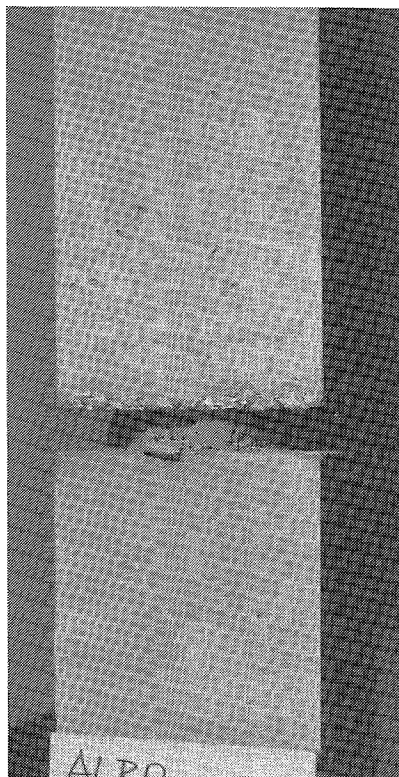
ALRE 25x25/32 A67



brud

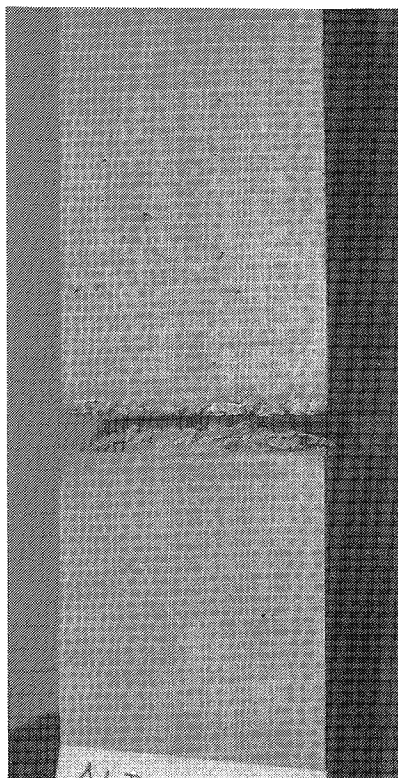
ALRE 25x25/32 A67

Figur 24(e)



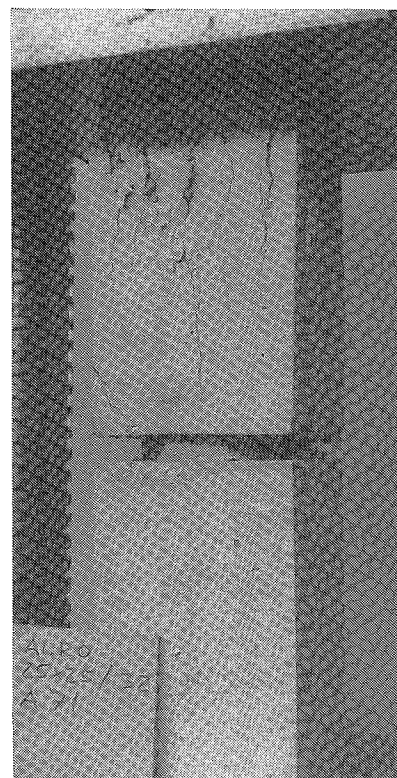
700kN = 81%

ALRO 20x20/32 A69



brud

ALRO 20x20/32 A69



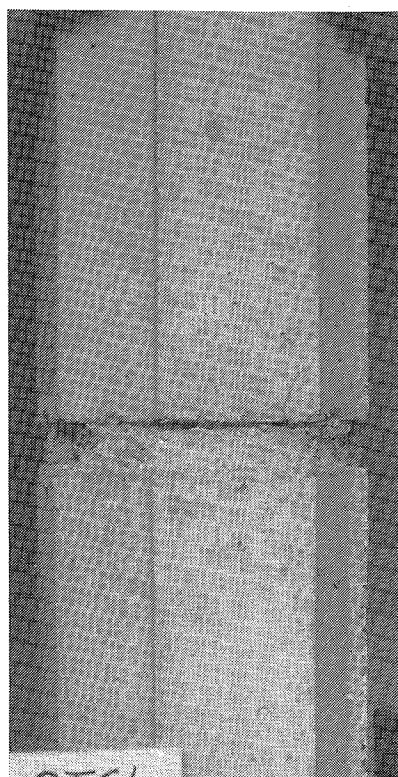
brud

ALRO 25x25/32 A71



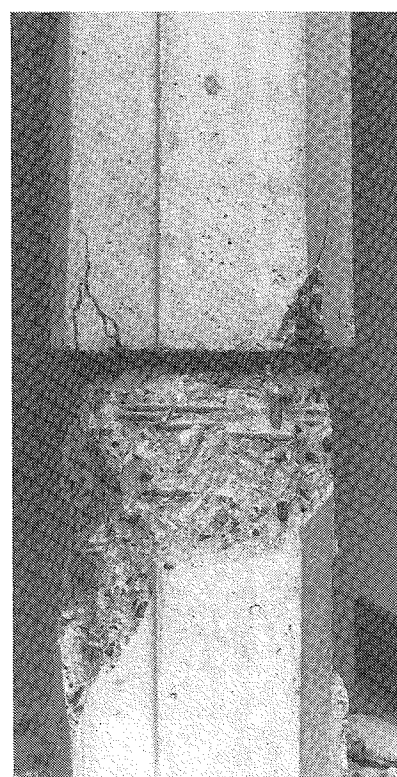
1400kN = 89%

OTGL 25x25/40 A35



1500kN = 95%

OTGL 25x25/40 A35



brud

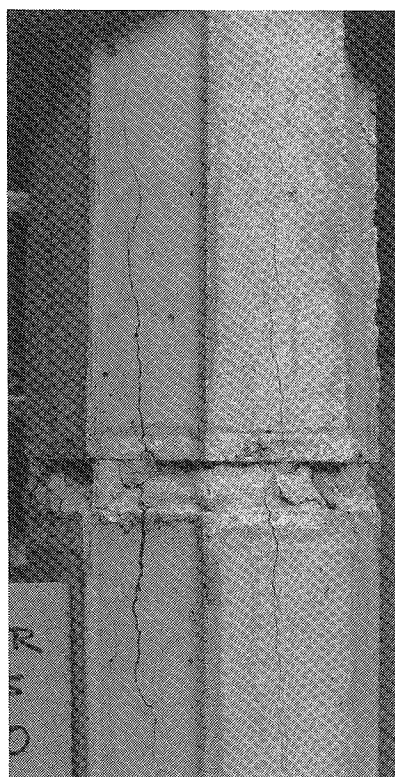
OTGL 25x25/40 A35

Figur 24(f)



1000kN = 78%

OTAR 25x25/40 B10



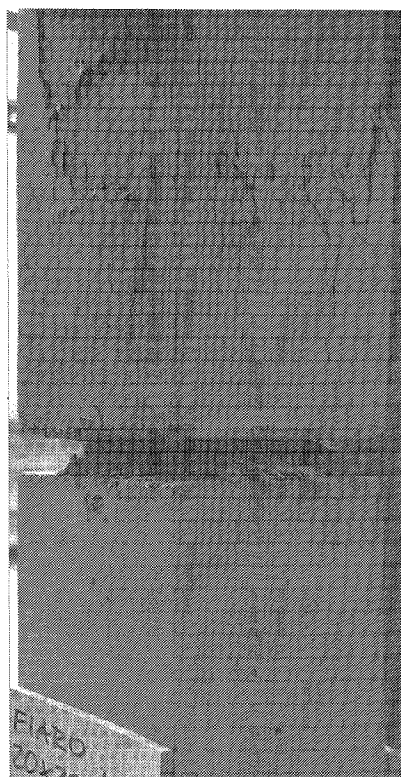
1275kN=100%

OTAR 25x25/40 B10



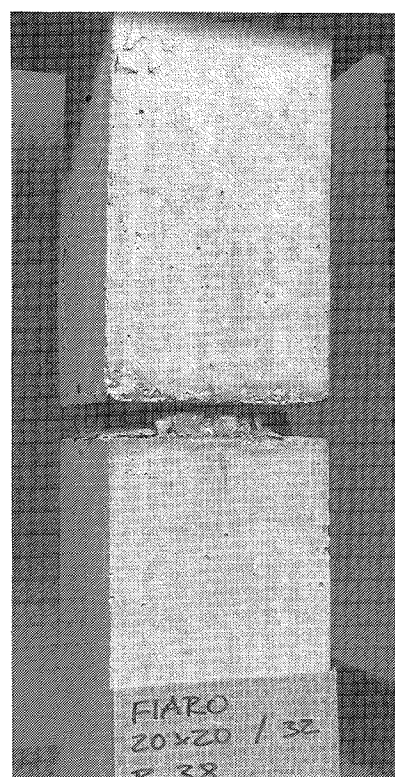
brud

OTAR 25x25/40 B30



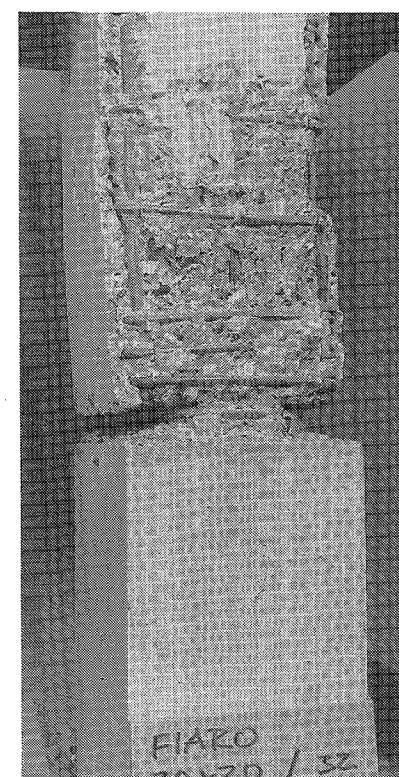
brud

FIARO 20x20/32 B33



1000kN = 93%

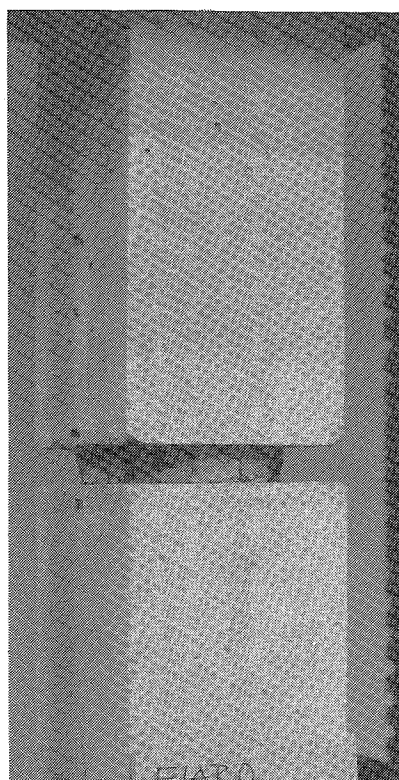
FIARO 20x20/32 B38



brud

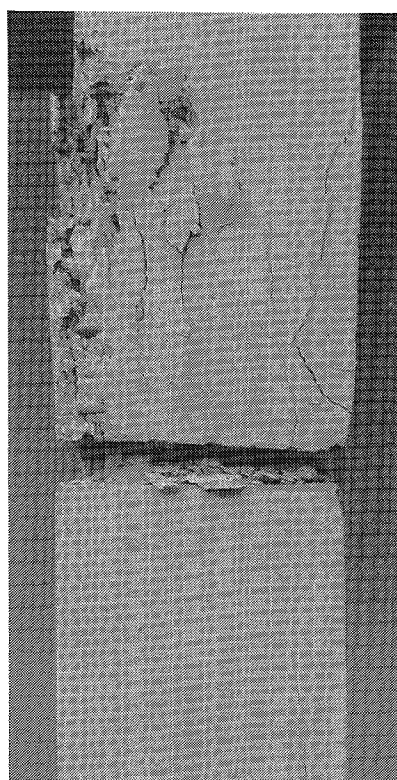
FIARO 20x20/32 B38

Figur 24(g)



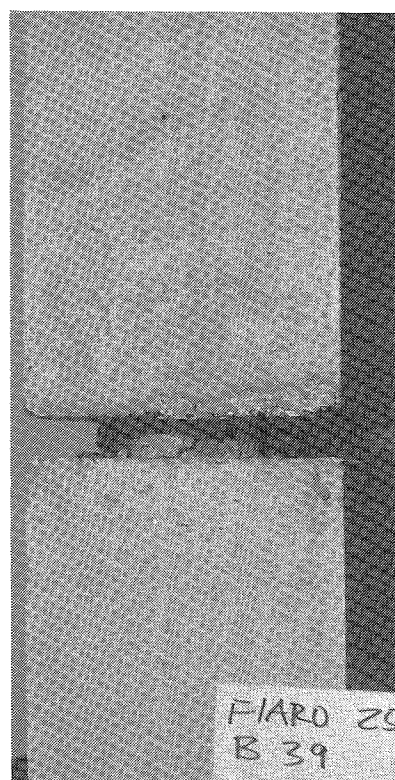
1000kN = 84%

FIARO 20x20/32 B41



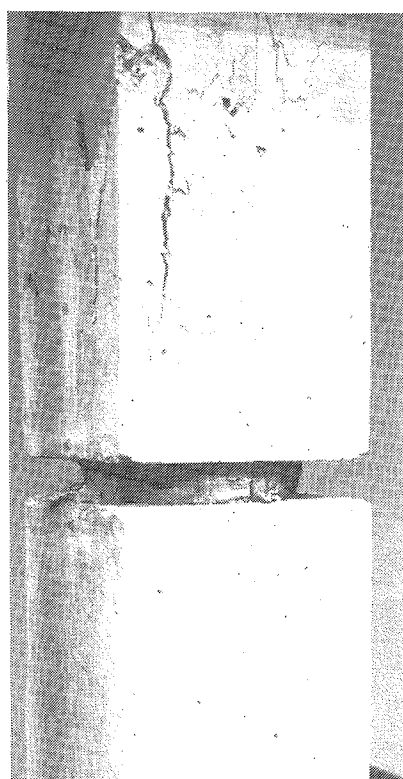
brud

FIARO 20x20/32 B42



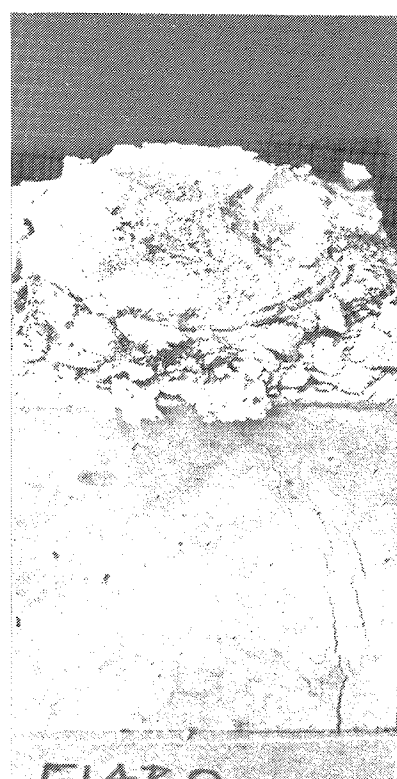
1500kN = 91%

FIARO 25x25/32 B39

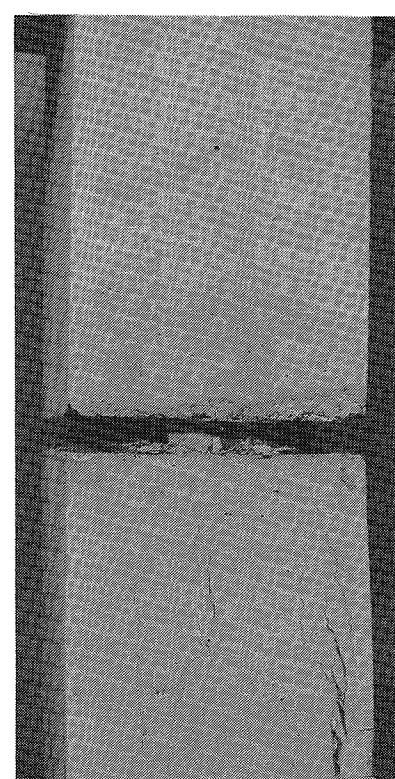


brud

FIARO 20x20/32 B41



FIARO 20x20/32 B42



brud

FIARO 25x25/32 B39

4. RESULTATER

I dette afsnit er der på forskellig vis angivet resultater af forsøgene.

Om de i resultatbehandlingen indgående størrelser skal bemærkes følgende:

Materialeparametrene f_m , f_c , E_m , E_c , ν_m og ν_c er fundet ved materialeprøvningen. Værdierne for E_m , E_c , ν_m og ν_c svarer til de indførte særlige definitioner.

E_{st} er regnet til 210.000 MN/m^2 .

Friktionskoefficienten i skellet mellem fugemørtel og betonelement er regnet til maksimalt $3/4$, hvorfor forholdet w/h regnes til maksimalt $3/16$.

De geometriske parametre a , b og h er målt på forsøgsemnerne.

ξ (defineret med formel (2)) er regnet til $1/2$.

I_α (defineret med formel (8)) er der i A_{st} indregnet den armering i søjleelementenderne, der er placeret inden for afstanden $d = \frac{1}{2} \cdot a$ fra mørtelfugen, plus eventuel armering i mørtelfugen.

Forsøg med én-cifrede løbenumre er ikke medtaget i resultatbehandlingen på grund af usikre tøjningsmålinger fra mørtelprøvningen.

4.1 Observerede og beregnede bæreevner

Indledningsvis er der angivet observeret og teoretisk beregnet bæreevne relateret til $A_c \cdot f_c$ med resultaterne opdelt i forsøg med forsøgsemner med armeret og uarmeret fugemørtel.

Dernæst er der angivet resultater opdelt efter de for den beregnede bæreevne bestemmende brudtilfælde.

Endelig er der i nogle eksempler foretaget sammenligning af bæreevnen $N_{j,u}/A_c/f_c$ for nogle udvalgte udformninger af samlingen.

$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$, $N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$ og $N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$
 =====

I det følgende er der i tre afsnit:

- o forsøgsemner med uarmeret fugemørtel,
- o forsøgsemner med armeret fugemørtel og
- o forsøgsemner med uarmeret fugemørtel

med særligt sand

angivet observerede og beregnede bæreevner $N_{j,u}^{obs}$ og $N_{j,u}^{cal}$ relateret til en formel bæreevne $A_c \cdot f_c$ af søjleelementets betontværsnit. Endvidere er angivet forholdet mellem observeret og beregnet bæreevne $N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$.

Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel

Tabellen, figur 25, viser resultaterne for forsøgsemnerne med uarmeret mørtel.

Taget under eet ligger forholdet mellem forsøgsværdi og teoretisk beregnet bæreevne i gennemsnit på 1,05 med en standardafvigelse på 0,25.

Forsøgene mærket x), xx) og xxx) viser bæreevner

$N_{j,u}^{obs}$ på ca. 1,4 å 1,8 gange den teoretiske bæreevne $N_{j,u}^{cal}$. Mørtlen i forsøgsemnerne i hver af disse tre grupper, mærket henholdsvis x), xx) og xxx), stammer fra hver sin sats. Yderligere tre forsøgsemner med armeret fugemørtel har mørtel fra samme sats som den, der er mærket xxx); herudover har ingen forsøgsemner mørtel fra nogen af disse tre satse.

Vanskeligheder ved at skaffe værdier for de i teorien indgående materialeparametre, som er repræsentative for fugemørtlen i forsøgsemnerne, kombineret med vanskeligheder ved at "indbygge" mørtlen i fugen ensartet fra gang til gang, medfører, at materialeparametrene, fundet ved cylinderprøvning, ikke altid er repræsentative for fugemørtlen. Der må også regnes med, at der i visse udførelser vil kunne overføres større forskydningskræfter i skellet mellem elementbetonen og fugemørtlen end den, der er regnet med.

Årsagen til de ret store afvigelser imellem de observerede og de teoretisk beregnede bæreevner for nogle af forsøgene, skal sandsynligvis tilskrives disse forhold.

Ses der bort fra disse ialt 12 forsøg, ligger forholdet mellem forsøgsværdi og teoretisk værdi i gennemsnit for de øvrige 58 forsøg med uarmeret mørtel på 0,95 med en standardafvigelse på 0,1.

De teoretiske bæreevner $N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$ ligger for forsøgsemnerne med fugetværsnit lig med søjletværsnittet på 0,9 å 1,0 for mørtel med samme styrke som elementbetonen og på 0,4 å 0,9 for mørtel med styrke mindre end betonstyrken. De observerede bæreevner $N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$ ligger på henholdsvis 1,0 å 1,1 og 0,6 å 0,8.

Figur 25.

Bæreevne af samling. $N_{j,u}/A_c/f_c$
 Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel.

		f_m/f_c	A_m/A_c	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$	Bemærkninger
ALGL	20x20/32	A48	1	1,01	0,95	1,06	
		A49		1,01		1,06	
	20x20/40	A36	1	0,76	0,75	1,01	
		A37		0,74		0,98	
		A38		0,74		0,99	
		A50	1	1,08	0,94	1,15	
		A51		1,00		1,06	
	20x20/48	A60	1	0,60	0,79	0,76	
		A61		0,66		0,84	
	25x25/30	A62	1	0,98	0,97	1,01	
		A63		1,01		1,04	
	25x25/40	A10	1	0,80	0,89	0,90	
		A11		0,77		0,87	
		A12		0,79		0,89	
ALRU	20x20/32	A39	1	0,77	0,86	0,90	
		A40		0,82		0,95	
		A41		0,77		0,90	
	20x20/40	A13	1	0,83	0,74	1,12	
		A14		0,79		1,07	
		A15		0,82		1,11	
	25x25/40	A31	1	0,68	0,83	0,82	
		A32		0,80		0,96	
ALRE	20x20/32	A64	0,64	0,53	0,61	0,87	
		A65		0,49		0,80	
		A77	0,64	0,70	0,73	0,96	
		A78		0,79		1,08	
		A84	0,64	0,92	0,52	1,76	xx)
		A85		0,83		1,60	xx)
	20x20/38	A72	0,64	0,86	0,81	1,06	
		A73		0,88		0,93	
		A74		0,84		0,88	
	20x20/48	A79	0,64	0,45	0,53	0,84	
		A80		0,52		0,97	
	25x25/24	A75	0,64	0,91	0,97	0,94	
		A76		0,89		0,92	
	25x25/32	A52	0,64	0,66	0,48	1,38	x)
		A66		0,86		0,91	
		A67		0,84		0,88	
		A86		0,83		1,43	xx)
		A87	0,64	0,80	0,58	1,38	xx)
		A87		0,80		1,38	xx)
	25x25/40	A54	0,64	0,69	0,43	1,60	x)
		A55		0,64		1,49	x)
ALRO	20x20/32	A56	0,53	0,83	0,91	0,91	
		A57		0,80		0,88	
		A68	0,53	0,53	0,53	1,01	
		A69		0,59		1,12	
	25x25/24	A81	0,53	0,68	0,90	0,76	
		A82		0,68		0,76	
		A83		0,72		0,80	
	25x25/32	A58	0,53	0,54	0,34	1,59	x)
		A59		0,62		1,82	x)
		A70		0,68		0,80	
		A71	0,53	0,73	0,85	0,86	

fortsættes

Figur 25, fortsat

Bæreevne af samling. $N_{j,u}/A_c/f_c$

Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel.

fortsat

		f_m/f_c	A_m/A_c	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$	Bemærkninger
FIGL 20x20/32	B19	0,31	1	0,66	0,66	1,00	
	B20			0,68		1,03	
	B21			0,66		1,00	
FIRU 20x20/32	B16	0,31	1	0,76	0,66	1,15	
	B17			0,71		1,08	
	B18			0,71		1,08	
	B25	0,29	1	0,62	0,40	1,55	xxx)
	B26	0,32		0,59	0,44	1,34	xxx)
	B27	0,32		0,62	0,44	1,41	xxx)
FIRE 20x20/32	B47	0,66	0,64	0,86	0,66	1,30	
	B48			0,78		1,18	
OTGL 25x25/40 (A)	A33	0,46	1	0,79	0,80	0,99	
	A34			0,76		0,95	
	A35			0,72		0,90	
OTGL 25x25/40	B22	0,30	1	0,56	0,64	0,88	
	B23			0,61		0,95	
	B24			0,61		0,95	

Bemærkninger:

- x) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, og ingen andre har mørtel fra denne sats.
- xx) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, og ingen andre har mørtel fra denne sats.
- xxx) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, yderligere 3 forsøgsemner med armeret mørtel (B28, 29 og 30) har mørtel fra denne sats, se figur 26.

For forsøgsemnerne med fugetværsnit på 64% og 53% af søjletværsnittet ligger $N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$ på 0,8 á 1,0 for mørtel med samme styrke som elementbetonen, og på 0,3 á 0,9 for mørtel med styrke mindre end betonstyrken. De observerede bæreevner $N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$ ligger på henholdsvis 0,7 á 0,9 og 0,5 á 0,9.

Forsøgsemner med armeret fugemørtel

Tabellen, figur 26, viser resultaterne for forsøgsemnerne med armeret mørtel.

Taget under eet ligger forholdet mellem forsøgsværdi og teoretisk beregnet bæreevne i gennemsnit på 1,3 med en standardafvigelse på 0,3.

Forsøgene mærket x), xx) og xxx) samt sø) viser bæreevner på ca. 1,5 à 1,8 gange den teoretiske bæreevne (to forsøg ligger på ca. 1,2).

Årsagen til disse ret store afvigelser imellem de observerede og de teoretisk beregnede bæreevner for disse forsøg skal sandsynligvis tilskrives de ovenfor under forsøgsemner med uarmeret fugemørtel nævnte forhold. Se også bemærkningerne i figur 26.

For de øvrige forsøg ligger forholdet mellem forsøgsværdi og teoretisk værdi på ca. 0,9 à 1,2.

Figur 26.

Bæreevne af samling. $N_{j,u}/A_c/f_c$
Forsøgsemner med armeret fugemørtel.

		f_m/f_c	A_m/A_c	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$	Bemærkninger
OTAR 25x25/40	B13	0,20	1	0,68	0,41	1,66	x)
	B14			0,62		1,51	x)
	B15			0,64		1,56	x)
	B28	0,29	1	0,70	0,44	1,59	xxx)
	B29			0,72		1,64	xxx)
	B30			0,80		1,82	xxx)
FIARO 20x20/32	B33	0,45	0,53	0,78	0,48	1,62	xx)
	B34			0,78		1,62	xx)
	B37	0,58	0,53	0,78	0,69	1,13	
	B38			0,83		1,20	
	B41	0,58	0,53	0,82	0,81	1,01	
	B42			0,82		1,01	
	B43	0,58	0,53	0,77	0,86	0,90	
	B44			0,74		0,87	
25x25/32	B35	0,44	0,53	0,78	0,48	1,62	xx)
	B36			0,78		1,62	xx)
	B39	0,58	0,53	0,82	0,70	1,17	
	B40			0,79		1,13	
	B45	0,66	0,53	0,75	0,90	0,83	
	B46			0,82		0,91	
FIAR 25x25/40	B31	0,45	0,67	0,84	0,68	1,24	xx)
	B32			0,84		1,24	xx)
OTAR 25x25/40	B10	0,29	1	0,63	0,40	1,58	sø)
	B11			0,72		1,82	sø)
	B12			0,67		1,70	sø)

Bemærkninger:

- x) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, og ingen andre har mørtel fra denne sats.
- xx) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, og ingen andre har mørtel fra denne sats.
- xxx) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, yderligere 3 forsøgsemner med uarmeret mørtel (B25, 26 og 27) har mørtel fra denne sats, se figur 25.
- sø) Sandet i mørtlen er sø-sand.

De teoretiske bæreevner $N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$ ligger på 0,4 á 0,9. De observerede bæreevner $N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$ ligger på 0,6 á 0,8. Forsøgsemnerne har mørtel med styrke på 0,2 á 0,7 gange betonstyrken.

Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel med særligt sand

Tabellen, figur 27, viser resultaterne for forsøgsemnerne med uarmeret fugemørtel med særligt sand, dels sø-sand dels sand af robbedalekvarts.

Alle forsøgene med sø-sand i mørtlen viser bæreevner på ca. 1,3 á 1,8 gange den teoretiske bæreevne.

Alle forsøgene hvor sandet i mørtlen er robbedalekvarts, viser bæreevner på ca. 2,5 á 2,8 gange den teoretiske bæreevne.

Figur 27.

Bæreevne af samling. $N_{j,u}/A_c/f_c$
Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel, særligt sand.

a) sø-sand.

		f_m/f_c	A_m/A_c	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$
ALGL 20x20/48	A42	0,26	1	0,40	0,32	1,25
	A43			0,42		1,31
	A44			0,49		1,53
25x25/40	A19	0,23	1	0,56	0,32	1,79
	A20			0,52		1,66
	A21			0,53		1,72
ALRU 20x20/32	A22	0,23	1	0,60	0,32	1,94
	A23			0,55		1,76
	A24			0,53		1,71
25x25/30	A45	0,23	1	0,66	0,39	1,70
	A46			0,68		1,75
	A47			0,66		1,70

b) Robbedalekvarts-sand

		f_m/f_c	A_m/A_c	$N_{j,u}^{obs}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{cal}/A_c/f_c$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$
ALGL 25x25/40	A25	0,14	1	0,58	0,21	2,81
	A26			0,54		2,59
	A27			0,59		2,84
ALRU 20x20/32	A28	0,14	1	0,53	0,21	2,60
	A29			0,55		2,70
	A30			0,51		2,48

Årsagen til disse store afvigelser imellem de observerede og de teoretisk beregnede bæreevner skal sandsynligvis tilskrives de ovenfor under forsøgsemner med uarmeret fugemørtel nævnte forhold.

I denne forbindelse skal det bemærkes, at begge de to typer sand har en stejl kornkurve og ikke kan anses for at være velegnede til mørtel i almindelighed. De styrker, der er fundet ved cylinderprøvningen er meget lave i forhold til dem, der fås for mørtel med velegnet sand med mere jævn kornkurve.

$N_{j,u}^{obs}$, $N_{j,u,m}$, $N_{j,u,r}$, $N_{j,u,c}$ relateret til $A_m \cdot f_m$, $A_r \cdot f_m$ og $A_c \cdot f_c$
 =====
 samt $N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$
 =====

Der er her i tre afsnit svarende til de for den beregnede bæreevne bestemmende brudtilfælde:

- o urevnet søjle
- o revnet søjle
- o søjleendebrud

angivet observerede og beregnede bæreevner samt forholdet imellem observeret og beregnet bæreevne.

Et forsøg kan forekomme i mere end eet af disse afsnit, idet der i hvert afsnit, udover de forsøg, hvor den teoretiske bæreevne er bestemt af det pågældende brudtilfælde, også er medtaget de forsøg, hvor bæreevnen i det pågældende brudtilfælde ikke er bestemmende for den teoretiske bæreevne, men ikke afviger mere end 10% fra den bestemmende bæreevneværdi.

Det gælder generelt, at de observerede brudbilleder, herunder brududviklingen inden brudlasten nås, stemmer rimeligt godt overens med det teoretisk bestemmende brudtilfælde. - Der henvises i øvrigt til [6].

Forsøg med forsøgsemner med uarmeret fugemørtel med særligt sand er behandlet for sig.

Bæreevnen bestemt af brudtilfælde urevnet søjle

$$\underline{N_{j,u}^{cal} = N_{j,u,m}}$$

Tabellen, figur 28, viser resultaterne for de forsøgsemner - med uarmeret fugemørtel -, hvor den teoretiske bæreevne bliver bestemt af $N_{j,u,m}$ (brudtilfælde urevnet søjle), eller hvor $N_{j,u,m}$ ikke afviger mere end 10% fra den bestemmende bæreevneværdi $N_{j,u,r}$ eller $N_{j,u,c}$.

Figur 28.

Bæreevne af samling.

$$N_{j,u}/A_m/f_m$$

Brudtilfælde urevnet søjle.

Forsøgsemner med uarmeret fugemørtel.

h/b		β	E_m/E_c	$N_{j,u,m}/A_m/f_m$	$N_{j,u,r}/A_m/f_m$	$N_{j,u,c}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{obs}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{obs}/N_{j,u}^{cal}$	Benærkninger
0,12	ALRO A81 A82 A83	0,29	0,52	2,75	2,94	2,76 2,91 2,91	2,09 2,22 2,32	0,76 0,76 0,80	c) c) c)
0,16	ALGL A10 A11 A12	0,26	0,74	2,00		1,93	1,75 1,68 1,72	0,90 0,87 0,89	c) c) c)
	ALRU A39 A40 A41	0,21	0,41	1,75		1,86	1,56 1,67 1,56	0,90 0,95 0,90	
	A31 A32	0,21	0,41	1,75		1,92	1,44 1,70	0,82 0,96	
	FIGL B19 B20 B21	0,27	0,24	2,14			2,13 2,20 2,15	1,00 1,03 1,00	
	FIRU B16 B17 B18	0,27	0,24	2,14			2,44 2,29 2,28	1,15 1,08 1,08	
	B25 B26 B27	0,14	0,27	1,39			2,16 1,87 1,97	1,55 1,34 1,41	xxx) xxx) xxx)
	OTGL (A) A33 A34 A35	0,21	0,41	1,74			1,75 1,67 1,58	0,99 0,95 0,90	
	OTGL B22 B23 B24	0,27	0,24	2,14			1,87 2,03 2,02	0,88 0,95 0,95	

fortsættes

Figur 28, fortsat

h/b	β	E_m/E_c	$N_{j,u,m}/A_m/f_m$	$N_{j,u,r}/A_m/f_m$	$N_{j,u,c}/A_m/f_m$	$N_{j,u,m}/f_m$	$N_{j,u}^{Obs}/A_m/f_m$	$N_{j,u}^{Obs}/N_{j,u}^{Cal}$	Bemærkninger
0,20	ALGL A36	0,21	0,41	1,53			1,54	1,01	
	A37						1,50	0,98	
	A38						1,51	0,99	
	ALRU A13	0,26	0,74	1,72			1,93	1,12	
	A14						1,84	1,07	
	A15						1,92	1,11	
	ALRE A64	0,22	0,47	1,55	1,68		1,44	0,87	r)
	A65						1,33	0,80	r)
	A77	0,29	0,52	1,92	1,98		1,90	0,96	r)
	A78						2,12	1,08	r)
	ALRO A56	0,19	0,56	1,44	1,60	1,55	1,41	0,91	c)
	A57						1,36	0,88	c)
	A68	0,22	0,47	1,55	1,68		1,70	1,01	r)
	A69						1,89	1,12	r)
	FIRE B47	0,19	0,41	1,44	1,56		2,05	1,30	r)
	B48						1,84	1,18	r)
0,24	ALGL A60	0,22	0,47	1,38			1,04	0,76	
	A61						1,14	0,84	
0,30	ALRE A79	0,29	0,52	1,36	1,37		1,14	0,84	rm)
	A80						1,32	0,97	rm)

Bemærkninger:

$N_{j,u}^{Cal} = N_{j,u,m}$ hvor intet andet er anført.

c) $N_{j,u}^{Cal} = N_{j,u,c}$

r) $N_{j,u}^{Cal} = N_{j,u,r}$

rm) $N_{j,u}^{Cal} = N_{j,u,r} \approx N_{j,u,m}$

xxx) Forsøgsemnerne med dette mrk. har fugemørtel fra samme sats, yderligere 3 forsøgsemner med armeret mørtel (B28, 29 og 30) har mørtel fra denne sats, se figur 30.

Tre af forsøgene, mærket xxx), giver bæreevner på ca. 1,35 à 1,55 gange den teoretiske bæreevne. Årsagen til disse ret store afvigelser imellem de observerede og de teoretiske bæreevner antages at kunne tilskrives de tidligere (side 59) omtalte vanskeligheder ved at skaffe materialeparametre, der er repræsentative for fugemørtlen i forsøgsemnerne.

Forholdet mellem observeret og teoretisk bæreevne ligger for de af de øvrige forsøg, hvor brudtilfældet urevnet søjle er bestemmende for den teoretiske bæreevne på ca. 0,8 à 1,15 med et gennemsnit på 1,0.

Bæreevnen bestemt af brudtilfælde revnet søjle

$$\underline{N_{j,u}^{cal} = N_{j,u,r}}$$

Uarmeret fugemørtel

Tabellen, figur 29, viser resultaterne for de forsøgsemner med uarmeret fugemørtel, hvor den teoretiske bæreevne bliver bestemt af $N_{j,u,r}$ (brudtilfælde revnet søjle), eller hvor $N_{j,u,r}$ ikke afviger mere end 10% fra den bestemmende bæreevneværdi $N_{j,u,m}$ eller $N_{j,u,c}$.

For alle disse forsøgsemner gælder, at de har fugetværsnit mindre end søjletværsnittet.

Ni af forsøgene, mærket x) og xx), giver bæreevner på ca. 1,4 à 1,8 gange den teoretiske bæreevne. Årsagen til disse ret store afvigelser imellem de observerede og de teoretiske bæreevner antages at kunne tilskrives de tidligere (side 59) omtalte vanskeligheder ved at skaffe materialeparametre, der er repræsentative for fugemørtlen i forsøgsemnerne.

Forholdet mellem observeret og teoretisk bæreevne ligger for de af de øvrige forsøg, der har brudtilfældet revnet søjle bestemmende for bæreevnen, på ca. 0,8 å 1,3, med et gennemsnit på 1,0.

Armeret fugemørtel.

Tabellen, figur 30, viser forsøgsresultater og teoretisk beregnede bæreevner for forsøgsemnerne med armeret fugemørtel.

Med nedennævnte undtagelser er det brudtilfældet revnet søjle, der er bestemmende for den teoretiske bæreevne, altså $N_{j,u}^{cal} = N_{j,u,r}$.

For de tre forsøg mærket m1) og de tre mærket m2) er bæreevnen i brudtilfælde urevnet søjle $N_{j,u,m}$ ca. 15% større end $N_{j,u,r}$ og således bestemmende for $N_{j,u}^{cal}$. I denne forbindelse skal det bemærkes, at armeringen er forholdsvis lille, således at værdien for α bliver lille. Endvidere er mørtelstyrken ikke særlig stor, hvorfor fås ret høje forsøgsværdier for $N_{j,u}/A_r/f_m$.

For alle forsøgene ligger den fundne bæreevne i gennemsnit på 1,3 gange den teoretiske beregnede bæreevne. Se i øvrigt afsnittet om forsøgsemner med armeret fugemørtel side 62.

For de fleste forsøgsemner gælder, at mere end 25% af den indregnede tværarmering ligger i mørtelfugen ($\alpha_{fug}/\alpha \geq 0,25$); for disse ligger den fundne bæreevne i gennemsnit på 1,4 gange den teoretiske bæreevne. For de få, der kun har ca. 15% af armeringen liggende i mørtelfugen, er den fundne bæreevne i gennemsnit 0,9 gange den teoretiske bæreevne.

APPENDIKS

INDHOLDSFORTEGNELSE

RESUME.....	1
0 INDLEDNING.....	2
1 GENEREL TEORI.....	4
1.1 Centralt belastede søjler.....	5
1.2 Tværbelastede søjler.....	6
1.3 Bøjningsstivheden.....	9
2 H.J. LARSENS BEREGNINGSMODELLER.....	10
3 CIB'S BEREGNINGSMETODE.....	11
4 H. GRANHOLMS BEREGNINGSMETODE.....	13
5 TVÆRBELASTET SØJLE - ALTERNATIV BEREGNING.....	15
5.1 Momentøgning.....	15
5.2 Reduceret søjlestyrke.....	18
6 BEREGNINGSMETODER OG FORSØG.....	19
6.1 Regningsmæssige styrker.....	21
6.2 Sammenligning med forsøgsdata og vurderinger.....	22
7 PARABELBUER.....	29
7.1 Snitkræfter og belastninger.....	30
7.2 Dimensioneringsmetode.....	35
LITTERATURLISTE.....	38

RESUME

Nærværende appendiks knytter sig til rapporten "Risteværkskonstruktioner opbygget af sammensatte Træbjælker".

Den beskriver kort en søjleteori, samt angiver forskellige metoder til at bestemme den kritiske søjlelast for 4-lamels sammensatte træøjler.

Den anførte teori er sammenlignet med fire forsøg, og nogle generelle tendenser er beskrevet.

Endvidere er der foretaget nogle beregninger for en parabelbue, opbygget af et 4-lamels tværsnit, svarende til det ved søjleforsøg anvendte tværsnit.

0 INDLEDNING

Der er i dette appendiks gennemgået forskellige beregningsmetoder for sammensatte træ søjler. Den beskrevne teori er fremdraget og bearbejdet i relation til en forsøgsserie med 4-lamels sammensatte træ søjler, der blev gennemført som en videreudvikling af et eksamensprojekt om sammensatte træbjælker [1]. Den beskrevne teori danner endvidere baggrund for en rapport til TOP (Træbranchens Oplysningsråd) og STVF (Statens teknisk videnskabelige Forskningsråd) [5].

Der er i det følgende behandlet en søjletype med geometri og tværsnit som angivet på figur 1.

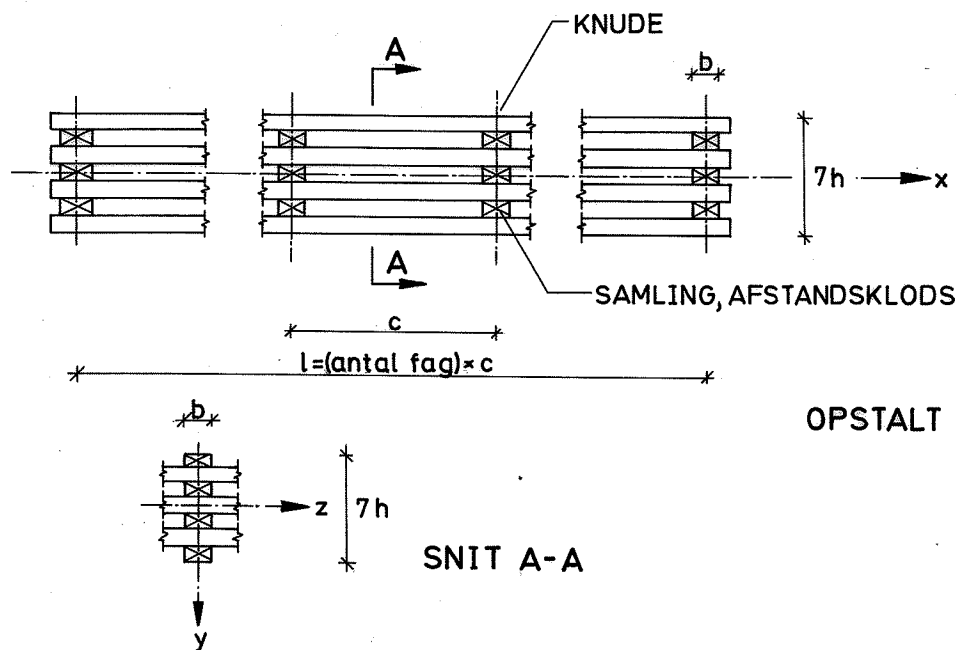


FIG. 1

Det bemærkes, at alle indgående trædele (lameller og "afstandsklodser") har tværsnitsdimensionen $b \times h$, og at alle samlinger (6 over hinanden) mellem lameller og afstandsklodser udføres ens.

Der anvendes endvidere følgende symboler udover de alment anvendte

k_s : en samlings forskydningsstivhed (enhed: N/mm)

k : den samlede forskydningsstivhed (enhed: N/mm)

I_o : det matematiske inertimoment for tværsnittet, svarende til uendeligt stive samlinger

I_E : det effektive inertimoment for tværsnittet

i : inertimomentet for den enkelte lamel

l_s : den fri søjlelængde

K_{My}, K_{Mz} : bøjningsstivheden om y- henholdsvis z-aksen

K_{vx} : vridningsstivheden om x-aksen

u : udbøjningen i enten y- eller z-akse retning

$$\frac{d(\quad)}{dx} = (\quad)'$$

Samlingernes bæreevne er ikke undersøgt nærmere, disses påvirkning kan naturligvis også være bestemmende for en søjles bæreevne, se f.eks. [2] for bestemmelse af denne.

Afsnit 4 og 5 er en videreudbygning af den i [1] appendiks udledte teori.

1 GENEREL TEORI

Den kritiske søjlelast, den mindste last, der giver stabilitetsbrud i en søjle, kan generelt bestemmes ud fra differentialligningerne 1.1 og 1.2, belastningsprincip jævnfør figur 2.

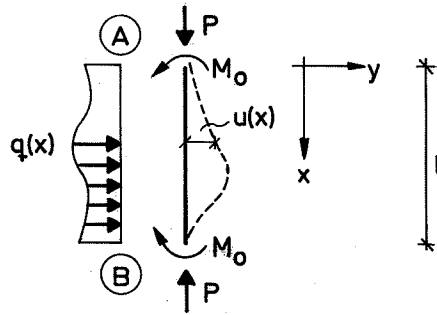


FIG.2

$$u'' = - \frac{M}{K_M} \quad (1.1)$$

$$M'' - (Pu')' = -q \quad (1.2)$$

Differentieres 1.2 to gange og indsættes samt antages P konstant findes

$$u'''' + \alpha^2 u'' - \frac{q}{K_M} = 0 \quad (1.3)$$

hvor

$$\alpha^2 = \text{Min} \left\{ \frac{P}{K_{Mz}}, \frac{P}{K_{My}} + \frac{1}{K_{My} K_{vx}} (M_0 + f(q(x))) \right\}$$

I de følgende afsnit betragtes tilfældet, hvor

$$\alpha^2 = \frac{P}{K_{Mz}} = \frac{P}{K_M}$$

Den fuldstændige løsning til differentialligningen er da

$$u = c_1 \sin \alpha x + c_2 \cos \alpha x + c_3 x + c_4 + u_{\text{part}} \quad (1.4)$$

hvor

c_i : er integrations-konstanter

u_{part} : er en partikulær løsning

Bestemmes c_i da ud fra randbetingelserne, kan stabilitetsbruddet bestemmes svarende til den mindste værdi af P , forskellig fra nul, der giver en løsning til 1.3.

1.1 Centralt belastede søjler

Betragtes tilfældet hvor

$$q(x) = 0 \quad \text{og} \quad M_0 = 0$$

og betragtes der kun simpelt understøttede søjler (pendulsøjler $\ell_s = \ell$).

Randbetingelser:

$$u(0) = u(\ell) = 0$$

$$M(0) = M(\ell) = 0 \Rightarrow u''(0) = u''(\ell) = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \sin \alpha \ell & \cos \alpha \ell & \alpha \ell & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha \ell & \cos \alpha \ell & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Homogene ligningssystemer har kun egentlige løsninger, hvis determinanten er nul.

$$D = 0 \Rightarrow -\alpha \ell \cdot \sin \alpha \ell = 0 \Rightarrow \alpha \ell = m \cdot \pi$$

(m er heltallig).

D.v.s. mindste egentlige værdi af $P(\alpha)$, der giver løsninger forskellige fra nul, er m lig med 1, hvorved den kritiske søjlelast bestemmes til:

$$P_E = \frac{\pi^2}{\ell^2} \cdot K_M \quad (1.5)$$

1.2 Tværbelastet søjle

Betragtes tilfældet med $q(x) = \text{konstant} = q$, samt søjlen simpelt understøttet i begge ender. Da systemet er statisk bestemt, kan vi umiddelbart udtrykke

$$M = \frac{1}{2}qx(\ell - x) + M_0 + P \cdot u$$

Vi ønsker at bestemme momentforøgelsen hidrørende fra normallasten.

Da søjlen er statisk bestemt og momentet derved er kendt, kan vi nøjes med at betragte ligning 1.1.

Denne udtrykkes derved som

$$u'' + \alpha^2 u = -\frac{\alpha^2}{P} \left\{ \frac{1}{2}qx(\ell - x) + M_0 \right\}$$

Der har den fuldstændige løsning

$$u = c_1 \sin \alpha x + c_2 \cos \alpha x - \frac{1}{P} \left\{ \frac{1}{2}qx(\ell - x) + \frac{q}{\alpha^2} + M_0 \right\}$$

Randbetingelser:

$$u(0) = u(\ell) = 0 \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \sin \alpha \ell & \cos \alpha \ell \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} - \frac{1}{P} \left\{ \frac{q}{\alpha^2} + M_0 \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

For determinanten ulig nul findes løsningen til det inhomogene ligningssystem til

$$c_2 = \frac{1}{P} \cdot \left\{ \frac{q}{\alpha^2} + M_0 \right\}$$

$$c_1 = c_2 \cdot \frac{1 - \cos \alpha \ell}{\sin \alpha \ell}$$

Hvorefter momentet på midten kan udtrykkes som

$$M\left(\frac{1}{2}\ell\right) = \left\{ \frac{q}{\alpha^2} + M_0 \right\} \frac{1}{\cos \frac{1}{2}\alpha\ell} - \frac{q}{\alpha^2} \quad (1.6)$$

hvor:

$$\alpha^2 = \frac{P}{K_M}$$

Momentforøgelsen hidhørende fra normallasten kan alternativt bestemmes ved tilnærmet at antage, at udbøjningskurven er sinus-formet

$$u = u_0 \cdot \sin \frac{\pi}{\ell} x$$

hvor u_0 er udbøjningen på midten.

$$\begin{aligned} M\left(\frac{1}{2}\ell\right) &= \frac{1}{8}q\ell^2 + M_0 + Pu_0 = -K_M \cdot u''(x=\frac{1}{2}\ell) \\ &= K_M u_0 \frac{\pi^2}{\ell^2} \end{aligned}$$

Indføres heri den tidligere bestemte kritiske søjlelast, findes:

$$u_0 = \frac{\frac{1}{8}q\ell^2 + M_0}{P_E - P}$$

$$M\left(\frac{1}{2}\ell\right) = \left(\frac{1}{8}q\ell^2 + M_0 \right) \frac{P_E}{P_E - P} =$$

$$\left(\frac{1}{8}q\ell^2 + M_0 \right) \cdot \frac{\pi^2}{\pi^2 - (\alpha\ell)^2} \quad (1.7)$$

Sammenlignes disse to udtryk for maksimalmomentet (1.6 og 1.7), idet momentet opdeles i to dele og udtrykkes momentforøgelsen hidhørende fra normalkraften ved ΔM_1

$$M = M_q + \Delta M_q + M_0 + \Delta M_0$$

Findes:

αl	0	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{15}{16}\pi$
ΔM_q Formel 1.6	1	1	1	1
ΔM_q Formel 1.7	1	0.98	0.97	0.97
ΔM_0 Formel 1.6	1	1	1	1
ΔM_0 Formel 1.7	1	0.81	0.80	0.79

Ergo, dersom belastningen (excl. normallast) blot giver anledning til en tilnærmelsesvis sinusformet udbøjningskurve, giver tilnærmelsesformlen 1.7 en tilstrækkelig nøjagtighed til bestemmelsen af momentforøgelsen hidrørende fra normallasten (en påvirkning svarende til M_0 alene giver en udbøjningskurve som er et cirkeludsnit).

Dersom:

$$\alpha^2 = \frac{P}{K_{My}} + \frac{1}{K_{My} \cdot K_{vx}} \left[M_0^2 + f(q(x)) \right]$$

svarer selve stabilitetsbruddet til et kombineret kipnings- og søjle-fænomen (α -værdi se afsnit 1.0).

For tilfælde, hvor $q(x) \neq 0$ bliver ligningssystemet væsentligt mere kompliceret. Da den udførte forsøgsserie er udført med afstivning over for dette stabilitetsfænomen, gennemgås teorien herfor ikke nærmere her. Søjlen - angivet på figur 1 - tænkes anvendt i et system af søjler med udstrækning i z-aksens retning, og indbyrdes forbundet af "afstivningsklodserne", hvorfor dette stabilitetsfænomen er uaktuelt.

Det bemærkes dog, at for en søjle belastet kun med et moment M_0 (se figur 2), vil den kritiske søjle-

last udtrykkes ved

$$\frac{P_E}{K_{My}} + \frac{M_0^2}{K_{My} \cdot K_{vx}} = \frac{\pi^2}{l_s^2}$$

1.3 Bøjningsstivheden

Bøjningsstivheden (K_M) vil være en funktion af konstruktionsgeometrien, træets stivhedsparametre og samlingernes forskydningsstivhed (k_s).

Oftest udtrykkes bøjningsstivheden som værende proportional med elasticitetsmodulet E

$$K_M = E \cdot I_E \quad (1.8)$$

hvor I_E er det effektive inertimoment.

Ved beregningen af I_E tages der hensyn til "sekundære" deformationer og samlingernes stivhed.

I de følgende kapitler er der angivet tre metoder til bestemmelse af I_E .

Både H.J. Larsen og H. Granholm anvender samme princip til at udtrykke I_E

$$I_E = \Sigma i + (I_0 - \Sigma i) \rho \quad (1.9A)$$

hvor ρ er en reduktionsfaktor, lig med 1 for uendeligt stive samlinger, og lig med 0 for total slappe samlinger.

Udtrykket kan, jævnfør figur 1, skrives som

$$I_E = \frac{1}{3} b h^3 + \left(\frac{61}{3} - \frac{1}{3} \right) b h^3 \rho = \frac{1}{3} (1 + 60 \rho) b h^3 \quad (1.9B)$$

svarende til det effektive inertimoment for fire lameller over hinanden med afstandsklodser.

Jævnfør kapitel 0 kan samlingernes bæreevne være dimensionerende for søjlestyrken, hvorved formel 1.5 ikke angiver den egentlige søjlestyrke; fænomenet behandles dog ikke her.

2.0 H.J. LARSENS BEREGNINGSMETODE

Reduktionsfaktoren ρ (formel 1.9) udtrykkes som

$$\rho = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{D\ell}\right)^2} \quad (2.1A)$$

hvor

$$D^2 = \frac{(N-1) k}{cEA_r}$$

N : antal elementer (lameller og mellemrum)

$$A_r = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{r_n} A_i$$

A_i = areal af enkelte elementer

c = afstanden mellem forbindelsesmidlerne (søm, bolte m.v.)

$$k = \frac{k_s}{1 + \frac{(N-1) c}{12EA_r} \left(\frac{I_0}{\sum_i} - 1\right) k_s}$$

Se i øvrigt figur 3.

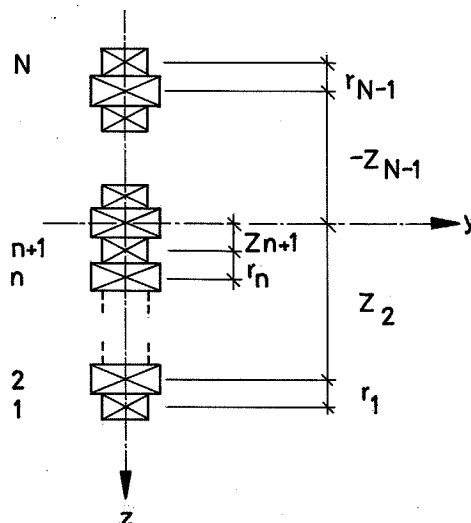


FIG. 3

For søjlen - angivet på figur 1 - findes

$$A_r = 20 \cdot bh$$

$$N = 4 + 3 = 7$$

$$k = \frac{k_s}{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{ck_s}{Ebh}} \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{I}{1 + \frac{\pi^2}{\ell^2} \left[\frac{10}{3} \cdot \frac{cbhE}{k_s} + 5 \cdot c^2 \right]} \quad (2.1B)$$

Det bemærkes, at udtrykket kun gælder for så store slankhedstal ($\ell \sqrt{A_{TOTAL}/I_E}$), at forholdene er rent elastiske.

Skønnes denne grænse - svarende til grænsen mellem de normalt anvendte søjleformer for massive træ-søjler, Ostenfeld-formlen for korte søjler og Euler-formlen for slanke søjler, findes:

$$\ell \sqrt{\frac{A_{TOTAL}}{I_E}} \geq 75$$

Eller for en søjle svarende til figur 1

$$\rho \leq \frac{1}{60} \left\{ 12 \left(\frac{\ell}{75h} \right)^2 - 1 \right\}$$

Det bør endvidere bemærkes, at H.J. Larsen behandler tværbelastede massive træ-søjler, jævnfør formel 1.7.

3.0 CIB'S BEREGNINGSMETODE

Metoden er analog til den almindelige for træ-søjler, anvendte beregningsmetode, hvor der bestemmes en søjlefaktor (k_{col}), udtrykt ved det effektive slankhedsforhold. Metoden anvendes på søjler med geometri, svarende til figur 4 (for udbøjning i figurens plan) med angivne forbehold.

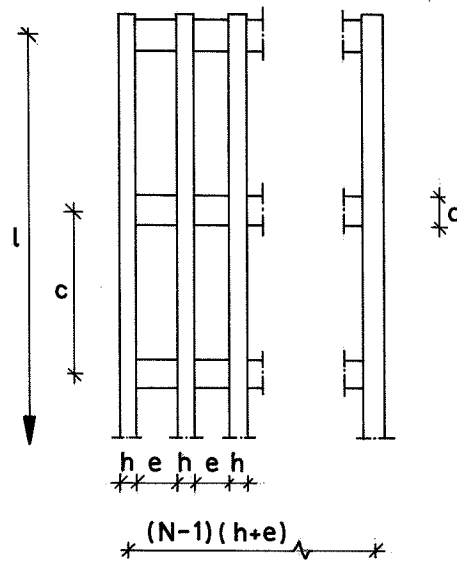


FIG.4

Sættes bredden af lamellerne til b , findes

$$\lambda_E^2 = \lambda^2 + \nu \frac{N}{2} \lambda_1^2$$

hvor:

$$\lambda^2 = \ell^2 \frac{A_{TOT}}{I_0}, \quad A_{TOT} = N \cdot bh$$

$$\lambda_1^2 = c^2 \cdot \frac{bh}{i^2}$$

ν	SAMLINGSMETODE		
	limet	sømmet	bolte + mellemlæg
langtidslast	1	4	3,5
korttidslast	1	3	2,5

Den kritiske søjlelast bestemmes da som i DS413 [7].

$$P_{krit} = s_o' \cdot k_{col} \cdot A$$

$$k_{col} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{4k_E} & , \quad k_E \geq 0,5 \\ k_E & , \quad k_E \leq 0,5 \quad (\text{elastiske søjler}) \end{cases}$$

$$k_E = \frac{\pi^2 E}{s_o \cdot \lambda_E^2}$$

Betragtes det elastiske tilfælde (Euler søjler)

$$P_{\text{krit}} = P_E = \frac{\pi^2 E A_{\text{TOT}}}{\lambda_E^2} \quad (3.1)$$

Jævnfør formel 1.5 og 1.8

$$I_E = \frac{A_{\text{TOT}} \ell^2}{\lambda_E^2}$$

Omskrives I_E svarende til formel 1.9, findes

$$\rho = 1 - \frac{I_0}{\left[\frac{2}{v} \left(\frac{\ell}{c} \right)^2 \frac{i}{I_0} + 1 \right] (I_0 - \sum i)} \quad (3.2A)$$

Betragtes igen søjlen - angivet på figur 1 - findes

$$\rho = 1 - \frac{6l}{60 \left[\frac{1}{122} \cdot \frac{1}{v} \left(\frac{\ell}{c} \right)^2 + 1 \right]} \quad (3.2B)$$

Metoden kan dog principielt kun anvendes på søjler hvor

- antallet af frie felter er mindst tre, d.v.s at søjlen minimum er samlet i ender og ved trediedelspunkter ($\ell \geq 3c$)
- $e \leq 5h$
- $d \geq 1,5h$
- ved sømmede samlinger skal der mindst være 4 søm pr. samling (ved ender på række). Ved boltede samlinger skal der anvendes mellemlæg samt mindst to bolte ved hver samling
- søjlen er centralt belastet
- samlingernes bæreevne undersøges for en nærmere angiven last

4 H. GRANHOLMS BEREGNINGSMETODE

Den grundlæggende udledning af teorien er gennemgået og modificeret i eksamensprojektet [1] og vil derfor ikke blive gengivet her.

Der henvises i følgende til formler i [1], appendiks 2. Løsningen af ligninger er baseret på uendelige enkeltserier, n (som er heltallig), svarer da til lednummer i serien.

Jævnfør [1] (14) skrives udbøjningen som

$$y = \sum y_n = \sum a_n \sin \frac{n\pi}{\ell} x$$

$$M = P \cdot y \Rightarrow$$

$$M_n = P \cdot a_n \cdot \sin \frac{n\pi}{\ell} x$$

Indføres heri [1] (20) og (22)

$$P_{\text{krit}} = \left(\frac{n\pi}{\ell} \right)^2 EY_n$$

Hvor Y_n betegner det n 'te led i serien, der beskriver det reducerede inertimoment.

Den mindste kritiske last findes da, når n sættes lig 1

$$P_{\text{krit}} = \frac{\pi^2}{\ell^2} EY_1$$

hvor vi kan sidestille Y_1 med det effektive inertimoment i formel 1.8.

Jævnfør [1] (24) og (25) kan reduktionsfaktoren i (1.9) skrives som

$$\rho = 3 \left(\frac{2}{\gamma h_0} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{\tanh \frac{1}{2} \gamma h_0}{\frac{1}{2} \gamma h_0} \right\} \quad (4.1)$$

hvor - jævnfør figur 1, samt [1] figur 4 og 5, (10) og (16)

$$\frac{1}{2} \gamma h_0 = \frac{7}{4} \frac{\pi h}{\ell} \sqrt{\frac{E}{K h}}$$

hvor:

$$K = \frac{1}{bc} k, \text{ udjævnede forskydningsstivhed} \\ (\text{N/mm}^3)$$

bestemmes jævnfør [1],

appendiks s.A.2.17

$$h_o = 7 h, \text{ totalhøjden}$$

5 TVÆRBELASTET SØJLE - ALTERNATIV BEREKNING

I det følgende opstilles beregningsmetoder for momentforøgelsen ved en tværbelastet søjle, baseret på beregningsmodeller i [1], appendiks 3, metode 2.2.

5.1 Momentøgning

Definitioner:

$M_0(x)$ = momentet hidrørende fra tværbelastningen

N_0 = ydre normalkraft, pos. som træk

N_i = $bh\sigma_i$, normalkraft i lamel i, pos. som træk

σ_i = $E f'_i(x)$, hvor $f_i(x)$ er forlængelsen og lamellen

g = $2hy'$, gensidig glidning mellem lamellerne

K = stivheden af det indførte forskydningslag

τ = Kg , "forskydningsspændingen" antages ens mellem alle lameller i et lodret snit (fast x)

$\bar{y}''' = 0$, der ses bort fra krumningsvariationen

Se i øvrigt [1] for definitioner og tilnærmelser.

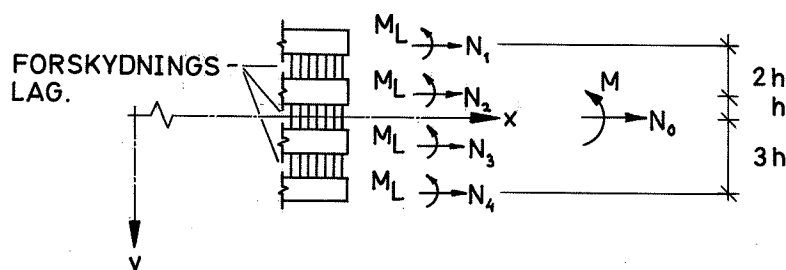


FIG. 5

Jævnfør figur 5 findes

$$N_1 = -N_M + \frac{1}{4} N_0 = bh\sigma_1$$

$$N_2 = N_3 = \frac{1}{4} N_0 = bh\sigma_2 = bh\sigma_3$$

$$N_4 = N_M + \frac{1}{4} N_0 = bh\sigma_4$$

$$M_L = -Eiy''$$

Idet N_2 og N_3 ikke medvirker ved momentoptagelsen jævnfør metode 2.2.

Idet N_0 er konstant findes

$$-\sigma'_1 = \sigma'_4 = \frac{1}{bh} \cdot N'_M(x)$$

$$\sigma'_2 = \sigma'_3 = 0$$

Betragtes et bjælkeudsnit - se figur 6

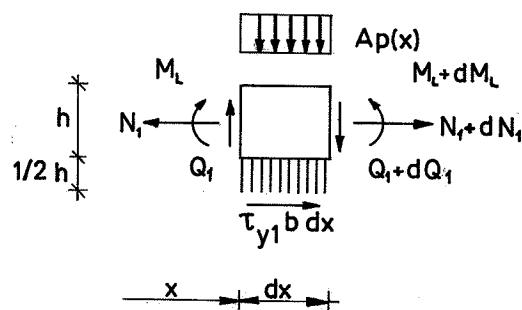


FIG. 6

$$\tau_{y1} = \tau = 2Khy' = -\frac{1}{b} \cdot N'_1 = \frac{1}{b} \cdot N'_M(x) \Rightarrow$$

$$y = \frac{1}{2Khb} \cdot N_M(x) + c_0$$

betragtes en pendulsøjle

$$x = 0 \Rightarrow y = 0, M_0(x) = 0 \Rightarrow c_0 = 0$$

Det totale ydre moment kan skrives som (jævnfør figur 5)

$$\begin{aligned} M &= 4M_L + 3h(-N_1 + N_4) + h(-N_2 + N_3) \\ &= -4Eiy'' + 6hN_M \\ &= -4Eiy'' + 12Kh^2b \cdot y \end{aligned} \quad (5.1)$$

Tænkes som ved formel 1.7 udbøjningen for pendulsøjlen værende sinusformet

$$y = u_0 \cdot \sin \frac{\pi}{\ell} x, \quad y'' = -\frac{\pi^2}{\ell^2} y$$

Betragtes tilfældet, hvor maksimal moment og udbøjning er sammenfaldende for $x = \frac{1}{2}\ell$, findes

$$M(=\frac{1}{2}\ell) = M_0 + P u_0 = 4 Ei \frac{\pi^2}{\ell^2} u_0 + 12Kh^2bu_0$$

Idet $N_0 = -P$, indføres størrelsen

$$P_{EM} = 4 \frac{\pi^2}{\ell^2} Ei + 12Kh^2b \quad (5.2)$$

Da findes

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{M_0}{P_{EM} - P} \\ M &= \frac{M_0 \cdot P_{EM}}{P_{EM} - P} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Svarende til formel (1.7).

Omskrives P_{EM} , jævnfør formel (1.8) og (1.9), findes reduktionsfaktoren

$$\rho = \frac{3}{5} \frac{\ell^2}{\pi^2} \frac{K}{Eh} \quad (5.4)$$

5.2 Reduceret søjlestyrke

I det følgende angives en metode til tilnærmet at beskrive reduktionen i søjlestyrke hidhørende fra momentets indvirkning.

Bestemmes I_E tilnærmet ved hjælp af formel (5.1)

$$M = -EI_E y'' = -Eiy'' + 12Kh^2by \Rightarrow$$

$$I_E = 4i - 12 \frac{Kh^2b}{E} \cdot \frac{y}{y''} \quad (5.5a)$$

Anvendes [1], appendix 3 (32), (34), (31), (12)

$$M(x) = 6bh^2(V_1x + V_0)$$

$$\bar{k}^2 = \frac{K}{Eh}$$

$$Ehy = \frac{1}{2\bar{k}^2} \left[e_1 \cosh 6\bar{k}x + e_2 \sinh 6\bar{k}x + V_1x + V_0 \right]$$

$$Ehy'' = \frac{18}{\bar{k}^2} \left[e_1 \cosh 6\bar{k}x + e_2 \sinh 6\bar{k}x \right]$$

(e_1 og e_2 findes af randbetingelserne for differentialligninger).

Omskrives dette - jævnfør appendix 3 - til

$$y = y_Q + y_{\text{korr}}$$

$$y_Q = \frac{1}{2\bar{k}^2 Eh} (V_1x + V_0) = \frac{M(x)}{12bh^2K}$$

$$y_{\text{korr}} = \frac{1}{2K} (e_1 \cosh 6\bar{k}x + e_2 \sinh 6\bar{k}x)$$

Det bemærkes, at y_{korr} er negativ og vokser for aftagende forskydningsstivhed (K).

Hermed omskrives formel (5.5a) til

$$\begin{aligned}
 I_E &= 4i - 12 \frac{Kh^2b}{E} \frac{1}{36\kappa^2} \left[1 + \frac{Y_Q}{Y_{\text{korrr}}} \right] = \\
 &4i - \frac{1}{3}bh^3 \left[1 + \frac{Y_Q}{Y_{\text{korrr}}} \right] = \\
 &\frac{1}{3}bh^3 \left[-\frac{Y_Q}{Y_{\text{korrr}}} \right]
 \end{aligned} \tag{5.5b}$$

Idet $i = \frac{1}{12}bh^3$, endvidere kan reduktionsfaktoren i formel (1.9b) skrives som

$$\rho = \frac{-1}{60} \left[1 + \frac{Y_Q}{Y_{\text{korrr}}} \right] \tag{5.6}$$

Hvorved den reducerede søjlestyrke $P_{E, \text{RED}}$ kan bestemmes ved formel (1.8) og (1.5). Denne værdi - $P_{E, \text{RED}}$ - kan ikke betragtes som en egentlig søjlestyrke, men anvendes til bestemmelse af momentøgningen ved formel 1.7.

6.0 BEREGNINGSMETODER OG FORSØG

De forskellige beregningsmetoder sammenlignes i relation til de udførte søjleforsøg.

Forsøgssøjlen er opbygget efter princip - som angivet på figur 1 - hvor

$$\begin{aligned}
 h &= 34 \text{ mm} \\
 b &= 70 \text{ mm} \\
 l &= 3333 \text{ mm} \\
 c &= 667 \text{ mm (5 fag)}
 \end{aligned}$$

Samlingen udføres med gennemgående M12-bolt (kvalitet 4.6) med 6 stk. 50 x 50 stjernemellemlæg. Mellemlæggene indpresses ved hjælp af M12-bolten, hvilken betyder, at disse ikke overalt er fuldt indpresede.

Af forsøgstekniske hensyn er søjlen udført som en dobbeltsøjle med tværsnit jævnfør figur 7.

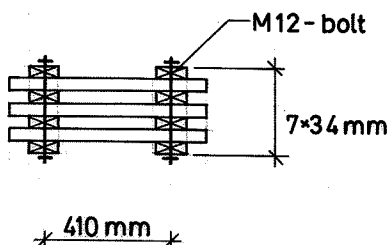


FIG. 7

Ved sammenligninger af det effektive inertimoment (I_E) betragtes en "enkeltsøjle".

$$I_0 = \frac{61}{3} \cdot 70 \cdot 34^3 \text{ mm}^4 = 55,94 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Beregningsforudsætninger for H.J. Larsens metode

$$\rho \leq \frac{1}{60} \left[12 \left(\frac{3333}{75 \cdot 34} \right)^2 - 1 \right] = 0,3250$$

svarende til

$$I_E \leq 18,80 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Hvilket jævnfør figur 8 - kurven for formel (2.1) - er opfyldt.

Beregningsforudsætninger for CIB's metode:

Det bemærkes, at kravet om to bolte pr. samling ikke er opfyldt, hvilket burde medføre, at de beregnede søjlestyrker bliver for store.

6.1 Regningsmæssige styrker

Denne bestemmes, svarende til uklassificeret konstruktionstræ, lastgruppe A (hvilende belastning), se DS 413 [7].

$$E = 2.000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 3,5 \text{ (i formel 3.2)}$$

$$k = 1,5 \text{ mm}^2/E = 3.000 \text{ N/mm}^2 \text{ (jævnfør [2])}$$

Idet P_E bestemmes (for en dobbeltsøjle) ved hjælp af formel 1.5, 1.8 og 1.9.

	Reduktionsfaktor ρ	I_E^4 $\times 10^6 \text{ mm}^4$	P_E kN
H.J. Larsen formel 2.1 og 2.2	0,1638	9,93	35,29
CIB formel 3.2	0,0396	3,09	11,00
H. Granholm formel 4.1	0,3713	21,35	75,86
P_{EM} formel 5.4	0,4265	24,39	(86,66)
Reduceret søjlestyrke formel 5.6	0,7784	43,75	(155,48)

TABEL 1: Tal i parentes angiver, at disse ikke er at betragte som egentlige søjlestyrker.

Det bemærkes, at CIB angiver en yderst lav søjlestyrke (dette forhold er dog ikke undersøgt nærmere), samt at H. Grandholm angiver en søjlestyrke, der er dobbelt så stor som H.J. Larsens.

Den samlede forskydningsstyrke bestemmes til

H.J. Larsen, $k = 1.840 \text{ N/mm}$

H. Granholm, $k = 2.005 \text{ N/mm}$

Denne forskel (på ca. 8%) vil dog ikke begrunde den store forskel i regningsmæssige søjlestyrker.

6.2 Sammenligning med forsøgsdata og vurderinger

I det følgende udregnes I_E for en enkelsøjle, mens P_E udregnes for en dobbeltsøjle, svarende til forsøgssøjler.

CIB's beregningsmetode er ikke medtaget ved sammenligningerne. Der blev udført 4 stk. søjleforsøg.

På figur 8 er det effektive inertimoment afbildet som funktion af k_s og E for de forskellige beregningsmetoder. (se følgende side).

Det ses, at generelt gælder det, at H. Granholm (formel 4.1) giver dobbelt så store værdier som H.J. Larsen (formel 2.1). Dette skyldes ikke som tidligere nævnt, at den samlede forskydningsstyrke bestemmes på forskellige metoder idet

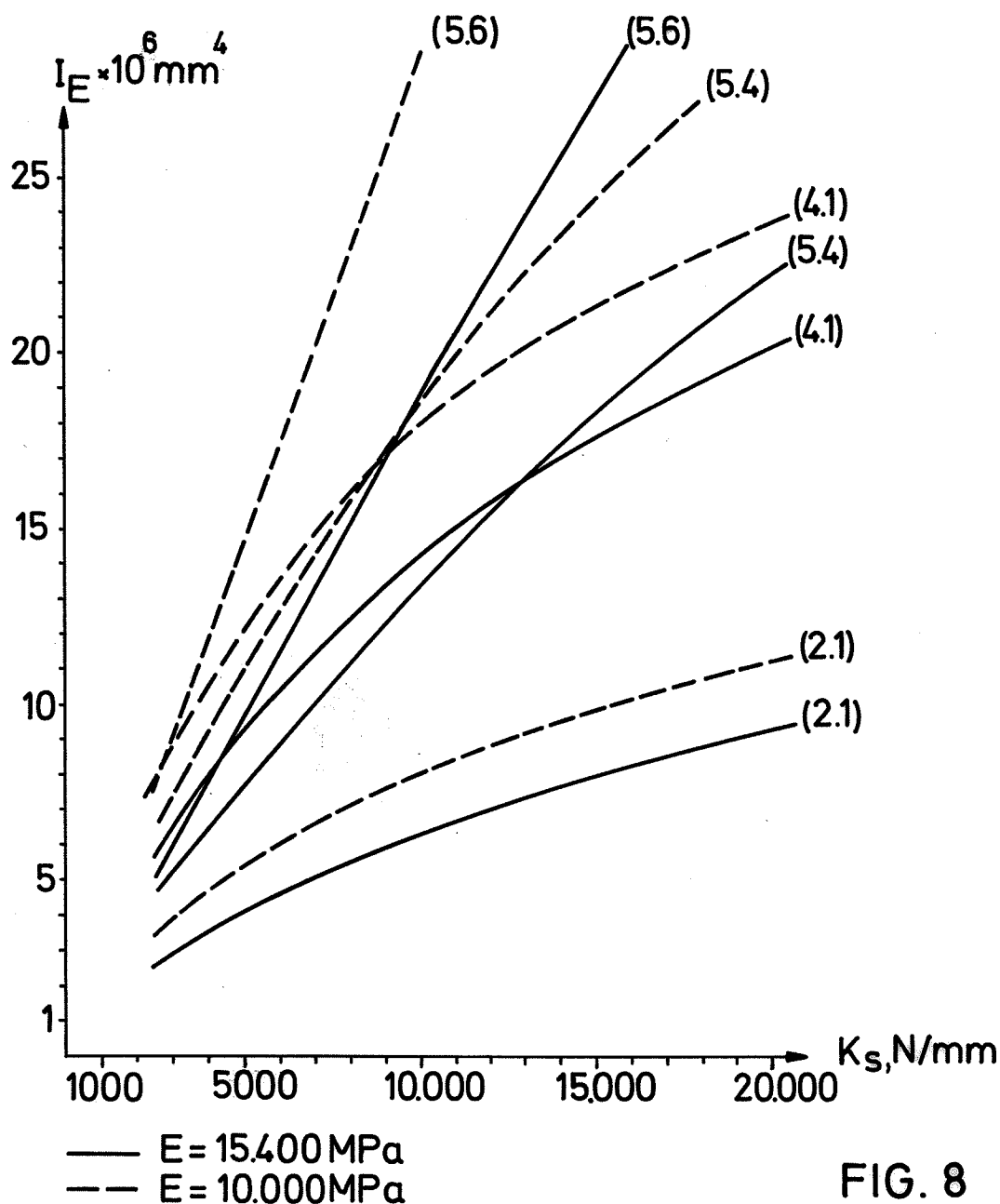
$$\frac{k_{\text{GRANHOLM}} - k_{\text{LARSEN}}}{k_{\text{GRANHOLM}}} \cdot 100\% = \begin{cases} \sim 2\% & (k_s = 3.000 \text{ N/mm}) \\ \sim 9\% & (k_s = 20.000 \text{ N/mm}) \end{cases}$$

Forsøgsresultater:

Rent tryk

forsøg 1.1 : $P_{\max} = 177 \text{ kN}$

forsøg 1.2 : $P_{\max} = 185 \text{ kN}$



FIGUR 8: Effektive inertimoment som funktion af E og k_s .

Tal i parentes angiver beregningsformel, idet y_Q og $y_{\text{kor}} i$ formel 5.6 er bestemt for $x = \frac{1}{2}l$.

Der forekom ikke egentlig søjlebrud ved nogen af forsøgene, idet forsøg på øget belastning kun medførte øgede deformationer og dermed aflastning grundet belastningsmetoden (olietrykspresse). Der var dog begyndende "søjlevirkning" ved begge forsøg (voksende tværdeformationer, ca. $1/300$ af søjlelængden).

Kombineret tryk og bøjning

forsøg 2.1 : $P = 67 \text{ kN}$, $M_0 = 1,0 \text{ kNm}$

forsøg 2.2 : $P = 50 \text{ kN}$, $M_0 = 2,0 \text{ kNm}$

Der forekom egentligt brud ved begge forsøg. Moment blev påført ved hjælp af 2×4 ens knudebelastninger (på 25 kg, henholdsvis 50 kg.pr. knude), se figur 9.

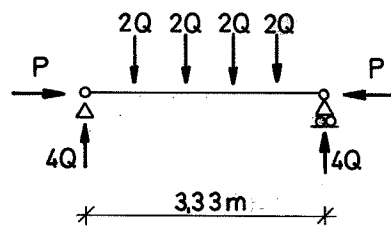


FIG. 9

Se i øvrigt [5] vedrørende søjleforsøg.

Forskydningsstivheden (k_s) ved forsøgene skønnes ud fra de i [1] (ved forskydningsforsøg med enkel samling) bestemte værdier.

Belastningen af samlingen ved rent tryk skønnes ud fra den af H.J. Larsen angivne beregningsmetode (se [2]). Kaldes forskydningskraften i samlingen for Q findes

$$Q = \frac{1,81 - k_{col}}{k_{col} \left(\frac{l}{i_E} \right)} \cdot P = k_Q \cdot P \quad (6.1)$$

hvor:

$$P_E = k_{col} \cdot A \cdot \sigma'_0 \Rightarrow$$

$$k_{col} = \frac{\pi^2 \cdot I_E}{4 \cdot bh \cdot l^2} \cdot \frac{E}{\sigma'_0}$$

$$i_E = \sqrt{\frac{I_E}{4 bh}}$$

Skønnes $\sigma'_0 = 35 \text{ MPa}$ (trykstyrken)

$E = 15.400 \text{ MPa}$ (jævnfør [1])

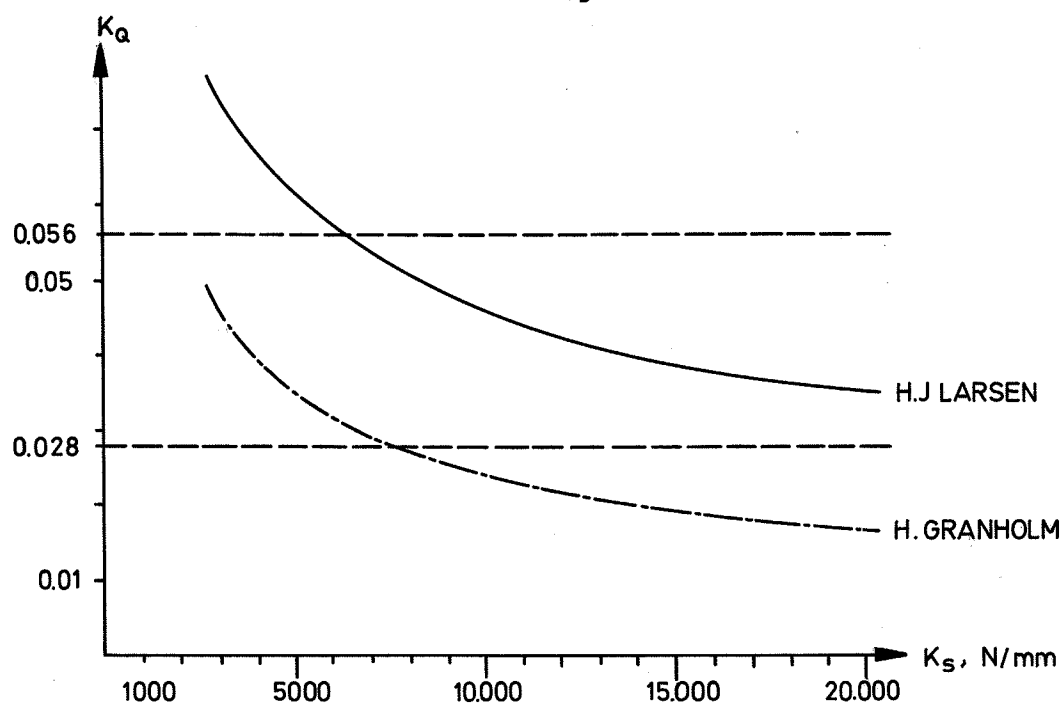


FIG. 10

FIGUR 10: k_Q som funktion af k_s for $E = 15.400 \text{ MPa}$.

Rent tryk

Skønnes $P_{E, \text{forsøg}} \sim 180 \text{ kN}$ og $E = 15.400 \text{ MPa}$.

Anvendes den H.J. Larsens beregningsmetode findes

$$\begin{aligned} Q &\geq 0,035 \cdot 180 \text{ kN} = 6,3 \text{ kN} && \Rightarrow \\ k_s &\sim 3.000 \text{ N/mm} && (\text{jævnfør forsøg i [1]}) \Rightarrow \\ I_E &= 2,94 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 && (\text{enkeltsøjle}) \Rightarrow \\ P_E &= 80,7 \text{ kN} && (\text{dobbeltsøjle}) \\ (P_E = 180 \text{ kN svarer til } k_s &\sim 10.000 \text{ N/mm}). \end{aligned}$$

Anvendes H. Granholms beregningsmetode findes

$$\begin{aligned} &\text{Forsøg i [1] angiver at for} \\ &5,0 \text{ kN} \leq Q \leq 10,0 \text{ kN er } k_s \sim 3.000 \text{ N/mm} \\ &\text{Indsættes } P = P_{E, \text{forsøg}} = 180 \text{ kN i formel 6.1} \\ &\text{findes } 0,028 \leq k_Q \leq 0,056 \\ &\text{svarende til } k_s \leq 7.000 \text{ N/mm} \\ &\text{Sættes derfor } k_s = 3.000 \text{ N/mm} && \Rightarrow \\ &P_E = 177 \text{ kN} && (\text{dobbeltsøjle}) \end{aligned}$$

På denne baggrund skønnes H. Granholms beregningsmetode (formel 4.1) at være den bedste metode til bestemmelse af den kritiske søjlelast ved rent tryk-påvirkede søjler.

Sættes $E = 10.000 \text{ MPa}$ vil samme forhold gøre sig gældende (H. Granholm $P_E = 155 \text{ kN}$, $k_s = 3.000 \text{ N/mm}$ og $P_E = 252 \text{ kN}$, $k_s = 6.500 \text{ N/mm}$).

Kombineret tryk og bøjning

Betragtes styrkefunktionen bestemt ved formel 1.7

$$F(P_E, P_M) = \frac{P}{P_E} + \frac{M_0}{M_{UR}} \cdot \frac{P_M}{P_M - P} \quad (6.2)$$

hvor: M_{UR} = momentbæreevnen

P_E = den kritiske søjlelast ved rent tryk

P_M = den kritiske søjlelast til bestemmelse af momentforøgelsen

Momentbæreevnen skønnes ved hjælp af bjælkeforsøg, udført med bjælker med konstruktionsgeometri, svarende til de anvendte søjler, se [1].

$$M_{UR} \sim 13,0 \text{ kNm}$$

Endvidere skønnes $k_s = 3.000 \text{ N/mm}$.

Styrkefunktionen bestemmes for forskellige beregningsmetoder, svarende til de to forsøgsresultater.

Metode	P_E , kN	P_M , kN	$F(P_E, P_M)$
H.J. Larsen (2.1)	80,7	80,7	1,28 1,02
H. Granholm (4.1)	177	177	0,50 0,50
H. Granholm (4.1)	177		0,52
P_{EM} (5.4)		142	0,52
H. Granholm (4.1)	177	142	0,62
Red. P_E (5.6)		163,5	0,59

TABEL 2.1: Styrkefunktionen for $E = 15.400 \text{ MPa}$.

Da styrkefunktionen - bestemt på grundlag af H. Granholms metode og kombinationer med denne - giver konstante værdier, kan det tyde på, at disse metoder giver den mest eksakte beregning. Det må dog bemærkes, at for brud i søjlen bør styrkefunktionen have værdien 1.

Styrkefunktionen alene vil dog ikke alene udtrykke konstruktionens bæreevne, idet det også bør undersøges, om samlingerne har den fornødne styrke.

Metode	P_E , kN	P_M , kN	$F(P_E, P_M)$
H.J. Larsen (2.1)	69	69	3,62 1,28
H. Granholm (4.1)	155	155	0,57 0,55
H. Granholm (4.1)	155		0,59
P_{EM} (5.4)		130	0,57
H. Granholm (4.1)	155		0,57
Red. P_E (5.6)		157	0,55

TABEL 2.2.: Styrkefunktionen for $E = 10.000$ MPa.

En teoretisk bestemmelse af brudbelastningen for kombineret tryk og bøjning kompliceres af de styrkebestemmende parameters indbyrdes afhængighed.

Idet samlingernes forskydningsstivhed vil være en funktion af momentet (inklusive tværlasten i disse, hidhørende fra normallasten), vil en aftagende forskydningsstivhed medføre en øget udbøjning og dermed et øget momentbidrag fra normallasten, som igen medfører et fald i forskydningsstivheden.

Med andre ord: En øgning af momentet vil medføre et fald i den kritiske søjlestyrke, samt en øget momentpåvirkning fra normallasten.

Generelt

Da det har været nødvendigt at skønne de indgående materialeparametre (E , k_s og M_{UR}) på et lille for-

søgsgrundlag, samt at der kun blev udført 4 søjle-forsøg, kan der ikke konkluderes noget med sikkerhed, der kan kun gives tendenser for konstruktionens adfærd.

De anførte hypoteser kan derfor heller ikke afvises af disse forsøg.

Det skønnes herunder, at H. Granholm giver den mest eksakte beregningsmetode, samt at H.J. Larsens beregningsmetode (som er simplere at anvende) vil være på den sikre side at anvende.

7.0 PARABELBUER

Med henblik på at undersøge konstruktionsformens (4-lamelstværnsnit) anvendelighed i bue- eller skal-konstruktioner, beregnes en parabelbues maksimale spænd ved hjælp af de tidligere angivne beregningsmetoder (se kapitel 7.2).

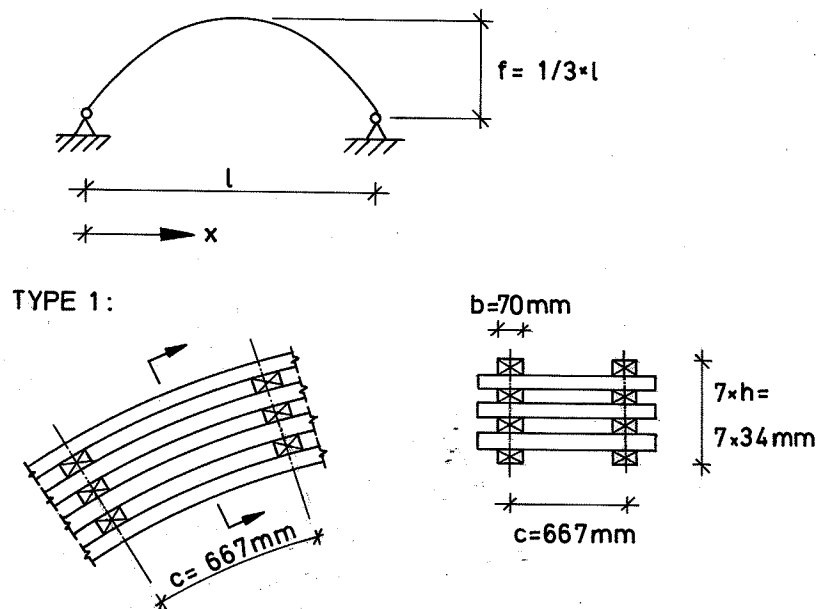


FIG.11

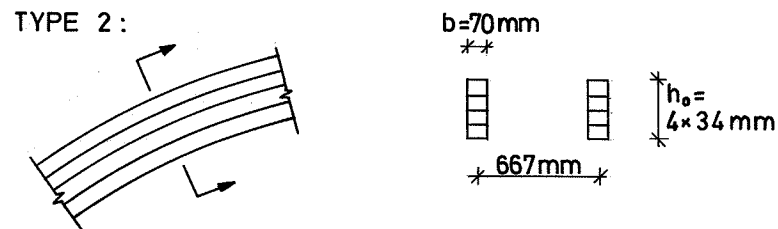


FIG.12

Til sammenligning beregnes endvidere en limtræsbue med samme materialeforbrug som kroppen i 4-lamelsbue (se figur 11 og 12).

7.1 Snitkræfter og belastninger

SNITKRÆFTER OG BELASTNINGER

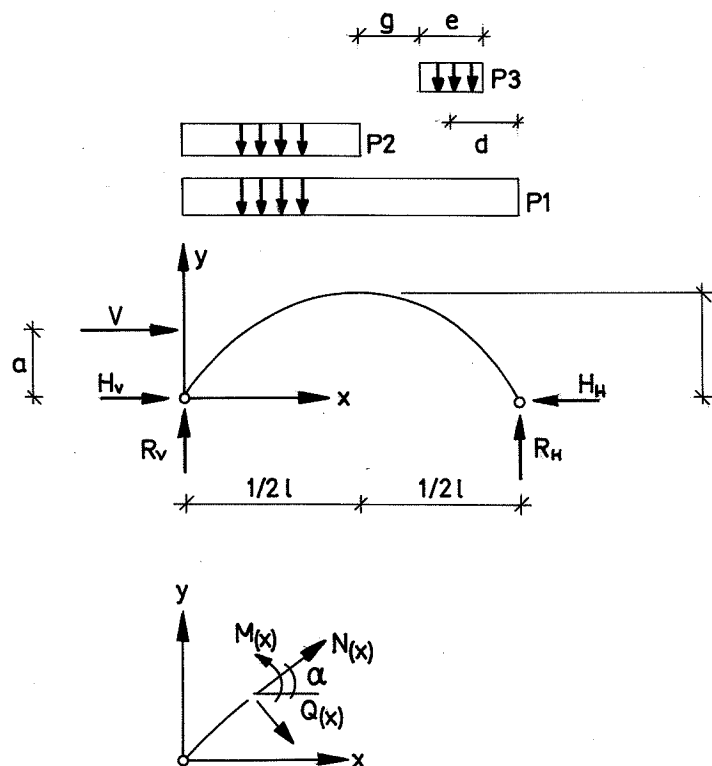


FIG.13

Konstruktionssystemlinje er en parabelkurve

$$y = \frac{4f}{\ell} x (\ell - x)$$

For p_1 alene findes

$$R_V = R_H = \frac{1}{2} p_1 \ell$$

$$H_V = H_H = \frac{1}{8} \frac{\ell^2}{f} p_1$$

$$N(x) = -\frac{1}{8} \frac{p_1}{f} \cdot \sqrt{\ell^4 + 16 f^2 (\ell - 2x)^2}$$

$$N_{\max} = N(0) = -\frac{1}{8} \frac{\ell}{f} \cdot p_1 \sqrt{\ell^2 + 16 f^2}$$

$$N(x=\ell/6) = -\frac{1}{8} \frac{\ell}{f} \cdot p_1 \sqrt{\ell^2 + \frac{64}{9} f^2}$$

$$M(x) = 0$$

For p_2 alene findes

$$R_V = \frac{3}{8} p_2 \ell, \quad R_H = \frac{1}{8} p_2 \ell$$

$$H_V = H_H = \frac{1}{16} \frac{\ell^2}{f} p_2$$

$$N(x) = \frac{p_2}{4\sqrt{\ell^4 + 16 f (\ell - 2x)^2}} \left[-32 f x^2 + 28 \ell f x - 6 \ell^2 f - \frac{1}{4} \frac{\ell^4}{f} \right]$$

$$\text{For } x \leq \frac{1}{2} \ell$$

$$N_{\max} \approx \frac{1}{16} \frac{\ell^2}{f} (0,44 \frac{f^2}{\ell^2} - 1) p_2, \text{ på den sikre side.}$$

$$M(x) = \begin{cases} -\frac{1}{8} p (2 x^2 - \ell x), & x \leq \frac{1}{2} \ell \\ -\frac{1}{8} p (2 x^2 - 3 \ell x + \ell^2), & x > \frac{1}{2} \ell \end{cases}$$

$$M_{\max} = \pm \frac{1}{64} p \ell^2, \text{ for } x = \frac{1}{4} \ell, \quad x = \frac{3}{4} \ell$$

For p_3 alene findes

$$R_V = (e - \frac{ed}{\ell}) p_3$$

$$R_H = \frac{ed}{\ell} p_3$$

$$H = \frac{5}{32} \frac{P_3}{f \frac{\ell}{2}} K$$

hvor

$$K = g^3 + \frac{5}{2} e \left(\frac{\ell}{2}\right)^2 + \frac{1}{10 \left(\frac{\ell}{2}\right)^2} ((e+g)^5 - g^5) - (e+g)^2 (e+7g)$$

Herefter bestemmes $N(x)$ og $M(x)$ simplest ved de 3 projektions- og momentligninger.

For V alene

$$R_V = -R_H = -\frac{a}{\ell} V$$

Indføres funktionen

$$F(a, f) = \frac{1}{60} \left[4f + \left(3a - 4f + \frac{a^2}{f} \right) \sqrt{1 - \frac{a}{f}} \right]$$

$$H_V = \frac{15}{2} \frac{1}{f} V \cdot F(a, f)$$

$$H_H = \left[1 - \frac{15}{2} \frac{1}{f} F(a, f) \right] V$$

Indføres endvidere (jævnfør figur 13)

$$\cos \alpha = \frac{\ell^2}{\sqrt{\ell^4 + 16 f^2 (\ell - 2x)^2}}$$

$$\sin \alpha = \frac{4 f (\ell - 2x)}{\sqrt{\ell^4 + 16 f^2 (\ell - 2x)^2}}$$

$$N(x) = \frac{a}{\ell} V \sin \alpha - H_V \cos \alpha, \quad y \leq a$$

$$Q(x) = -\frac{a}{\ell} \cos \alpha - H_V \sin \alpha, \quad y \leq a$$

$$M(x) = -H_V y - \frac{a}{\ell} V x, \quad y \leq a$$

$$N(x) = -\frac{a}{\ell} V \sin \alpha - H_H \cos \alpha, \quad y > a$$

$$Q(x) = -\frac{a}{\ell} V \cos \alpha + H_H \sin \alpha, \quad y > a$$

$$M(x) = V a - H_H y - \frac{a}{\ell} V x, \quad y > a$$

Regningsmæssige belastninger

Maksimal spænd bestemmes for fire lasttilfælde. Buen antages at modtage belastning fra en bredde på

$$2 \cdot 0,667 \text{ m} \approx 1,33 \text{ m}$$

Egenvægt : Regnes tilnærmet som en last svarende til

P_1 :

$$g = 1,33 \text{ m} \cdot 0,46 \text{ kN/m}^2 = 0,61 \text{ kN/m}$$

Snelast : Der regnes med en halv meter sne ved horizontal projektion:

$$s = 1,33 \cdot \text{m} \cdot 0,75 \text{ kN/m}^2 = 1,00 \text{ kN/m}$$

Vindlast : Hastighedstryk: $q = 0,65 \text{ kN/m}^2$

Formfaktoren bestemmes jævnfør DS 410.2, 2. udgave A.7.10 svarende til cylindertage.

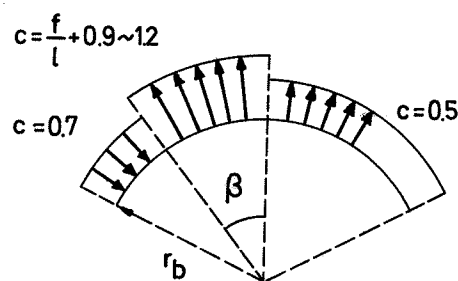


FIG. 14

FIGUR 14: Formfaktor, $\tan \beta = 0,8$.

Parabelbuen tilpasses cirkelbuen, så disse er fællespunkter i fodpunkter og toppunkt, hvorved der findes

$$r_b = \frac{1}{8} \frac{l^2}{f} + \frac{1}{2} f$$

Lasten omformes til linielaster og vandrette enkeltkræfter, jævnfør figur 15.

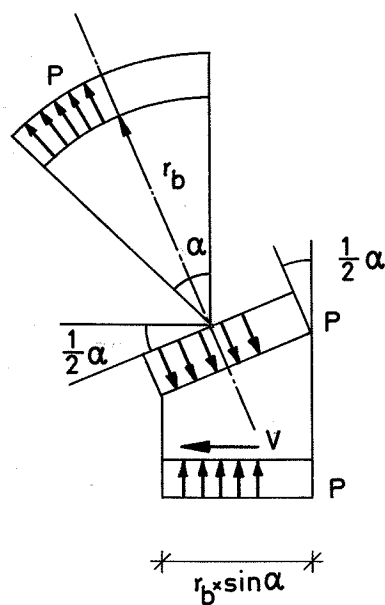


FIG.15

Ved ligevægt findes

$$V = p \cdot r_b \cdot \sin \alpha \cdot \tan \frac{1}{2} \alpha$$

Ved hjælp af de angivne beregningsmetoder bestemmes der de farligste snitkræfter i følgende lasttilfælde

LAST 1 : Egenvægt: $p_1 = 0,61 \text{ kN/m}$

Belastningen optages som rent tryk.

LAST 2 : Egenvægt + $1,5 \cdot \text{sne}$: $p_1 = 2,11 \text{ kN/m}$

Belastningen optages som rent tryk.

LAST 3 : Egenvægt + $1,5 \text{ sne}$ ($\frac{1}{2}$ bunden, $\frac{1}{2}$ fri)

$p_1 = 1,36 \text{ kN/m}$, $p_2 = 0,75 \text{ kN/m}$

Belastningen optages ved kombineret tryk og bøjning.

LAST 4 : Egenvægt + $1,5 \cdot \text{vind}$

$p_1 = 0,61 \text{ kN/m}$

$1,5 v = 1,30 \text{ kN/mc}$, fordeles jævnt over figur 14 og 15.

Belastningen optages ved kombineret tryk/træk og bøjning.

7.2 Dimensioneringsmetode

For kombineret tryk og bøjning dimensioneres buerne efter princip som formel 6.2

$$\frac{|N(x)|}{P_E} + \frac{|M(x)|}{M_{UR}} \cdot \frac{P_E}{P_E - |N(x)|} \leq 1 \quad (7.1)$$

Idet P_E bestemmes ved hjælp af H. Granholms metode, formel (4.1).

Den frie søjlelængde for to charnieres-buer bestemmes jævnfør [6], hvorved den kritiske søjlelast udtrykkes ved

$$P_E = \left(\frac{\pi^2}{s^2} - \frac{1}{r^2} \right) E I_E \quad (7.2)$$

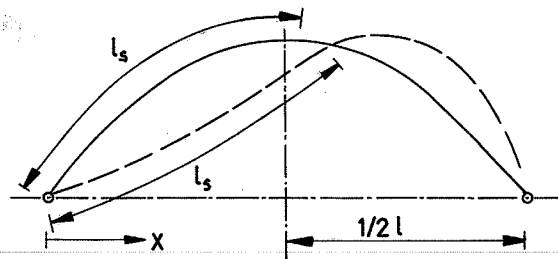
hvor

s : er den halve buelængde, se figur 13

$$s = \frac{1}{4} \ell \left\{ \sqrt{1 + 16 \left(\frac{f}{\ell} \right)^2} + \frac{1}{4} \frac{\ell}{f} \ln \left[4 \frac{f}{\ell} + \sqrt{1 + 16 \left(\frac{f}{\ell} \right)^2} \right] \right\}$$

r : er krumningsradius til 1/4 dels punktet

$$r = \frac{\ell^2}{8f} \left[1 + 4 \left(\frac{f}{\ell} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$



STABILITETSBRUD I BUE

FIG. 16

Ved last 1 og 2, hvor belastningen giver anledning til rent tryk, er der dimensioneret for normaltrykket bestemt for $x = l/6$. Normaltrykket er maksimalt ved fodpunktet ($x=0$), men her er der ingen søjlevirkning. Ved last 3 og 4 er der dimensioneret for den farligste kombination af $N(x)$ og $M(x)$.

Materialeparametre (se i øvrigt DS 413 [7])

Tværsnit type 1:

Der anvendes regningsmæssige styrker overalt. Der anvendes 3 forskellige sæt materialeparametre.

- 1.A $E = 2.000 \text{ MPa}$ (svarende til U.K.)
 $k_s/E = 1,5 \text{ mm}$ (svarende til langvarig last,
 jvnf. H.J. Larsen)
- 1.B $E = 2.000 \text{ MPa}$ (svarende til U.K.)
 $k_s/E = 3,5 \text{ mm}$ (svarende til kortvarig last,
 jvnf. H.J. Larsen)
- 1.C $E = 3.500 \text{ MPa}$ (svarende til T300)
 $k_s/E = 3,0 \text{ mm}$

Det skønnes, at selv om der anvendes U.K. (Uklassificeret Konstruktionstræ), vil det ikke være urimeligt at anvende et "styrkeberegnings"-E-modul, svarende til T300, da buen - jævnfør tværsnitsudformningen - vil være langt mindre deformet end ved U.K.

Valg af k_s/E vil derimod være mere diskutabelt; thi dersom belastningen optages som rent tryk, vil samlingerne kun blive belastet i ringe grad, hvilket kan begrunde et valg af stort k_s/E forhold; derimod kan vi grundet konstruktionsformen (tværsnitsudformningen) ikke forvente, at alle mellemlæg er fuldt indpressede, hvilket vil begrunde et valg af lille k_s/E forhold.

Generelt anvendes

$$s_0 = 4,0 \text{ MPa (trækstyrken)}$$

$$M_{UR} = 4,74 \text{ kNm, svarende til ca. } \frac{1}{3} \text{ af brudmomentet, bestemt ved forsøg (se kap. 6.2).}$$

Dette er på den sikre side, idet - jævnfør DS 413 -
(regningsmæssig styrke) $= \frac{0,6}{1,3}$ (karakteristisk styrke)

Ved last 4 multipliceres styrkerne med 1,4.

Tværsnit_type_2

Der anvendes styrker svarende til T300 limtræ (standardbuer leveres som T300 fra fabrik)

$$E = 4.500 \text{ MPa}$$

$$s_0 = 16,0 \text{ MPa}$$

$$s_m = 19,0 \text{ MPa (bøjningsstyrken)}$$

I rapporten side 75 er det regningsmæssige maksimale spænd for dobbeltparabelbuen (se rapport, figur 40) bestemt for de forskellige lasttilfælde ved de forskellige tværsnitstyper.

LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] Helle Søreberg og Finn Olaf Sørensen:
Fra sammensatte træbjælker til Risteværker,
Eksamensprojekt ved Instituttet for Husbygning,
Danmarks tekniske Højskole, 1980.
- [2] H.J. Larsen:
Beregning af trækonstruktioner - Teori.
Teknisk Forlag, København 1967.
- [3] CIB:
Structural Timber Design Code,
Working Group W18 Timber Structures,
Third Draft, September 1978.
- [4] H. Granholm:
Sandöbrons Bågställing,
Chalmars tekniska Högskolas Handlinger,
nr. 239, 1961.
- [5] Helle Søreberg og Finn Olaf Sørensen:
Risteværkskonstruktioner, opbygget af
sammensatte Træbjælker.
Instituttet for Husbygning,
Danmarks tekniske Højskole, 1982.
- [6] Anker Engelund:
Brobygning, bd. I,
Gjellerup, København 1934.
- [7] DS 413:
Dansk Ingeniørforenings norm for Trækonstruktioner,
3. udgave, december 1974.