

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **136**

SIGURD ANDERSEN

ISOSTATDÆK

KONSTRUKTION - MATERIALER - ENERGI

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1980

FORORD

Denne rapport udgør en del af et licentiatarbejde udført ved Instituttet for Husbygning, DTH, og må ses i sammenhæng med hovedrapporten "Det akkumulerede energiforbrug til fremstilling af boliger", rapport-nummer 137, og rapport-nummer 134 "Det akkumulerede energiforbrug til fremstilling af byggematerialer".

Da nærværende rapport indgår som et led i hovedrapportens emnevalg, har det været naturligt at benytte afsnitsnummereringen fra hovedrapporten også her.

Ligeledes er litteraturlisten også i denne rapport anbragt efter hvert større afsnit.

Til sidst vil jeg gerne udtrykke min taknemmelighed for hjælp og kritisk rådgivning til følgende af instituttets ansatte:

lektor, arkitekt m.a.a. Frits Gravesen

lektor, civilingeniør Torben Jakobsen

og især til

lektor, civilingeniør Erik Reitzel

som praktisk faglærer

samt

professor, arkitekt m.a.a. Knud Peter Harboe

som ansvarlig faglærer.

Sigurd Andersen, april 1980

RESUME

Den foreliggende rapport sigter på at finde nogle praktisk mulige veje til energibesparelser i forbindelse med opførelse og produktion af etageboliger.

Analysen støtter sig til udvalgte konstruktionssystemer, der skal repræsentere forskellige grader af konstruktionsminimering. Energibesparelserne er opnået gennem besparelser i materialer til det bærende system ved samtidigt at tage hensyn til konsekvenserne for opfyldelse af de vigtigste bygningsfunktionskrav.

Som et konstruktionsalternativ er isostatplader analyseret og behandlet m.h.t. beregningsmetode, historie og funktionskrav.

Denne analyse - kapitel 7.1 - kan læses løsrevet fra resten af rapporten, idet den indholdsmæssigt udskiller sig fra resten af rapporten, men dog er nødvendig for forståelsen af de sidste kapitler.

Der gengives i rapporten resultater af ressourceberegning på en modelbygning, som viser ressourceforbrugets afhængighed af konstruktionsfaktorer som: konstruktionssystem, spændvidde, konstruktionsmetode og varmeakkumuleringsevne.

SUMMARY

The aim of this report is to find some practically possible ways to energy savings in connection with erection and production of storeyed buildings.

The analysis is concentrated on selected structure systems representing various degrees of structure minimizing. The energy savings are achieved through savings of material for the load bearing system regarding the most important performances for the use and safety of the building.

As a structural alternative isostatic plates have been analyzed regarding calculation method, history and performance.

This analysis - chapter 7.2 - can be read individually because the contents separate from the rest of the report. However, it is a necessary part for the understanding of the last chapters.

The final part of the report deals with the results of calculations of energy consumption on a model of a building showing the dependency on the energy consumption of factors such as: Structure system, span, construction method, and heat accumulating ability.

	Forord	
	Resumé	
	Indholdsfortegnelse	
7.0	UNDERSØGELSENS MÅL OG ARBEJDSOMRÅDE	1
7.1	ISOSTATDÆK I JERNBETON	3
7.1.0	Isostater	3
7.1.1	Isostatplader i Nervi's konstruktioner	4
7.1.2	Materialebesparelser og isostatdæk	7
7.1.3	Teorien for isostater	11
7.1.4	Visualisering af hovedmomenter	16
7.1.5	Beregning og dimensionering af isostatdæk	27
7.1.6	Sammenfatning	34
7.2	ISOSTATDÆK OG ENERGIBESPARELSER	37
7.2.0	Valg af bærende hovedsystem	37
7.2.1	Ressourcebesparelser og konstruktionsminimering	41
7.2.2	Modelhuset	42
7.2.3	Ressourceforbrug og spændvidde	44
7.2.4	Beregninger af ressourceforbrug for modelhuset	50
7.2.5	Indflydelse på driftsenergiforbruget	55
7.3	KONSTRUKTIONSMINIMERING OG FUNKTIONSKRAV	62
7.3.0	Om konstruktionsminimering og brandsikkerhed	62
7.3.1	Om konstruktionsminimering og lydtransmission	62
7.3.2	Om konstruktionsminimering og opførelse	70
7.3.3	Om konstruktionsminimering og installationsføring	73
7.3.4	Om konstruktionsminimering og planløsning	76
7.3.5	Sammenfatning	78
7.4	KONKLUSION	83

Litteraturlister er anbragt efter hvert hovedafsnit, d.v.s. side 2, 35, 61 og 81.

7.0 UNDERSØGELSENS MÅL OG ARBEJDSOMRÅDE

Målet med denne undersøgelse er, at eftervise energibesparelsesmuligheder gennem materialebesparelser ved fremstillingen af boligen. Dette gennemføres alene for konstruktioner, der egner sig til fleretagesbyggeri, men til gengæld søges alle relevante parametre tilgodeset i forudsætningerne for undersøgelsen.

Netop den omstændighed, at bygningerne skal kunne benyttes til boliger lægger nok den største binding på udformningen af det bærende system og dermed muligheden for ressourcebesparelser.

Når der derfor i det følgende skal sammenlignes muligheder for ressourcebesparelser vælges det, at gøre det inden for traditionelle rammer for boligformer, d.v.s. boliger med rektangulære rum og konstant etagehøjde.

Af afsnittet i hovedrapporten [80.0] om geometrisk optimering af bygningernes overordnede struktur, ses det, at en optimal udformning af boligenheden er større boligblokke med 4-8 etager ud fra en energimæssig synsvinkel. Der vælges derfor til de senere beregninger en modelbygning i 6 etager med 9 m husdybde og 36 m længde, altså en standardboligblok. Selve modelbygningen er beskrevet i detaljer på side 42.

Undersøgelsen vil koncentrere sig om mulige bærende systemer til denne modelbygning, og de konsekvenser disse vil få for energiforbruget til opførelse og drift af modelbygningen.

Analogt til begrænsningerne m.h.t. boligform må andre funktionsmæssige og sikkerhedsmæssige aspekter inddrages i betragtningen for at de eventuelt efterviste besparelsesmuligheder kan sikres en rimelig realistisk baggrund.

Nogle af de vigtigste bygningsmæssige funktionskrav vil derfor blive inddraget.

I [80.0] analyseres energiforbruget til fremstilling af bygninger og dets afhængighed af materialevalget. Da undersøgelsen her er tænkt som supplement til de øvrige undersøgelser i [80.0], indskrænkes materialevalget, hvorimod konstruktionssystemerne varieres. Der vælges kun at behandle konstruktionssystemer af jernbeton og stål.

[80.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL
FREMSTILLING AF BOLIGER"
Rapport nr. 137,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.

7.1 ISOSTATDÆK I JERNBETON

7.1.0 Isostater

Dette afsnit er reelt set en selvstændig analyse af et bærende element, men får meget større aktualitet når den ses i sammenhæng med resten af denne rapport. Derfor er analysen føjet ind i rapporten, og det vedlagte appendix må da ses som appendix alene til dette afsnit 7.2.

Med isostatdæk menes i det følgende krydsribbedæk, hvor ribberne følger den tilsvarende isotrope plades isostater*

Sådanne plader er svære at beregne rent umiddelbart og vil i de fleste tilfælde være vanskelige at fremstille, især p.g.a. ribbernes buede forløb. Der skal peges på, at der med isostatdækkene kan opnås kvaliteter, der i specielle tilfælde kan veje tungere end den fordyrelse, der opstår med hensyn til produktionen.

De specielle tilfælde, der her tænkes på, er f.eks. en arkitekts eller en ingeniørs ønske om at afspejle kræfternes forløb i konstruktionens udformning, ønsket om materialebesparelser fremfor en arbejds-kraftsbesparelse (U-lande) eller ønsket om lette konstruktioner.

Den materiale- og vægtbesparende effekt optræder ved ribbekonstruktioner først tydeligt fra en vis spændvidde. Dette er især udpræget for betonkonstruktioner og skyldes de minimumskrav, der sættes til ribbetykkelser, pladetykkelse m.m.

Endvidere er krydsribbeløsningen kun aktuel, hvor forskellen mellem pladebredde og pladelængde ikke er for stor, $b/l \leq 1,5$.

I det følgende beskrives alene det tilfælde, hvor $b/l = 1$, men det påpeges, at plader med andre b/l -forhold kan beregnes og beskrives på samme måde.

*) isostaterne er hovedmomenttrajektorierne, d.v.s linier, der i hvert punkt følger hovedsnitretningerne for plademomenterne.

7.1.1 Isostatplader i Nervi's konstruktioner

Som tidligere nævnt bragte den italienske ingeniør Pier Luigi Nervi*, som den første isostatdækkene på bane. Hans mål var at lade kraftforløbet i pladen være bestemmende for formen. Inspireret af den sen-gotiske bygningskunst, som den f.eks. kommer til udtryk i hvælvene i King's College Chapel i Cambridge (1441), prøvede Nervi at opnå lignende arkitektoniske effekter. Ved dels at udnytte T-tværsnittets optimale form, kombineret med jernbetonens formbarhed, og dels teorien for momenternes fordeling over pladen, nåede han frem til isostatpladen.

I sin mest rendyrkede form findes den i den bærende konstruktion i Gatti-uld-fabrikkerne i Rom, 1953 (se figur 7.1.0.1). En sammenligning af ribbeforløbet med plottet af hovedmomenterne viser, hvor fint Nervi har kunnet beregne isostaterne allerede i 1953 uden hjælp af EDB.

I en senere bygning - Palazzo del Lavarro, Torino, 1961 - benyttede Nervi igen isostatplader, nemlig som dækplader i mezzaninen, som omkranser salen. Nervi's teori - at sikre en bygnings æstetiske værdi ved at udføre konstruktionerne statisk korrekt, teknisk perfekt og med fornuftig økonomi - er i denne mezzanin ikke blevet dyrket i så høj grad, som i f.eks. Gatti-uld-fabrikken.

I figur 7.1.1.2 er ribbeforløbet i de anvendte dæk vist sammen med det virkelige forløb af isostaterne. Endnu større afvigelser opnås, hvor pladerne afskæres ved trapperne og i støbeskellene, der ikke kan

*) Nervi, italiensk ingeniør, 1913-1979, kendt for mange arkitektoniske mesterværker, hvis værdi især ligger i formgivningen af de bærende konstruktioner.

sikre den kontinuitet i pladen, som Nervi har forudsat for isostaternes forløb.

Dette må ses på baggrund af, at selve opførelsen af bygningen var tidsbegrænset til 10 måneder, og at langt den største arbejdsindsats måtte lægges i det bærende hovedsystem, som for Nervi var en nyudvikling.

Han skriver da også selv i sin kommentar til byggeriet: - "For the mezzanine floor a system was adopted. This permitted not only the placement of ribs where they were aesthetically pleasing, but also the completion of the floors on schedule", [65.0].

En lignende baggrund har der været for formgivningen af etageadskillelserne i et stort lagerhus i Bologna, 1948. Ønsket var først og fremmest at udvikle en på den tid mere økonomisk metode til opførelse af jernbetondæk.

På grund af pladernes ikke-kvadratiske form og de kraftige randbjælker i langsgående retning vil isostaterne midt i feltet netop være orienteret mere parallelt til randbjælkerne end normalt.

Har Nervi imidlertid været klar over, at isostaterne netop kan konvergere mod det retlinede system ved visse værdier af randbjælkestivheder? (se afsnit 7.1.4 under "beregnete momentfordelinger"). Desværre kan man af det materiale, der er om Tobakslagerbygningen ikke bestemme noget nøjagtigt stivhedsforhold. Nervi nævner heller ikke noget i sine kommentarer om isostaterne i disse dæk, men han har sikkert haft en fornemmelse for ribbernes korrekte forløb allerede dengang.

De eksempler, der i litteraturen er draget frem, viser, at Nervi har arbejdet med spændvidder på sine krydsribbekonstruktioner lige fra 6-12 m.

1948	Tobakslagerbygning	12 m spænd
1953	G.A.T.T.I. uldfabrikken	6 m spænd
1961	Palazzo del Lavarro	10 m spænd

Optimering af økonomien i konstruktion og opførelse var en af Nervi's ledende tanker: - "The relationship between the economics of architecture and its aesthetic expression is more difficult to define, but in my opinion its existence is confirmed by countless observations.

A functional structure and economic efficiency (extremely different from just simply "economy") are the result of proper proportioning of the sizes and relationships of spaces, the richness of ornamentation, and the preciousness of the materials with respect to the purpose for which the building will be used".

Med økonomisk effektivitet mener Nervi ikke den begrænsede betydning, som ordet har i dag, men måske snarere en samlet økonomi - ressourceøkonomi, byggeøkonomi, vedligeholdelsesøkonomi - på basis af en lang levetid for konstruktionen, ikke mindst på grund af konstruktionernes arkitektoniske værdi.

Nervi's konstruktioner og tanker er derfor af stor betydning for os i dag, hvor nødvendigheden af nye tankemåder med hensyn til bygningsøkonomien viser sig.

7.1.2 Materialebesparelser og isostatdæk

Krydsribbeplader beregnes næsten altid med den tilnærmelse, at pladen ingen vridningsstivhed har. Dette er både grundlaget for Hillerborgs strimmelmetode [59.1], og for den tillempede brudliniemetode, som er beskrevet i [75.0].

Ved at lade ribberne følge isostaterne, lader man dem også følge de retninger, hvor der intet vridningsmoment optræder.

Muligheden for at opnå materialebesparelser og dermed energibesparelser ved at anvende isostatdæk i stedet for almindelige krydsribbedæk kommenteres første gang af Reitzel i [76.1]. Her påpeges, at hvis man ønsker materialebesparende konstruktioner inden for det præfabrikerede byggeri, vil man med fordel kunne tage udgangspunkt i isostatdæk.

E. Reitzel [75.3] har påvist, at for "minimumskonstruktioner", hvor "minimumskonstruktioner" her skal forstås som gitterkonstruktioner med minimalt materialeforbrug, gælder det, at træk- og trykstænger står vinkelret på hinanden.

I en senere uddybning [79.1] skrives om isostatdæk: "Rimeligt udført vil sådanne løsninger ofte give anledning til gode materialebesparelser. Årsagen hertil er, at materialerne placeres på de steder og efter de retninger, hvor kræfterne er størst."

Overføres dette til ribbepladerne svarer det til, at ribber med maksimalmoment står vinkelret på ribber med minimalmoment eller sagt på en anden måde:

I krydsribbepladen med det minimale materialeforbrug følger ribberne hovedmomentsnittene eller isostaterne, for den elastisk beregnede plade.

Denne tese skal ikke bevises, men sandsynliggøres gennem nogle eksempler.

I det følgende betragtes plader med arealet $\sim 5 \times 5$ m, belastet med jævnt fordelt last (egenvægt + $1,5 \cdot$ bevægelig belastning), svarende til almindelig boligforhold ($p = 1,5 \text{ kN/m}^2$). Pladerne er fremstillet af beton, $\sigma'_{bk} = 20 \text{ MPa}$, og armering, st. 42 B.

Eksempel 7.1.2.1

Med udgangspunkt i eksempel 7.1.4.1 kan der med nogle eksempler på plader vises, hvor store materialebesparelser, der kan opnås ved at anvende isostatprincippet.

Der er gennemregnet plader med spænd på 5×5 m og de er simpelt understøttede i begge retninger. De optimale armeringsforhold eller pladetykkelser er ikke beregnet, men der er regnet med krav til nedbøjninger efter de håndregler, der gives i Teknisk Ståbi, d.v.s.

- for dobbeltspændte massive plader $h \geq \frac{\ell}{40}$
- for krydsribbeplader (bjælker) $h \geq \frac{\ell}{20}$

Endvidere er der forudsat beton- og stål kvalitet som tidligere nævnt. (Se figur 9).

For energiforbruget fås for de 4 plader følgende værdier, idet energiforbrug, forbundet med selve produktionen (præfabrikation eller in-situ-støbning), foreløbig er udeladt.

Man ser, at ribbepladerne generelt giver de største besparelser i betonforbruget, mens isostatløsningerne giver yderligere besparelser i stålforbruget.

1.	Massiv plade med krydsarmeringsnet	125,0 kWh/m ²
2.	Massiv plade med isostatarmæringsnet	115,7 kWh/m ²
3.	Krydsribbedæk	93,5 kWh/m ²
4.	Isostatribbedæk	88,1 kWh/m ²

Isostatdækkene vil være mere fordelagtige, hvor understøtningerne bliver begrænset til søjler eller vægstykker. Ribbeplader generelt bliver gunstigere ved øget spændvidde, når det gælder jernbetonplader. □

Ved supplerende undersøgelser, der er gennemført i forbindelse med beregninger af energiforbruget til fremstilling af råhuse i flere etager, viste det sig desuden, at den materialebesparende effekt fulgte nogle af de tendenser, der gælder for økonomien i råhuskonstruktioner.

Det vil i korte træk sige, at isostatribbepladen for alvor kun kan "konkurrere" med massive konstruktioner og krydsribbedæk, når der opnås simple samlinger mellem plade og andre bygningsdele og et ribbeforløb, der fordeler ribberne rimeligt over hele pladefeltet.

I de tilfælde, hvor man opnår en koncentrering af ribbebundter vil meget af materialebesparelsen gå tabt i forøget armeringsforankring, og dermed også forøgede ribbebredder. Endvidere viste der sig derigennem en tendens til, at ribbepladernes fordele først kom klart frem ved spændvidder over 6-8 m.

Dette skyldes også, at ribbetværnsnittenes brudbæreevne først kan udnyttes ved spænd omkring 8-10 m, mens det er nedbøjningskrav, der dikterer tværsnittene ved mindre spændvidder.

Som det fremgår af det tidligere, er det kun belastningstilfældet - jævnt fordelt last - som er behandlet, hvilket er den dominerende last i jernbetonetageadskillelser.

Isostaternes forløb er nøje sammenkædet med belastningens fordeling. En koncentreret last vil give et helt andet forløb end vist i appendix.

En skæv lastfordeling vil også give andre isostatmønstre, men dog ikke afgørende forskellig fra dem, der gælder for jævnt fordelt last. I figur 7.1.2.1 er momentretningerne for en skævt fordelt fladelast optegnet sammen med isostaterne for den tilhørende jævnt fordelte last.

Idet man for etageadskillelser af jernbeton altid må regne med en fladelast fra egenvægten, og i brudbelastningen kan tænke sig en skæv fladelast, men sjældent koncentrerede belastninger alene, vil isostatmønstrene, svarende til den dimensionerende lastfordeling, ikke afvige væsentligt fra mønstret for en jævnt fordelt last.

Denne tese bliver mere og mere udpræget jo større egenvægten bliver i forhold til den bevægelige last, d.v.s. ved større spændvidder.

7.1.3 Teorien for isostaterne

Teorien bag isostaterne findes i elasticitetsteorien for homogene, plane legemer, som bl.a. beskrevet i [75.2] og [59.0]. Udviklingen af begreberne hovedretninger og -spændinger m.m. går helt tilbage til 1850'erne, men skyldes især Otto Mohr, der i 1881 angav grafiske metoder til bestemmelse af hovedsnittene ud fra faste ortogonale retninger.

I det følgende vil der blive brugt begreber, som bør defineres:

1. Hovedsnit (2. hovedsnit)

Det snit i et pladepunkt, hvori ligevægtsmomentet alene består af et bøjningsmoment $m_{1(2)}$. For 1. hovedsnit gælder, at det tilsvarende moment er det maksimale moment i dette punkt. For 2. hovedsnit gælder, at det tilsvarende moment er det minimale moment i det betragtede punkt, regnet med fortegn.

1. Hovedmoment (2. hovedmoment)

m_1 eller $m_{\max}$ (m_2 , $m_{\min}$) er bøjningsmomentet i 1. hovedsnit (2. hovedsnit)

1. hovedretning (2. hovedretning)

er retningen af 1. hovedsnit. (2. hovedretning) = (2. hovedsnit)

Af elasticitetsteorien udledes det, at de to hovedretninger for plademomenterne står vinkelret på hinanden. Hovedmoment som vektor og hovedsnit har samme retning. Retningen af bøjningspåvirkningen, spændingerne eller bjælkeretningen er sammenfaldende med den tilsvarende hovedretning.

Transformationsformler for ortogonale koordinatsystemer kan udledes af Mohr's cirkel for todimensionale spændinger.

For hovedmomenterne gælder følgende ligningssæt:

Transmissionsformler (formelsæt 7.1.3.1):

$$m_1 = \frac{m_x + m_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_x - m_y}{2}\right)^2 + m_{xy}^2}$$

$$m_2 = \frac{m_x + m_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{m_x - m_y}{2}\right)^2 + m_{xy}^2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 m_{xy}}{m_x - m_y}$$

Elasticitetsteorien (formelsæt 7.1.3.2):

$$m_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$m_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$m_{xy} = -D (1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Kombineret (formelsæt 7.1.3.3):

$$\left. \begin{array}{l} m_1 \\ m_2 \end{array} \right\} = \frac{1 + \nu}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \pm \frac{1 - \nu}{2} \cdot D \cdot$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}}{\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}}$$

hvor

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

og

E = elasticitetsmodul af pladematerialet

t = pladetykkelse

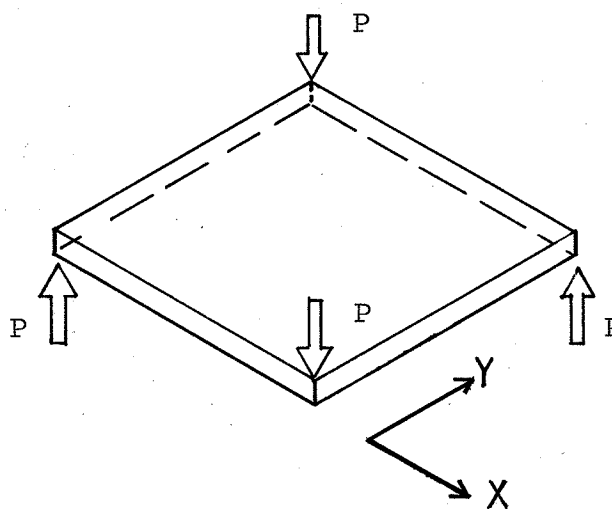
ν = Poissons forhold for pladematerialet

$w = w(x,y)$ = nedbøjningen i z -retningen

θ = vinklen mellem x -aksen og 1. hovedakse

Eksempel 7.1.3.1

Der betragtes en plade, påvirket som vist i figur 1.⁴



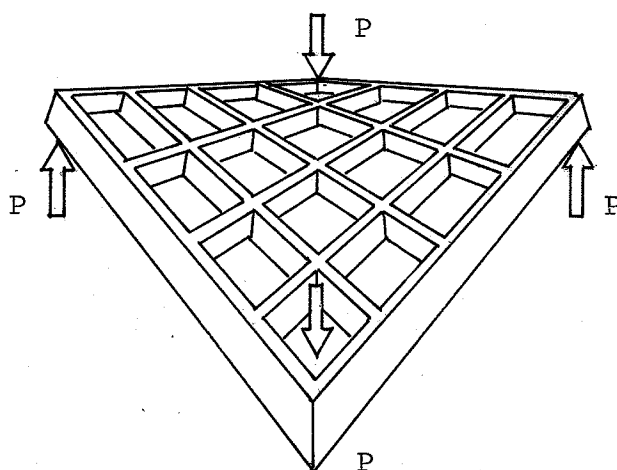
Figur 1:

Som det vises i M.P. Nielsen [75.2] er denne plade* udsat for ren vridning, idet

$$\begin{aligned} m_x &= 0 \\ m_y &= 0 \\ m_{xy} &= -\frac{1}{2} P \end{aligned}$$

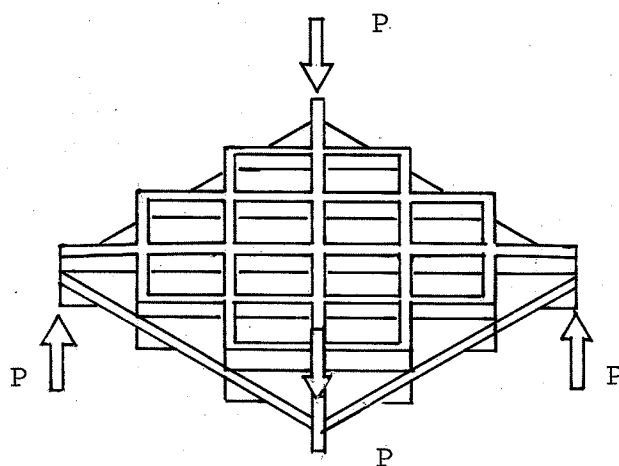
*) Vridningspladens teori er specielt behandlet allerede i 1920 i [20.0] og vridning i betonplader generelt i [57.0].

Erstattes pladen af en ribbeplade som vist i figur 2



Figur 2:

vil der være meget ringe bæreevne, idet ribbeplader meget dårligt kan optage vridningskræfter. I dette tilfælde vil man intuitivt vælge en løsning, som vist i figur 3



Figur 3:

hvor ribberne er anbragt diagonalt.

Det skal vises, at dette netop tilfredsstiller hovedsnitretningerne for plademomenterne, og at ribberne i dette tilfælde ikke bliver påvirket til vridning.

Hovedsnitretningen findes som:

$$\tan 2\theta = \frac{2m_{xy}}{m_x - m_y} \rightarrow \div \infty \Rightarrow \theta = \div 45^\circ$$

$$m_1 = \frac{m_x + m_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_x - m_y}{2}\right)^2 + m_{xy}^2} = +|m_{xy}| = \frac{P}{2}$$

$$m_2 = -|m_{xy}| = -\frac{P}{2}$$

$$m_{xy} = 0$$

Ved at erstatte den massive plade med et diagonalt krydsribbesystem ændres kraftforløbet ikke, og vi opnår en momentfordeling, hvor der kun optræder bøjning i ribberne. □

Et lignende eksempel drages netop frem i [20.0], hvor der vurderes, hvorledes armeringen i en massiv vridningsplade skal orienteres. Der konkluderes da, at en armering parallel med siderne giver en dobbelt så stor nedbøjning, som en diagonal armering for samme armeringsgrad og samme belastning.

7.1.4 Visualisering af hovedmomenter

Et problem ved mere raffinerede konstruktioner er at gøre spændingsfordelinger eller momentfordelinger overskuelige og letopfattelige.

Spændingsoptik

Et redskab, som kan bruges, er spændingsoptik. Ved spændingsoptikken benyttes en model af den betragtede konstruktionsdel, udført i et materiale, som har den egenskab, at polariseret lys, der passerer gennem det, drejes afhængigt af spændingerne i materialet og deres retninger. Et velegnet materiale er f.eks. araldit. Spændingsoptiske undersøgelser kan dog umiddelbart kun fastlægge hovedspændingsretninger og kun indirekte -størrelser.

En kortlægning af en konstruktions hovedspændingsretninger foregår da ved en række situationsbilleder, hvor der fokuseres på én bestemt retning i hvert billede.

Billedet viser da alle de punkter, der har samme hovedspændingsretning ved hjælp af mørke streger, isoklinerne (se figur 7.1.4.1). Denne metode er altså kun delvis anvendelig, men kan blive aktuel, hvor andre metoder ikke slår til.

En analyse kan da foregå ved at der fremstilles en model af det betragtede element i et spændingsoptisk materiale, og der tegnes et netværk på modellen, som viser i hvilke punkter man ønsker hovedspændingsretningerne bestemt. Ved at dreje polarisationsfiltrene kan man for hvert punkt i netværket bestemme (ved aflæsning på polarisationsfiltret) en hovedspændingsretning, idet isoklinerne da vil gå gennem det betragtede punkt.

EDB-plotning

Et andet og hurtigere redskab er de efterhånden ret udbyggede faciliteter, der eksisterer for grafisk fremstilling ved hjælp af EDB-teknik.

Den grafiske fremstilling kan både foregå ved hjælp af faste papirplottere - på NEUCC en calcompplotter - og ved hjælp af dataskærme. Grundlaget for den grafiske fremstilling er en spændings-, deformations- eller snitkraftberegning.

En sådan beregning kan både være en analytisk beregning, som f.eks. i [78.0] og eksempel 7.1.4.1 og 7.1.4.2, og en elementmetodeberegning. Analytiske beregninger er naturligvis teoretisk de mest korrekte, men det eksisterende beregningsgrundlag, d.v.s. de analytiske formeludtryk, se [59.0], er begrænset til de enkleste tilfælde med hensyn til pladegeometri og understøtningsforhold.

Finite-element-metoder* har den fordel, at de kan anvendes uden vanskeligheder på alle former for pladegeometrier, understøtningsforhold m.m., men for at kunne sikre en rimelig nøjagtighed i beregningerne må der benyttes et rimeligt stort antal elementer.

Eksempler på analytiske beregningsmetoder er vist i [78.0] og [70.0]. Selve beregningsgangen er forsøgt uddybet i eksempel 7.1.4.1 og 7.1.4.2.

Af finite-element-metoderne eksisterer der færdige programpakker, mere eller mindre udbyggede, f.eks. det tyske ASKA, det amerikanske STRUDL, det svenske SERFEM og PREFEM og mange flere.

*) Finite-element-metoden er en deformationmetodeberegning, hvor konstruktionen efter en valgt topografi deles op i et antal elementer. Hvert element påvirkes da med et sæt tvangskræfter eller -deformationer i de fælles opdelingspunkter, knudepunkterne, og ved hjælp af betingelsesligninger bestemmes disse tvangskræfters størrelse, så ligevægt er opfyldt. Heraf kan snitkræfter og spændinger i knudepunkter beregnes.

Af disse har de svenske programmer netop indbyggede plotterrutiner, der kan give de ønskede visualiseringer af hovedspændingerne, se figur 7.1.4.2, men de findes desværre endnu ikke på NEUCC.

Der er derfor benyttet STRUDL, som der er gjort flest erfaringer med på Instituttet for Husbygning. STRUDL indeholder visse plotterrutiner, men desværre endnu ikke de ønskede. Der er derfor udviklet et lille plotteprogram [79.0], som kan give det ønskede plot, og som man kan benytte i forbindelse med STRUDL-programmet på NEUCC.

Programmet tegner i hvert knudepunkt - i den i finite-element-beregningen benyttede topografi - en streg, som har samme retning, som hovedmomentet og en længde, der er proportional med momentets numeriske størrelse, altså analogt til eksempel 7.1.4.1 og 7.1.4.2.

I appendix til denne rapport er optegnet sådanne momentfordelinger for nogle af de almindeligste understøtningsforhold for kvadratiske homogene, isotrope plader.

Sammenlignes figur 7.1.4.4 med appendix, side 9 som viser henholdsvis en analytisk og en elementmetodeberegning, ses det, at der næppe er synlig forskel på de to visualiserede momentfordelinger. Udskrevet som tal vil der da også være afvigelser mindre end 2%.

I visse grænsetilfælde kan fejlene, som opstår i finite-element-metoden, blive synlige og man må da især være på vagt, hvor der optræder koncentrerede laster, punktformede understøtninger eller specielle randgeometrier.

Eksempel 7.1.4.1

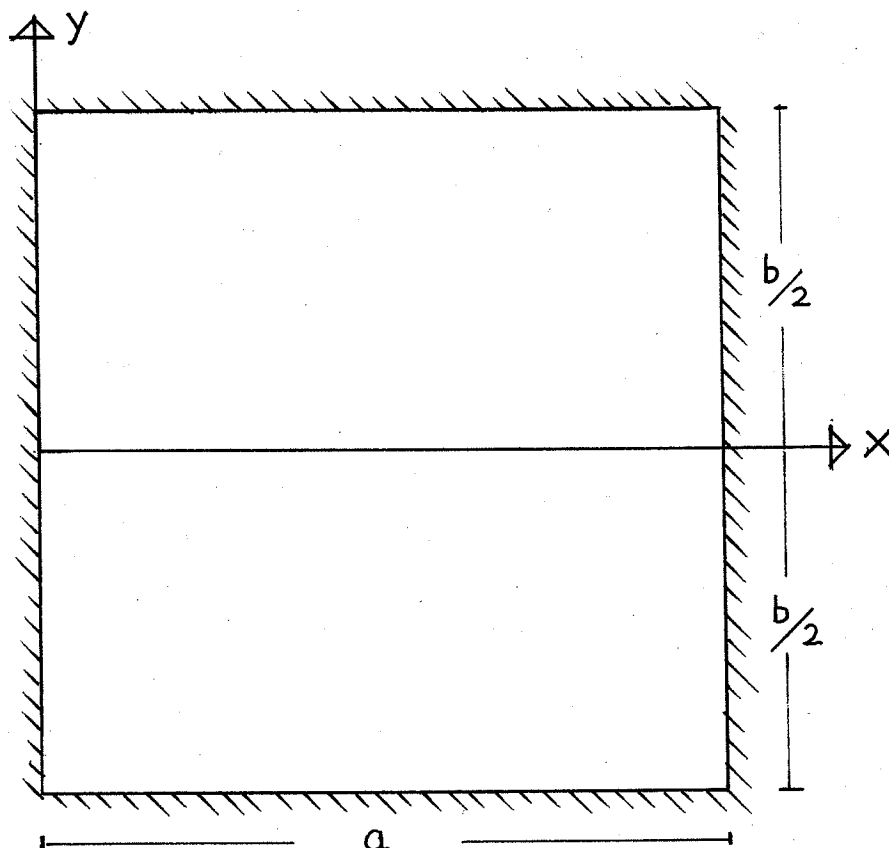
Her betragtes en simpelt understøttet plade, spændende i 2 retninger - $5 \times 5 \text{ m}$ - og belastet med en jævnt fordelt last q .

Pladen har stivheden $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$.

LEVY* påviste, at pladens udbøjningsudtryk kan skrives som

$$(1) \quad w = \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^5} \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{2\alpha_m y}{b} + \frac{\alpha_m}{2 \cosh \alpha_m} \frac{2y}{b} \sinh \frac{2\alpha_m y}{b} \right) \sin \frac{m\pi x}{a}$$

hvor a og b er sidelængder i x - og y -retning, og $\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a}$, idet x , y -koordinatsystemet er anbragt som vist herunder.



*) Se [75.2] side 35-37 og [59.0].

Fourier-udviklingen (1) kan bruges i en EDB-beregning eller til bestemmelse af maksimalmomenter ved håndregning.

Formålet er her at bestemme hovedmomentfordelingen over pladens areal. Dette er gjort ved hjælp af et EDB-program, der i 16×16 punkter på pladen udregner udtrykkene 7.1.3.3 og hovedsnittets retning (i grader) med x-aksen.

Det sidste sker ud fra formlen

$$\tan 2\theta = \frac{2 m_{xy}}{m_x - m_y} = \frac{2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}}{\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}}$$

Disse tal er derefter brugt som inddata til et plotteprogram, der i hvert af de 16×16 punkter tegner en vektor, d.v.s. en streg, der har en længde proportionalt med hovedmomentet og en retning svarende til vinklen θ med m_x .

På denne måde gøres momentfordelingen visuel. Isostaterne fremkommer ikke direkte, men kan forholdsvis nemt tegnes op udfra disse vektorer ved at følge hovedsnittenes retning.

I figur 7.1.4.4 og 7.1.4.5 er vist momentfordelingerne for $m_{\max}$ (1. hovedretning) og $m_{\min}$ (2. hovedretning) for den simpelt understøttede kvadratiske plade.

Stregerne skal forstås som momentvektorer, således at hovedsnittets normal står vinkelret på stregerne.

Eksempel 7.1.4.2

Tilsvarende rækkeudviklinger for tilfældet, hvor pladen er fuldt indspændt i alle fire sider, kan bestemmes ud fra formel (1) i eksempel 7.2.2.1, idet den simpelt understøttede plade tænkes påvirket af randmomenter.

$$(2) \quad \begin{aligned} m_{oy} &= \sum_{m=1.3.5..} (-1)^{\frac{m-1}{2}} E_m \cos \frac{m\pi x}{a} \\ m_{ox} &= \sum_{m=1.3.5..} (-1)^{\frac{m-1}{2}} F_m \cos \frac{m\pi y}{b} \end{aligned}$$

hvoraf nedbøjningerne kan bestemmes. Ved hjælp af kraftmetode-betragtninger kan betingelsesligningerne for pladedrejningen ved understøtningerne udtrykkes i to ligningssæt til bestemmelse af E_m og F_m . (Se [59.0], p. 197-202).

$$(3) \quad \left\{ \begin{aligned} & \frac{4qa^2}{\pi^3} \cdot \frac{1}{i^4} \left(\frac{\alpha_i}{\cosh^2 \alpha_i} - \tanh \alpha_i \right) \\ & + \frac{E_i}{i} \left(\tanh \alpha_i + \frac{\alpha_i}{\cosh^2 \alpha_i} \right) \\ & - \frac{8ia}{b} \sum_{m=1.3.5..}^{\infty} \frac{F_m}{m^3} \frac{1}{\left(\frac{a^2}{b^2} + \frac{i^2}{m^2} \right)^2} = 0 \\ & \frac{4qb^2}{\pi^3} \cdot \frac{1}{i^4} \left(\frac{\beta_i}{\cosh^2 \beta_i} - \tanh \beta_i \right) \\ & - \frac{F_i}{i} \left(\tanh \beta_i + \frac{\beta_i}{\cosh^2 \beta_i} \right) \\ & - \frac{8ib}{a} \sum_{m=1.3.5..}^{\infty} \frac{E_m}{m^3} \frac{1}{\left(\frac{b^2}{a^2} + \frac{i^2}{m^2} \right)^2} = 0 \end{aligned} \right.$$

hvor $\alpha_i = \frac{i\pi b}{2a}$ og $\beta_i = \frac{i\pi a}{2b}$, og a og b, som før er spændvidder i x- henholdsvis y-retningen.

Dette ligningssæt kan udtrykkes som to matrixligninger.

$$(4) \quad \begin{aligned} \underline{C}_m^1 + \underline{A}_{im}^1 \cdot \underline{E}_m + \underline{B}_{im}^1 \cdot \underline{F}_m &= 0 \\ \underline{C}_m^2 + \underline{A}_{im}^2 \cdot \underline{F}_m + \underline{B}_{im}^2 \cdot \underline{E}_m &= 0 \end{aligned}$$

Løsningen* på dette ligningssystem findes ved subtraktion, idet øverste ligning multipliceres med $\underline{B}_{im}^2 \cdot (\underline{A}_{im}^1)^{-1}$, henholdsvis nederste ligning med $\underline{B}_{im}^1 \cdot (\underline{A}_{im}^2)^{-1}$, ($\underline{A}_{im}$ er en diagonalmatrix med diagonalelementerne A_m og nul udenfor diagonalen)

$$(5) \quad \begin{aligned} \underline{E}_m &= \frac{\underline{B}_{im}^1 \cdot (\underline{A}_{im}^2)^{-1} \cdot \underline{C}_m^2 - \underline{C}_m^1}{\underline{A}_{im}^1 - \underline{B}_{im}^1 \cdot (\underline{A}_{im}^2)^{-1} \cdot \underline{B}_{im}^2} \\ \underline{F}_m &= \frac{\underline{B}_{im}^2 \cdot (\underline{A}_{im}^1)^{-1} \cdot \underline{C}_m^1 - \underline{C}_m^2}{\underline{A}_{im}^2 - \underline{B}_{im}^2 \cdot (\underline{A}_{im}^1)^{-1} \cdot \underline{B}_{im}^1} \end{aligned}$$

Løsningen på udbøjningsudtrykket fås herefter ved at addere udtrykkene for udbøjning for den simpelt understøttede plade belastet henholdsvis med jævnt fordelt last og randmoment.

I det samme koordinatsystem som i eksempel 7.1.4.1 fås

$$(6) \quad \begin{aligned} w &= \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^5} \sin \frac{m\pi x}{a} \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{m\pi y}{a} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2 \cosh \alpha_m} \frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} \right) \quad (\text{fortsættes næste side!}) \end{aligned}$$

*) I [78.0] er denne løsningsmetode angivet, så den let kan misforstås. Når et ligningssæt med matricer som koefficienter skal løses, gælder der andre regler for multiplikation end med skalarer, idet faktorernes orden da ikke er ligegyldige. Formlen for E_m i [78.0] skal derfor erstattes af udtrykket (5).

$$\begin{aligned}
& - \frac{a^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1.3.5..}^{\infty} \frac{E_m}{m \cosh \alpha_m} \sin \frac{m\pi x}{a} \left(\frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} \right. \\
& \left. - \alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi y}{a} \right) \\
& - \frac{b^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1.3.5..}^{\infty} \frac{F_m}{m \cosh \beta_m} (-1)^{\frac{m-1}{2}} \cos \frac{m\pi y}{b} * \\
& \left(\frac{m\pi x}{a} - \beta_m \right) \sinh \left(\frac{m\pi x}{a} - \beta_m \right) - \beta_m \tanh \beta_m \cosh \left(\frac{m\pi x}{a} - \beta_m \right)
\end{aligned}$$

For tilfældet jævnt fordelt last på en kvadratisk plade er momentfordelingerne for $m_{\max}$ og $m_{\min}$ optegnet analogt til eksempel 7.1.4.1 i figur 7.1.4.6 og 7.1.4.7. □

Beregnete momentfordelinger

Som grundlag for beregninger af isostatplader, det være sig ribbeplader eller massive plader med orienteret armering, er der i bilagene vist momentfordelinger efter samme princip, som i de tidligere eksempler.

Ved beregningerne er der benyttet elementmetodeprogrammet STRUDL og et plotteprogram [79.0], baseret på de FORTRAN-plotterrutiner, som findes tilgængelige på DTH-NEUCC.

I alle tilfælde er det kvadratiske plader, der er behandlet og af symmetri Grunde er der kun vist øverste venstre hjørne af pladen.

I figur 7.1.4.8 er elementopdelingen vist. Belastningstilfældene er alene jævnt fordelt last.

I plottene er der angivet dels belastningstilfældet, dels randbetingelser.

Endvidere er der angivet største positive moment og største negative moment, svarende til de længste streger i det positive momentfelt, henholdsvis det negative momentfelt. Overgangen mellem de positive momenter og de negative momenter er ikke direkte vist, men kan let aflæses af plottene, som det bælte, hvor stregerne er meget korte. I visse tilfælde kan man næsten tegne nulmomentlinien ind.

Når man skal afgøre, hvad der er positive momenter, og hvad, der er negative momenter, tager man det faktum i betragtning, at hovedmoment 1 er det maksimale moment og dermed positivt og omvendt med hensyn til hovedmoment 2.

Sammen med den almindelige fornemmelse for momentfordelingen - afhængigt af belastning og randbetingelser - skulle dette kunne give det nøjagtige overblik over momentfordelingen.

I de tilfælde, hvor pladen er understøttet på randbjælker, er der benyttet to faktorer, som fortæller noget om randbjælkens stivhed.

Timoshenko & Krieger benytter sig af en størrelse, α , defineret som forholdet mellem randbjælkens stivhed, EI , og pladens stivhed, $\alpha \cdot D$ ([59.0], side 220).

I de tilfælde, hvor pladen er indspændt i randbjælken, bliver bjælkens vridningsstivhed også af betydning. I denne rapport er der benyttet følgende faktorer:

Bjælkens stivhed om en vandret akse på tværs af bjælken:

$$\alpha = \frac{2E_{bj}I}{\ell \cdot D} \quad , \quad D = \frac{1}{12}(1 - \nu^2)^{-1} \cdot E_{p1} \cdot t^3$$

E_{bj} = Bjælkematerialets elasticitetsmodul (Pa)

I = Bjælkens inertimoment (m^4)

ℓ = Pladens spændvidde m

ν = Poissons forhold for pladen -

t = Pladens tykkelse m
 E_{pl} = Pladematerialets elasticitetsmodul (Pa)

Bjælkens vridningsstivhed:

$$\gamma = \frac{2GI_v}{l \cdot D}$$

G = Bjælkematerialets forskydningsmodul (Pa)

I_v = Bjælkens vridningsinertimoment (m⁴)

I de gennemregnede tilfælde er belastningen og spændvidden enhedsstørrelser således, at man af plottet kan aflæse plademomentet $m = \delta \cdot p \cdot l^2$, hvor δ kan bestemmes af det angivne maksimale og minimale moment.

Beregningerne har kunnet gennemføres med en gennemsnitspris pr. kørsel på 12 kr, altså under den interne DTH-betalingsgrænse.

Dette kræver imidlertid, at der køres med RATE = SLOW og at programmet er oversat og lagret.

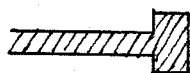
Specialtilfælde

Under kørslen med disse beregninger viste der sig situationer, d.v.s. specielle randbetingelser for pladen, hvor isostatmønstret konvergerede mod retlinede forløb.

Disse tilfælde opstod, når pladeunderstøtningerne var randbjælker, både som fri-rand, og som kontinuert plade over randbjælken.

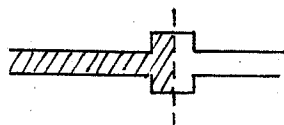
At dømme efter disse beregninger bliver isostatmønstret retlinet ved følgende forhold mellem randbjælkestivhed og pladestivhed (se appendix):

Fri rand:



$$\alpha \approx 3,3 \quad , \quad \gamma \approx 0,75$$

Kontinuert rand:



$$\alpha \approx 2,8$$

For disse specielle forhold bliver almindelige kupoldæk altså geometrisk ligedannede med kraftforløbet i en isotrop plade for kvadratisk pladefelt.

Denne konvergens er ikke omtalt i noget kildemateriale, men dens tilstedeværelse kan umiddelbart og logisk indses af isostat-mønstrene for henholdsvis den enkle plade, understøttet i fire punkter, og den langs randen understøttede plade.

For disse to plader står isostaterne - eller i dette tilfælde hovedmomenterne for hovedretning 1 - groft set vinkelret på hinanden. I det første af tilfældene er momentvektorerne orienteret periferisk, mens de i det andet tilfælde hovedsageligt er diagonalt orienterede.

Idet grænsetilfældene for randbjælkestivhederne netop er disse to situationer, vil der for en eller anden værdi af randbjælke-stivheden ske et skift fra den ene orientering til den anden orientering. Dette skift ses tydeligt af figurerne i appendix.

Resultatet er meget betydningsfuldt for en industrialiseret udnyttelse af krydsribbeplader, idet man vil kunne forudse betydelige materialebesparelser ved at udføre retlinede krydsribbeplader med netop de angivne forhold mellem randbjælke- og ribbestivhed. Det må derfor anbefales, at der laves forsøg for at verificere beregningerne.

7.1.5 Beregning og dimensionering af isostatdæk

Den viste måde at afbilde momentfordelingen på kan også benyttes som udgangspunkt til en beregning og udformning af isostatplader. Dette skal vises i det følgende.

Ud fra den grafiske fremstilling kan man forholdsvis let tegne isostaterne op med større eller mindre afstand. Idet pladen er krydsbærende netop i hovedretningerne vil belastningen på pladen, som ligger mellem to isostater, blive ført til understøtningen af den derved fremkomne strimmel.

Man kunne altså ved hjælp af krumme strimler, som afgrænses af isostaterne, beregne pladen ved hjælp af strimmelmetoden*. I dette tilfælde, hvor vi allerede har beregnet plademomenterne, kan vi i stedet betragte momenterne som belastning, og ved at vælge en strimmel og bestemme dens bredde, fremkommer strimlens momentpåvirkning som det gennemsnitlige hovedmoment, multipliceret med strimlens bredde. I praksis kan dette foregå således:

- 1) Et tilpas tæt isostatliniesæt optegnes for begge hovedretninger
- 2) Et maksimalt bjælkemoment i ribbepladen (eller i den massive plade fastlægges)
- 3) Det største hovedmoment opsøges på det grafiske plot og en dertil svarende strimmelbredde fastlægges
- 4) Herefter kan isostaterne, svarende til denne strimmel og de hermed symmetriske strimler, tegnes op og proceduren gentages for næste strimmelsæt

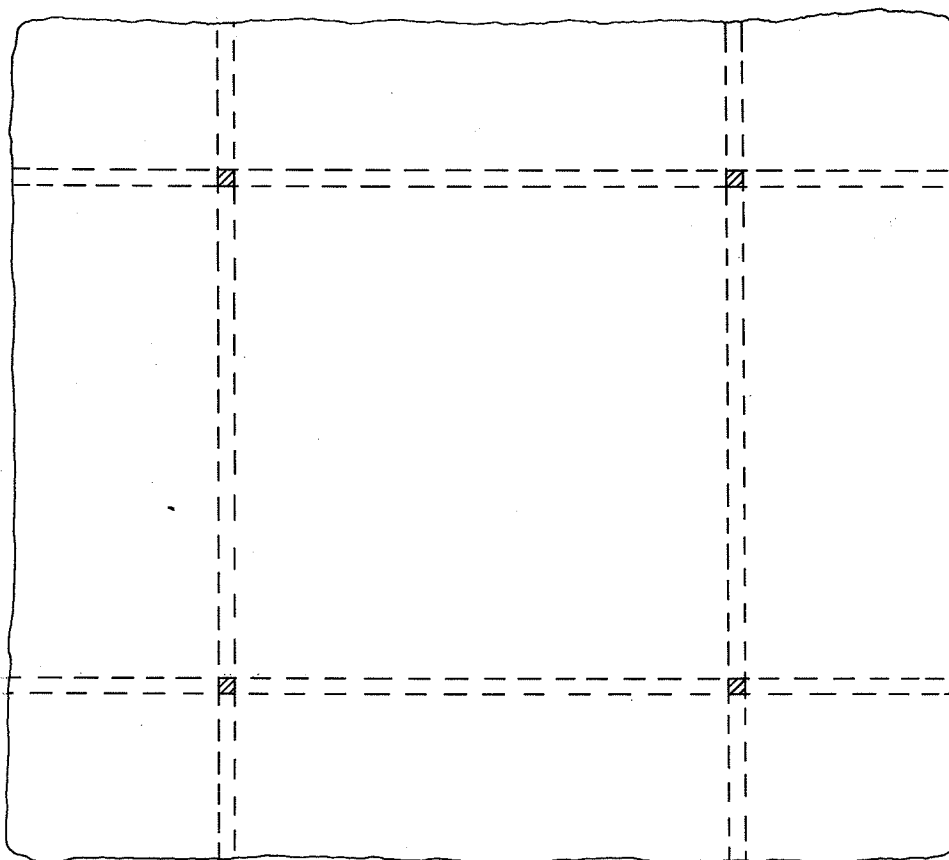
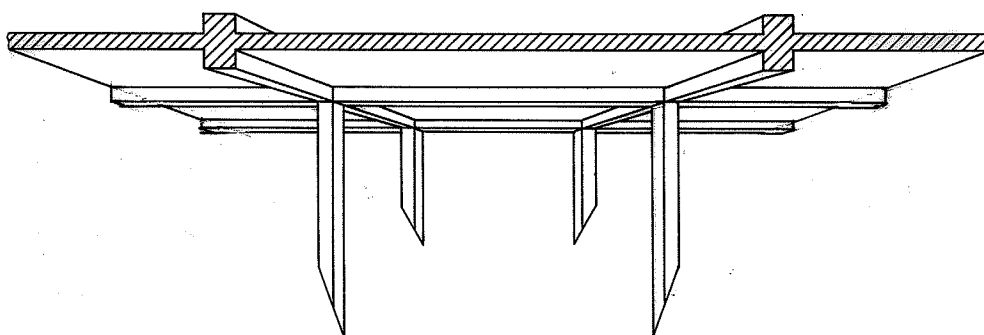
*) "Strimmelmetoden" kaldes den pladeberegningss metode, som Hillerborg udviklede i 1956. [59.1], som netop ikke tager hensyn til vridningsmomenter i plader.

De derved fremkomne strimler kan da ækvivaleres med T-bjælker eller for den massive plades vedkommende med en bestemt pladearmering.

Denne fremgangsmetode er vist i eksempel 7.1.5.1.

Eksempel 7.1.5.1

Vi vil skitsere og beregne et isostatdæk med krydsribber ud fra de følgende forudsætninger:



Pladen er kontinuert og understøttet punktvis af søjler i kvadratiske moduler og har en spændvidde på 4,8 m. Mellem søjlerne er pladen forsynet med randbjælker, hvor disse bjælker har et inertimoment I , som er $0,25 \cdot I_{p\ell} \cdot L$, $I_{p\ell}$ er pladens inertimoment pr. længde og L er spændvidden.

Som grundlag har vi et grafisk plot fra en elementmetode-beregning ved hjælp af STRUDL-programmet, som vist i figur 7.1.5.1 og 2. Der er her kun vist en fjerdedel af pladen på grund af symmetrien.

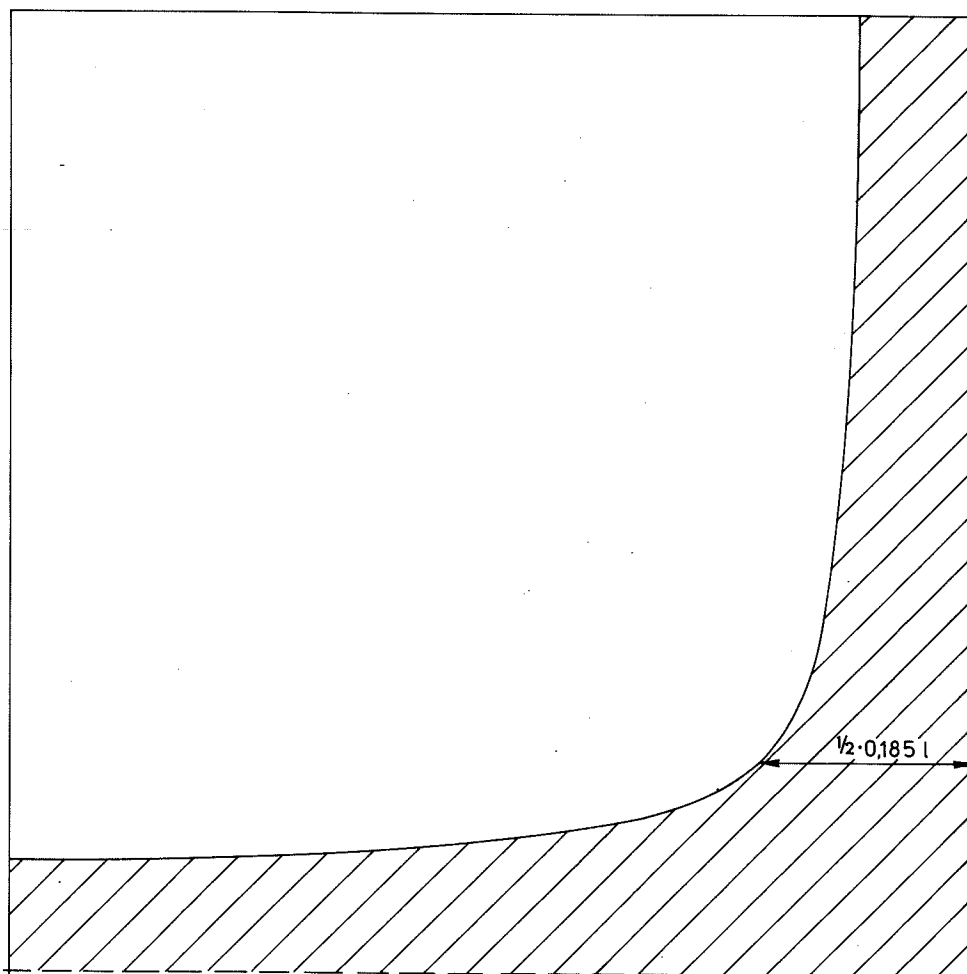
Ud fra dette plot er isostaterne tegnet op og vist i figur 7.1.5.3 og 4.

Det vælges at dimensionere ribberne i isostatpladen efter et maksimalmoment på $0,006 p\ell^3$ og et minimalmoment på $-0,006 p\ell^3$.

Der begyndes med at opsøge og måle det numerisk største moment i pladen, i dette tilfælde i figur 7.1.5.2: $m_{\min} = -0,1663 p\ell^2 = 49 \text{ mm}$. Heraf fås skalafaktoren $0,0034 p\ell^2/\text{mm}$.

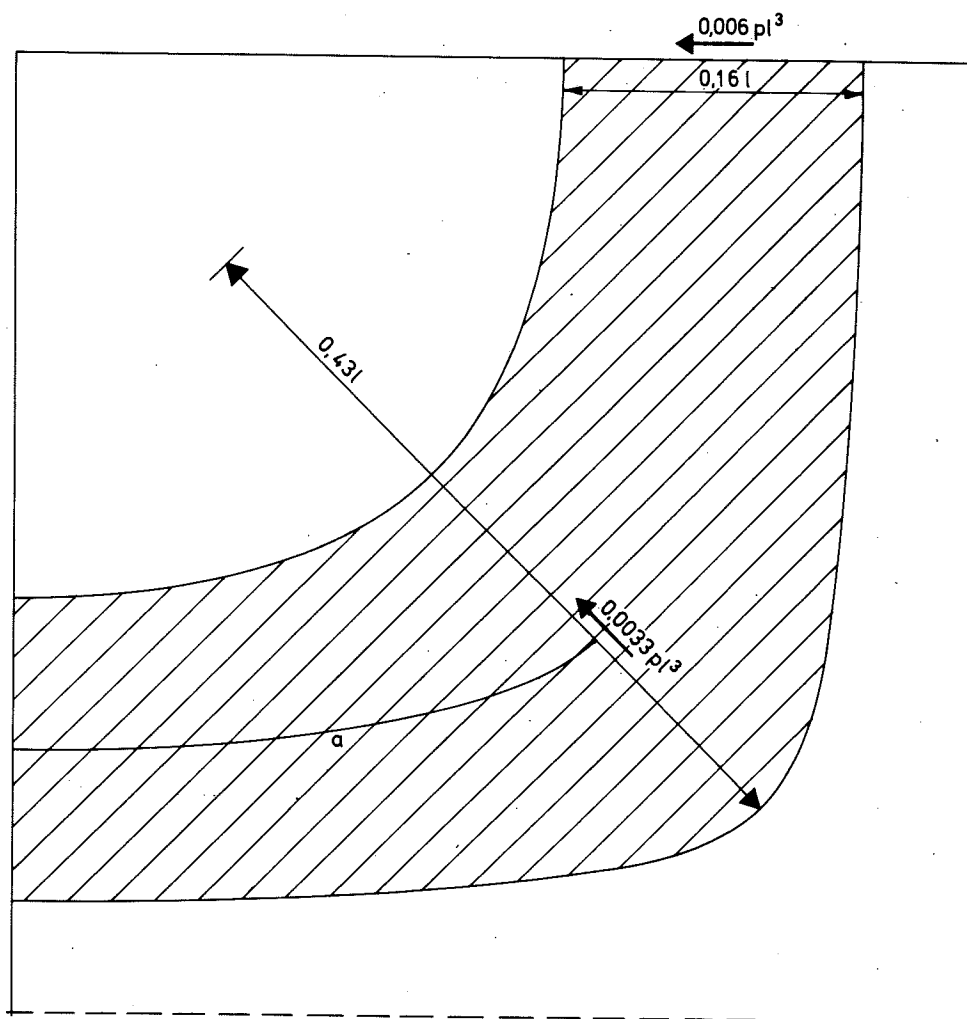
Beregning og fastlæggelse af strimler begynder i symmetrilinierne her med strimlerne svarende til hovedmomenterne 2. Hertil bruges figur 7.1.5.2 og isostaterne hørende til 1. hovedretning, figur 7.1.5.3.

Det største moment måles på midten til 9,5 mm, svarende til et moment på $9,5 \cdot 0,0034 = 0,0323 \text{ p}\ell^2$. Den tilsvarende strimmelbredde bliver da $0,006 / 0,0323 = 0,185 \cdot \ell$ eller 59 mm.



Derefter måles momentet i feltet, svarende til den næste strimmel, i dette tilfælde i gennemsnit $4 \text{ mm} \cdot 0,0034 \text{ p}\ell^2/\text{mm} = 0,0136 \text{ p}\ell^2$ og hertil svarer en strimmelbredde på $0,006 / 0,0136 \cdot \ell = 0,44 \ell$ eller 141 mm.

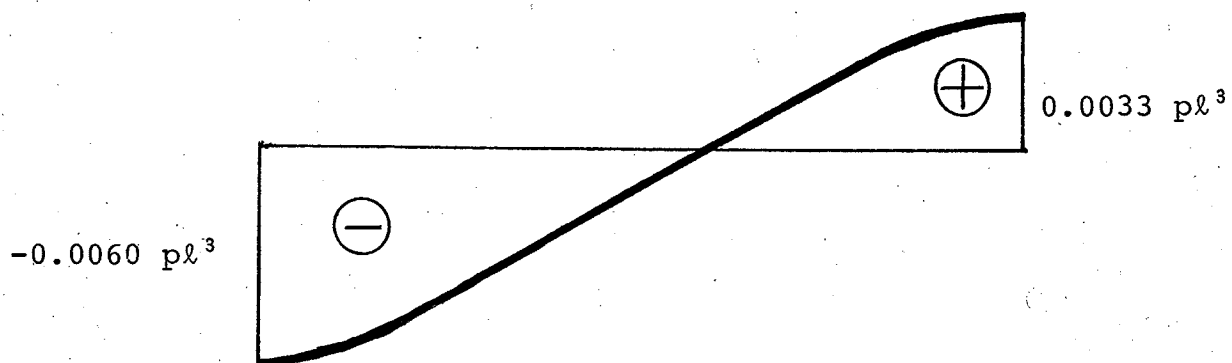
Det kontrolleres, at der ved randen ikke opnås større momenter end krævet.



Plademomentet her kan måles til $-0,0375 pl^2$, hvilket svarer til en strimmel på $0,16 \cdot l$. Strimmelbredden her skal altså være mindre end $0,16 l$.

Således kan der arbejdes videre med at fastlægge strimlerne, også for hovedretning 2. Det skal endnu engang påpeges, at det er momentoptegningerne for 2. hovedmoment, der bruges til optegning af isostaterne for 1. hovedretning og omvendt.

For hver enkelt strimmel kan man derefter optegne momentets variation efter afstanden fra understøtningerne. Dette er her eksempelvis gjort for den sidst viste strimmel.



Hver strimmel kan således dimensioneres efter maksimalmomentet, i dette tilfælde $0,006 \text{ pl}^3$, eller strimlens tværsnit kan afpasses efter det aktuelle moment. For en ribbeplade vil det i konsekvensen betyde, at ribberne skal løbe på undersiden eller oversiden af pladen, afhængigt af om plademomentet er positivt eller negativt.

Derved udnyttes den gennemgående plade som trykhoved, hvilket især er fordelagtigt i jernbetonplader.

Ribbeforløbet i dette eksempel vil - når det er færdigberegnet - se ud som vist i figur 7 eller, hvis der er "undersideribber" alene, som vist i figur 8.

Dette arbejde, som her udføres manuelt, burde kunne udføres ved hjælp af EDB, således at man kunne få tegnet strimlerne op af en plottemaskine, tilsvarende de viste plot.

Dette kan f.eks. gøres ved lineære interpolationer mellem værdierne både for momenter og hovedretninger.

De plot af strimler, man derved får ud, bliver altså tilnærmede stykvis rette linier, der vil kunne være et noget enklere grundlag til bestemmelse af isostatribbernes beliggenhed.

Det fremsatte krav om, at alle strimlernes momenter skal være lige store er ikke nødvendigt.

En alternativ metode er at fastlægge sit ribbeforløb efter de optegnede isostater, men ikke tage hensyn til en fastlæggelse af strimlens bredde.

Man kan da igen optegne momenternes fordeling langs strimlen, og man må så dimensionere hver enkelt ribbe for sig for dets maksimalmoment alene eller man kan afpasse ribbens tværsnit efter momentfordelingen.

7.1.6 Sammenfatning

Som det er vist i de forrige afsnit, så ligger der rige muligheder i anvendelsen af isostatpladeprincippet i jernbetonkonstruktioner.

Isostatplader har den fordel, at de kræver væsentlig mindre ressourcer - både materialer og energi - end sædvanlige dækkonstruktioner. Samtidig kan det dokumenteres, at i de tilfælde, hvor de er blevet benyttet, har de tilført bygningen en vis arkitektonisk værdi.

Elementer kan desuden transporteres i lodret stilling på grund af deres stivhed.

Ulemperne træder frem ved produktionen af pladerne, der naturligvis kræver mere arbejdskraft end sædvanlige dæktyper. Ulempen kan elimineres i de tilfælde, hvor der er rigeligt med arbejdskraft, f.eks. i udviklingslandene, eller ved en masseproduktion på fabrik, hvor en ekstra formudgift ikke får så stor vægt i økonomien.

I praksis kunne man godt forestille sig princippet blive brugt, specielt når fænomenet med isostaternes konvergens, jvf. side 44, blev anvendt så isostatpladen ville nærme sig mere kendte produkter, som f.eks. Lemming & Erikssons krydsribbeplader.

Litteratur

- [20.0] N.J. Nielsen:
"SPÆNDINGER I PLADER", p.112-114
København DTH Diss., G.E.C.Gads Forlag,
Danmark 1920.
- [57.0] Jørgen Nielsen:
"VRIDNINGSARMEREDE JERNBETONPLADER"
Nordisk Betong vol. 1, 1957,
Sverige 1957.
- [59.0] S. Timoshenko og S. Woinowsky-Krieger:
"THEORY OF PLATES AND SHELLS"
2. edition, McCraw-Hill, p. 113-124,
U.S.A. 1959.
- [59.1] Arne Hillerborg:
"STRIMLEMETODEN"
Sverige 1959.
- [65.0] Pier Luigi Nervi:
"AESTHETICS AND TECHNOLOGY IN BUILDINGS"
Harvard University Press,
U.S.A. 1965.
- [69.0] M.A. Muspratt:
"BEHAVIOR OF SIMPLY SUPPORTED SLABS"
Journal of the Structural Division, dec. 1969,
U.S.A. 1969.
- [70.0] M.A. Muspratt:
"COMPUTER GRAPHIC DISPLAY"
International Journal of Computer Mathematics,
vol. 2, p. 259-268,
England 1970.
- [74.0] Hans Petersson og Jan Bäcklund:
"SERFEM - A COMPUTER PROGRAM FOR IN-PLANE
ANALYSIS OF PLATES BY THE FINITE ELEMENT
METHOD"
Département of Building Construction,
Chalmers University of Technology,
Sverige 1974.
- [75.0] Ramböll & Hannemann A/S:
"BEREGNING AF KUPOLDÆK EFTER PLASTICITETS-
TEORIEN"
Danmark 1975.
- [75.2] M.P. Nielsen og A. Rathkjen:
"SKIVER OG PLADER, RM 6.1"
Instituttet for Bygningsteknik, AUC, p. 31-32,
Danmark 1975.

- [75.3] Erik Reitzel:
"OM MATERIALEØKONOMISKE KONSTRUKTIONER
OG BRUDLINIER"
Bygningsstatistiske Meddelelser, vol.46, no 2, 1975,
Danmark 1975.
- [76.0] Claus Philipsen:
"FORELÆSNINGSNOTAT OM SPÆNDINGSOPTIK"
Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DTH,
Danmark 1976.
- [76.1] Erik Reitzel:
"BETONKONSTRUKTIONER OG RÅSTOFØKONOMI"
Bidrag til Dansk Betondag 1976,
Danmark 1976.
- [78.0] M.A. Muspratt:
"ELASTIC ANALYSIS OF SLABS"
Building and Environment, vol. 13, p. 51-59,
Pergamon Press,
England 1978.
- [79.0] Sigurd Andersen:
"PLOTTEPROGRAM TIL OPTEGNING AF HOVEDSPÆN-
DINGER ELLER -MOMENTER I SKIVER OG PLADER"
Appendix til licentiatafhandling ved IFH, DTH,
Danmark 1979.
- [79.1] Erik Reitzel:
"FRA BRUD TIL FORM"
Polyteknisk Forlag
Danmark 1979

7.2 ISOSTATDÆK OG ENERGIBESPARELSER

7.2.0 Valg af bærende hovedsystem

Med indskrænkningen i bygningens geometriske udformning er der også sat grænser for det bærende hovedsystems udformning.

Et system - som ud fra bæremæssige betragtninger synes at have et stort materialeforbrug og en høj forarbejdningsgrad - er det almindeligt kendte betonelements-system, bestående af bærende tværvægge i massivt beton og enkeltspændte huldæk. Da dette system er så udbredt, netop til bygninger af den benyttede type, vil systemet blive brugt som sammenligningsgrundlag eller referencesystem.

Derudover kan der ikke umiddelbart udelukkes muligheder.

Betragtes alene energiforbruget til fremstillingen på grundlag af bæreevnemæssige krav kan der imidlertid konstateres tendenser m.h.t. det optimale system.

[75.3] undersøger således forskellige bærende systemer til netop seksetages huse. Med de forudsætninger, der gives i denne kilde, findes det, at et rammesystem af jernbetonbjælker og -dæk er det mindst energikrævende. Desuden ses det, at teglkonstruktioner er fordelagtige generelt.

Dette skyldes, at kildens værdi for energiforbrug til fremstilling af tegl, p.g.a. specielle lerfore-

komster bl.a. med indhold af organiske materialer, er mindre i forhold til tallene her (ca. 20-25%) og konklusionen kan derfor ikke overføres til denne rapport.

Tendensen mod mindre materialekrævende konstruktioner er undersøgt i [72.0], dog kun for søjle-plade-konstruktioner. På grundlag af en bruttomaterialepris konstateres således, at ribbeplader og plader med kantbjælker er de mest økonomiske. Vægtmæssigt gælder dette dog kun for ribbepladerne, ifølge [72.0].

Denne tendens understreges endelig af eksempel 7.2.0.1, som under enkle forudsætninger viser energiforbruget til fremstilling af bærende systemer i jernbeton.

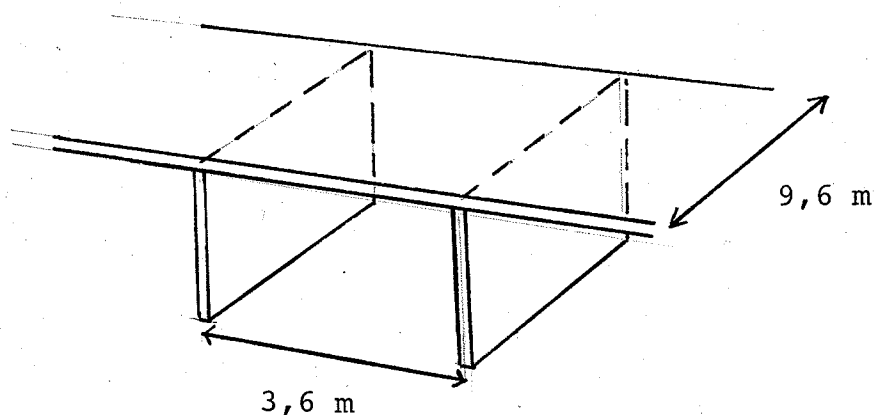
Eksempel 7.2.0.1

I det følgende skal det forsøges, at sammenligne en række betonkonstruktioner, som opfylder samme bærende funktion.

Konstruktionen tænkes at være i én etage med en bredde på 9.6 m og uendelig længde. Konstruktionen består af lodrette, bærende dele og en vandret plade. I første omgang tænkes alle lodrette og vandrette dele at udformes prismatiske h.h.v. plane.

Etagehøjden er 2.8 m og der tænkes at være en jævnt fordelt regningsmæssig nyttelast på 3.5 kN/m^2 på pladen. Afstanden mellem understøtningerne i længderetningen er af størrelsen 3.6 m.

Energiforbrugene er beregnet ved hjælp af metoder og værdier fra [79.2] og [80.1], og er vist i figur 7.2.0.1.



Materialeparametrene er

beton : $\sigma'_{bk} = 20 \text{ MPa}$

$E_{br} = 12 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

stål (st.42) : $\sigma_{ak} = 240 \text{ MPa}$

$E_{ar} = 210 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

□

Der kan konkluderes at ud fra bæreevnekravene alene er ribbekonstruktioner materiale- og energiøkonomiske. Derudover er referencesystemet - det normale betonelements-system - ret energikrævende.

Dette skyldes først og fremmest, at elementernes dimensioner også er baseret på andre krav, som f.eks. brand- og lydmæssige krav.

Elementerne skal desuden kunne anvendes i mange forskellige situationer.

For at kunne sammenligne på et reelt grundlag bør man derfor i modsætning til eksempel 7.2.0.1 også inddrage skille vægge, facader, afstivende konstruktioner og andre funktionskrav end de bæreevnemæssige.

Da dette ikke kan gennemføres her for alle mulige kombinationer af bærende elementer, skal der i hovedsagen betragtes tre systemer i jernbeton:

- a) referencesystemet, bestående af præfabrikerede, uarmerede, massive bærende tværvægge, hvorpå der er oplagt simpelt, understøttede, præfabrikerede huldækplader
- b) et søjle-plade-system, bestående af massive, dobbeltspændte plader, forsynet med randbjælker, spændende fra søjle til søjle, enten som adskilte dækelementer eller som kontinuerte in-situ støbte plader
- c) et søjle-plade-system, bestående af isostatribbeplader, enten som elementer eller støbt in-situ

I det følgende belyses de valgte konstruktionssystemer i sammenhæng med nogle af de tidligere nævnte, idet der især lægges vægt på andre funktionskrav (end de bæreevnemæssige).

7.2.1 Ressourcebesparelser og konstruktionsminimering

Ved konstruktionsminimering forstås i det følgende en minimering af konstruktionernes samlede masse for uændret materialevalg.

Når modelhuset i næstfølgende afsnit beskrives, vil det fremgå, at det, der bliver ændret af huset, når analysen skrider frem, alene er det bærende system.

Lette ikke-bærende skillevægge, facadekonstruktioner m.m. er ens fra tilfælde til tilfælde. På denne måde er det muligt at opnå et slags "førsteordensudtryk" for ressourceforbrugets afhængighed af konstruktionssystemets art, idet klimaskærmens egenskaber ikke varierer. Som det senere skal ses, vil der dog være nogle konsekvenser for den bygningsmæssige geometri, der slår igennem på både energi- og materialeforbruget.

Den ene "sekundære" virkning er, at etagehøjden og rumhøjden varierer, dels når konstruktionssystemet ændres, og dels når spændvidden ændres. Dette slår både igennem på materialeforbruget - som dog kan indregnes i regnestykket umiddelbart - og på energiforbruget til opvarmning af huset.

Den anden "sekundære" virkning er de forskellige konstruktionssystemers forskel i tyngde, som hænger direkte sammen med konstruktionsminimeringen.

Når konstruktionens tyngde varierer, varierer også bygningens varmeakkumuleringsevne, idet materialevalget er ens for alle konstruktionssystemer. Dermed varierer også energiforbruget til opvarmning af huset.

Der vil derfor blive undersøgt tre faktorer indflydelse på bygningens energiforbrug

- a) materialeforbrugets og opførelsesmetodens variation
- b) driftsenergiforbrugets variation m.h.t. bygningsoverfladeforøgelse

c) driftsenergiforbrugets variation m.h.t.
bygningstýngde

For at disse tre afhængigheder kan blive sammenlignelige, må der gøres nogle forudsætninger m.h.t. bygningens klimaskærm og bygningens forventede levetid. Ved at ændre disse forudsætninger drastisk kan man, som det senere skal ses, næsten komme til et hvilket som helst resultat, man ønsker.

7.2.2 Modelhuset

Modelhuset er en stavformet boligblok, bygget over et modulnet på 30 cm. Hver af de seks etager har en grundplan på 30 x 120 moduler. Bygningen er udstyret med en krybekælder under hele bygningen i halv etagehøjde over terræn, således at der bliver mulighed for at føre trappeindgangen ind både i 1. etages plan og 1/2 plan under 1. etage. Etagehøjden er indreguleret efter normal rumhøjde 2,6 m.

Blokken er forsynet med 2 trappeopgange med elevatorer og de stabiliserende skivesystemer i søjleplade-bygningerne er koncentreret omkring disse trappeopgange.

Tagdækningen er ens for alle bygninger og er ikke medtaget i denne analyse, bortset fra at dens isolerende virkning er indregnet.

Det gennemsnitlige vinduesareal er 1/3 af facadearealet i referencebygningen, svarende til 20% af gulvarealet, altså i overkanten af BR-77-retningslinierne.

Forudsætninger m.h.t. klimaskærm er beskrevet i tabel 7.2.2.1, mens data for de forskellige systemer er beskrevet i tabel 7.2.2.2.

For referencesystemet med de bærende tværvægge vil facadekonstruktionen i gavlene naturligvis være tunge sandwichelementer. Disse tillægges i de varmetekniske beregninger dog samme egenskaber, som de lette facader for ikke at gøre beregningerne endnu mere forvirrende.

Beregningerne er udført på grundlag af den tidligere beskrevne elementmetode STRUDL, således at for massive plader er delfelternes maksimalmomenter dimensionerende og for isostatdækkene er den i afsnit 7.1.5 beskrevne metode benyttet. For det bærende tværvægssystem ligger brochuremateriale til grund for beregningerne af materialeforbruget. (H + S)

I varmeberegningerne er desuden forudsat en moderat orientering af husets vinduer mod syd, hvor husets længdeakse er orienteret øst-vest. Denne forudsætning - sammen med forudsætningen om vinduernes facadeandel - fremhæver betydningen af husets varmeakkumuleringssevne.

7.2.3 Ressourceforbrug og spændvidde

Når et bærende konstruktionssystem er udvalgt må der derefter træffes et valg af spændvidde for dette system. For at belyse konsekvenserne af et sådant valg skal der kort gives et billede af sammenhængen mellem spændvidde og ressourceforbrug.

Betragtes alene materialerne, der medgår til de bærende konstruktioner, kan der hentes oplysninger fra flere kilder.

[72.1] angiver således en principiel sammenhæng mellem "specifik bæreevne" og spændvidde for ligedannede konstruktioner, som må forstås som en principielkurve. Afbildes den reciprokke værdi, d.v.s. materialeforbruget divideret med bæreevnen, bliver den hyperbelloignende kurve til en voksende kurve.

Den nøjagtige form af kurven afhænger af konstruktionens art.

For hængekonstruktioner i stål har Frei Otto [65.0] tabelleret sådanne forløb. Sammenhængen bliver da en næsten lineær funktion ved små spændvidder og en stærkt voksende funktion, når spændvidderne bliver så store, at egenvægten har dominerende betydning for dimensioneringen.

Frei Otto påpeger, at en sådan sammenhæng kun gælder for rent trækpåvirkede konstruktioner, idet kravet om ligedannede konstruktioner kun kan efterleves for varierende spændvidder med rene trækkonstruktioner.

Inddrages også konstruktionselementer, som er bøjnings- eller trykpåvirkede, vil stabilitetsfænomener gøre sig gældende.

Generelt vil der dog for vandrette, bærende dele gælde, at sammenhængen mellem materialeforbrug og spændvidde er tilnærmelsesvis af samme principielle opbygning, som vist i figur 7.2.3.2., inden for mindre intervaller (se eksempel 7.2.3.1).

For lodrette bærende dele, som skal føre belastningen fra de vandrette elementers understøtningspunkter til fundamentet, gælder imidlertid andre regler.

Dette skyldes først og fremmest, at antallet af de lodrette elementer er omvendt proportional med spændvidden.

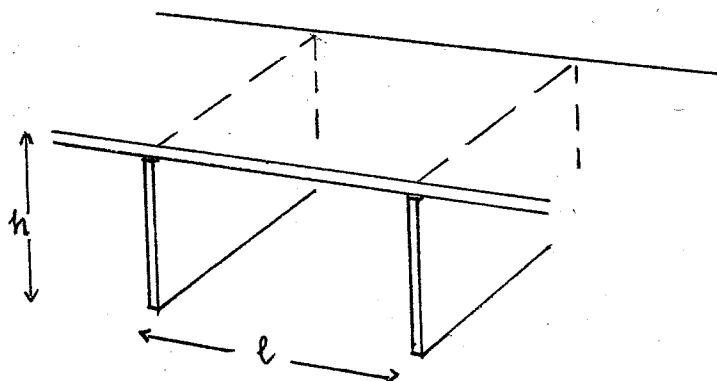
Derudover er materialeforbrugets afhængighed af belastningen noget forskellig fra f.eks. trækpåvirkede konstruktioner. Dette resulterer i en principiel sammenhæng mellem ressourceforbrug og spændvidde, som vist i figur 7.2.3.3.

Den slags kurver er kendt fra utallige minimerings-situationer og vil som regel have ret flade minima, således at det søgte optimum ofte er et interval, hvori afvigelser i værdi ikke betyder ret meget for forbrugets størrelse.

Det teoretiske grundlag for sådanne kurver er forsøgt belyst gennem følgende eksempel.

Eksempel 7.2.3.1

Der betragtes et meget simpelt bærende system, bestående af parallelle, lodrette skiver med indbyrdes afstand ℓ . Derpå hviler plader, der spænder i retningen vinkelret på skivernes plan. Der opstår således en uendelig konstruktion, hvoraf vi betragter en enhedsbredde (analogt til eksempel 7.2.0.1).



Der indføres følgende simple forudsætninger

- a) skiver og plader har samme tværsnit, respektive, langs hele deres længde
- b) dimensionering af skiverne som vægge for lodret last sker alene ud fra den simple Euler-teori eller trykbrud
- c) dimensionering af pladerne sker efter formlen

$$m_{\max} = W'_p \cdot \sigma_{\max}$$

- d) for skiver forudsættes følgende gældende

$$P'_{kr} = \beta q \cdot l = \left(\frac{\pi}{h}\right)^2 E_s I'_s$$

$$I'_s = i_s^2 \cdot t_s$$

$$i_s = \rho_s \cdot t_s$$

- e) for pladerne forudsættes da følgende gældende

$$W'_p = \gamma \cdot i_p \cdot t_p$$

$$I'_p = i_p^2 \cdot t_p$$

$$i_p = \rho_p \cdot t_p$$

$$m_{\max} = \alpha \cdot q \cdot l^2$$

f) belastningen består af en jævnt fordelt belastning, q , på 2 kN/m^2 . Egenvægten negligeres!

g) den totale vægt pr. m^2 optimeres, d.v.s.

$$M = r_p \cdot t_p + r_s \cdot t_s \cdot h/l \text{ optimeres m.h.t. } l$$

Der kan da indføres to faktorer

$$k_1 = 3 r_p \sqrt{\frac{\alpha q}{\gamma \rho_p \sigma_{\max}}}$$

$$k_2 = 2 r_s \sqrt[3]{\frac{\beta q h^5}{E_s (\pi \rho_s)^2}}$$

der fastlægger den optimale spændvidde således

$$l_{\text{opt}} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{0.6} \quad \text{hvis} \quad t_s \leq \sqrt{\frac{\sigma_s}{E_s}} \cdot \frac{h}{\pi \rho_s}$$

$$l_{\text{opt}} = 0 \quad \text{hvis} \quad t_s \geq \sqrt{\frac{\sigma_s}{E_s}} \cdot \frac{h}{\pi \rho_s}$$

hvor

q er belastningen (kN/m^2)

α er momentfaktoren (-)

γ er modstandsmomentfaktoren (-)

ρ er inertiradiusfaktoren $= \frac{I}{t}$ (-)

r er rumvægten (kg/m^3)

β er reaktionsfaktoren (-)

h er søjlelængden (m)

E_s er elasticitetsmodul af skivematerialet (MPa)

$\sigma_{\max}$ er nominel bøjningsbrudspænding for pladematerialet (MPa)

t er konstruktionstykkelsen (m)

σ_s er trykspænding i lodrette dele (MPa)

I er inertimoment (m^4/m)

P er skivens søjlelast (kN/m)

W er pladens modstandsmoment (m^3/m)

m er plademoment (kNm/m)

Som en meget grov tilnærmelse kan γ for de tværsnitsprofiler sættes til 0,6, hvorved

$$k_1 = 3,87 r_p \sqrt{\frac{\alpha q}{\rho_p \sigma_{\max}}}$$

Minimeringskurverne vil da komme til at forløbe som vist i figur 7.3.2.4.

For de vandrette bærende dele bliver sammenhængen lineær svarende til, at egenvægten negligeres. For de lodrette bærende dele bliver sammenhængen sammensat af en lineær kurve svarende til trykbrudskriteriet og en aftagende potensfunktion, svarende til Euler-kriteriet.

$$M = \frac{1}{3} k_1 \cdot \ell + \frac{1}{2} k_2 \cdot \ell^{\frac{2}{3}}, \quad t_s \leq \sqrt{\frac{\sigma_s}{E_s}} \frac{h}{\pi \rho_s}$$

$$M = \frac{1}{3} k_1 \cdot \ell + k_3, \quad t_s \geq \sqrt{\frac{\sigma_s}{E_s}} \frac{h}{\pi \rho_s}$$

Vil man optimere spændvidden med hensyn til energiforbruget til fremstilling af materialerne skal faktorerne k_1 og k_2 blot multipliceres med energiindholdene i henholdsvis plade- og skivematerialet.

Den optimale spændvidde under forskellige forudsætninger er således beregnet, dels for en materialeminimering og dels for en energiminimering i tabel 7.2.3.1. $\square$

Det ses da, at de optimale spændvidder varierer kraftigt, afhængigt af kombinationen af plade- og skivematerialer. Generelt er de optimale spændvidder imidlertid ret lave i forhold til praktiske forhold.

Det ses endvidere, at energibetragtningerne giver et mere udjævnet billede, mens materialeforbrugsbetragtningerne viser større forskelle i optimale spændvidder.

Det må påpeges, at den betydelige simplificering der er gjort i eksemplet, resulterer i en form for grænseværdier, således at forstå, at hvis der tages hensyn til forhold som beskrevet i afsnit 7.1, og man prøver at indpasse det bærende system efter en bygning, vil de optimale spændvidder sandsynligvis nærme sig det i praksis kendte interval på 3,6 - 6 m. Dette verificeres i næste afsnit.

7.2.4 Beregninger af ressourceforbrug for modelhuset

De i afsnit 7.2.2 viste bærende systemer er applikeret til modelhuset og for hvert tilfælde er materialeforbrug og energiforbrug til opførelse og materialerne beregnet.

Som dimensionerende snitkraftberegning er anvendt elementmetodeberegninger for pladerne, dog ikke for huldækkene som delvist er fastlagt ud fra brochuremateriale. Derudover er dimensioneringen foregået efter betonnormerne DS 411 og den i afsnit 7.1.5 beskrevne metode.

Til beregning af energiforbruget til fremstilling af modelhusets materialer er der anvendt resultaterne fra [79.2] og værdierne i tabel 7.3.2.1.

Beregningernes formål er dels at vise ressourceforbrugets afhængighed af

- a) konstruktionssystem
- b) spændvidde
- c) udførelsesmetode

Endvidere søges der at give sammenlignende oplysninger med hensyn til pengeøkonomiske overvejelser. Resultaterne er vist i tabel 7.2.4.1.

Idet antallet af tilfælde er ret få er resultaterne, hvis de vises grafisk, nok for prætentiose, også p.g.a. den usikkerhed, der må tillægges beregningerne. Grafiske afbildninger giver dog et langt klarere billede af sammenhængene. Der er derfor lavet kurver - vist i figur 7.2.4.1 - 7.2.4.4 - som et forsøg på at forklare tendenserne. Til hjælp herved er erfaringerne fra forrige afsnit benyttet med hensyn til ressourceforbrugets afhængighed af spændvidden.

ad figur 7.2.4.1

Af denne figur kan aflæses, hvor store besparelser i "anlægsenergi", der er forbundet med at gå over til søjle-plade-systemer fra det almindelige tværvægselementsystem under de givne forudsætninger. Det ses, at væsentlige besparelser opnås ved spændvidder i intervallet 2.4 - 4.5 m og for krydsribbesystemets vedkommende igen over 8 m. Endvidere kan det ses, at besparelsen ved at gå fra massive pladesystemer til isostatdækkene først bliver betydelig ved spændvidder over 6 m, hvilket også passer med et økonomisk skøn.

Sammenligning med de indtegnede bygninger A-G har specielt interesse med hensyn til G, A og D. Sammenlignes energiforbruget, svarende til G med nederste kurve, ses det, hvorledes øget facadeareal spiller ind på "anlægsenergiforbruget". Inddrages endvidere driftsenergiforbruget, G', fås en meget betydelig energiforbrugstilvækst, som helt eliminerer besparelsen ved at benytte isostatpladesystemet (se figur 7.2.4.4).

A og D repræsenterer stålbyggesystemerne, hvor D må anses for en nedre grænseværdi, jvf. afsnit 7.1.0. Det ses, at både D og A ligger betydeligt højere end de teoretiske kurver og de "praktiske" kurver, som kunne tænkes at gå igennem B og C (se figur 7.2.4.3).

ad figur 7.2.4.2

Energiforbruget til fremstilling af skivebygninger har i dette tilfælde et optimum ved en spændvidde mellem 4 og 6 m, og der skal peges på det ret udtalte flade minimum.

Forløbet synes at følge teorien fra forrige afsnit fint: når spændviddens optimale interval ligger så "højt" kan det forklares med, at skivetykkelsen er holdt konstant, dels for at tilgodese lydproblemerne, og dels hidrørende fra produktionshensyn.

I figurerne er indtegnet kurver, svarende til $\pm 10\%$, som må betragtes som beregningernes totale usikkerhed. Ved indbyrdes sammenligninger vil en stor del af denne usikkerhed elimineres.

ad figur 7.2.4.3

Går man over til søjle/pladesystemer bliver væggenes indflydelse på energiforbruget elimineret og den optimale spændvidde falder til under 3 m, som det kunne forudsiges i afsnit 7.2.3. Ses der bort fra den ekstra lydisolering, som er årsag til knækket i kurven, kan det se ud til, at teorien om den lineære sammenhæng passer op til spændvidder på 6 m, hvorefter egenvægtens indflydelse på energiforbruget gør sig gældende som en hurtigt voksende kurve. Hertil bidrager også voksende stabiliserende konstruktioner.

Det ses, at der ikke er nogen væsentlig forskel med hensyn til konstruktionsmetode.

ad figur 7.2.4.4

Samme tendens gør sig gældende i denne figur, blot endnu mere udtalt. Det kan således se ud som om det lineære område strækker sig ud over 9 m i spændvidde, hvilket kan forklares ved krydsribbedækkenes ringe egenvægt i forhold til massive plader (figur 7.2.4.2).

I dette tilfælde er forskellen mellem in-situ-konstruktion og præfab-konstruktion endnu mindre.

Materialeforbruget er ikke det væsentlige i denne undersøgelse, men er dog vist i figur 7.2.4.5. For de materialer, der er afgørende for egenvægten, ses, at de samme tendenser fra de forrige figurer går igen. Derimod viser det sig, at stålforbruget opfører sig lige omvendt af tilslagsforbruget med hensyn til konstruktionssystem, hvilket kan forklares med dels et øget armeringsforbrug i dobbelt-spændte konstruktioner, og dels en mere kompliceret armeringsføring i isostatdækkene.

I den tidligere nævnte finske undersøgelse gennemførtes en analog undersøgelse af bruttomaterialeprisen for forskellige konstruktionssystemer. Resultater derfra er gengivet i figur 7.2.4.6., hvor

- a)=kvadratiske massive pladefelter med randbjælker og -søjler
- b)=rektangulære massive pladefelter med randbjælker og søjler
- c)=krydsribbedæk og søjler

Det ses, at også her slår ribbepladesystemet bedst igennem. Desværre er oplysningerne om de betragtede systemer ret sparsomme. Det fremgår således ikke, hvilken konstruktionsmetode, d.v.s. in-situ støbning eller præfabrikation, der ligger til grund for disse kurver.

Til sidst skal der da drages nogle hovedtræk af resultaterne. Når der fokuseres på ressourceforbruget til opførelse af fleretages blokke, kan der under de undervejs indførte forudsætninger opnås væsentlige ressourcebesparelser, ikke mindst i betonforbrug, i forhold til referenceråhussystemet ved at operere med spændvidder på omkring 3 m og bygge råhuset op som søjle-plade system.

Der opnås ikke yderligere væsentlige besparelser ved at forfine dette bærende system til det viste isostatdæksystem ved denne spændvidde. Besparelserne ved dette system træder først tydeligt frem ved

spændvidder over 8 m for energiforbrugets vedkommende, men for betonforbrugets vedkommende allerede ved 5 m.

Denne tendens fremgår til dels også af en engelsk undersøgelse fra efterkrigstiden 1954-55, hvor materialeknaphed var herskende i langt højere grad end i dag. Af denne undersøgelse, der behandlede 28 etageboligkomplekser af beton, fremgår det netop, at spændvidderne for de forskellige byggesystemer er valgt i de ovenfor beskrevne optimale områder. I figur 7.2.4.7 er arbejdskraftforbruget på byggepladsen for in-situ-systemerne vist som funktion af spændvidden*.

De optimale spændvidder - set ud fra et ressource-synspunkt - ligger for søjlepladesystemerne omkring 3 m og for referencesystemet ved 4-6 m.

I disse betragtninger er forspændte konstruktioner ikke taget med. Forspændte konstruktioner vil imidlertid sænke ressourceforbruget endnu mere. F.eks. vil modelbygningen ved ca. 8 m spændvidde have et energiforbrug til sammenligning med figur 7.2.4.1 på $\sim 530 \text{ kWh/m}^2$, hvis dækkene i referencesystemet er forspændte huldæk. Besparelsen vil dog være størst ved store spændvidder.

Endelig kan der ikke konstateres nogen forskel på hvilken konstruktionsmetode, der anvendes til opførelse af bygningerne, idet forskellene i energiforbrug mellem in-situ støbte og præfabrikerede systemer er meget små og ligger inden for beregningernes usikkerhed.

Der er imidlertid stor forskel på energiforbruget, når man går over til alternative konstruktionssystemer som GEAI-systemet, som ved en spændvidde på godt 3 m er helt oppe på et energiforbrug på 625 kWh/m^2 .

I praksis ligger tallet for stålbygninger højere.

Var GEAI-systemet udført i aluminium 51., som har omtrent samme styrketal som stål 42, ville energiforbruget have været så højt som 1335 kWh/m^2 .

7.2.5 Indflydelse på driftsenergiforbruget

De opstillede modelbygninger adskiller sig ikke væsentligt med hensyn til driftsenergiforbruget, idet klimaskærmen, som omgiver huset, i alle tilfælde er antaget at være ens. Driftsforbruget af bygningen ændres dog i de tilfælde, hvor etagehøjden på grund af dæktykkelser må forøges. Desuden ændres bygningens varmeakkumulerende evne med de tilsvarende reduktioner i bygningernes masse.

Hvad angår etagehøjden af bygningerne så influerer de på husets overfladeøkonomi, hvilket også betyder ændrede transmissionsvarmetab. I de bygninger, hvor det er aktuelt, d.v.s. hvor den massive dæktykkelse overstiger 20 cm, må etagehøjden øges med det tilsvarende antal cm.

Med hensyn til akkumuleringssevnen vil man generelt kunne opnå energibesparelser ved en øget akkumuleringssevne i bygninger, anbragt inden for den isolerende konstruktion.

Tilsvarende opnås da øgede energiforbrug, hvis akkumuleringssevnen mindskes.

I [79.0] er denne sammenhæng belyst ved hjælp af et regnemaskineprogram, der er tilkøbet vejrdato fra referenceåret [74.0]. Henning Madsen har da bl.a. bestemt de partielle afledede af energiforbruget i fire modelrum med hensyn til akkumuleringssevne.

I det område, hvori vore bygninger befinder sig, kan den partielle afledede da bestemmes til $0,026 \frac{\text{kWh}}{\text{år}} / \text{°C}$.

Heri er indbefattet dels køling ved temperaturer over 24°C og opvarmning ved temperaturer under 21°C . Modelrummenes termiske belastning er imidlertid simuleret efter kontorfunktioner, hvilket giver et lidt afvigende billede, ligesom det må formodes, at den i forhold til vores modelbygninger ændrede klimaskærm m.m. giver anledning til afvigelser.

Nu vil man i almindelige boliger ikke forlange køling af luften, men lade beboerne foretage den nødvendige køling ved at åbne for vinduer eller hindre solen i at trænge ind i bygningerne i sommerperioden.

Der er derfor gennemregnet de elleve modelhuse (ti beton plus et stål) med ens klimaskærm, men ændret akkumuleringsevne: Dette er gjort ved hjælp af BA4-programmet [76.0], som også Henning Madsen benyttede.

Dette redskab er meget groft i simulationsmodellen med hensyn til akkumuleringsevnen og burde egentlig ikke anvendes til dette formål, men da det har været det eneste tilgængelige på stedet, er det blevet anvendt.

Forudsætningerne med hensyn til klimaskærm og ventilation er beskrevet tidligere i afsnit 7.2.2.

Varmeforbrugets afhængighed af akkumuleringsevnen af de indre konstruktioner er vist i figur 7.2.5.1.

Under forudsætning af, at metoden (BA4-programmet) er egnet til beregning af akkumuleringens effekt, fås der øjensynligt ingen væsentlig forringelse i de massive plader med kantbjælker i forhold til sædvanlige huldæk-tværvægssystemer.

Derimod er der en mærkbar forskel i energiforbruget for krydsribbedækkene, hvilket kan skyldes den manglende akkumulerende masse.

Det ses, at der mellem referencebygningen og den dårligste bygning, er en forøgelse af varmeforbruget på 1400 kWh/år. Med en udnyttelse af olie - i f.eks. et oliefyr på 0,85 - svarer det til et energiforbrug på ca. 1650 kWh/år.

Over en levetid af 50 år svarer det til en samlet forøgelse af forbruget på 40,5 kWh/m². Dette tal må sammenlignes med den tilsvarende besparelse for den aktuelle bygning i forhold til referencebygning, som aflæst af tabel 7.2.4.1, er ca 102 kWh/m².

Besparelsen kan således korrigeres til 62 kWh/m² eller 14%.

Den største forøgelse af facadeoverfladen i tabel 7.2.5.1 giver en forøgelse af energiforbruget på 67 kWh/m² over en periode på 50 år.

Spørgsmålet om varmeakkumuleringssevnenes indflydelse hænger sammen med variationer i varme- eller temperaturbelastning for rummene. Hvis der i bygningen installeres et klimaanlæg med nøjagtig regulering til en konstant rumtemperatur vil akkumuleringssevnen ingen indflydelse have. Hvis derimod temperaturen tillades at svinge betydeligt, og man benytter konstruktionerne til fremføring og forvarmning, henholdsvis køling af ventilationsluft, vil akkumuleringssevnen af konstruktionerne spille en større rolle end angivet i figur 7.2.5.1. Dette er kendt fra f.eks. det svenske Termo-dæk-system [78.0], hvor huldæklader bliver benyttet til fremføring af ventilationsluft.

Samme effekt kan opnåes ved at anvende separate stenlagre, som kan udføres i energiextensive materialer, uafhængigt af den bærende konstruktion.

På denne baggrund må de angivne tal betragtes som øvre grænseværdier for varmeakkumuleringseffekten, hvis modelbygningen udsættes for konventionelle opvarmningssystemer.

Som det fremgår af tabel 7.2.2.1 er modelbygningen bedre egnet til udnyttelse af solindfaldet gennem vinduerne end bygninger, udført efter BR-77 isole-ringskravene.

Dette skyldes dels at modelbygningens vinduesareal er større end BR-77 kravene, og dels at dens varme-tab er større end i en tilsvarende "BR-77-bygning".

I normale tilfælde vil effekten på opvarmningsbe-hovet derfor være betydelig mindre end angivet.

Under den givne forudsætning kan kurverne i figur 7.2.4.1 korrigeres for driftenergiforbrugsændringer i grænsetilfældet. Disse ændringer - som angives i tabel 7.2.4.2 - resulterer da i kurvesættet, som vist i figur 7.2.5.2.

Det ses, at ved at tage hensyn til driftsenergifor-brugets variation, udjævnes forskellene kraftigt. Denne tendens vil være endnu tydeligere, hvis byg-ningens levetid øges ud over de 50 år. Kurverne i figur 7.2.5.2 repræsenterer - når man ser bort fra akseforskydning - det totale energiforbrug over hele bygningens levetid, som vil være af størrelsen

elforbrug* ($\sim 3000 \text{ kWh/m}^2$)	6.600 kWh/m ²
opvarmning	2.500 kWh/m ²
varmt-vand	2.800 kWh/m ²
fremstilling af bygning	800 kWh/m ²
	12.700 kWh/m ²

De maksimale besparelser, ved at vælge et alternativt konstruktionssystem, er dermed i værste fald kun 0,8% af det totale forbrug, men dog nok til at op-varme huset i ca. 2½ år.

Det skal endelig påpeges, at den energimæssige fordel, som isostatdæksystemet har, når fremstillingen betragtedes alene, totalt set kan blive opslugt ved normale spændvidder, og at simple systemer, som f.eks. den massive plade med randbjælker - især ved små spændvidder - bliver energi-økonomiske. I sådanne systemer kan isostatarmoring med fordel benyttes.

Forøget forbrug på grund af:

	Spændvidde	Akkumulering		Overflade		Totalt	
Reference-system	3 m	0 kWh/m ² br		0 kWh/m ² br		0 kWh/m ² br	
	4,5 m	3,2	"	0	"	3,2	"
	6 m	4,1	"	0	"	4,1	"
	8,4 m	4,6	"	22,5	"	27,1	"
Rand-bjælker	3 m	10,6	"	0	"	10,6	"
	4,5 m	7,0	"	0	"	7,0	"
	8,4 m	0,4	"	15,6	"	16,0	"
Isostat-dæk	3 m	34,7	"	0	"	34,7	"
	4,5 m	19,0	"	0	"	19,0	"
	8,4 m	10,5	"	45,2	"	55,7	"
GEAI	4,5 m	52,9	"	22,5	"	75,4	"

Tabel 7.2.5.2:

Forøgelser over 50 år af energiforbrug til opvarmning af modelhuset, som følge af ændringer i råhussystem.

Litteraturliste

- [49.0] Ministry of Works:
"NEW METHODS TO HOUSE CONSTRUCTION"
National Building Studies,
Special Report no 4 og 10,
England 1949.
- [63.0] C.N. Craig:
"MULTI-STOREY FLATS - DESIGN, BUILDING
METHODS AND COSTS"
National Building Studies,
Special Reports no 34,
England 1963.
- [65.0] Conrad Roland:
"FREI OTTO - SPANNWEITEN"
Ullstein Verlag,
Vesttyskland 1965.
- [68.0] "HEDEPARKEN, BALLERUP"
Byggeindustrien vol 19, p. 458-464,
Danmark 1968.
- [70.0] "500 LOGEMENTS H.L.M. IN ROUEN, SYSTEME
INDUSTRIALISÉ GEAI"
Bauen und Wohnen no 4, april 1970,
Schweiz 1970.

Samtale med Georg Rothne, Instituttet for
Byggeteknik, Kunstakademiet, marts 1979.
- [72.0] "PLS-80 - AN OPEN MODULAR COLUMN-SLAB
COMPONENT BUILDING SYSTEM"
RTS 1972:2, Building Information Institution,
Finland 1972.
- [72.1] Erik Reitzel:
"KONSTRUKTIV VÆKST OG MODELPRINCIPPER"
Arkitekten nr. 18,
Danmark 1972.
- [74.0] "REFERENCEÅRET - VEJRDATA FOR VVS-beregninger"
Statens Byggeforskningsinstitut, rapport nr. 89,
Danmark 1974.
- [75.0] Erik Reitzel og H.F. Mathiassen:
"ENERGI, BOLIGER, BYGGERI"
Fremad, Danmark 1975.
- [75.1] Robert A. Kegel:
"THE ENERGY INTENSITY OF BUILDING MATERIALS"
Heating, Piping and Air Conditioning,
juni 1975, U.S.A.

- [75.2] "STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT",
Byggeindustrien vol 26, p. 163-168,
Danmark 1975.
- [75.3] B.A. Haseltine:
"COMPARISON OF ENERGY REQUIREMENTS FOR
BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES"
The Structural Engineer, vol. 53 no 9,
England 1975.
- [76.0] Hans Lund:
"PROGRAM BA4 TIL BEREGNING AF RUMTEMPERA-
TURER OG VARME- OG KØLEBEHOV"
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
meddelelse nr. 46, Danmark 1976.
- [78.0] "HUS MED BETONGSTOMME SPAR 80% VÄRME....."
Byggnadstidningen nr. 18, 1978,
Sverige 1978.
- [79.0] Henning Madsen:
"OPSTILLING AF ET KONCENTRERET REFERENCEÅR"
Eksamensprojekt ved Laboratoriet for
Varme- og Klimateknik, DTH,
Danmark 1979.
- [79.1] "ET NYT OG SPENDENDE SOCIALT BOLIGBYGGERI
FOR ALLE ALDRE"
Arkitekt- og byggebladet DPA, april 1979.
- [79.2] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG VED FREM-
STILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1979.
- [80.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG VED FREM-
STILLING AF BOLIGER"
Rapport nr. 137, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980
- [80.1] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN"
Rapport nr. 135,
Instituttet for Husbygning, DTH
Danmark 1980.

7.3 KONSTRUKTIONSMINIMERING OG FUNKTIONSKRAV

7.3.0 Om konstruktionsminimering og brandsikkerhed

Umiddelbart synes dette at lyde som to modsætninger, idet man normalt tilvejebringer den nødvendige brandsikkerhed ved at overdimensionere konstruktionerne noget i forhold til bæreevnekravene.

Problematikken er naturligvis mere differentieret end ovenfor antydnet.

Udover det forhold, at man ofte kan opnå den nødvendige brandsikkerhed ved en forøgelse af konstruktionsdimensioner, dæklag m.m., gælder det, at man ved ændringer af det bærende system eller komponenters tværsnitsform som regel også ændrer de brandsikkerhedsmæssige betingelser.

Desværre er der indtil nu ikke udført nogen nøjere sammenligning af de brandmæssige aspekter i forbindelse med forskellige konstruktionssystemer, bortset fra de prøvningsmæssige klassifikationer, gældende for de godkendte, markedsførte byggekomponenter.

Vil man derfor kunne udtale sig om konstruktioners ressourceøkonomi ud fra brandmæssig dimensionering må der først gennemføres en mere indgående, sammenlignende undersøgelse af forskellige konstruktionstypers fordele og ulemper m.h.t. brandsikkerhed.

En sådan undersøgelse vil falde uden for denne rapports rammer, men der skal dog gennemgås nogle generelle sammenhænge i forbindelse med ressourceøkonomien og brandsikkerheden.

Brandsikkerhedskravene er mest afgørende for konstruktionsminimeringen i fleretages bygningskonstruktioner. Det er her Bygningsreglementet stiller de strengeste krav, især kravet om BS-konstruktioner i lejlighedsskel, der gør at materialevalget - og dermed konstruktionsvalget - indskrænkes væsentligt.

Som nævnt i afsnit 7.0 behandles i denne rapport alene jernbeton- og stålkonstruktioner. Det er derfor alene jernbeton- og stålkonstruktioner, der vil blive omtalt.

Jernbetonkonstruktioner bliver så godt som altid godkendt som BS-konstruktioner uden brandisolering. Det betyder ikke, at brandsikkerheden i alle betonkonstruktioner er lige stor. Der er generelle konstruktive og formmæssige egenskaber, der umiddelbart har konsekvenser for brandsikkerheden, heraf nævnes:

- monolitiske konstruktioner har ofte større bæreevnereserve end elementkonstruktioner, for samme materialevalg og konstruktionstykkelser
- dobbeltspændte konstruktioner har mulighed for kraftomlejring ved lokalt svigt og giver derfor større bæreevnereserve under brand end enkeltspændte konstruktioner
- jo mindre konstruktionstykkelserne - og jo større de relative udsatte overflader - er, des større andel af betonen er temperaturpåvirket under brand, hvorved faren for materialesvigt vokser
- opadrettede nicher i vandrette konstruktioner opsamler varme røggasser under brand og giver dermed en øget temperaturpåvirkning på konstruktionsdelene
- betontværsnit påvirket til énakset tryk vil være sårbare over for fald i materialestyrke som følge af direkte temperaturpåvirkning, idet det mekanisk påvirkede tværsnit er direkte udsat i modsætning til træksiden, hvor dæklag beskytter armeringen (dette forekommer f.eks. i rammehjørner eller søjletoppe, hvor betonen ofte er udnyttet meget kraftigt til tryk og hvor der nedefra kan komme ret store temperaturpåvirkninger)

For de tidligere, udvalgte konstruktionssystemer kan der være forhold, der taler både for og imod at anvende dem i brandmæssig henseende.

I referencesystemet er der enkeltspændte dæk, hvilket er brandteknisk mindre fordelagtigt. Denne ulempe opvejes dog af, at huldækkene ofte vil være overdimensionerede til det formål, de i praksis anvendes til.

Dårligst synes ribbepladesystemet at være, både p.g.a. de opadvendte nicher og konstruktionens ringe tykkelse.

Den massive plade med randbjælker burde derimod kunne klare sig bedre under brand, især idet lokalt svigt kan resultere i en kraftomlejring til en enkeltspændt konstruktion, og i elementversionen er desuden tryk-tværsnittene alle i oversiden og følgelig ikke så kraftigt temperaturpåvirket under en brand.

For stålkonstruktioner er der andre aspekter, der er afgørende, idet tendenser til betydelige reduktioner af materialestyrken gør sig gældende med stigende temperatur, især for kolddeformeret stål.

For almindelige bløde ståltyper, som benyttes til profiljern, plader og rør, er styrkesvigtet ved høje temperaturer ikke nær så udtalt. Hvor stål alene udgør den bærende konstruktion, benyttes profiler, rør eller profilerede plader, som har meget små godstykker i forhold til tilsvarende anvendte betonkonstruktioner. Konstruktionen skal derfor normalt forsynes med en brandisolering. Hvor kraftig og hvordan denne isolering skal være er ikke specificeret i krav.

I BR-77 er angivet et eksempel på en godkendt bærende konstruktion (BS-60 drager), hvor det er meget væsentligt, at drageren omstøbes helt og at eventuelle hulrum er udfyldt med isolering.

Denne løsning må dog siges at være forældet, forstået på den måde, at den i dag er for dyr at anvende.

Derudover er der en række godkendte konstruktioner, som er beskrevet i publikationer fra firmaer, der fremstiller brandisoleringsmaterialer, som f.eks. mineraluld, asbestuld, gipsplader og brandhæmmende maling.

I udlandet stilles der ofte lempeligere krav til brandisoleringen, hvilket f.eks. kan ses af figur 7.3.0.1, som viser en konstruktion fra Frankrig, der i Danmark nok ikke var blevet godkendt uden mineraluldsfyld omkring stålkonstruktionen.

Anvendelsen som BS-60-konstruktion kan enten være baseret på prøvning eller på en generel godkendelse. Derfor er det i praksis svært at sammenligne ligeværdige konstruktioner af stål og jernbeton med hensyn til brandsikkerhed og også med hensyn til ressourceforbrug.

Stålkonstruktionerne vil derfor i det følgende blive repræsenteret af GEAI-systemet, som vist i figur 7.3.0.1, som et grænsetilfælde. Da materialeforbruget både med hensyn til bæreevne- og brandkrav er minimeret meget kraftigt i dette system vil det energiforbrug, systemet repræsenterer, ligge under det lavest opnåelige under danske forhold.

7.3.1 Om konstruktionsminimering og lydtransmission

Også mellem disse to faktorer synes der umiddelbart at være en modstrid. Erfaringer med hensyn til lyd-isolation af plane konstruktionselementer har ført frem til en empirisk sammenhæng mellem middelreduktionstal og kvadratmetervægt, som normalt betegnes "vægtkurven" (se figur 7.3.1.1).

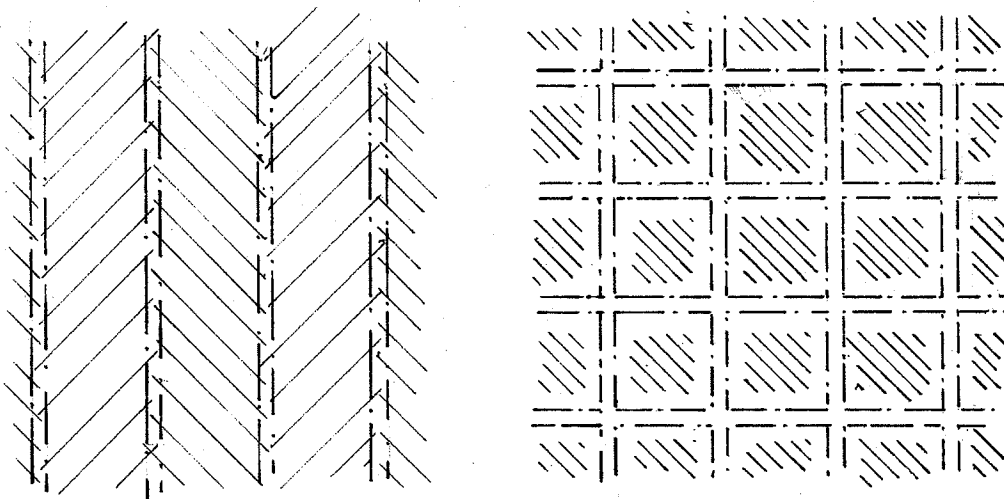
Af denne sammenhæng kan der f.eks. udtrækkes en minimumsvægt af massive vægge i lejlighedsskel, svarende til ca. 350 kg/m^2 . Hvor massive eller plane skal konstruktioner da være for at vægdkurven gælder?

I dette tilfælde er spørgsmålet relevant for både de foreslåede huldæk og krydsribbedækkene. Ingerslev og Kristensen påpeger i [60.0], at der for enkeltspændte ribbeplader, d.v.s. plader med ribber løbende i en retning alene, må regnes med en lydreduktion for pladen, svarende til den, man vil få ved at gå ind i vægdkurven med vægten af den tynde plade alene. At ribberne ikke giver anledning til nogen væsentlig lydreduktion herudover kan forklares delvist ved de undersøgelser, der er gjort i [77.0]. Her eftervises det, at udbredelsen af bygningslyden nok reduceres væsentligt i retningen på tværs af ribberne, men ikke nær så meget på langs af ribberne.

Middelreduktionstallet for luftlyd for enkeltspændte ribbeplader bliver derfor væsentligt ringere end for en massiv plade med samme vægt. Dette gør sig til dels også gældende for huldæk.

Går man over til krydsribbeplader forbedres lydreduktionen igen. Ved at lægge afstivende ribber i to retninger hindrer man for det første bygningslyden i at udbrede sig i den tynde overplade. Samtidigt bliver pladefelterne stivere ved den dobbelte indspænding.

En sådan forøgelse af stivheden har dog kun betydning ved lave frekvenser.



Denne forklaring er ikke hentet fra nogen kilde, men skal kort sandsynliggøres gennem de tilgængelige måleresultater.

I forbindelse med udviklingen af præfabrikerede krydsribbeelementer i beton, foretaget af det rådgivende ingeniørfirma Lemming & Eriksson, blev der foretaget lydmålinger i et prøvehus, hvor disse elementer blev benyttet som etageadskillelse [72.1].

Sammenholdes disse resultater med målingerne gengivet i [60.0], ses det ved at sammenligne med en massiv plade med samme vægt, at der kun sker en væsentlig forringelse af lydreduktionen, i området 1200-3000 Hz. (se figur 7.3.1.2).

Analoge sammenligninger mellem massive plader og enkeltspændte ribbeplader - henholdsvis hulplader - med omtrent samme vægt, er vist i figur 7.3.1.3.

Heraf ses det, at forringelsen af lydreduktionen allerede er synlig ved 300 Hz og opefter.

For krydsribbedæk bliver den manglende lydreduktion ikke kritisk, når vurderingsgrundlaget er den i BR-77 indførte I_a -værdi, mens den kan blive kritisk for enkeltspændte ribbeplader eller huldæk, idet sænkningen i lydreduktionstallet i forhold til det massive dæk, da også omfatter frekvensområdet 200-1000 H_z , hvor vurderingen af I_a -værdien er særlig følsom for ændringer af reduktionstal (se figur 7.3.1.4).

Der kan konkluderes, at der for krydsribbedæk ikke sker nogen forringelse af luftlydisoleringen i forhold til massive betondæk, bortset fra den vægtbetingede.

For enkeltspændte ribbeplader og huldæk sker der en forringelse, der for ribbepladernes vedkommende gør, at man nærmere må benytte vægten af den mindste pladetykkelse, når pladens lydreduktion skal bestemmes af "vægtkurven".

Med hensyn til trinlydisoleringen er det for rå betondæk lydudbredelsen ved de høje frekvenser, der er afgørende. Forsynes betonkonstruktionen med det svømmende gulv - det være sig blot et normalt opklodset brædegulv på strøer - da vil der blive tilført en væsentlig trinlydsdæmpning ved de høje frekvenser og det kritiske område med hensyn til I_i -bestemmelsen bliver da typisk frekvensintervallet 100-500 H_z (se figur 7.3.1.5).

Samme konklusion, som gælder for luftlydisolation, gælder da også for trinlydisolation, når alle etageadskillelser forsynes med et svømmende gulv.

Trægulv på strøer giver også en forbedring af luftlydisolationen, men i de fleste tilfælde af minimal størrelse (0-3 dB). Et svømmende gulv som trægulv, udlagt på et kontinuert mineraluldslag giver en forbedring af luftlydisolationen af samme størrelse som det opklodsede trægulv.

Hvis man vil forøge reduktionstallet væsentligt, må man benytte tungere svømmende gulve, f.eks. asfalt- eller betongulve, udlagt på mineraluld. Derved kan der opnås forbedringer på op til 10 dB [79.0].

Ønsker man ikke at forøge etageadskillelsens vægt væsentligt, må man benytte nedhængte lydisolerende lofter, hvis en væsentlig luftlydisolationsforbedring skal opnås.

En sådan ekstra-konstruktion kan udføres på mange måder. Denne ekstra lydisolering vil i de senere nævnte alternative modelbygninger blive skønnet ud fra det kildemateriale, der er angivet, hvilket også gælder den nødvendige brandisolering.

Med hensyn til stålkonstruktioner vælges det også her at bruge det omtalte GEAI-system som repræsentant for stålbygninger.

Generelt bestemmes luftlydisolationen ud fra vægtkurven for den rå konstruktion alene.

Angående vægge er der benyttet godkendte vægtyper både til lette skillevægge og lejlighedsskel, som de er beskrevet i brochurer for gipspladevægge og porebetonvægge.

Endelig kan der nævnes, at erstatningen af bærende vægge med søjler og lette ikke-bærende vægge med rigtigt udførte samlinger vil kunne nedsætte flanke-transmissionen i vertikal retning generelt.

7.3.2 Om konstruktionsminimering og opførelse

Når der sættes focus på opførelsen af bygninger af jernbeton vil de mulige metoder ligge mellem to yderpunkter for præfabrikationsgrad.

Der er på den ene side det totalt præfabrikerede råhussystem, hvor opførelsen da er begrænset til montage af færdige elementer.

På den anden side er der den "traditionelle" støbe-metode, hvor alle bærende bygningsdele støbes med forme, som fremstilles til lejligheden.

Derimellem ligger der et utal af muligheder, hvor der anvendes præfabrikerede forme, enkelte præfabrikerede bærende elementer eller hvor der eventuelt anvendes permanente forme.

Ud fra energimæssige betragtninger er der fire faktorer, der væsentligst spiller en rolle i en sammenligning af disse metoder:

- a) Forskellen i akkumuleret energiforbrug til fremstilling af betonelementer og udstøbt beton
- b) Forskellen i energiforbrug til udtørring af betonelementer og in situ-beton
- c) Energiforbruget til fremstilling og opstilling af formmateriale
- d) Forskellen i energiforbrug til vinterforanstaltninger for betonelementer og in situ-beton

Når der fokuseres på materialeforbruget, og dermed indirekte energiforbruget, bliver det først og fremmest den statiske virkemåde af konstruktionen, f.eks. graden af kontinuitet af de bærende, vandrette konstruktioner, der er afgørende.

Øget kontinuitet i de bærende konstruktioner kan betyde væsentlige materialebesparelser og kan bedre opnås i en betonkonstruktion, støbt in situ, end i et præfabrikeret system. Til gengæld kan man generelt forvente en bedre materialekontrol og dermed en bedre udnyttelse af materialeegenskaberne i præfabrikerede elementer.

Et eksempel på det sidste er udviklingen af et nyt vibreringssystem, som kan sænke cementforbruget i betonelementproduktionen med 30-50% [79.1].

Man ser, at det er en speget affære, hvor det er meget svært at sige noget afgørende om konsekvenserne for ressourceforbruget, når man vælger en bestemt opførelsesmetode.

I de tidligere gennemførte beregninger (afsnit 7.1 og 7.2) vælges der derfor at gøre følgende forudsætninger:

- 1) For referencesystemet (normalt betonelementsystem) er opførelsesprocessen den kendte med montage, fugeudstøbning og kunstig udtørring. Fundamentene er sribefundamenter
- 2) For de andre to systemer arbejdes der med to metoder:
 - en analog metode til den ovenfor beskrevne blot med punktfundamenter
 - en metode, hvor der anvendes præfabrikerede søjler, der støbes sammen med in situ støbte dækplader. I begge tilfælde støbes de afstivende vægge in situ inden resten af bygningen opføres. Også i dette tilfælde anvendes punktfundamenter.

Når der skal tages hensyn til energiforbrug - som resultat af punkterne a-d - benyttes værdier fra [79.2], som er gengivet i tabel 7.3.2.1.

	Præfab. konstruktioner	In situ-konstruktioner
a) [79.2]	Der henvises til afsnit 3.9 i [79.2]	Der henvises til afsnit 3.4 i [79.2]
b) [80.1]	25 kWh/ton	45 kWh/ton
c) [80.1]	0	10 kWh/m ² form
d) [80.1]	Der henvises til afsnit 4.3 i [80.1]	Der henvises til afsnit 4.3 i [80.1]

Tabel 7.3.2.1

Skal opførelsen bedømmes ud fra andre kriterier, hvilket i denne sammenhæng er mindre relevant, kan det blandt andet påpeges, at en konstruktionsminimering oftest vil medføre lettere konstruktionselementer og derigennem mere beskedne krav til montagegrej, transportkøretøjer m.m.

Dette gælder naturligvis kun hvis elementstørrelsen ikke øges ved en konstruktionsminimering. Alene p.g.a. transporten sættes der for præfabrikerede elementer grænser for elementstørrelsen. Man må således, når de valgte søjleplade-bygningers spændvidder overstiger spændvidder på 3.6 m, normalt fremstille dækelementerne på feltfabrik ved byggepladsen, da transport ad almindeligt vejnet da ikke længere er tilladt.

Løsninger, hvor elementerne fremstilles i mindre enheder og spændes sammen, vælges det her at se bort fra, og der gøres den forudsætning, at energiforbruget til fremstilling af præfabrikerede elementer på en feltfabrik, er det samme som på en fast fabrik.

Denne forudsætning er nødvendig for at kunne gennemføre undersøgelsen uden også at skulle foretage undersøgelse af energiforbruget i feltfabrikker.

7.3.3 Om konstruktionsminimering og installationsføring

Med udgangspunkt i installationernes føringsveje og optimering af disse kan en bygnings optimale form og struktur fastlægges ud fra lignende betragtninger, som i [75.0], afsnit 6.

Idet installationernes fremstilling og brug normalt resulterer i energiforbrug af mindre størrelsesorden i forhold til de øvrige energiforbrug skal en sådan optimering kun uddybes ganske lidt her.

Trækkes der paralleller til distributionsnet, som for det plane tilfælde er behandlet i [75.0], kan man betragte en boligbloks installationer, som et distributionsnet i tre dimensioner. Ligesom i det plane tilfælde vil energiforbruget forbundet med installationerne i løbet af en fastsat levetid da bestå af et anlægsenergiforbrug og et driftsenergiforbrug.

I [75.0] sandsynliggøres der, hvorledes driftsenergiforbruget dominerer i hovedledningerne, mens anlægsenergiforbruget dominerer i de små forgreninger fra hovednettet. En optimering med hensyn til energiforbruget vil ud fra disse antagelser resultere i et trækronelignende fordelingsnet i det plane tilfælde.

Et sådant modelnet må blive endnu mere "rigtigt", når det tredimensionale net skal optimeres.

Konsekvensen heraf vil betyde kernebygninger, hvor boligerne udgør kugleagtige skaller omkring centrene for hovedforsyningsledningerne, altså bygninger, der er meget forskellige fra den modelbygning, der betragtes.

En fastlæggelse af bygningsgeometrien ud fra installationsmæssige kriterier er som tidligere indiceret nok et indgreb, som direkte vil få mindre indflydelse på energiforbruget, og som indirekte kan ødelægge for eksempel overfladeøkonomien m.m. En videre behandling af dette emne vil til dels ske i afsnit 8 i hovedrapporten [80.0].

Af relevans for den benyttede modelbygning er således kun, hvorledes fornuftige føringsveje i forbindelse med de foreslåede byggesystemer kan etableres. Deles installationerne op i vandrette og lodrette installationsføringer kan der gøres nogle generelle kommentarer til mulighederne i forskellige byggesystemer.

Der kan principielt anføres, at der alt andet lige ikke er nogen væsentlig forskel i mulighederne for føringsveje mellem præfabrikerede og in situ-betonkonstruktioner. Ligeledes giver alle de valgte systemer ens muligheder for installationsføringer i facaden.

Ønskes der en slags installationskerne, som kunne nærme sig til et installationsnet, som beskrevet ovenfor, kan dette gennemføres i alle de valgte systemer, når der tages hensyn hertil i den indledende projektering. En væsentlig forskel viser sig imidlertid ved videreførelsen af installationerne, idet de vandrette føringer hindres i langt højere grad af bærende tværvægge end af lette ikke-bærende skillevægge. Muligheden for at føre installationer i selve væggene er de samme, når der er tale om planlagte installationer, mens ændringer alene kan komme på tale ved lette skillevægge.

Bliver man - f.eks. p.g.a. lydhensyn - nød til at etablere et nedhængt loft, vil dette udvide installationsføringsmulighederne, mens føringsmulighederne under gulve er ens for alle konstruktioner, undtagen for det bærende tværvægssystem.

Med hensyn til de lodrette føringer begrænses mulighederne af, hvormeget af etageadskillelsen, der kan undværes til bærende formål.

Da har især ribbepladerne fordele, idet pladefelterne kun tjener sekundære, bærende funktioner og dermed kan fjernes næsten uhindret.

For enkeltspændte dækelementer er der meget snævrere begrænsninger i hvor og hvor store gennemføringer, der kan tillades, uden at skulle indføre flere understøtninger. Dette kan lettere lade sig gøre i de massive dobbeltspændte dæk, men kræver da en del ekstraarmering.

Der er således visse forskelle i de bærende konstruktionssystemer, der får indflydelse på mulighederne for installationsføringer, og dermed indirekte på de energiforbrug, som blev beskrevet i begyndelsen af dette afsnit.

7.3.4 Om konstruktionsminimering og planløsning

Det område, hvorpå konstruktionssystemets form får størst indflydelse er nok boligens planløsning eller rumforløbet i boligen. Anderledes end i de traditionelle énfamiliehuse, hvor planløsningen er med til at diktere den bærende konstruktion, vil konstruktionsprincipper i etageblokke lægge op til bestemte planløsninger eller direkte begrænse mulighederne for rumudformningen. Det er derfor nødvendigt at vurdere, om alternative konstruktionssystemer medfører urimeligheder med hensyn til planløsning og rumudformning.

For det almindelige tværvægsbyggeri, d.v.s. det, der her kaldes referencesystemet, er planløsninger mulige ud fra anvendte normer, idet systemet jo er benyttet flittigt i byggeriet i dag.

Alternativet, som i dette tilfælde er et søjlepladesystem med lette skillevægge, er noget mindre benyttet - i hvert fald i forbindelse med boliger.

Det viser sig bl.a. at være et spørgsmål om, hvorledes søjleafstanden indvirker på mulighederne for en acceptabel planløsning. Ligeledes bliver muligheden for at tilslutte skillevægge til loftet af vital betydning, især for pladesystemer med ikke-plane undersider.

Der findes i Danmark boligbyggerier i flere etager, hvor det bærende system består af hovedsageligt søjler og plader af jernbeton. I disse byggerier, f.eks. [79.3], er spændvidden - eller søjleafstanden - normalt 4,5 - 6 m. Der skulle derfor kunne konkluderes, at med søjleafstande over 4,5 - 6 m, er der ingen væsentlige problemer med hensyn til indpasning af lejlighedsplaner i det bærende system.

For at kunne give et udsagn om mulighederne, når søjleafstanden er mindre end 6 m har arkitekt m.a.a. Frits Gravesen, IFH, bistået med en undersøgelse af planløsninger inden for modelbygningens rammer og med de nævnte konstruktionssystemers begrænsninger.

I denne undersøgelse indgik krydsribbedækkene i en form, som senere beskrevet i afsnit 7.2, de såkaldte isostatdæk.

Som det ses er disse også valgt som sammenligningsgrundlag i de senere beregninger af ressourceforbrug. Disse valg er gjort for at få den konstruktive yderlighed, som ligger i isostatdækkene med i betragtningerne. Med hensyn til almindelige krydsribbedæk så kan de indgå under samme forudsætninger, som isostatdækkene i konstruktionssystemet.

Frits Gravesens "pilotundersøgelse" sigtede dels på at opnå acceptable, nutidige planløsninger og dels opnå acceptable lejlighedsstørrelser i sammenligning med de normer, som gælder for alment boligbyggeri.

De skillelinier, der naturligt opstod i det bærende system med hensyn til ruminddeling, var først og fremmest bjælker og ribber, men også fuger mellem elementer. Sammen med søjlernes dominerende virkning gav det dog generelt ingen virkelig ubrugelige rammer for indretningsmulighederne.

Med den begrænsning, som lå i modelbygningens søjleplacering, nemlig at spændvidderne på langs og på tværs af bygningen var ens, viste det sig, at kra-

vene til rumstørrelse og lejlighedsstørrelse bedst kunne tilgodeses, når spændvidderne var multimplum af ca. 3 m, og at der ikke opstod generende bindinger p.g.a. det bærende system, selvom spændvidden altså var så lille som 3 m.

En anden konklusion var, at selv om isostatdækkene tilførte bygningen et utraditionelt mønster, så kunne dette mønster i en simplificeret form bruges til at forme rumforløb og lejlighedsformer, som i virkeligheden var mere fleksible og åbne med hensyn til rumstørrelser og -kombinationer, end et normalt tværvægsmønster.

Ud fra en arkitektonisk synsvinkel viste det sig i øvrigt, at de utraditionelle mønstre, som opstod i isostatdækkene naturligt ledte frem til andre bygningsstrukturer, end den i modelbygningen anvendte.

Disse kan komme i konflikt med andre minimeringsstræbelser, f.eks. overfladeøkonomiseringen af bygningen (se side 51 og figur 7.3.4.1).

Dette behøver imidlertid ikke at være tilfældet, men det understreger i hvor høj grad minimeringsstræbelser må foregå ved betragtning af alle væsentlige aspekter.

Hvis alle aspekter inddrages, og man opnår en minimeret løsning, vil man imidlertid med stor sandsynlighed opnå arkitektonisk optimale løsninger (jvf. afsnit 7.1.1.).

Fleksibiliteten i de valgte systemer er naturligvis afhængig af spændvidden, således at man opnår større fleksibilitet med voksende spændvidde med hensyn til indretningsmuligheder.

Ved store spændvidder vil fleksibiliteten i planlægningsfasen i de forskellige systemer være omtrent ligeværdige, mens man ved små spændvidder vil finde størst fleksibilitet i søjlepladesystemerne også med hensyn til ændringer af rumbegrænsninger i beboelsestiden.

7.3.5 Sammenfatning

Betragtes alle de indtil nu nævnte funktionskrav under én hat, danner der sig et broget billede af fordele og ulemper ved at benytte forskellige systemer i modelbygningen.

For på en eller anden måde at gøre disse fordele og ulemper mere overskuelige, er der lavet en grov vurdering i figur 7.3.5.1, hvor fordele og ulemper er vist ved +/÷.

Dette er naturligvis en ret unuanceret betragtningsmåde, men kan godt forsvares i dette tilfælde, hvor ressourceforbruget er det væsentlige.

Vurderingerne over muligheder for materiale- og energibesparelser bygger på udredelserne i tidligere afsnit 7.0.3.

Som det ses af figur 7.3.5.1, er det mest positivt vurderede system, det tredje, valgte system, krydsribbepladerne hvilende på søjler og afstivet af få koncentrede skivesystemer.

Af disse overvejelser kan der konkluderes at:

De i afsnit 7.2 beregnede ressourcebesparelser ved at vælge alternative bærende systemer i forhold til referencesystemet kan opnås uden at sænke niveauet for de nødvendige funktionskrav til bygningen.

Litteratur

- [60.0] Frits Ingerslev og Jørgen Kristensen:
"LYDISOLATION I BOLIGBYGGERI"
SBI-rapport 39, Teknisk Forlag,
Danmark 1960.
- [68.0] M.S. Abrams:
"COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE
AT TEMPERATURES TO 1600 F"
ACI, SP-25,
USA 1968.
- [69.0] G. Bastue Christensen:
"LETMETALLER 1 - ALUMINIUM, MAGNESIUM OG
DERES LEGERINGER"
Forlaget Ivar,
Danmark 1969.
- [70.0] "500 LOGEMENTS H.L.M IN ROUEN, SYSTEME
INDUSTRIALISÉ GEAI"
Bauen und Wohnen no 4, april 1970,
Schweiz 1970.

Samtale med Georg Rothne, Instituttet
for Byggeteknik, Kunstakademiet, marts 1979.
- [72.0] T.T. Lie:
"FIRE AND BUILDINGS"
Applied Science Publishers Ltd,
England 1972.
- [72.1] "RAPPORT OVER MÅLING AF LYDISOLATION
I KONTORHUS"
Byggeriets akustiske målestation, SBI,
Danmark 1972.
- [75.0] Erik Reitzel og H.F. Mathiassen:
"ENERGI, BOLIGER, BYGGERI"
Fremad,
Danmark 1975.
- [77.0] Jørgen Kristensen:
"LYDISOLATION I BETONBYGGERI"
SBI-rapport 101, s. 8 og 11,
Statens Byggeforskningsinstitut,
Danmark 1977.
- [79.1] "DANISH PRECAST PROCESS USES LESS CEMENT"
Concrete Products, februar 1979,
USA 1979.
- [79.0] Jørgen Kristensen m.fl:
"BYGNINGERS LYDISOLERING"
SBI-anvisning 112, s. 27-32,
Statens Byggeforskningsinstitut,
Danmark 1979.

- [79.2] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG
VED FREMSTILLINGEN AF BYGGMATERIALER"
Rapport nr. 134,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1979.
- [79.3] "ET NYT OG SPÆNDENDE SOCIALT
BOLIGBYGGERI FOR ALLE ALDRE"
Arkitekt- og Byggebladet DPA, april 1979,
Danmark 1979.
- [80.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG
VED FREMSTILLING AF BOLIGER"
Rapport nr. 137,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.
- [80.1] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN",
Rapport nr. 135,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.

7.4 KONKLUSION

Målet med denne rapport har været at undersøge, om man gennem materialeminimering af råhuskonstruktionen kan opnå energi- og ressourcebesparelser, først og fremmest i anlægsfasen.

For den rene bærende konstruktion - isoleret betragtet - kan spørgsmålet besvares med et klart ja. Der viser sig endda temmelig store potentielle besparelser.

Tages der hensyn til boligens øvrige funktionskrav vil især de potentielle energibesparelser reduceres kraftigt. Det skyldes først og fremmest den stærke binding, der består mellem "anlægsenergi" og "driftsenergi". Materialeminimeringer kan således resultere i besparelser i anlægsfasen, men i forøgede forbrug i driftstiden.

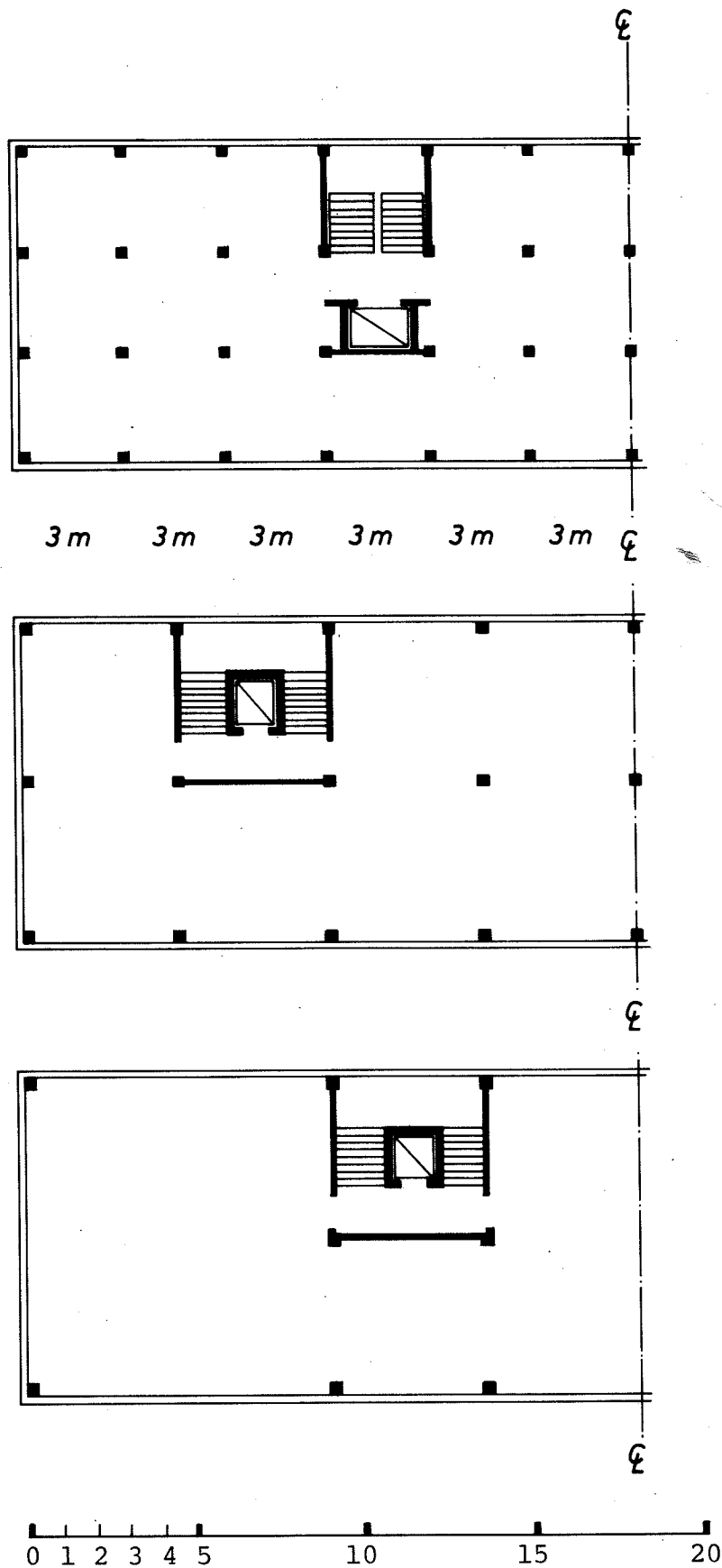
Analysen viser dog, at der med normale opvarmningsmetoder er energibesparelser at hente - i denne analyse et energiforbrug svarende til to års varme-forbrug eller 0,8% af boligens samlede energiforbrug over 50 år. De største potentialer ligger i en generel anvendelse af jernbeton som konstruktionsmateriale i råhusets bærende dele, kombineret med råhussystemer bestående af søjler, helt eller delvist monolitiske bjælke-plade-konstruktioner og lette facader og skillevægge. Denne råhussammensætning er specielt energiøkonomisk ved spændvidder mellem 3 og 4,5 m. Ved spændvidder mellem 4,5 og 7 m er det normale betonelement-system lige så energiøkonomisk. Søjlekonstruktionen forudsættes koncentreret omkring trappeopgange.

En yderligere minimering af konstruktionerne viste sig i denne analyse ikke at være fordelagtig med hensyn til energibesparelser. Konstruktionsminimeringen, der består i en speciel krydsribbeløsning for de vandrette bærende dele, benævnt isostatplader, kan dog have stor ressourcebesparende og energibesparende effekt, hvis spændvidden er bundet til intervallet 8-10 m (i forspændt form formodentlig helt op til 12-14 m). I sådanne tilfælde vil energi- og materialebesparelserne forbundet med denne konstruktion formodentlig falde sammen med væsentlige økonomiske besparelser.

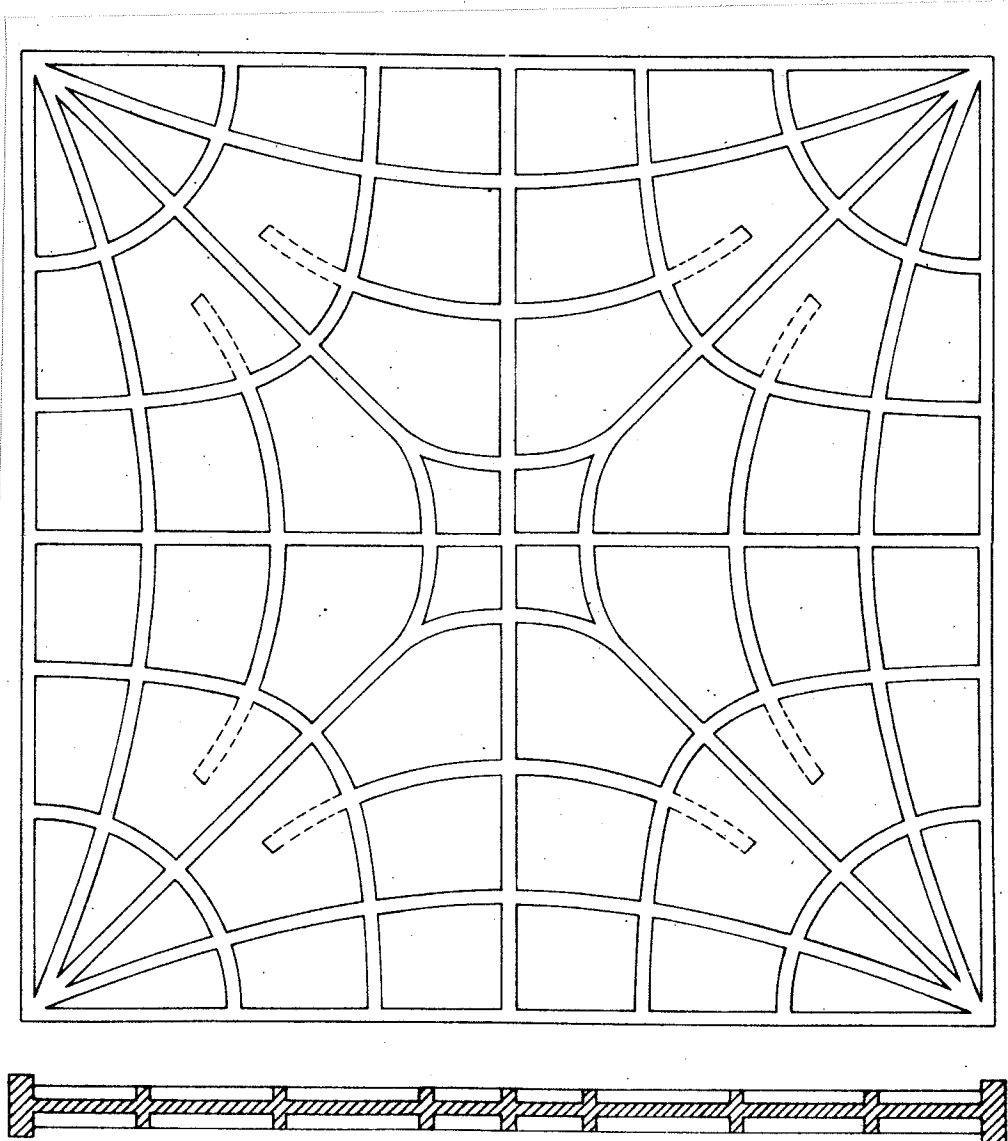
Der viste sig i analysen heller ingen besparelsemuligheder i at anvende in-situ støbning i stedet for præfabrikation. Dette afhænger dog af så mange forskellige faktorer, som f.eks. årstid, produktion og byggepladsledelse, at spørgsmålet er betydeligt sværere at give udsagn om, end de tidligere nævnte besparelsemuligheder.

Der skal til slut anføres, at i de tilfælde, hvor der gøres særlige anstrengelser for at udnytte råhuskonstruktionerne til varmeakkumulering i boligen, bliver grundlaget for denne rapport ændret betydeligt. I sådanne tilfælde kan det forudses, at skivekonstruktioner vil give større muligheder for energibesparelser totalt set.

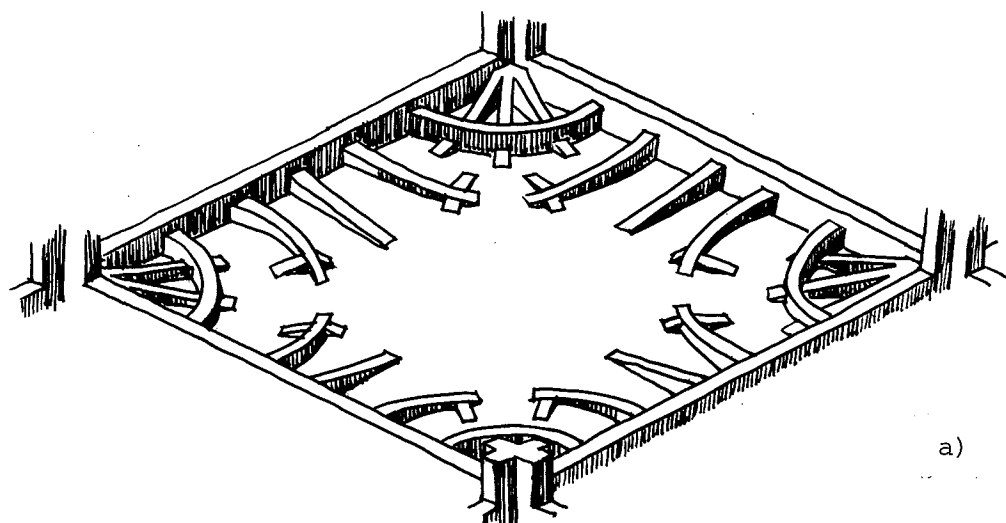
Se endvidere sammenfatningen af afsnit 7.1.



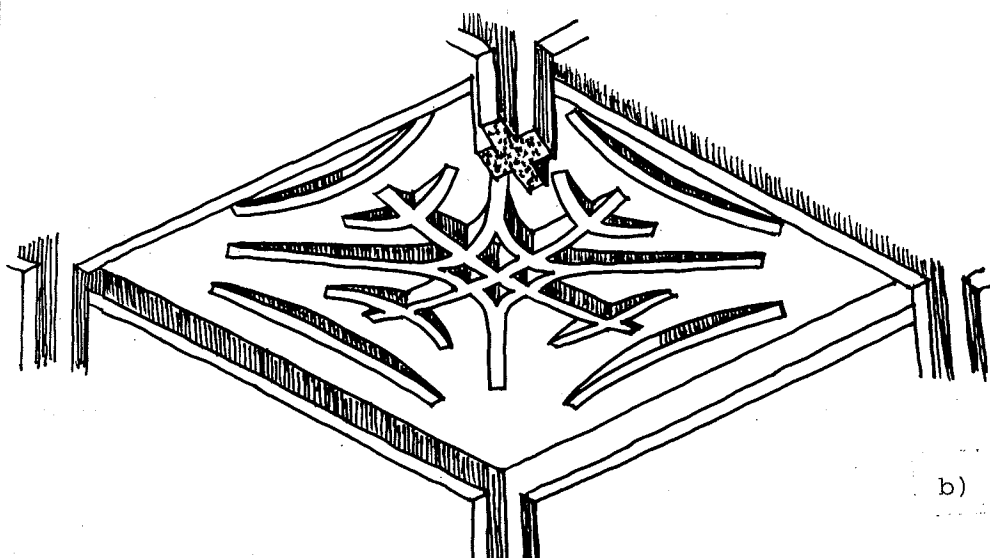
Planer af modelbygningen med tre forskellige spændvidder. Søjle-/pladesystem.



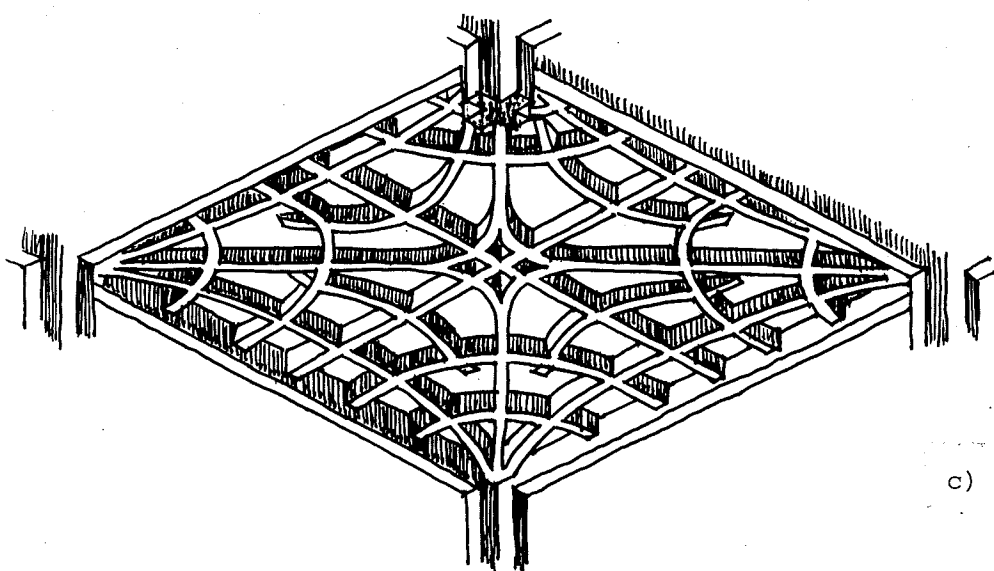
Figur 7: Færdigberegnet ribbeforløb.
I Edb-beregningerne er det forudsat at ribberne er
symmetriske omkring pladens symmetriplan.



a)

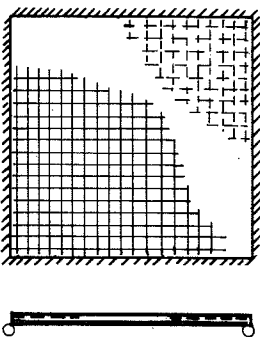
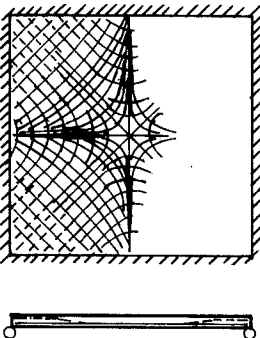
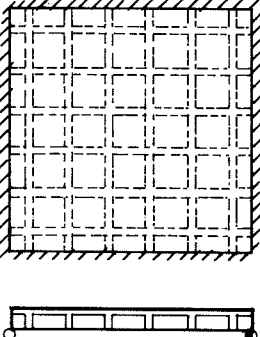
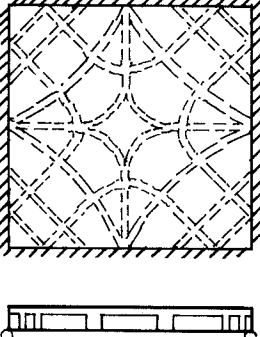


b)

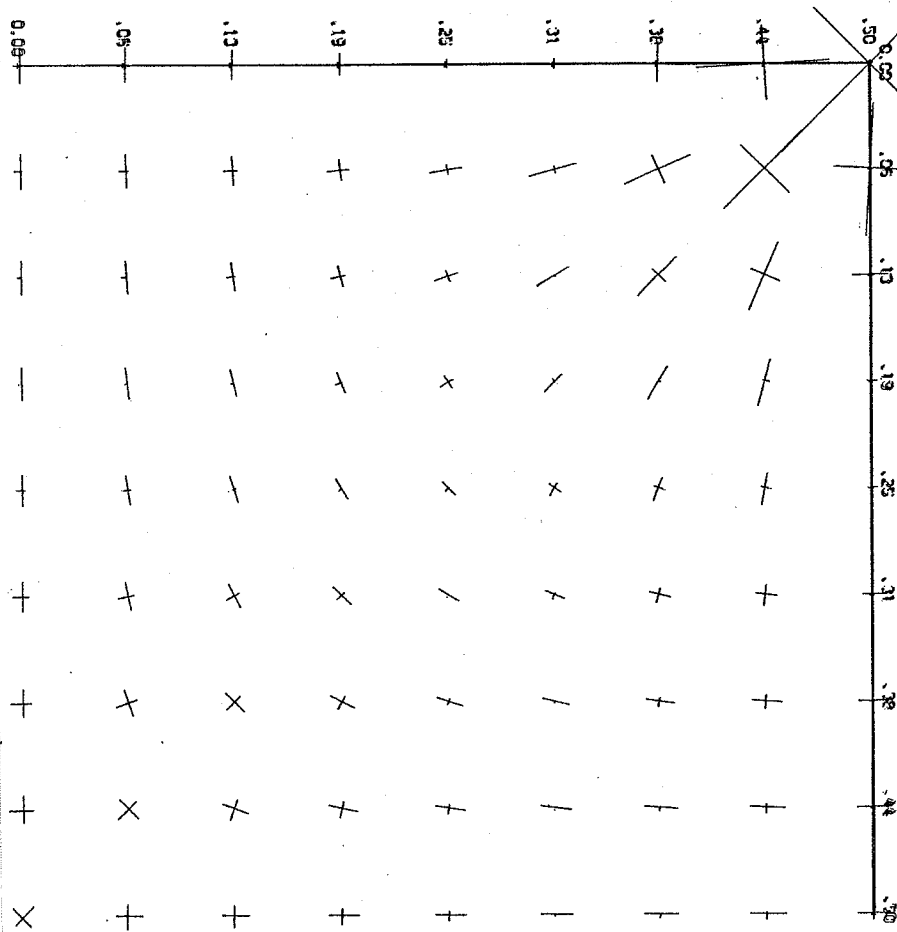
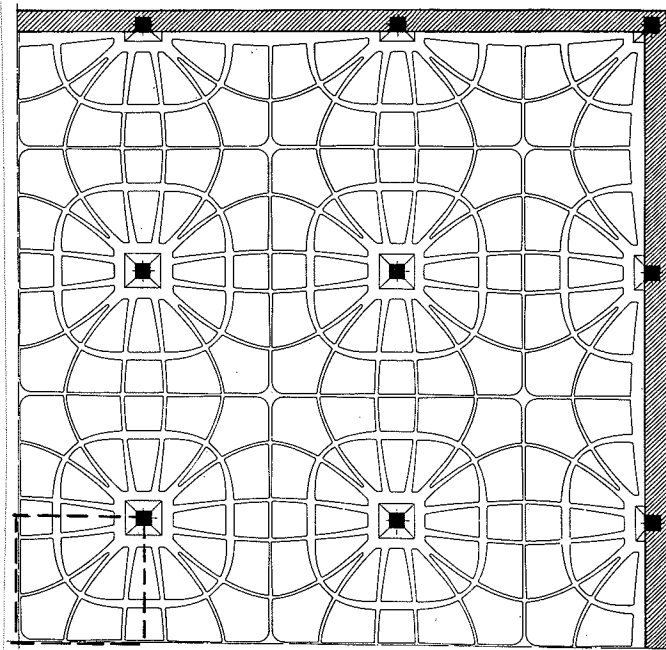


c)

Figur 8: Ribbeforløbet optegnet perspektivisk.
a) er oversiden og b) undersiden hvis ribbehøjden afpasses efter momenternes størrelse og retning.
c) er undersiden hvis der kun benyttes undersideriber.

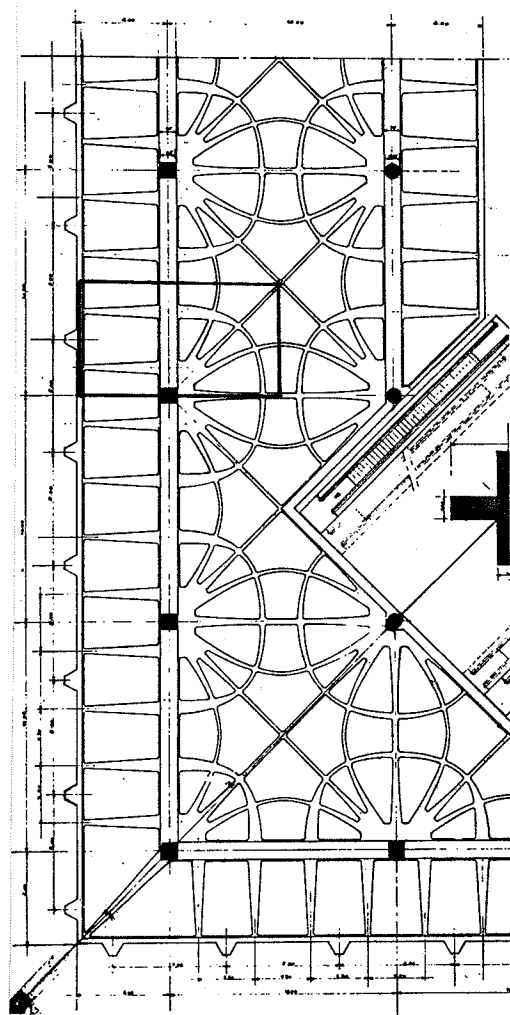
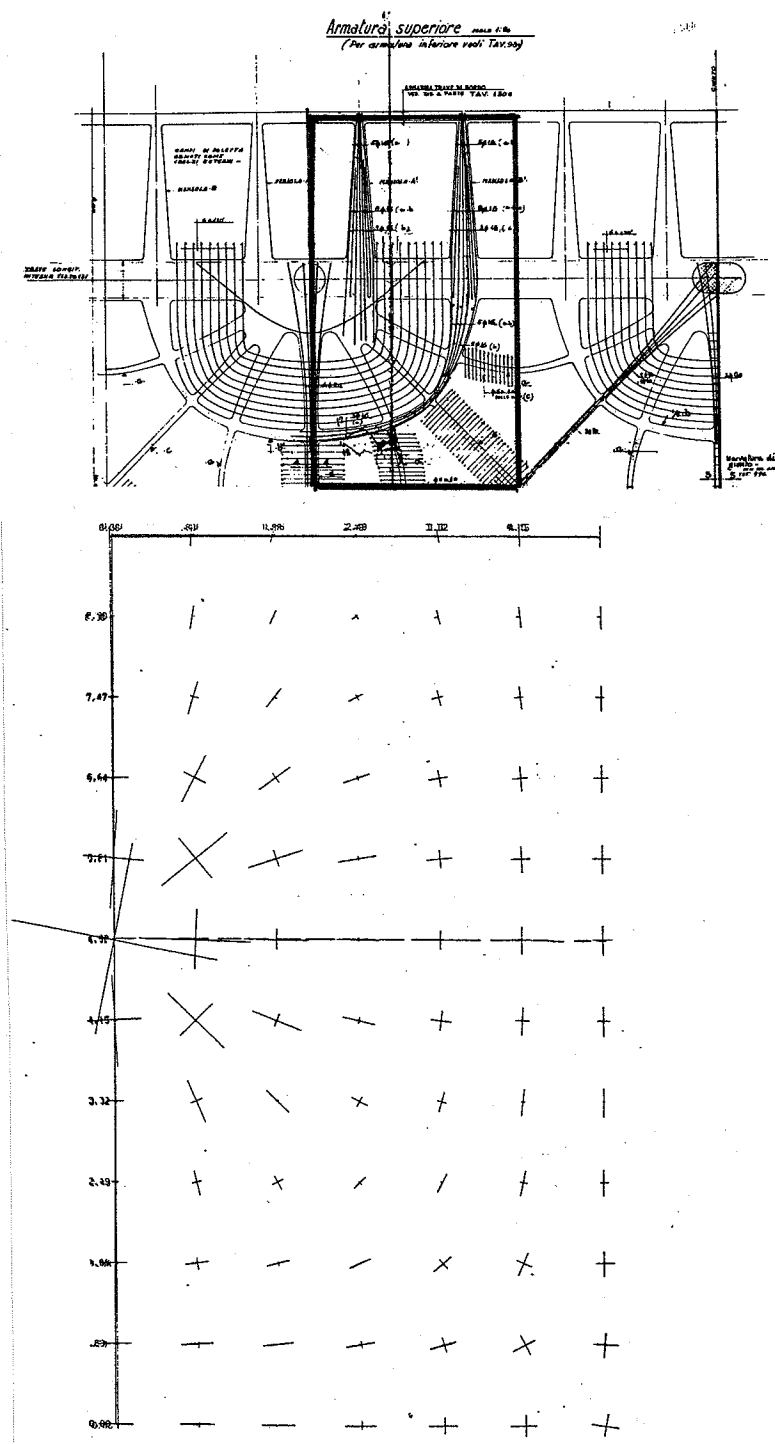
PLADE	Beregningsmetode	Beskrivelse	Ressourcer
	BRUDLINIETEORI $M_F = \frac{1}{24} q l^2$	pladetykkelse 12 cm, underside- armering K8 pr. 24 cm i.b.r., oversidearmering K6 pr. 20 cm, for- ankring 30 cm.	BETON 276 KG ARMERING 5.06 KG
	ELASTICITETS- TEORIEN $M_{MAX} = 0.048 q l^2$	pladetykkelse 12 cm, armering K8, forankring 30 cm, opbøjet armering i hjørnerne.	BETON 276 KG ARMERING 3.87 KG
	STRIMMELMETODEN $M_{MAX} = \frac{1}{16} q l^2$	pladetykkelse 5 cm, ribbehøjde 20 cm, armering K12 plus Ø3 pr. 12 cm i.b.r., for- ankring 40 cm.	BETON 204 KG ARMERING 3.84 KG
	ELASTICITETSTE- ORIEN $M_{MAX} = 0.048 q l^2$	pladetykkelse 5 cm ribbehøjde 0-20 cm armering K10 plus K5 pr. 28 cm i.b.r forankring 40 cm	BETON 202 KG ARMERING 3.30 KG

Figur 9: Materialeforbrug til ligeværdige simpeltunderstøttede, kvadratiske plader. (Spændvidde 5 m)



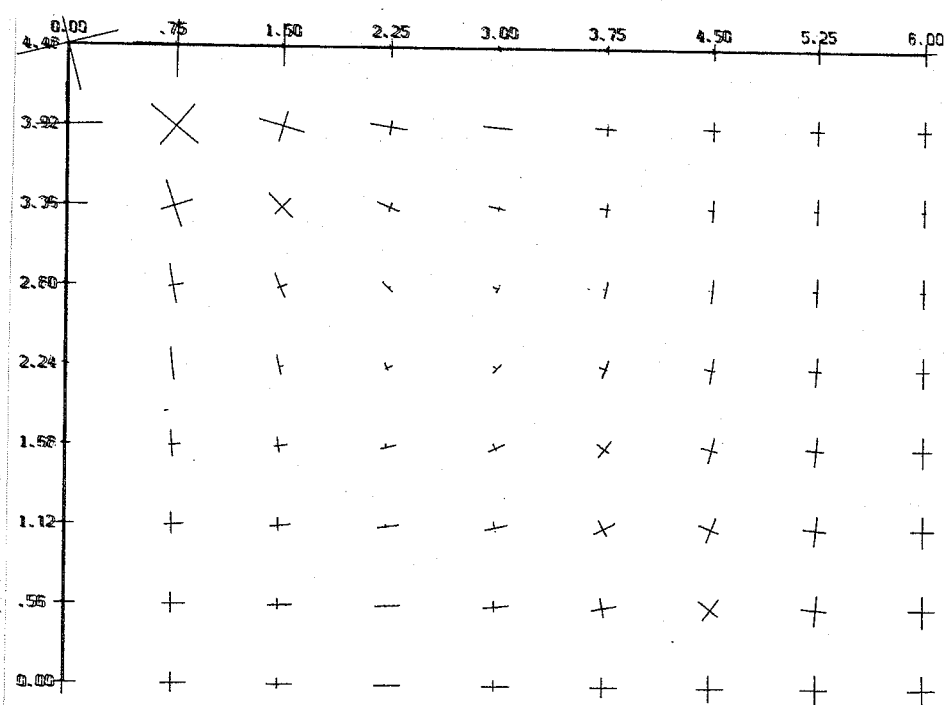
Figur 7.1.1.1:

Ribbeforløbet i Gatti-uld fabrikkernes tagplader og den beregnede hovedmomentfordeling for det betragtede tilfælde, kilde [65.0].



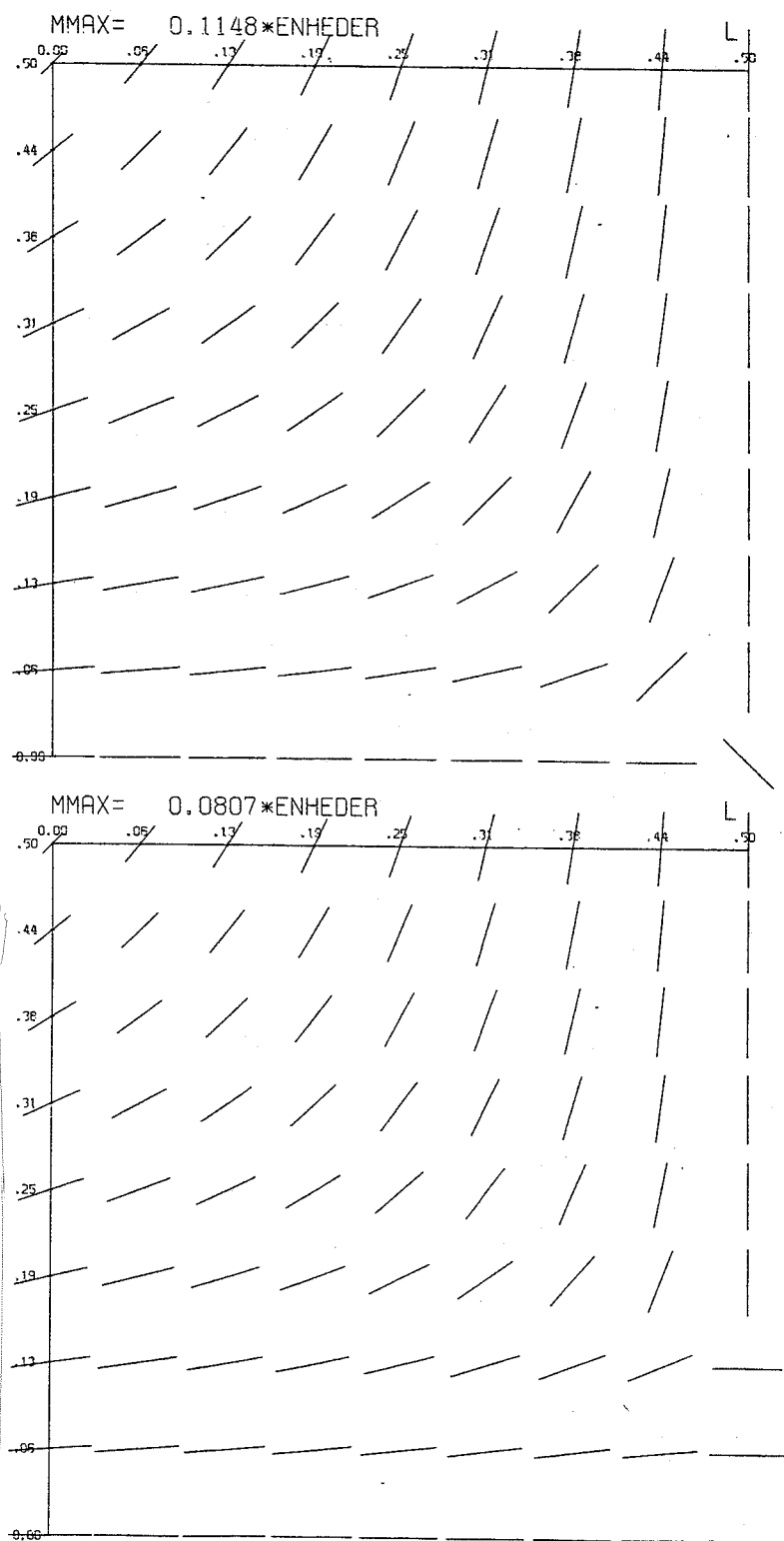
Figur 7.1.1.2:

"Isostatdækkene" i Pallazo del Lavarro i Torino og de tilhørende hovedmomentfordelinger, beregnet som omtalt i afsnit 7.1.4.[65.0].



Figur 7.1.1.3:

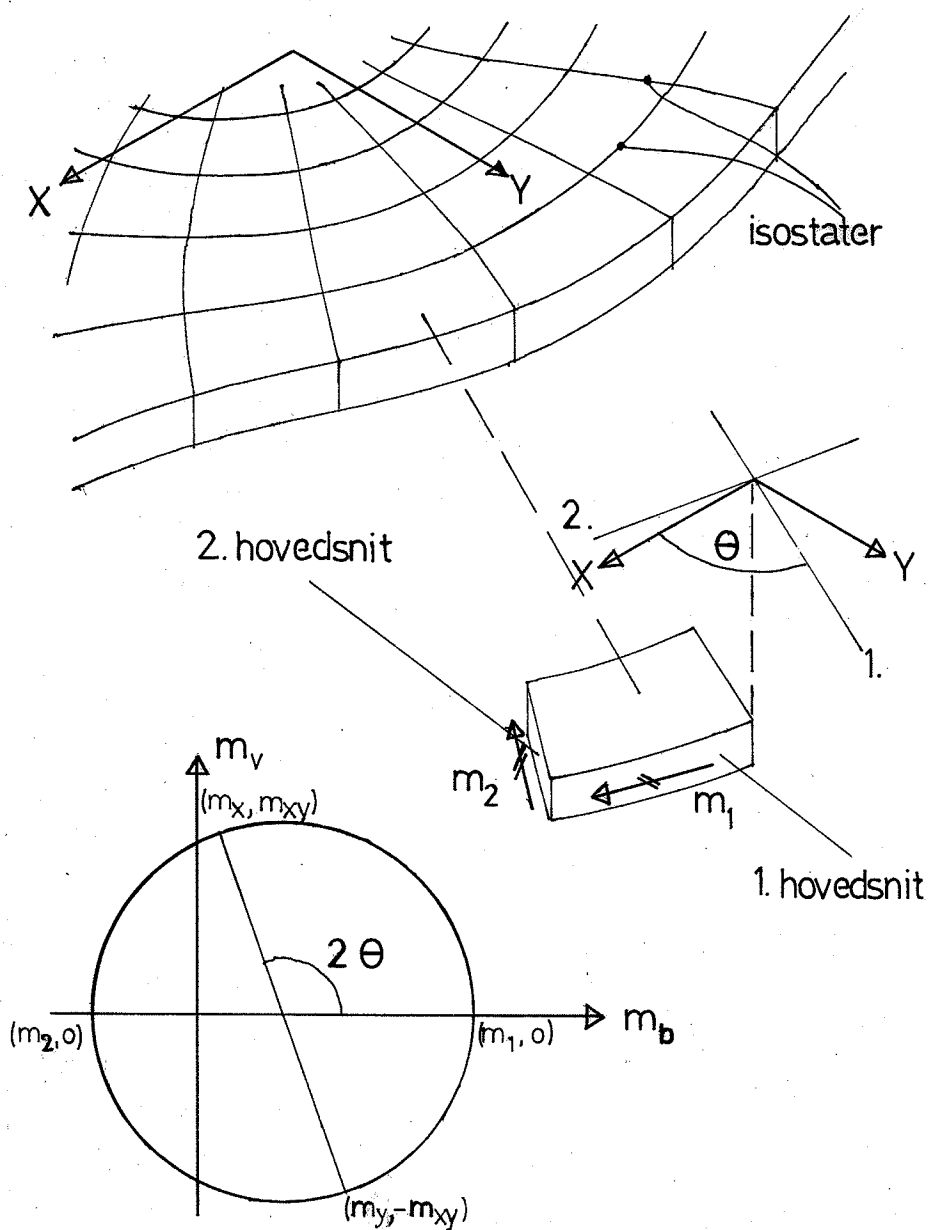
Kupoldækkene i en tobakslagerbygning i Bologna og de tilsvarende momentfordelinger for pladefeltet, beregnet efter skønnede randbjælkestivheder [65.0].



Figur 7.1.2.1:

Hovedmoment l for en kvadratisk plade med randbjælker belastet med

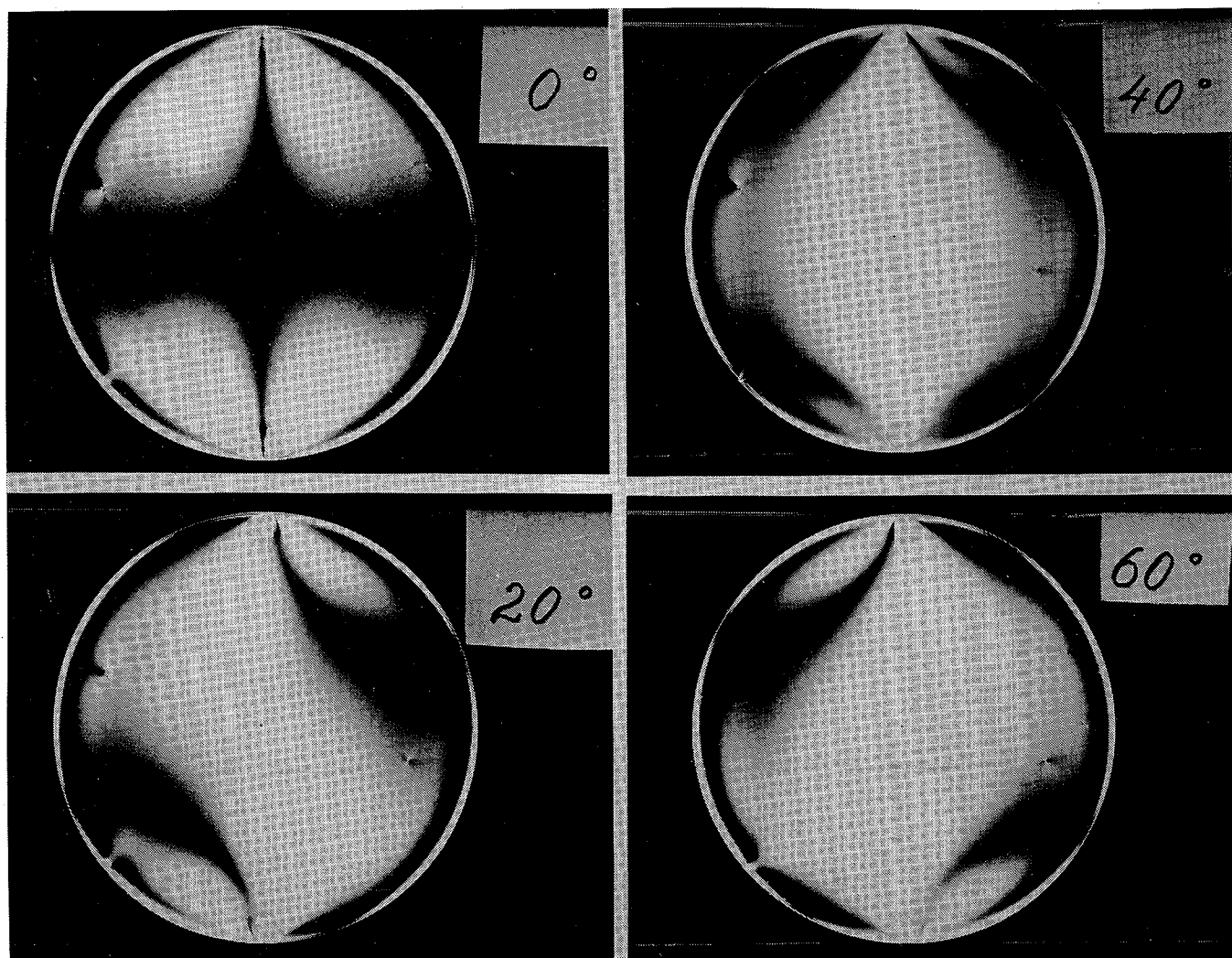
- a) jævnt fordelt last
- b) jævnt fordelt last i et bælte på midten



m_b er bøjningsmoment og m_v er vridningsmoment.

Figur 7.1.3.1:

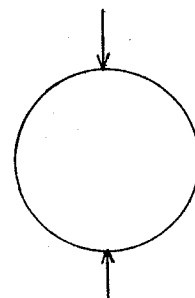
Mohr's grafiske metode til fastlæggelse af hovedmomenter og -retninger.

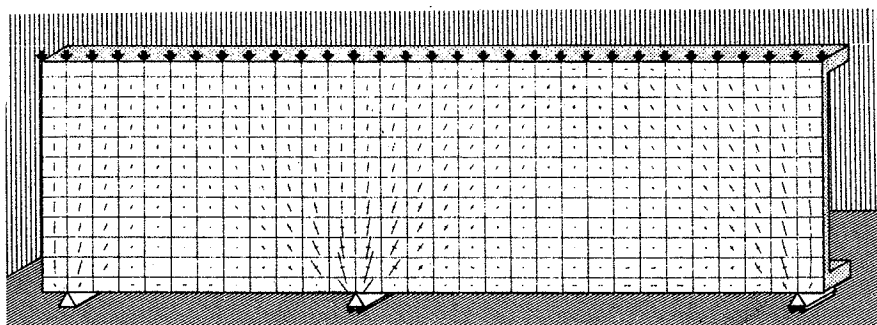


Figur 7.1.4.1:

Spændingsbillede af en trykpåvirket skive, hvor polarisationsfiltrene er drejet α° i forhold til lodret og vandret. De skarpt aftegnede linier er de såkaldte isokromater, linier, der sammenkæder punkter, hvor $\sigma_1 - \sigma_2 = n \cdot k$.

De bredere og mere udflydende linier er isoklinerne, som sammenkæder punkter med samme hovedspændingsretning, som polarisationsfiltrene. Anvendes der hvidt lys, som lyskilde vil isokromaterne fremtræde med deres tilsvarende ($n \cdot k$ bestemmer bølgelængden) komplementærfarve, og man kan tydeligt adskille isokromater og isokliner, der stadig vil være sorte linier. Kilde [76.0].

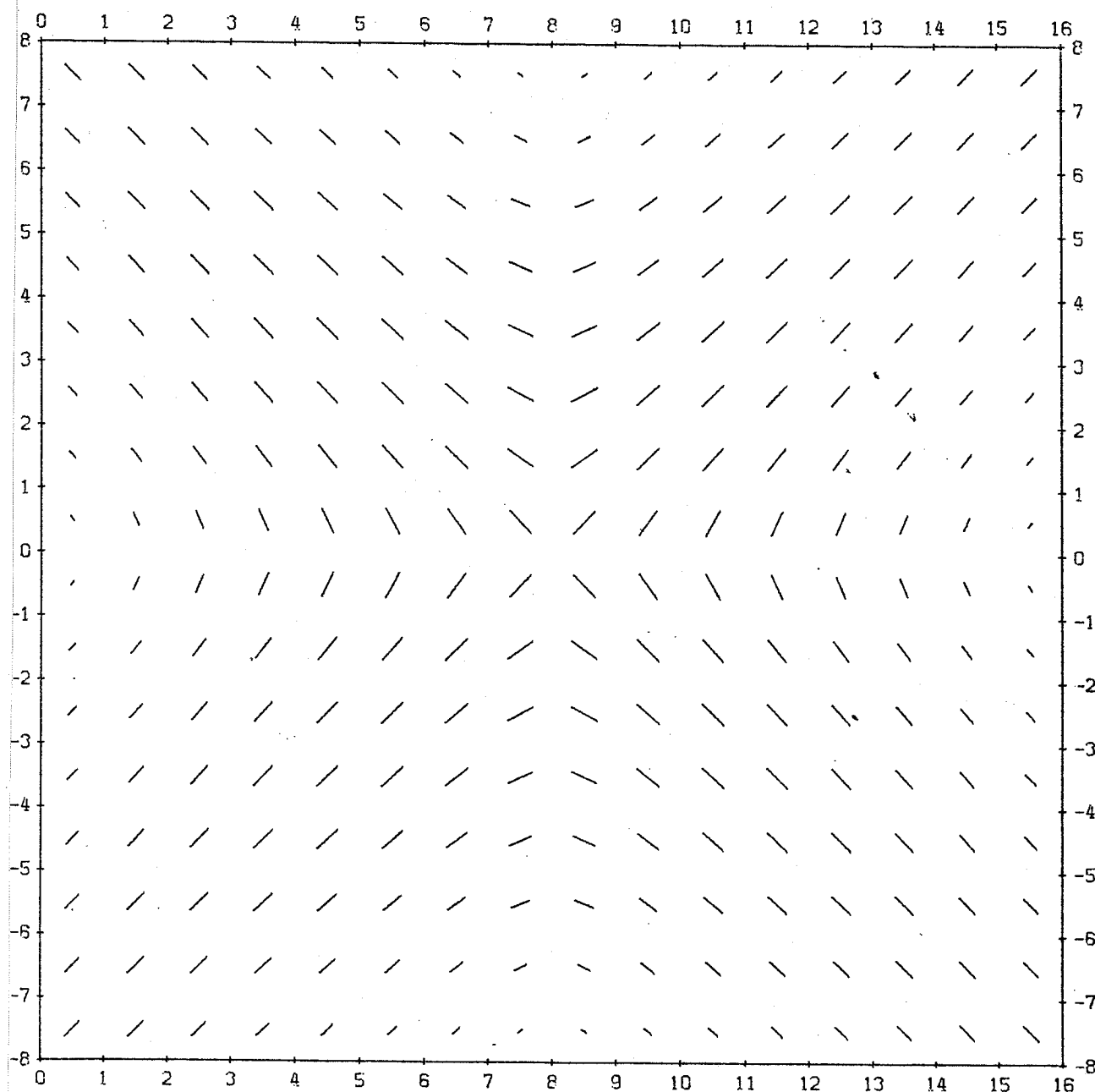




Figur 7.1.4.2:

Visualisering af hovedspændinger i en skive, beregnet og plottet ved hjælp af SERFEM [74.0]. Analoge faciliteter for plader findes i PREFEM.

0 1 2 3 4 cm

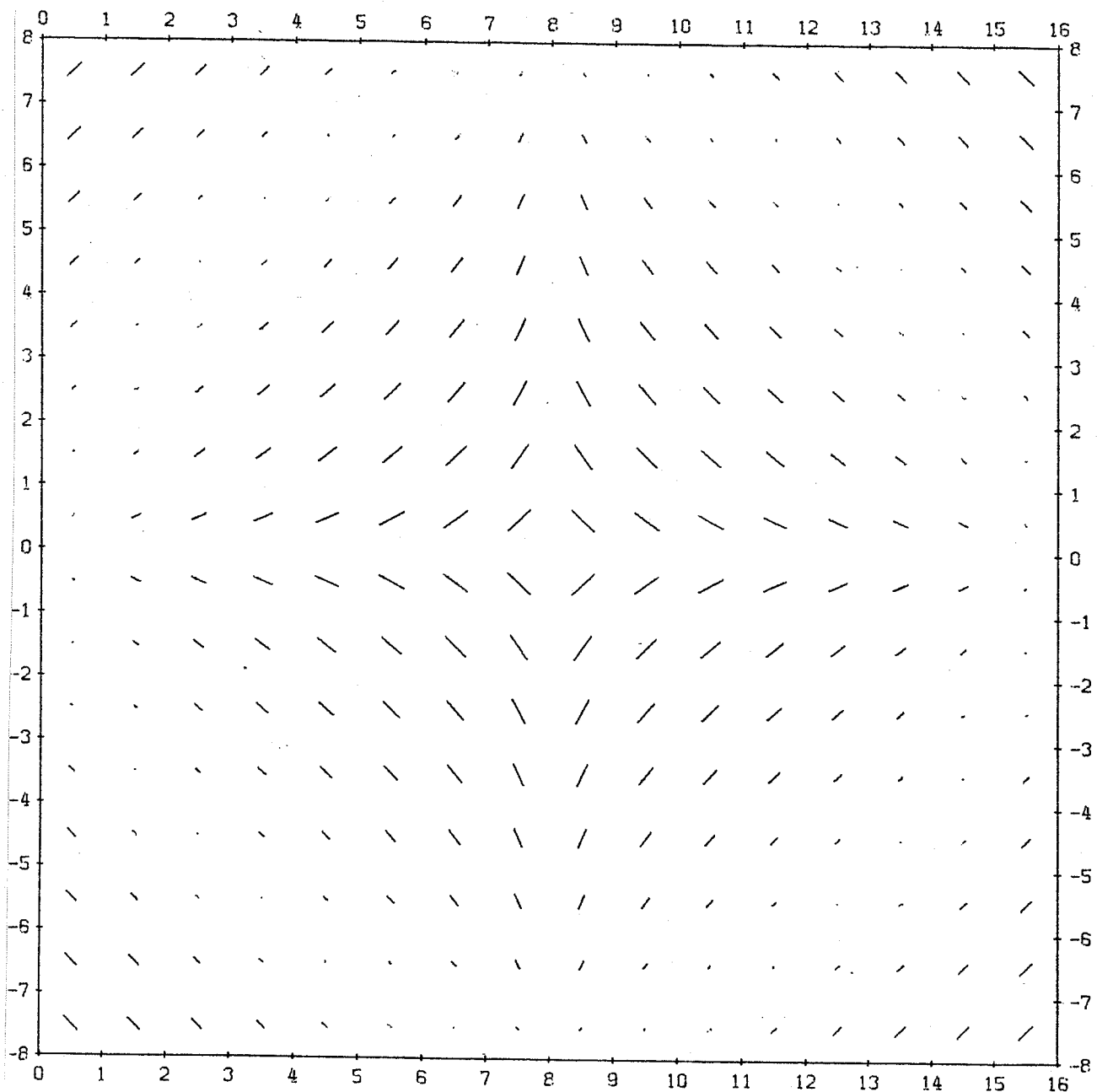


Figur 7.1.4.4:

Visualisering af 1. hovedmoment, størrelse og retning efter en analytisk beregning af en simpelt understøttet plade.

hovedmoment, størrelse og retning

0 1 2 3 4 cm

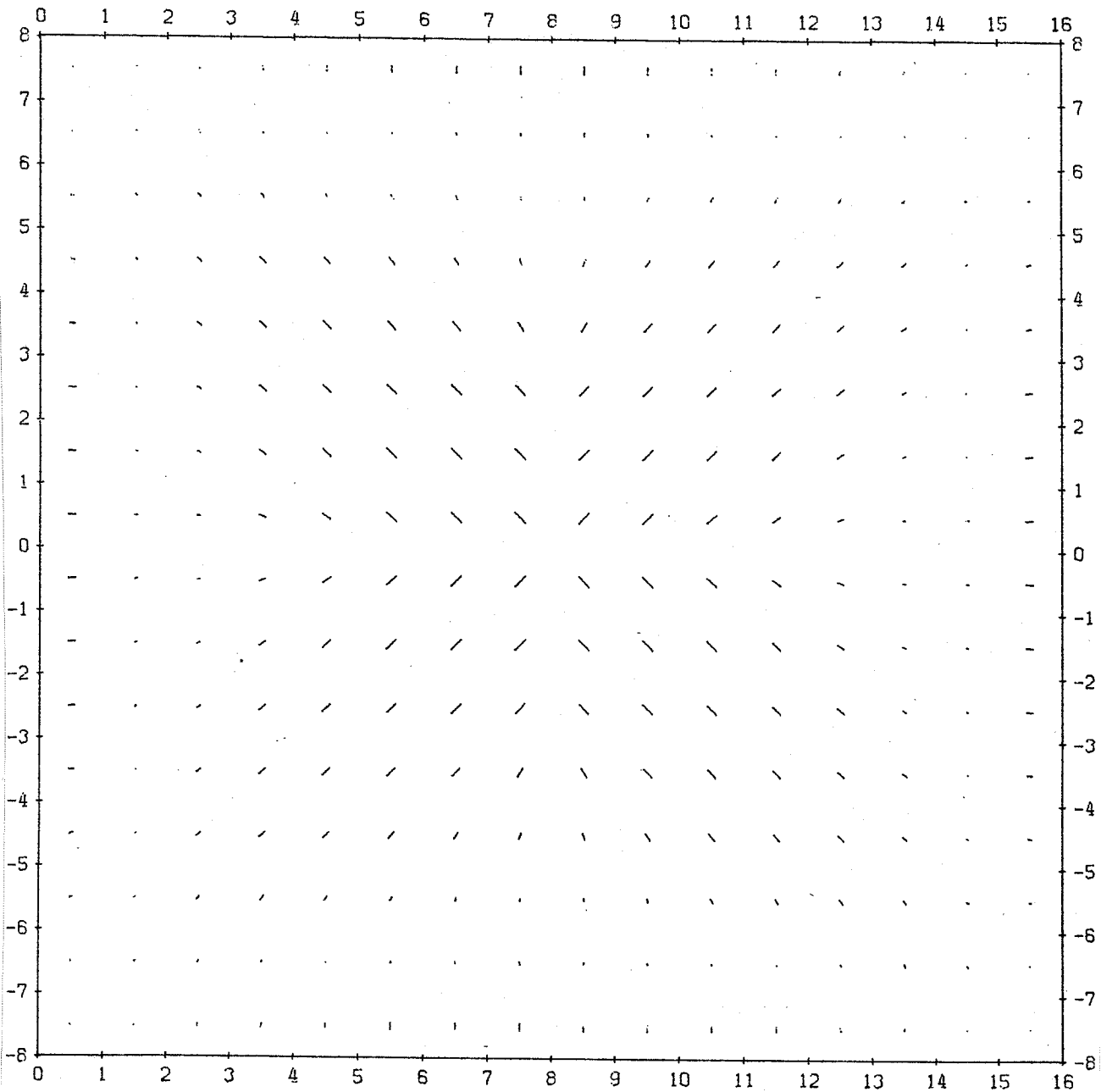


Figur 7.1.4.5:

Visualisering af 2. hovedmoment, størrelse og retning efter en analytisk beregning af en simpelt understøttet plade.

0 1 2 3 4 cm

0 1 2 3 4 cm

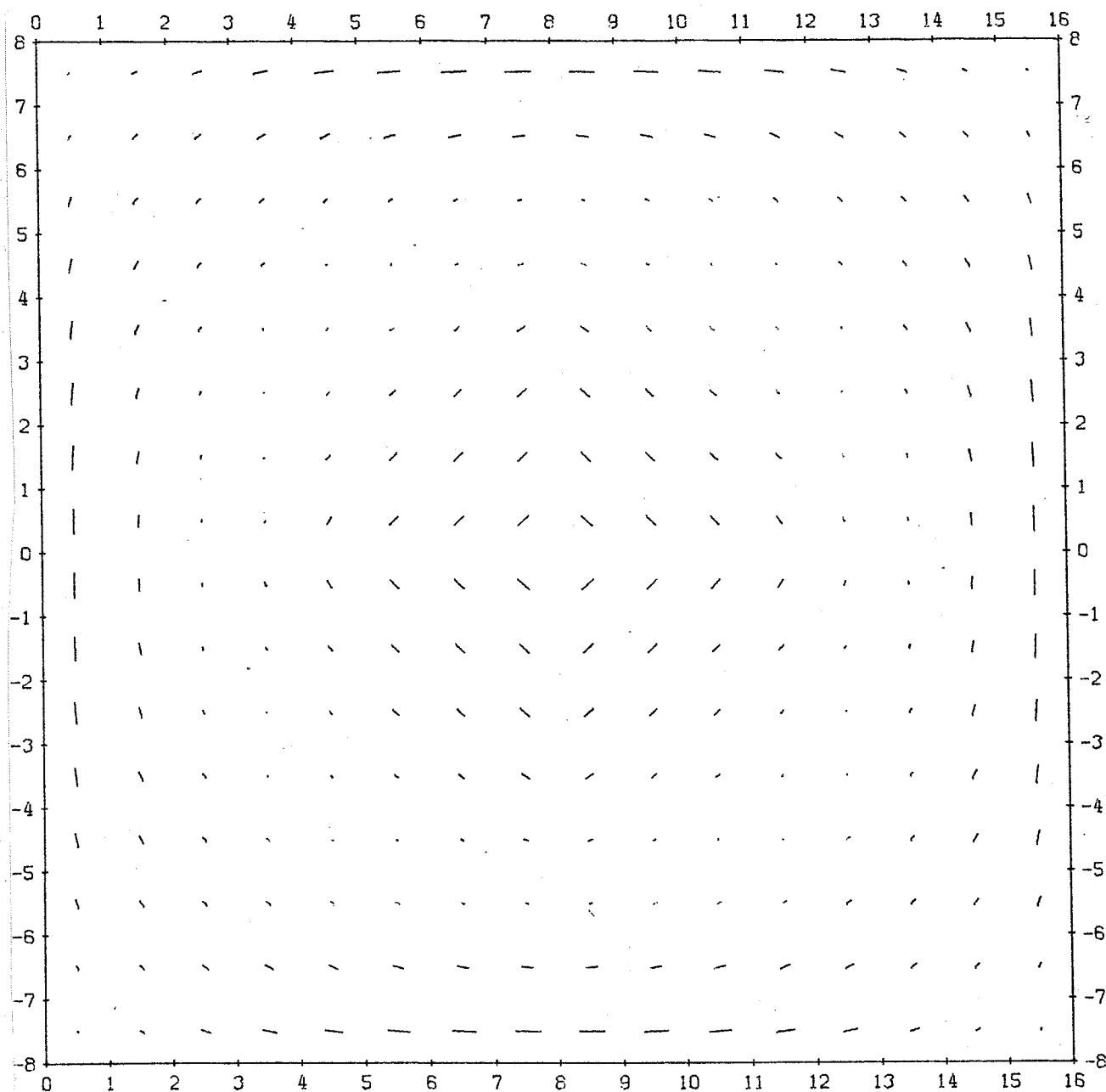


Figur 7.1.4.6:

Visualisering af 1. hovedmoment, størrelse og retning efter en analytisk beregning af en fuldt indspændt plade.

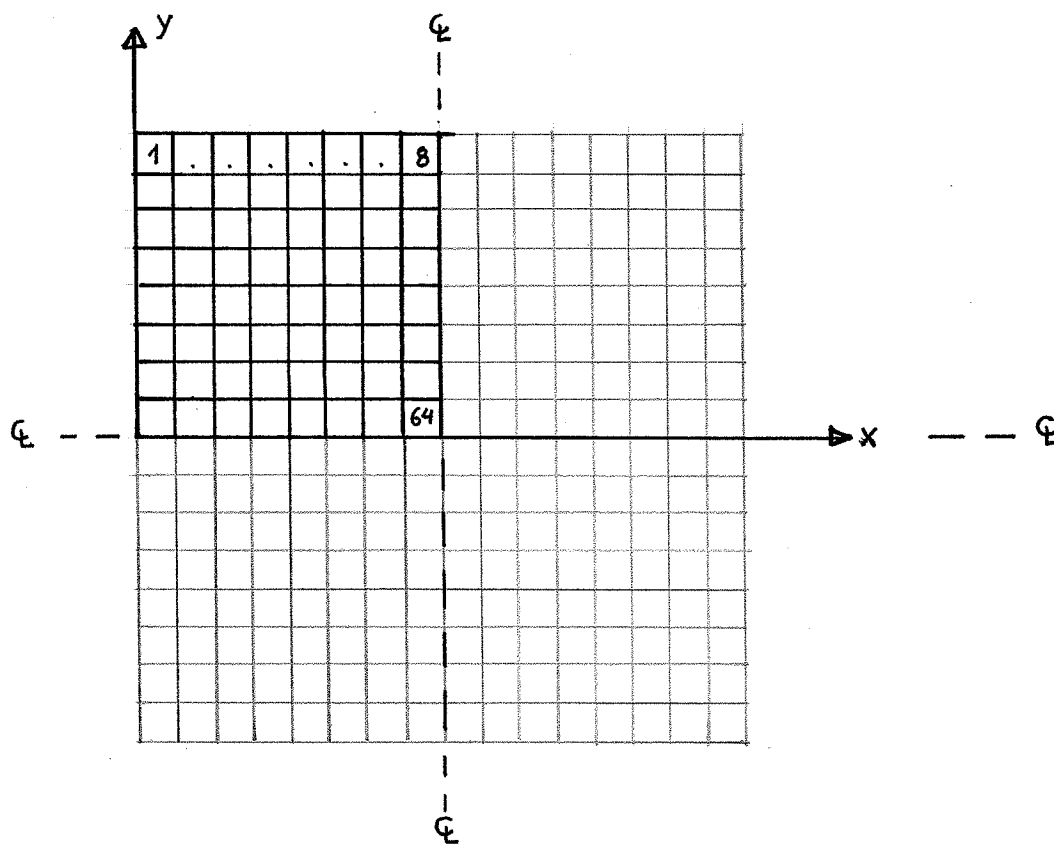
Visualisering af 2. hovedmoment, størrelse og retning

0 1 2 3 4 cm



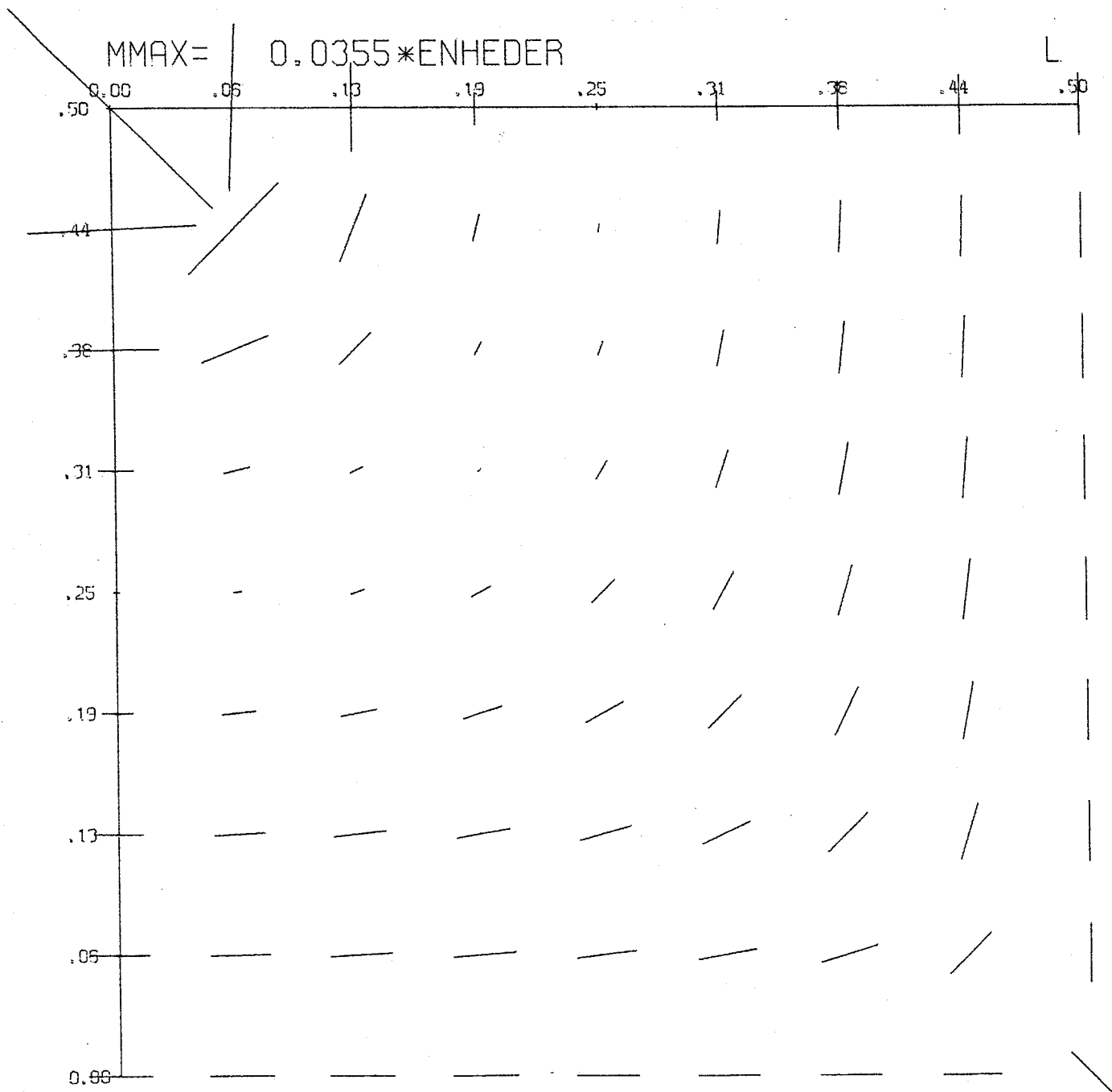
Figur 7.1.4.7:

Visualisering af 2. hovedmoment, størrelse og retning efter en analytisk beregning af en fuldt indspændt plade.



Figur 7.1.4.8:

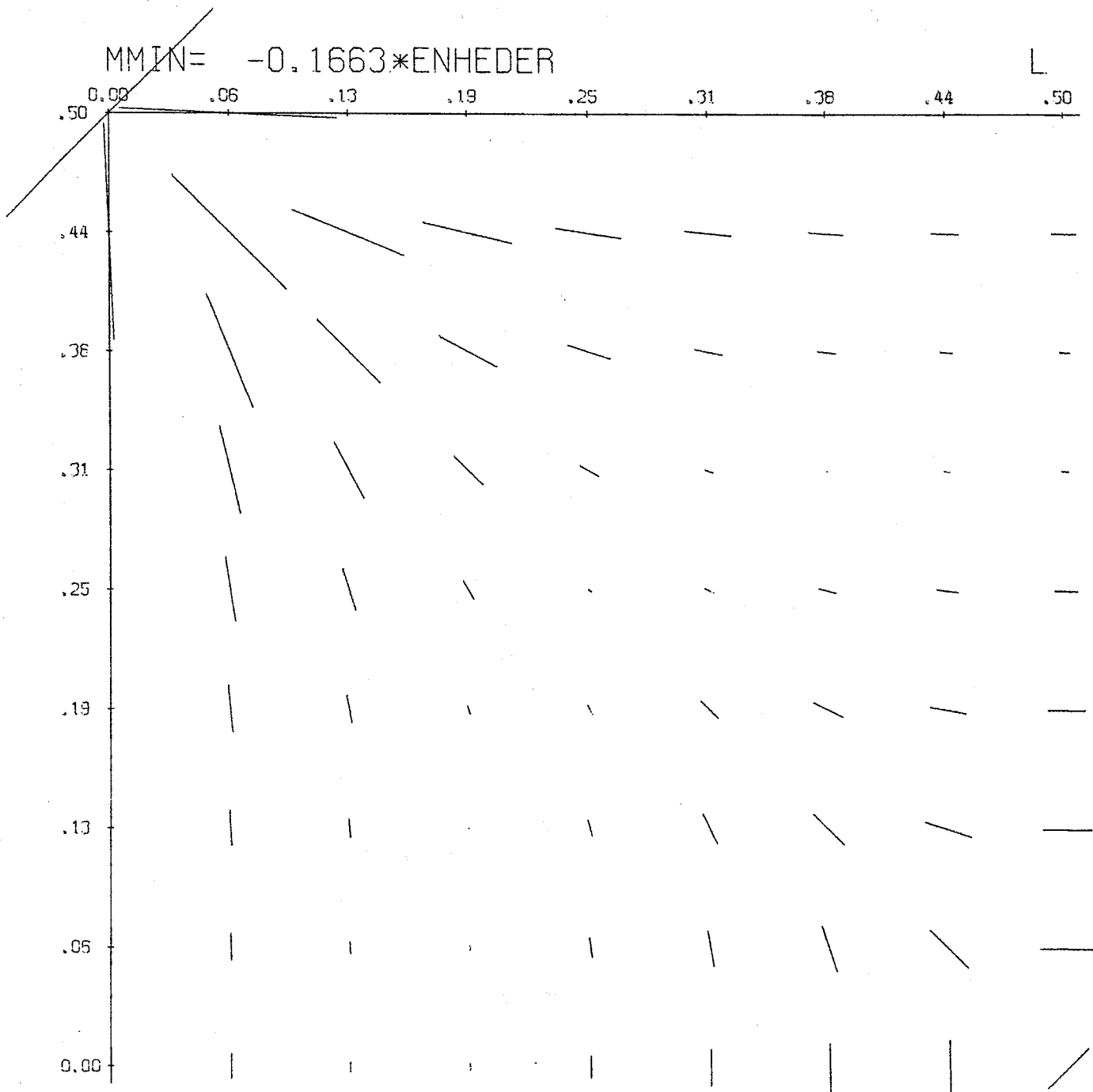
Elementopdelingen i de behandlede pladetilfælde.



Figur 7.1.5.1:
1. hovedmoment.

Målestok

0 1 2 3 4 5 cm

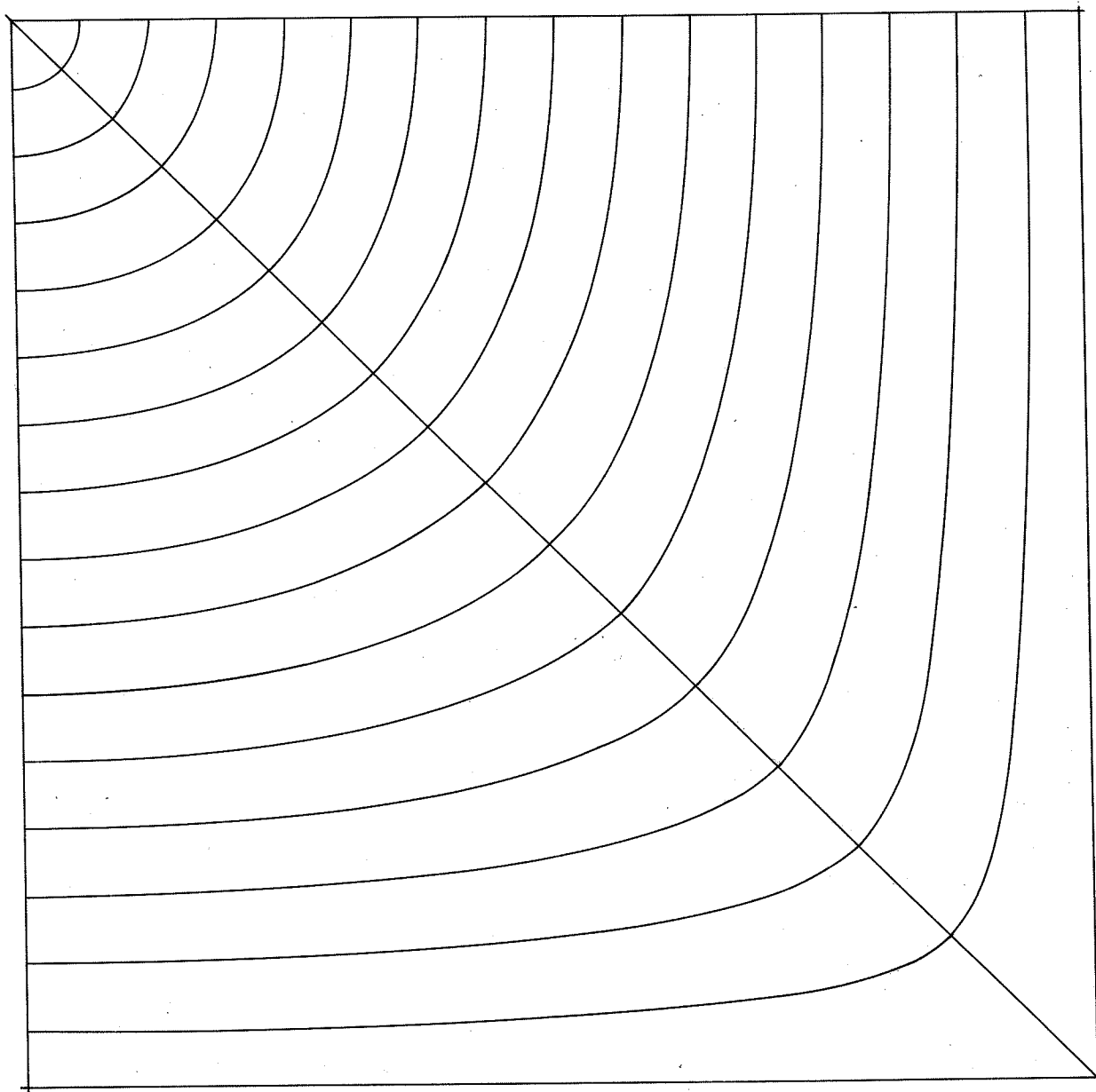


Figur 7.1.5.2:
2. hovedmoment.

Målestok

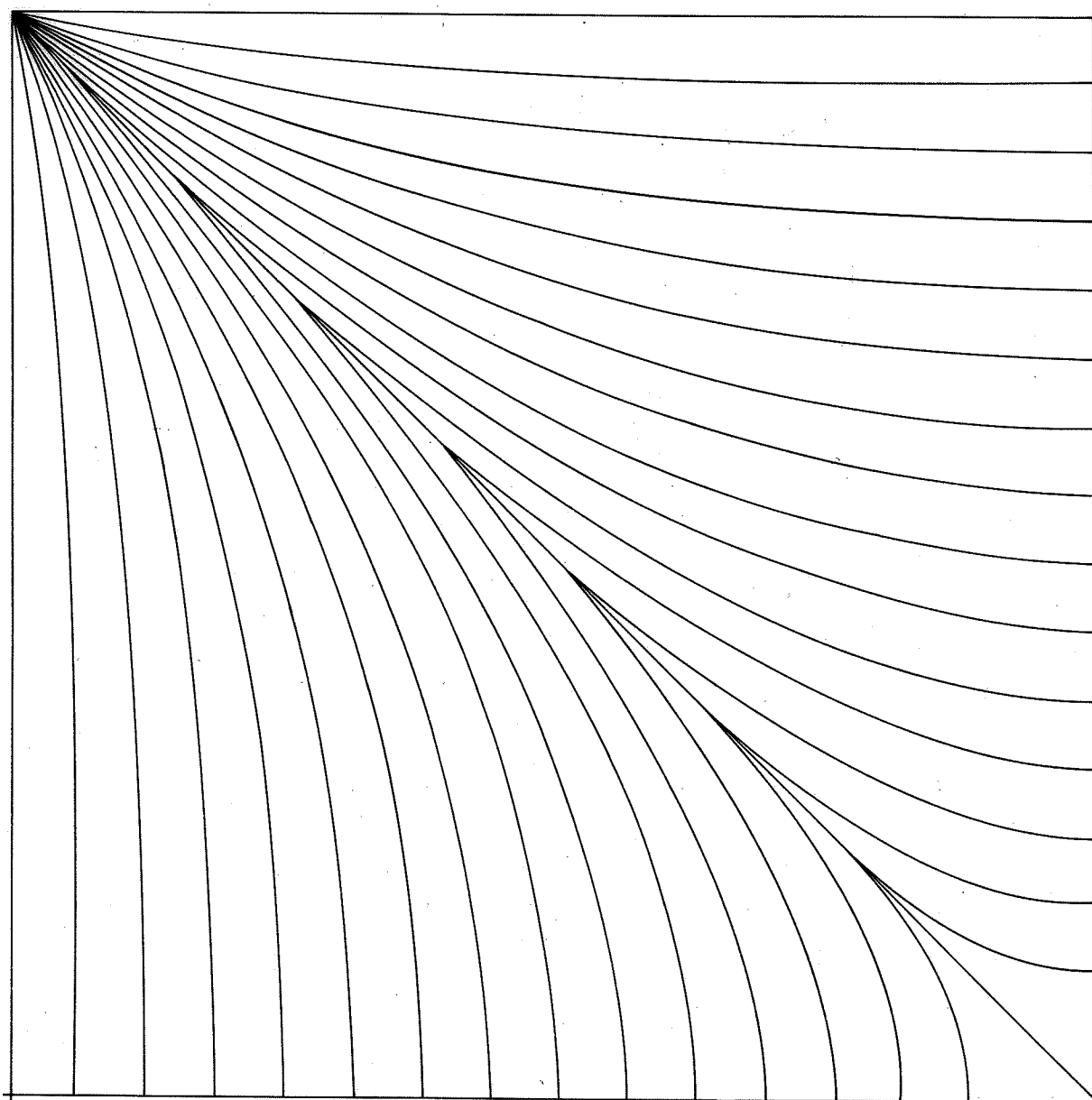
1 mm = 0.001 m

0 1 2 3 4 5 cm



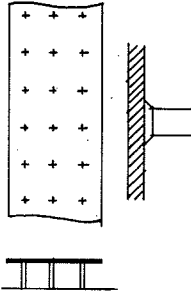
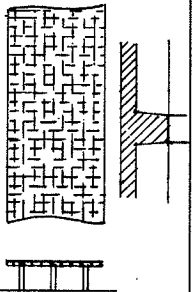
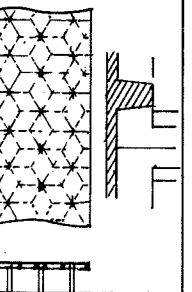
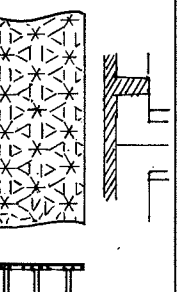
Figur 7.1.5.3:

Isostaterne for 1. hovedretning, optegnet efter figur 7.1.5.1.



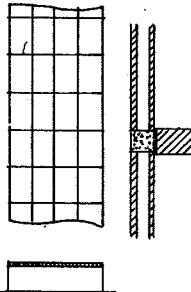
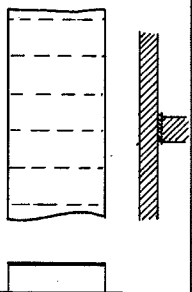
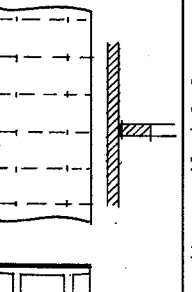
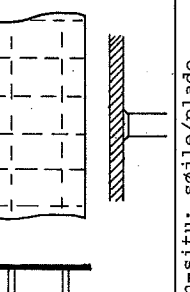
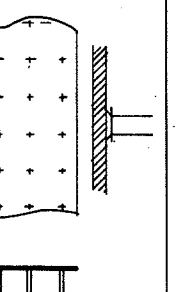
Figur 7.1.5.4:

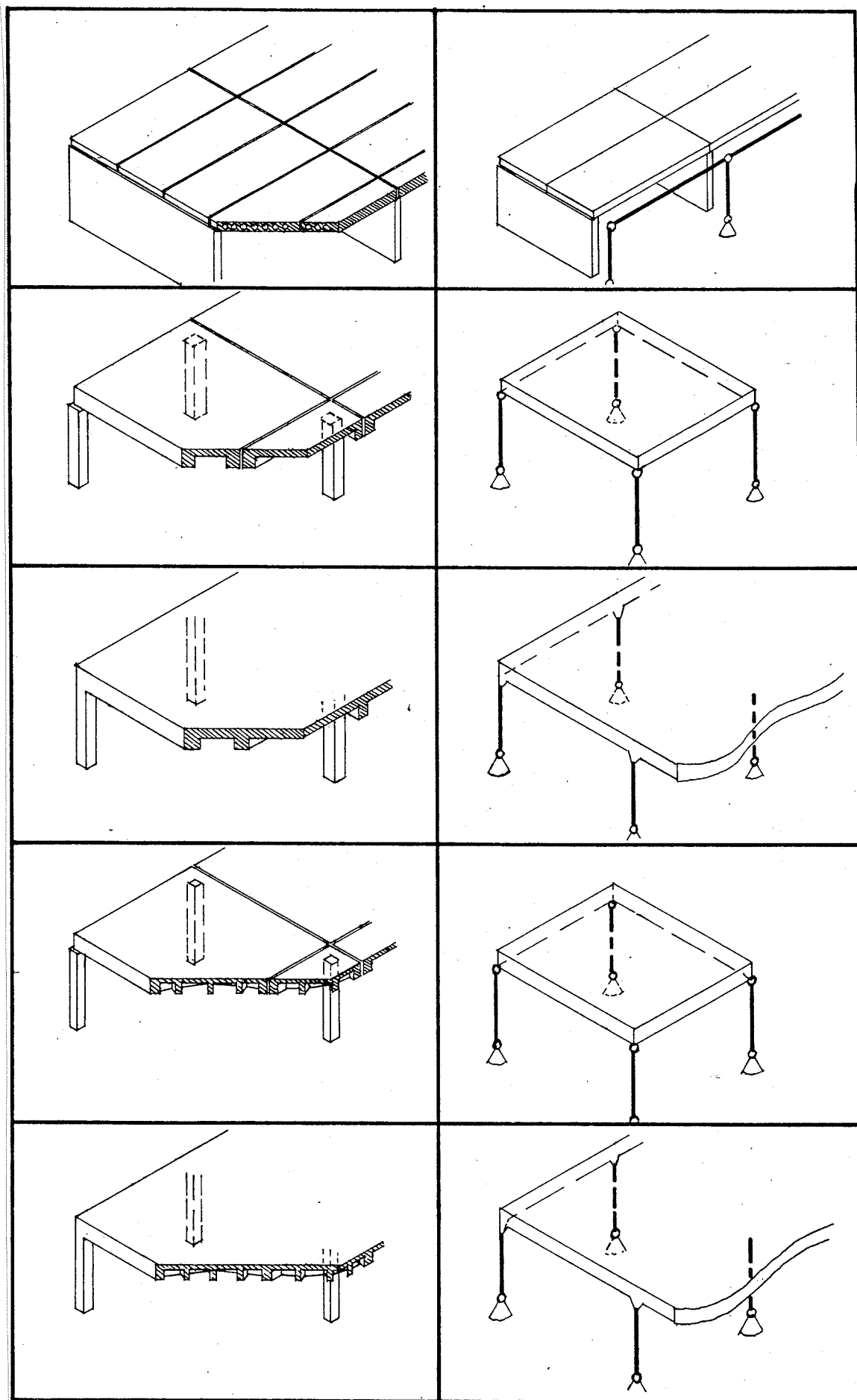
Isostaterne for 2. hovedretning, optegnet efter figur 7.1.5.2.

		kg/m ²		kWh/m ²	
		beton	stål	ERC	
Konstruktion in-situ: søjle/plade polært armeret 	Materialer	300	8.28	159.0	
	plade 13 cm søjler formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	47.6	2.17	32.4	
		348	10.45	230.4	
in-situ: søjle/ribbeplade 	Materialer	285	7.20	145.5	
	plade ~ 0,123 m søjler formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	47.6	2.17	32.4	
		333	8.4	225.7	
in-situ: søjle/ribbeplade 	Materialer	245	7.46	135.7	
	plade ~ 0,106 m søjler formarbejde udtørring	42	2.20	30.9	
		287	9.7	204.8	
in-situ: søjle/ribbeplade 	Materialer	237	5.71	119.6	
	plade ~ 0,103 m søjler formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	42	2.20	30.9	
		279	7.9	191.1	

Figur 7.2.0.1: Energiforbrug til fremstilling af alternative overdækninger af jernbeton.

*) Forkortelsen ERC er overtaget fra [80.0] og står for Energy Requirement of Construction.

		kg/m ²		kWh/m ²	
		beton	stål	ERC	
Konstruktion betonelement: plade/skive 	Materialer	300	4.6	184.5	
	dækplader 18 cm betonskive 15 cm fugearmring fugebeton udtørring vinterforan- staltninger	200	1.0	104.5	
		12	0.7	5.8	
in situ: kont. plade/skive 	Materialer	300	5.65	137.1	
	dækplade 13 cm betonskive formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	133	1.64	53.6	
		433	7.29	244.4	
præfab. ramme/in-situ kont. dæk 	Materialer	300	5.65	137.1	
	dækplade 13 cm præfab. ramme formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	76.4	4.50	71.3	
		376	10.15	242.8	
in-situ: søjle/plade net-armeret 	Materialer	300	20.0	256.8	
	plade 13 cm søjler formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	33	2.07	27.2	
		333	22.1	320.7	
in-situ: søjle/plade net-armeret 	Materialer	300	11.2	183.4	
	plade 13 cm søjler formarbejde udtørring vinterforan- staltninger	47.6	2.17	32.4	
		348	13.4	254.8	



Figur 7.2.2.1: Principskitse af de undersøgte røhussystemer

Konstruktion i klimaskærm	K-værdi W/°C m ²
Let facade (uden vinduer)	0,40
Tag, built up på isolering	0,30
Gulv mod krybekælder	0,50
Vinduer, 2 lag glas	2,70
Tung facade, sandwichelementer	0,40
Ventilation p.g.a. utæthed	0 W/°C
Ventilationsanlæg, 0,5 h ⁻¹	908 W/°C
Gratisvarme (undtaget solindfald)	gennemsnit 15 kW
Minimal rumtemperatur	19/21°C
Konstruktion i huset	
Lette skillevægge :	Gipsplader på stålskelet med isolering indlagt.
Lejlighedsskel :	15 cm/18 cm betonelementer eller 2 × 10 cm gasbetonvæg med isolerende mellemlag.

Tabel 7.2.2.1:

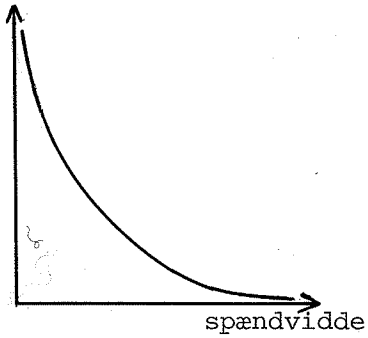
Forudsætninger med hensyn til varmetab og bygningens adskillende konstruktioner.

Bygningsmodel	Etage-højde	Spænd-vidde	Dæktykkelse	Væg-/søjle-dimension
Tværvægge	2,8 m	3 m	huldæk 18,5 cm	15 cm væg
	2,8 m	4,5 m	huldæk 18,5 cm	15 cm væg
	2,8 m	6 m	huldæk 23 cm	15/18 cm væg
	2,90 m	9 m (4,5)	huldæk 30 cm	15/18 cm væg
Randbjælke-plader	2,8 m	3 m	9/30 cm	20 × 20 cm
På søjler	2,8 m	4,5 m	14/30 cm	30 × 30 cm hule
(Præfab. el. in-situ)	2,87 m	9 m (4,5)	27/65 cm	30 × 40 cm
Isostatdæk	2,8 m	3 m	5/18 cm	20,5 × 20,5 cm hule
På søjler	2,8 m	4,5 m	5/25 cm	27,5 × 27,5 cm hule
(Præfab. el. in-situ)	3,00 m	9 m (4,5)	7/48 cm	30 × 30 cm

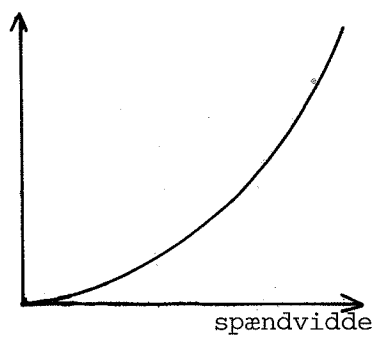
Tabel 7.2.2.2:

Data for dimensioner og etagehøjder i de forskellige bærende systemer.

$\frac{\text{bæreevne}}{\text{materialeforbrug}}$

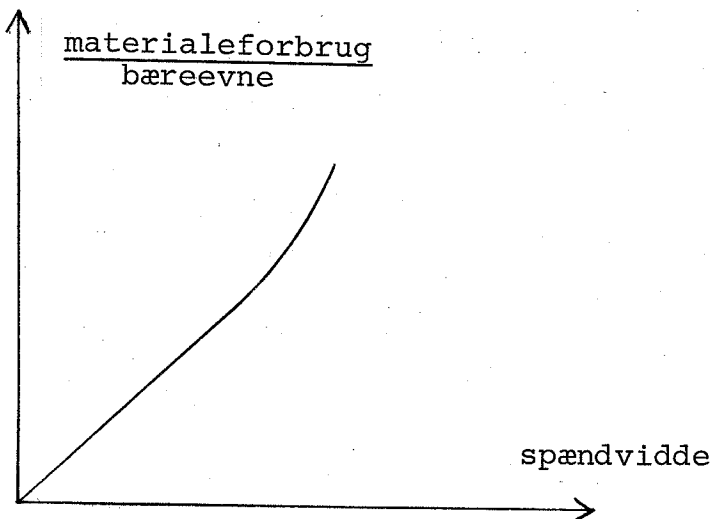


$\frac{\text{materialeforbrug}}{\text{bæreevne}}$



a)

$\frac{\text{materialeforbrug}}{\text{bæreevne}}$



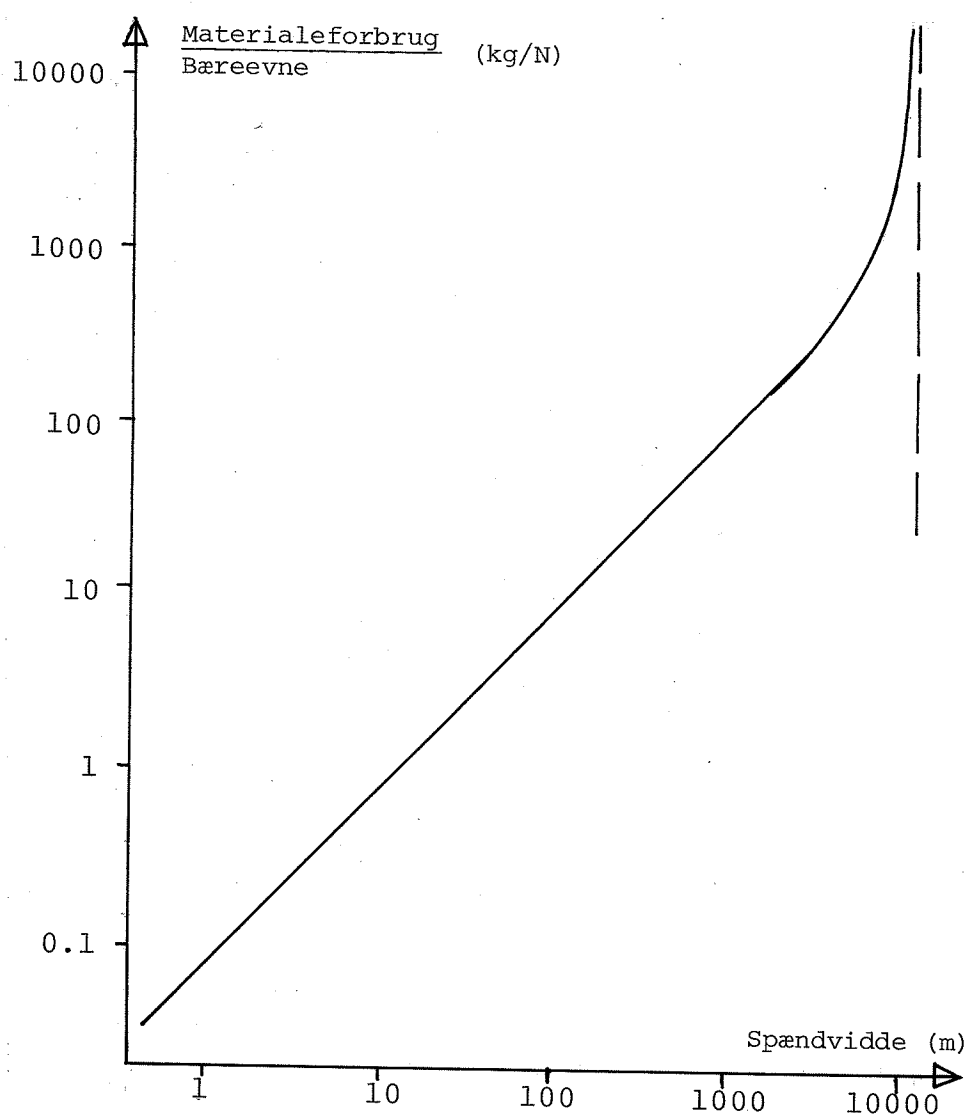
b)

Figur 7.2.3.1:

Sammenhæng mellem bæreevne, materialeforbrug og spændvidde

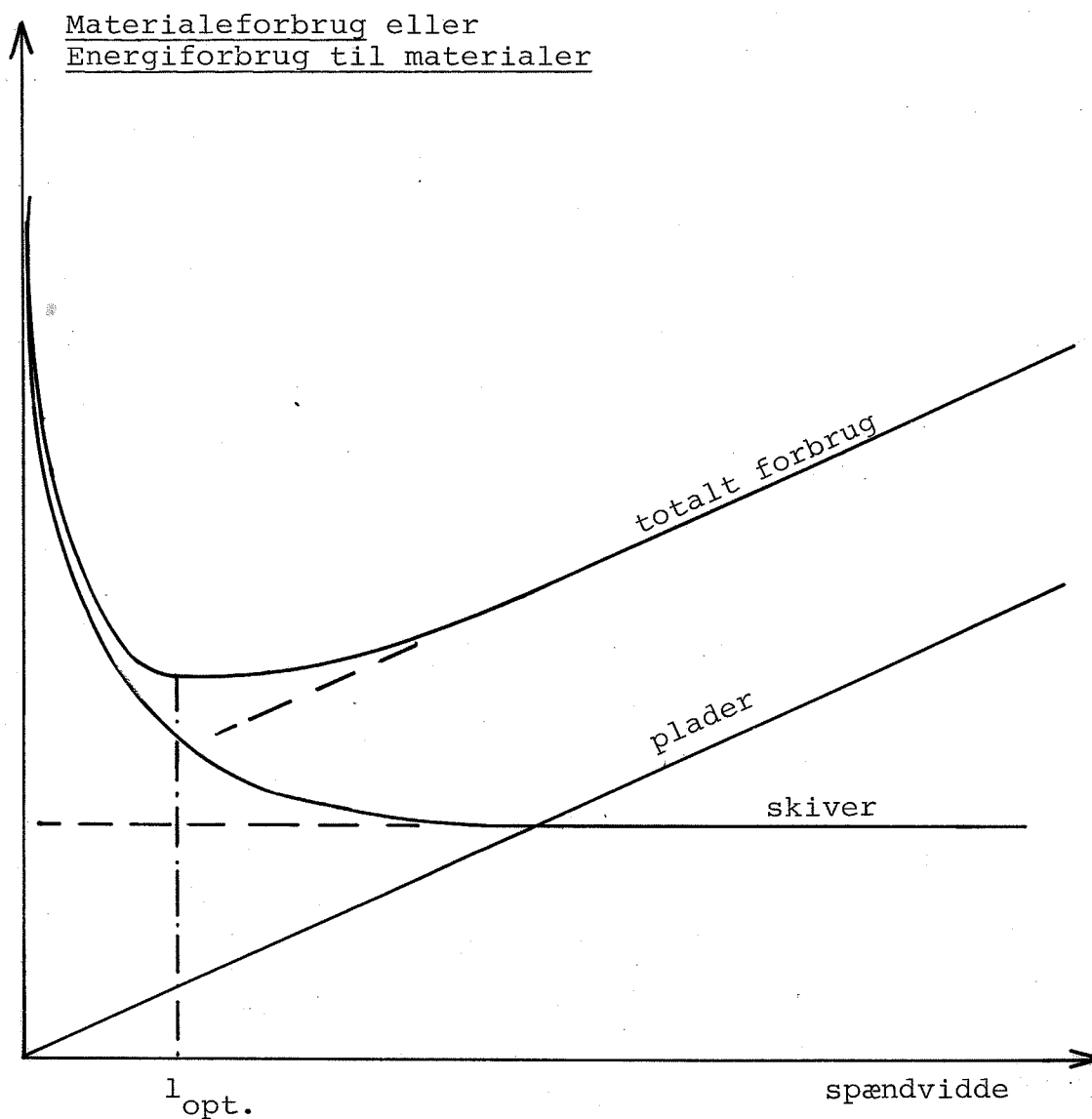
a) efter [72.1]

b) principielt forløb efter [65.0]



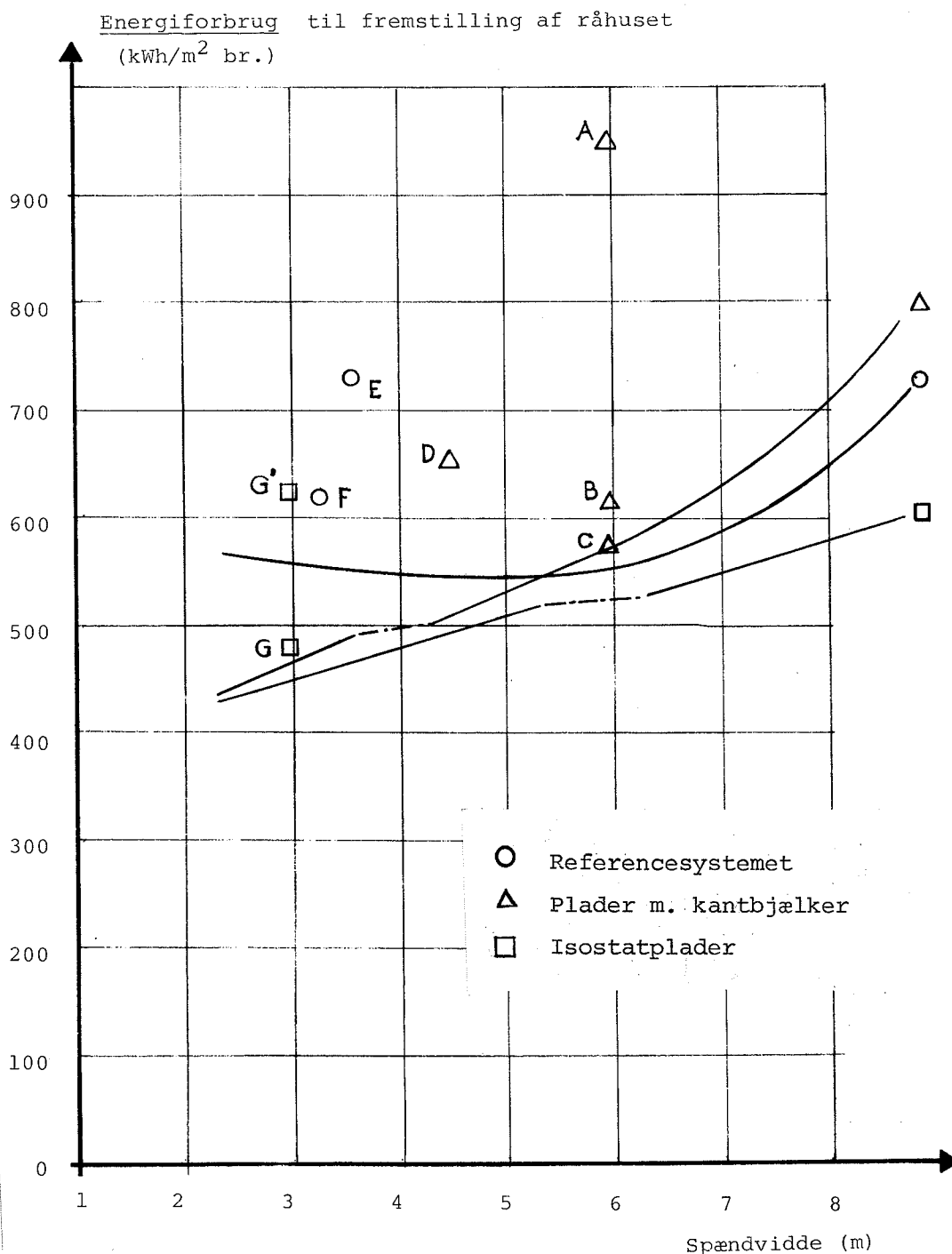
Figur 7.2.3.2:

Sammenhæng mellem materialeforbrug (for fastholdt bæreevnekrav) og spændvidde [65.0], afbildet med dobbeltlogaritmisk skala, for en trækpåvirket konstruktion.



Figur 7.2.3.3:

Principiel sammenhæng mellem spændvidde og materialeforbrug for vandrette og lodrette bærende dele.



Figur 7.2.4.1:

Sammenligning mellem energiforbruget til fremstilling af råhuset med tre systemer og nogle aktuelle byggerier.

A: Et skolebyggeri i U.S.A., bygget i et stålrammesystem med overbeton [75.1].

B: SBI's kontorbygning i Hørsholm [75.2].
Betonelementer som søjle-bjælke-pladesystem.

C: Boligbyggeri som søjle-plade-system i beton, støbt på stedet [79.1].

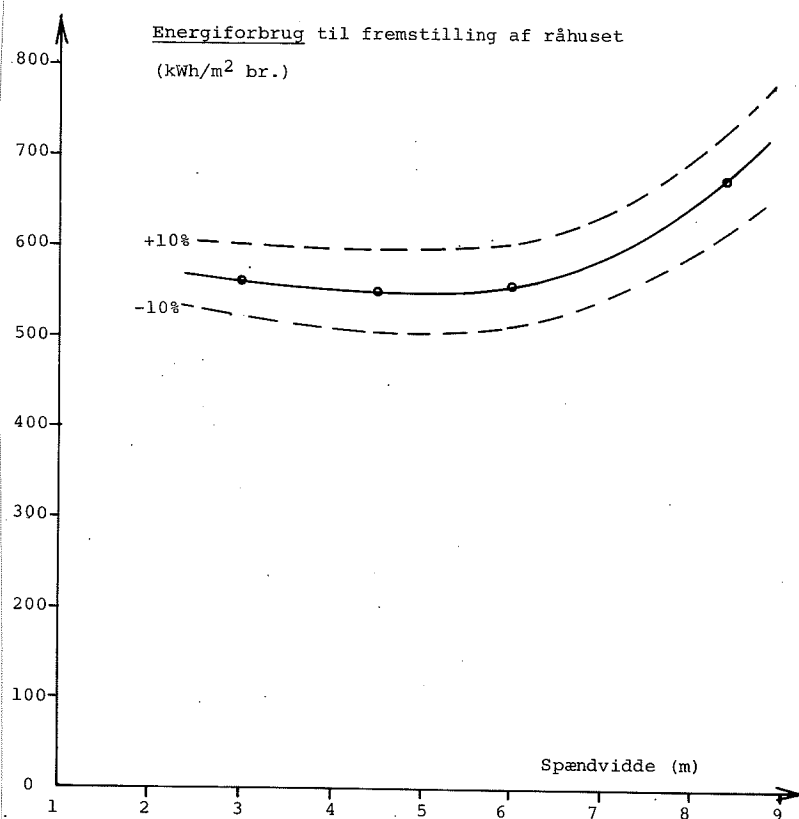
D: Modelbygning med stålramme-system, det franske GEAI-system, med lette facader [70.0].

E: Boligbyggeri i almindeligt betonelements-system [68.0].

F: Boligbyggeri i almindeligt betonelements-system [80.0].

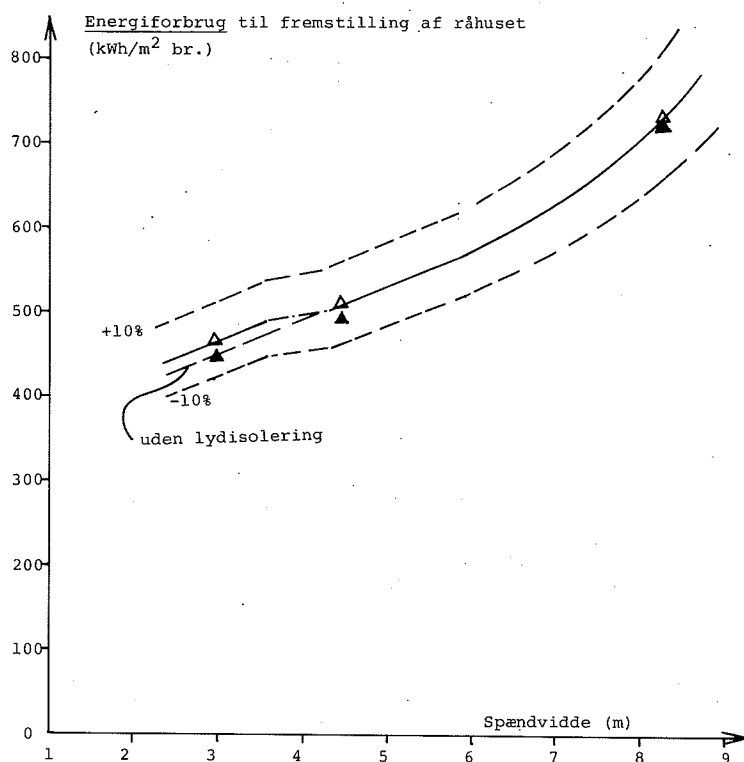
G: Præfabrikeret søjle-pladebygning med isostatplader med den i figur 7.3.4.1 viste planløsning.

G': Som G, men her korrigeret for ekstravarmetab over 50 år, som følge af bygningens forøgede facadeareal i forhold til modelbygningen.



Figur 7.3.3

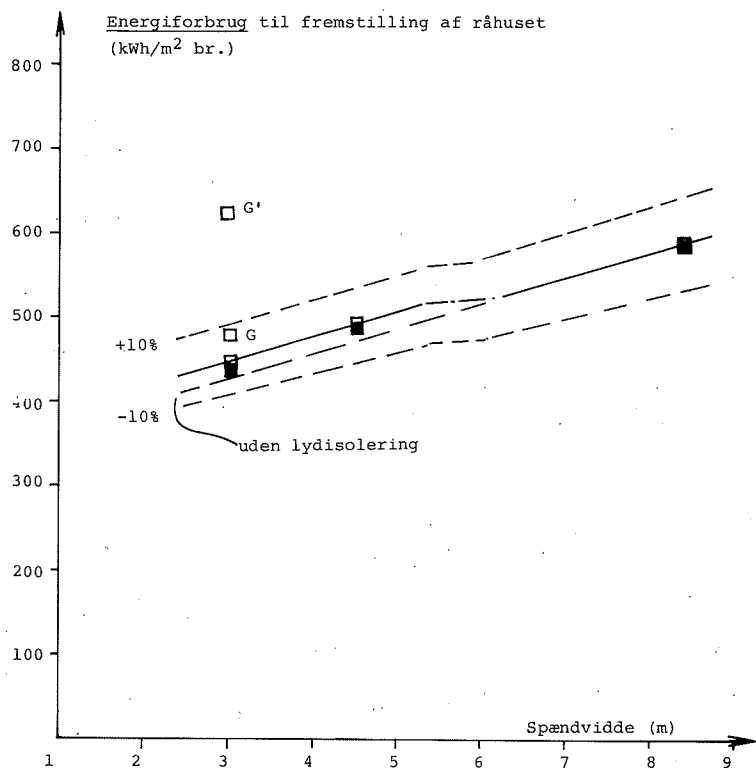
"Anlægsenergiforbrugets" uafhængighed af spændvidden for det almindelige tværvægsbetonelements system, referencesystemet.



Figur 7.2.4.3:

"Anlægsenergiforbrugets" afhængighed af spændvidden for søjle-pladesystem med randbjælker mellem søjlerne

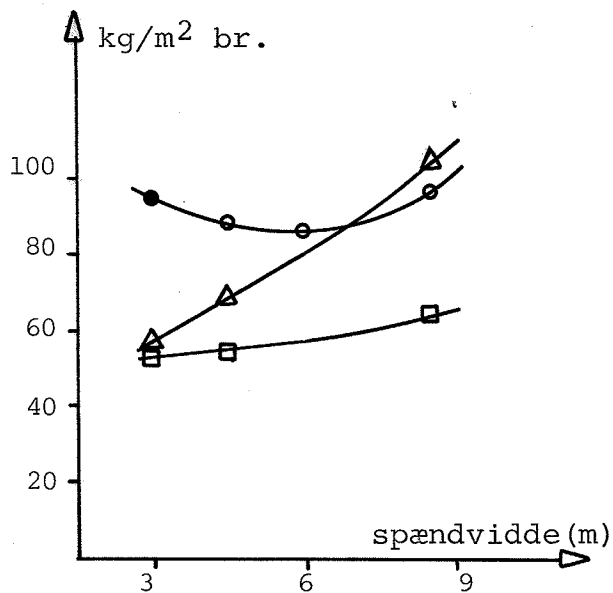
- △ = præfabrikerede dækelementer
- ▲ = in-situ støbte dæk



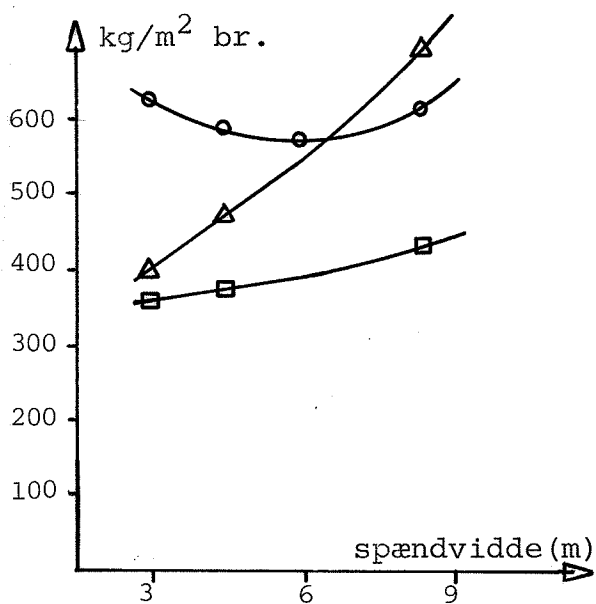
Figur 7.2.4.4:

"Anlægsenergiforbrugets" afhængighed af spændvidden for søjle-pladesystem med isostatdæk (G og G', se figur 7.3.3.1)

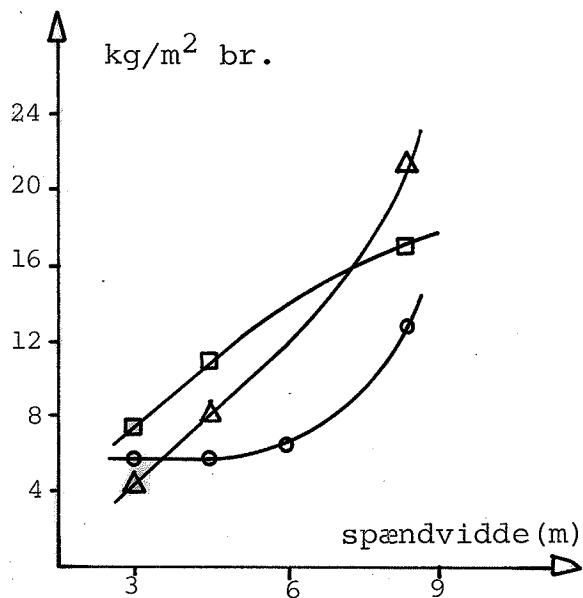
- = præfabrikerede dækelementer
- = in situ støbte dæk



cementforbrug



tilslagsforbrug

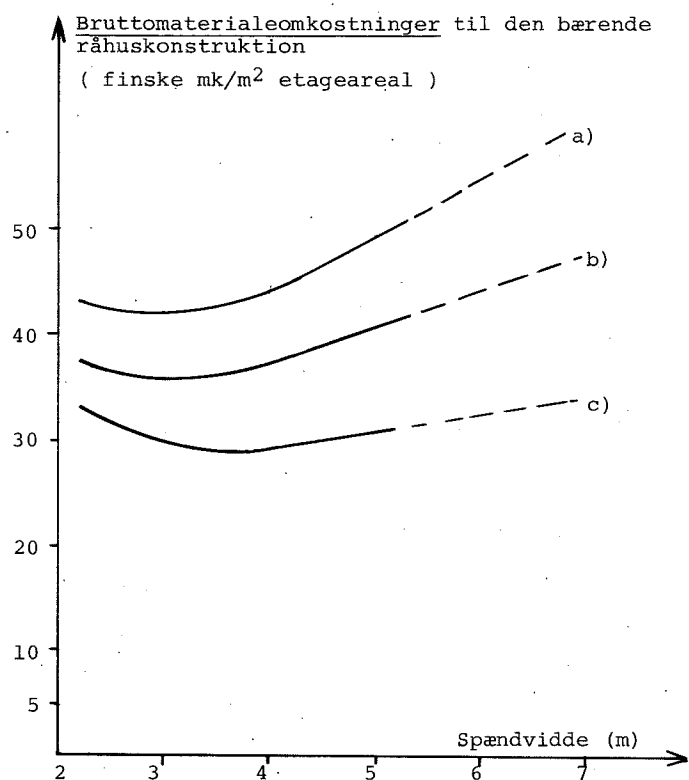


stålforbrug

Figur 7.2.4.5:

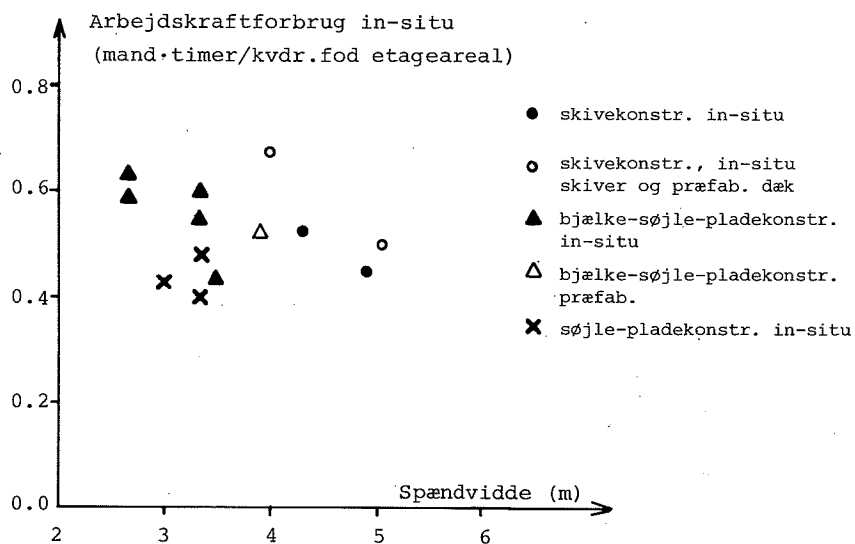
Beregnete materialeforbrug for de forskellige bærende systemer.

Signaturer som i figur 7.2.4.1.



Figur 7.2.4.6:

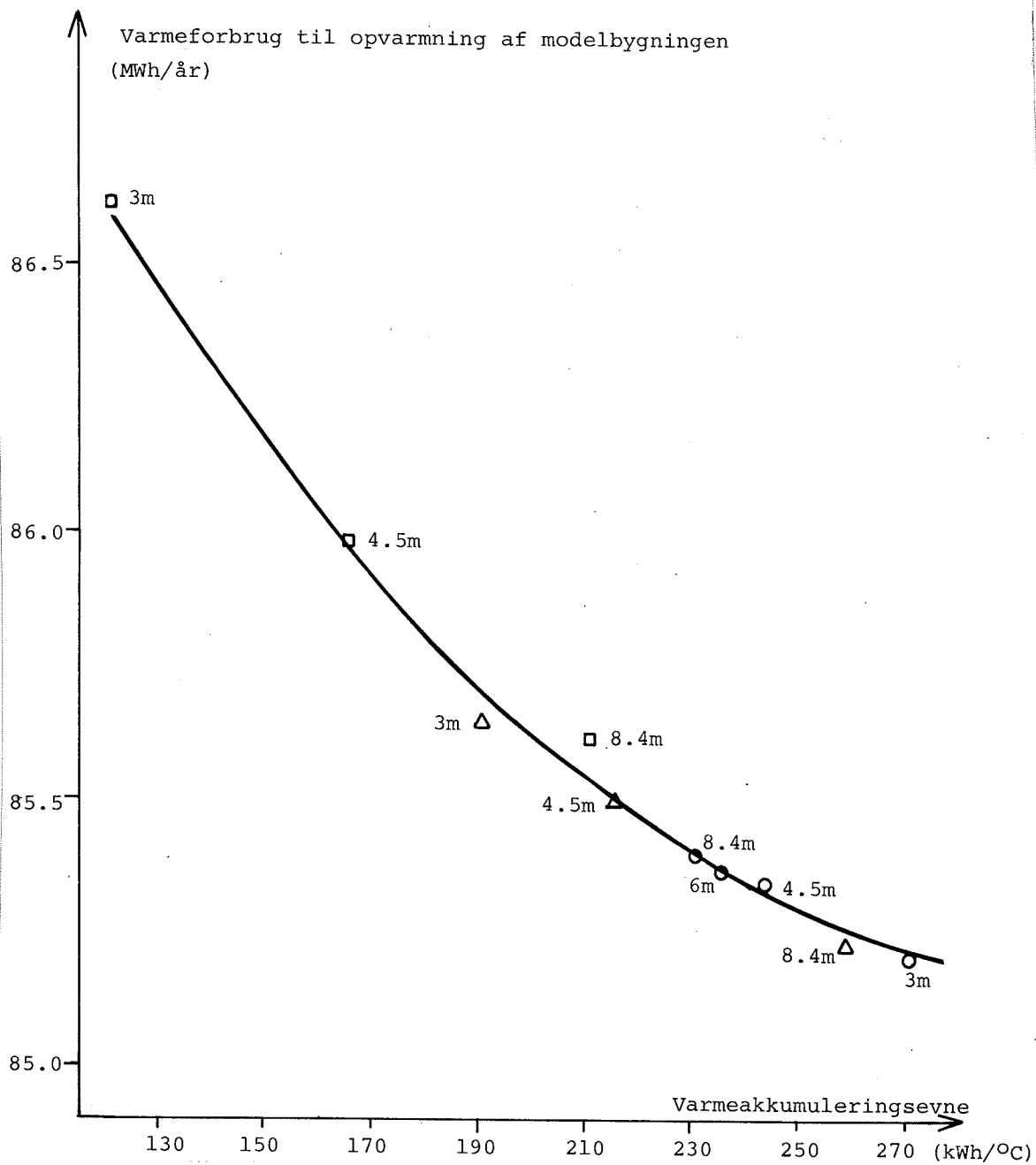
Bruttomaterialeomkostninger for forskellige råhussystemer af beton efter [72.0]. (a) - c), se teksten).



Figur 7.2.4.7:

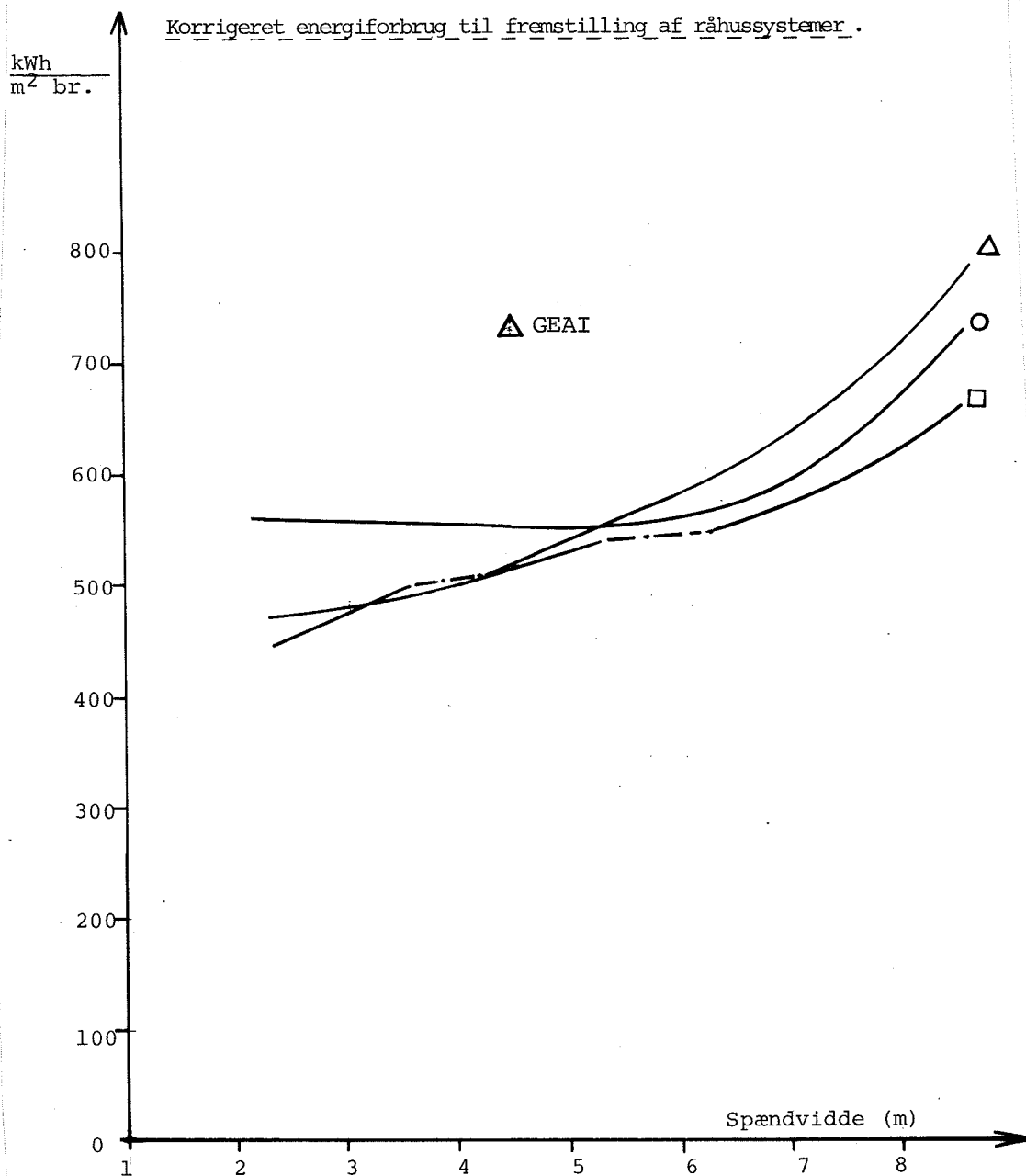
Aktuelle engelske betonbyggerier 1954-55. Arbejdskraftforbruget* på byggepladsen efter [63.0].

*) Der må advares mod at bruge disse resultater på danske forhold. Figuren skal først og fremmest vise spændviddefordeling.



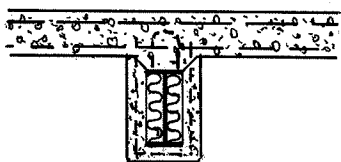
Figur 7.2.5.1:

Konstruktionernes varmeakkumuleringssevnes indflydelse på varmeforbrug for modelbygningen.

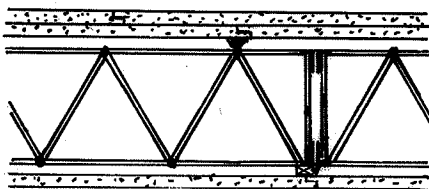


Figur 7.2.5.2:

Energiforbrug til fremstilling af råhussystemer, korrigeret for indflydelse på driftsforbruget. Signaturer, se figur 7.2.4.1.



12 cm jernbeton
IPE 200 profil m. bøjle
Mineraluldsudfyldning
3 cm netforstærket
pudsdeklay



2x3 cm plastforstærket
cementklinkerplade
30 cm rumgitterelement,
rundjern og profiler
3 cm vermiculitplade

a)

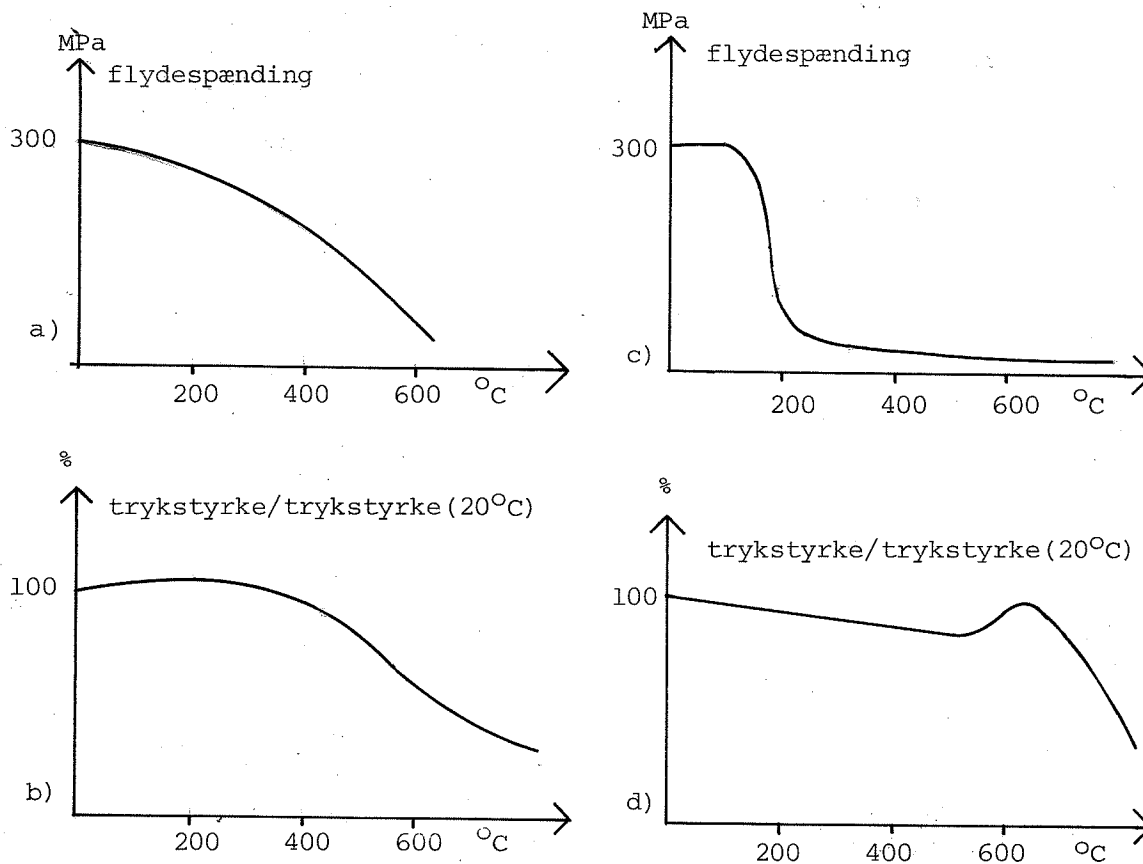
b)

Figur 7.3.0.1:

Etageadskillelser i stål:

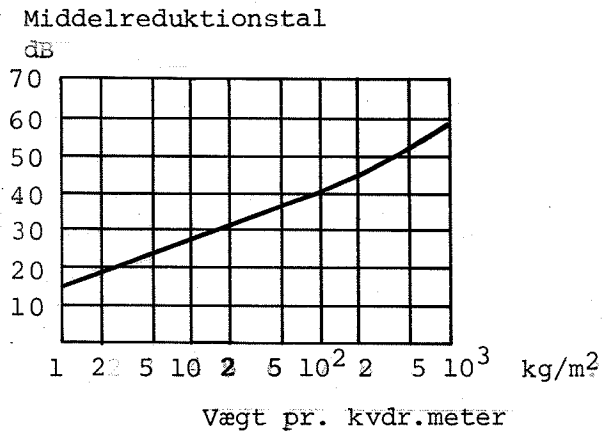
a) Eksempler fra Bygningsreglementet 1977

b) Det franske GEAI-system fra et forsøgsbyggeri i Rouen [70.0]



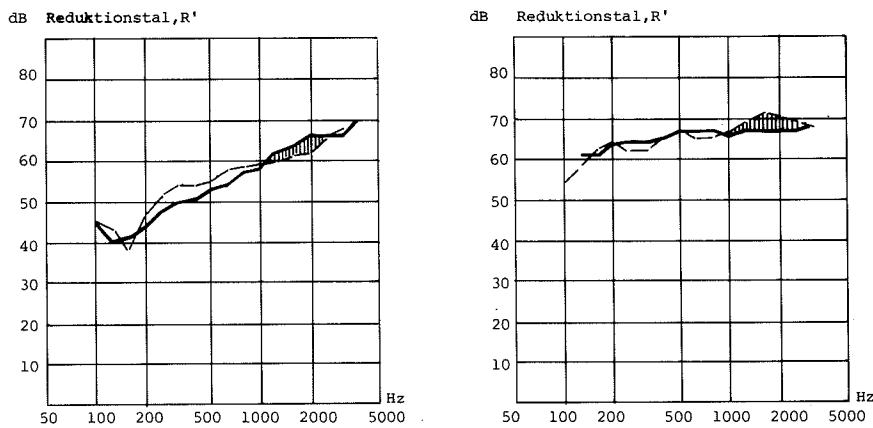
Figur 7.3.0.2:

Styrkeparametres principielle afhængighed af temperaturen i materialet for a) stål 37, b) beton med almindelig tilslag, c) aluminium S51, d) letbeton med sandtilslag efter [72.0], [68.0] og [69.0].



Figur 7.3.1.1:

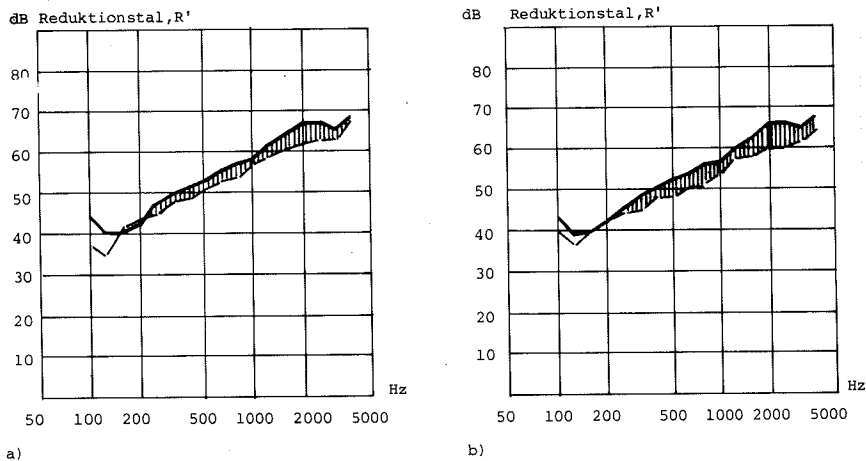
Middelreduktionstallet som funktion af vægten pr. kvadratmeter. Den fuldt optrukne kurve er en empirisk bestemt "vægtkurve". Den punkterede kurve er beregnet ud fra forenklede forudsætninger og uden hensyntagen til koincidenseffekt.



Figur 7.3.1.2:

Det frekvensafhængige reduktionstal for luftlyd henholdsvis trinlydniveau.

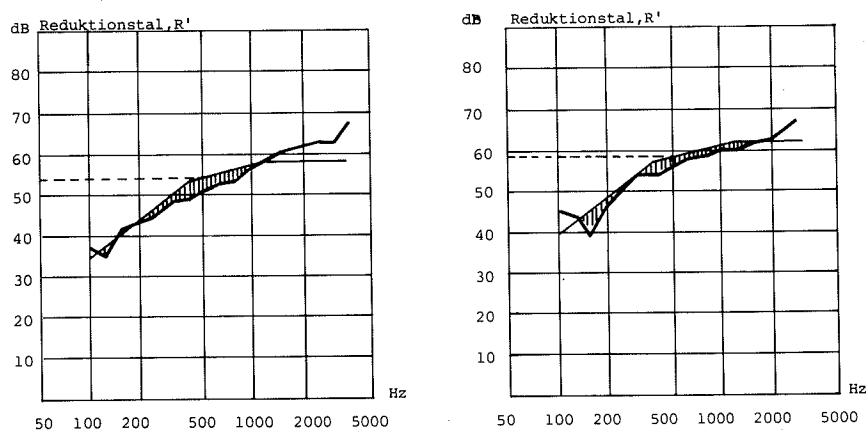
- 14 cm massiv etageadskillelse [60.0]
- 8/22 cm krydsribbedæk [72.1]



Figur 7.3.1.3:

Det frekvensafhængige reduktionstal for luftlyd, laboratoriemålinger [60.0].

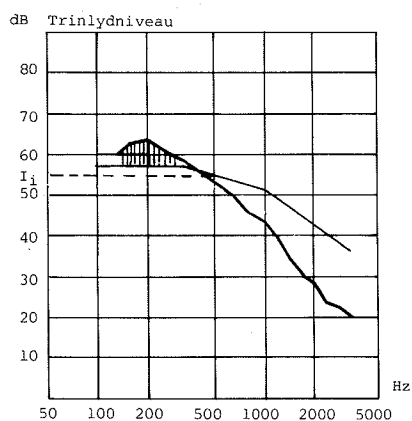
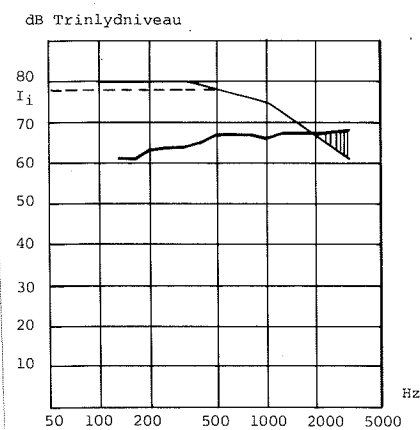
- 14 cm massivt betondæk, 320 kg/m^2
- - - (a) 10/22 cm betonribbeplade, enkeltspændt, 325 kg/m^2
- - - (b) 19 cm hulrækplade, beton, $\sim 310 \text{ kg/m}^2$



Figur 7.3.1.4:

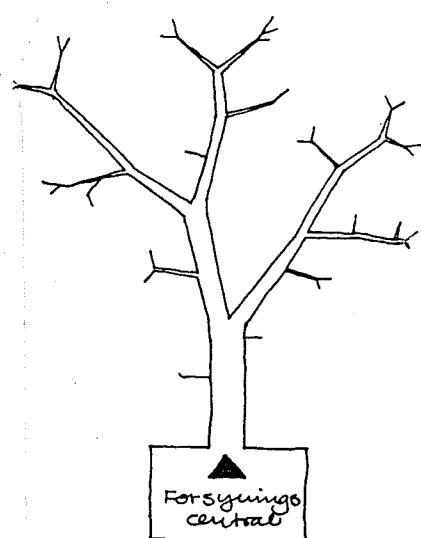
Bestemmelse af I_a -værdien for henholdsvis enkeltspændt og krydsribbeplade. Det ses, at i det første tilfælde bliver det kritiske område for bestemmelsen af I_a 200-1000 Hz , mens det i det andet tilfælde er 300-2000 Hz .

- reduktionstal
- standardkurve, I_a aflæses ved 500 Hz



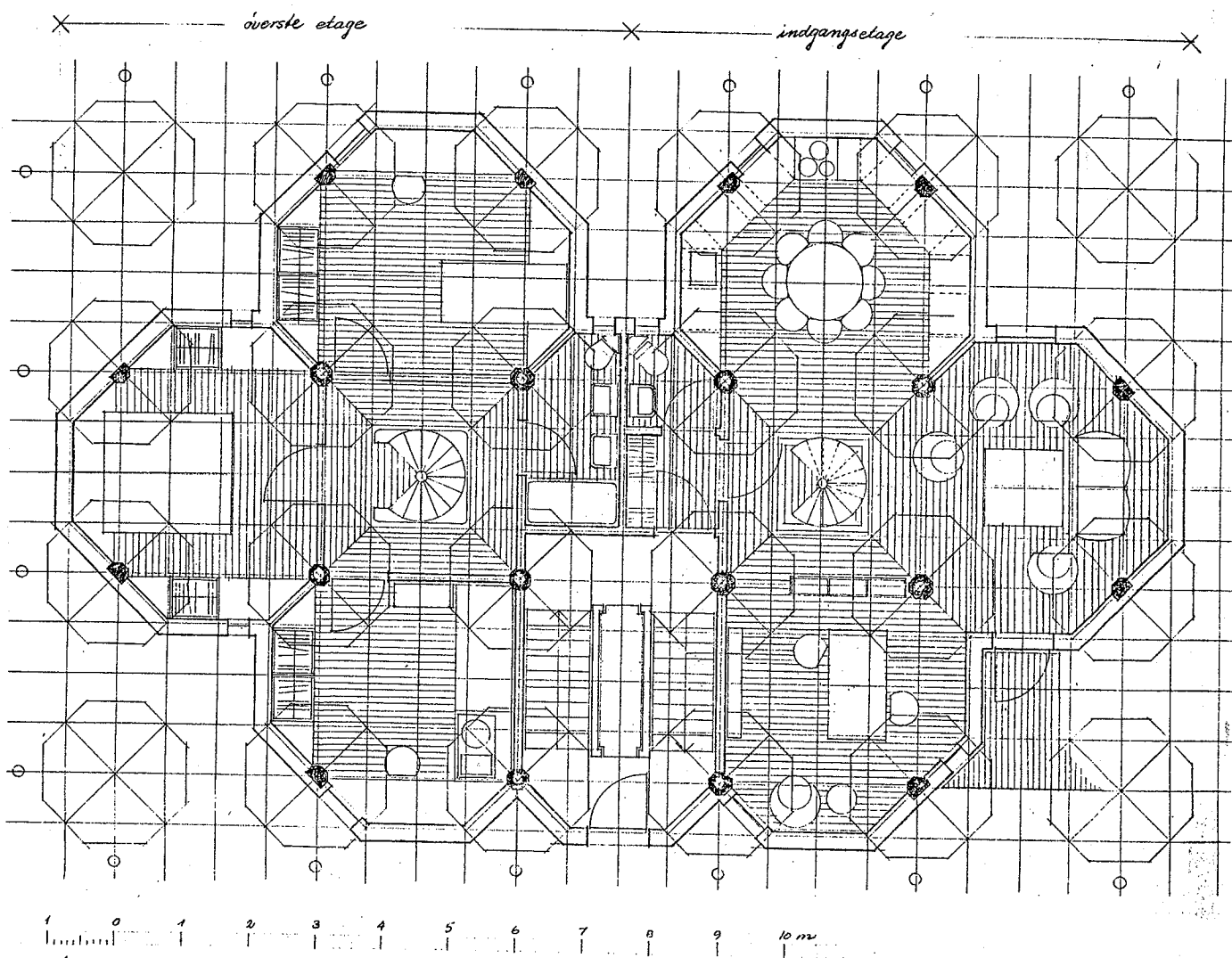
Figur 7.3.1.5:

Bestemmelse af trinlydisolationen I_i for massivt 14 cm beton-dæk, henholdsvis med trægulv på strøer med bløde brikker, og uden.



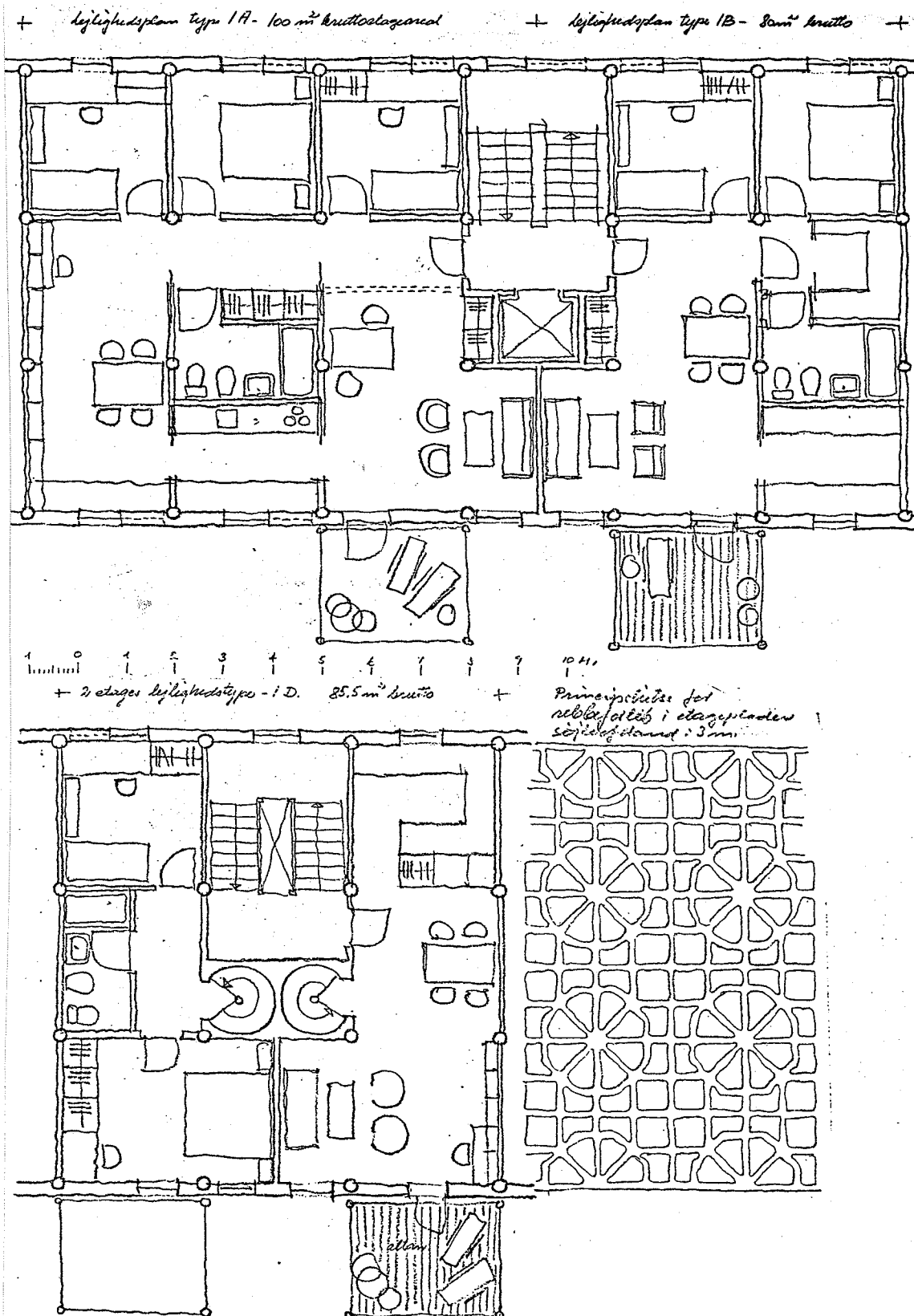
Figur 7.3.3.1:

Optimalt distributionsnet i planen efter [75.0].
Ligheden med træets opbygning er tydelig.



Figur 7.3.4.1:

Bebyggelsesform afledt af krydsribbemønstrene i isostatdækkene for søjlepladebygninger i flere etager. Frits Gravesen.



Figur 7.3.4.2:

Lejlighedsplaner for søjlepladekonstruktioner i 6 etager.
Frits Gravesen.

Figur 7.3.5.1.1:

Vurdering af normalt forekommende bærende systemer ved små spændvidder (3-6 m).

Skitse	Bærende system i jernbeton	Generel materialeudn. til bærende formål	Mulighed for materialebesparelser	Mulighed for energibesparelser	Brand-sikkerhed	Lyd transmission	Montage/opførelse	Installationsøring	Generel fleksibilitet
	Skivekonstruktion med enkeltspændte dæk	÷	÷	/	+	+	+	÷	÷
	Rammekonstruktion med enkeltspændte dæk uden skiver	/	/	÷	÷	/	+	/	/
	Søjle-plade konstruktion, støbt in-situ med massive plader afst. af enkelte skiver	÷	/	÷	÷	+	/	+	+
	Søjle-plade konstruktion med delvist efterspændte dæklm. og afst. af enkelte skiver	/	+	/	÷	+	÷	+	+
	Søjler + plader med kantbjælker støbt på stedet afst. af enkelte skiver	/	/	/	/	/	÷	+	/
	Søjler + plader som elementer, afstivet af enkelte skiver	+	/	/	+	/	+	+	/
	Søjler + krydsribbeplader, støbt sammen på stedet, afst. af enkelte skiver	/	+	+	/	÷	÷	+	/
	Søjler + krydsribbeplader, som elementer, afstivet af enkelte skiver	+	+	+	/	÷	+	+	/

Signaturer: + har fordele m.h.t. dette funktionskrav
 / er acceptabelt m.h.t. dette funktionskrav
 ÷ har ulemper m.h.t. dette funktionskrav

skiver	Plader	α	β	r_s (kg/m ³)	r_p (kg/m ³)	ρ_s (-)	ρ_p (-)	h (m)	E_s (MPa)	Q_{max} (MPa)	λ_{opt} (m)	λ_{opt} (m)
		(-)	(-)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(-)	(-)	(m)	(MPa)	(MPa)	(m)	(m)
beton	beton	1/8	1	2300	2300	0,29	0,29	2,6	7000	20	1,82	1,82
stål	stål	1/8	1	7850	7850	0,29	0,29	2,6	210000	240	2,74	2,74
træ	træ	1/8	1	500	500	0,29	0,29	2,6	12000	10	1,33	1,33
stålskelet	stressed skin	1/8	1	100	100	0,50	0,60	2,6	210000	10	0,38	0,67
træskelet	stressed skin	1/8	1	100	100	0,29	0,60	2,6	12000	10	0,83	0,83
uarmet beton	betonelementer	1/8	1	2300	1700	0,29	0,35	2,6	6000	20	2,64	1,36
uarmet beton	stressed skin	1/8	1	2300	100	0,29	0,60	2,6	6000	10	6,24	1,40
betonramme	betonramme	1/16	1	2300	2300	0,29	0,29	2,6	8000	20	2,18	2,18
stålramme	stålramme	1/16	1	170	170	0,42	0,42	2,6	210000	240	3,20	3,20
murværk	tømmer	1/8	1	1700	130	0,29	0,29	2,6	3000	10	8,19	6,68

Tabel 7.2.3.1.1:

Optimale spændvidder med hensyn til minimalt materialeforbrug og minimalt energiforbrug beregnet efter eksempel 7.2.3.1.

Beregnet for bevægelig belastning 2,0 kN/m² og uden hensyntagen til egenvægt.

Bygnings- dele	Referencebygningen			Ribbeplader, præfabr elementer			Plader m. kantbjælke præfab. elementer			Isostatribbeplader in situ			Plader m. kantbjælker in situ		
	3 m	4.5 m	6 m	8.4 m	3 m	4.5 m	8.4 m	3 m	4.5 m	8.4 m	3 m	4.5 m	3 m	4.5 m	8.4 m
Dækelementer	370.0	371.3	410.3	609.6	282.8	354.4	568.1	312.2	406.2	856.4	249.9	323.1	234.1	320.4	723.9
Fugebeton	15.7	13.9	12.5	21.0	0.7	1.2	2.5	0.7	1.2	2.5	-	-	-	-	-
Fugearmering	26.6	24.4	23.7	22.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bærende vægge, søjler	295.7	244.0	224.1	221.4	110.8	118.7	121.1	112.5	121.4	142.7	109.3	117.0	127.8	120.3	140.1
Trapper	27.3	44.6	29.3	44.6	24.6	35.7	35.7	24.6	35.7	35.7	24.6	35.7	24.6	35.7	35.7
Lette facadeelementer	157.0	157.0	157.0	157.0	196.0	196.0	206.5	196.0	196.0	196.0	196.0	196.0	196.0	196.0	203.0
Tunge facadeelementer	32.3	32.3	32.3	35.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lette skille vægge	38.3	48.7	53.3	66.8	90.9	90.9	87.4	90.9	90.9	90.9	90.9	90.9	90.9	90.9	90.9
Lejlighedsskel	-	-	-	26.0	43.3	43.3	48.6	43.3	43.3	50.5	43.3	43.3	43.3	43.3	50.5
Rendefundament	27.4	28.7	24.3	22.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.0	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Krybekældervægge	64.8	65.0	67.4	56.3	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
Krybekældergulv	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Søjlefundament	-	-	-	-	2.1	2.9	4.0	2.1	2.9	4.7	2.1	2.9	2.1	2.9	5.7
Skivefundament	-	-	-	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	1.2
Fundamentsarmering	-	-	-	-	3.3	3.3	1.6	3.3	3.3	1.6	3.3	3.3	3.3	3.3	1.6
Lydisolering	-	-	-	-	34.1	33.6	0.4	34.1	0.4	0.4	33.2	33.2	32.3	-	-
Forskalling	3.0	2.5	2.2	2.1	6.0	7.1	7.1	6.0	7.1	8.8	46.0	47.1	32.6	33.1	35.4
Vinterforanstaltn.	8.2	8.0	8.2	8.4	5.9	5.9	6.6	6.2	6.8	8.8	15.8	16.4	18.9	23.2	38.3
Udtørring	37.7	35.3	34.2	36.9	21.3	22.1	25.8	24.0	27.9	41.0	38.5	40.0	43.3	48.0	73.8
Materialespild	43.1	41.0	41.0	51.3	34.9	36.9	45.1	34.9	39.0	55.4	32.8	34.9	32.8	36.9	55.4
Ialt: MWh	1150.0	1119.6	1122.7	1384.8	904.1	999.4	1206.9	938.2	1029.5	1544.1	933.1	1031.2	929.4	1002.0	1502.0
Ialt: kWh pr. m² etage	560.0	546.1	547.7	675.5	441.0	487.5	588.7	457.7	502.2	753.2	455.2	503.0	453.4	488.8	732.7

Tabel 7.2.4.1:

	dæktykkelse	etagehøjde	ΔA
Krydsribbe 4,5 m 9 m	5/25 cm 7/48 cm	2,80 m 3,00 m	0 m ² 108 m ²
Randbjælke 9 m	27 cm	2,87 m	37,8 m ²
Tværvægge 9 m	30 cm	2,90 m	54 m ²

Tabel 7.2.5.1:

Ændringer af modelhusets overfladeøkonomi, som følge af forøgede dæktykkelser.