



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R56:1975

Lättbärverk med samverkande blandkomponenter

Jens-Fredrik Larssen

BYGGDOK

Sankt Eriksgatan 46

112 34 Stockholm

tel: 08-617 74 50

fax: 08-617 74 60



601228867

Byggforskningen

Sex

Lättbärverk med samverkande blandkomponenter

Jens-Fredrik Larssen

Rapporten omfattar dels en utarbetning av en grundläggande böjningsteori för enkelspända bärverk med samverkande blandkomponenter påverkade av jämnt fördelad belastning, dels en redovisning av verifierande fullskalförsök. Den utgör ett delprojekt inom ramen för det forskningsarbete som bedrivs vid Avdelningen för Stålbyggnad (KTH) och som avser "Plåtpaneler i byggnadsteknisk användning".

Bakgrund

Det snabbt ökande utbudet av tunnplåt med garanterade hållfasthetsvärden och hög förädlingsgrad från metallindustrin och olika skivprodukter från skogs- och träförädlade industrier har givit impulser till en lättbyggnadsteknik inom husbyggnadssektorn, där flera samverkande material ingår i bärverket. Ytbärverkselement är uppbyggda av tunnplåtprofiler som baskomponent med skikt av artfrämmande material.

Fördelen med blandkomponentlösningar är möjligheten att optimera materialvalet med hänsyn till statiska och funktionella krav. Skivor, som tidigare enbart har använts som beklädnadsmaterial, får således ytterligare en funktion som lastupptagande ytskikt, vilket innebär att den totala materialåtgången reduceras.

Statiska frågeställningar rörande bärverkselement av samverkande blandkomponenter har i en tidigare rapport (R75:1973) översiktligt behandlats. De härledda uttryck och ekvationer grundar sig på ideella förutsättningar bland annat i fråga om det belastade bärverkets böjstyvhet och påkänningarnas fördelning i tvärsnittet. Vid lättbärverk av tunnväggiga profiler kan emellertid ett flertal instabilitetsformer bli aktuella som inverkar på lastupptagningsförmågan.

Samverkande blandkomponenter

Blandkomponenten består av två eller flera hopfogade, statistiskt samverkande material.

Rapporten behandlar bärverkselement uppbyggda av tunnplåtprofil som baskomponent och med skikt av plywood.

Detta innebär att arbetskurvorna för blandmaterialen har olika utseende och att säkerhetsproblemen samt de nominella säkerhetsfaktorerna är olika.

FIG. 1 visar i princip arbetskurvorna för plåt- och plywoodmaterialet. Betraktas blandkomponenten (plåt och plywood) som ett ideellt material kan dess

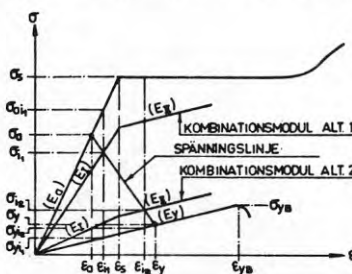


FIG. 1. Arbetskurvor för samverkande material.

ideella elasticitetsmodul, även kallad kombinationsmodul, uttryckas som en funktion av de båda blandmaterialens tvärsnittsmått och elasticitetsmoduler.

Varje delkomponents hållfasthets-egenskaper läggs till grund för bedömning av blandelementet som helhet. Linjen mellan punkterna σ_a/ϵ_a och σ_y/ϵ_y benämnes spänningslinjen där σ_a och σ_y anger plåt- resp. plywoodmaterialets tillåtna påkänningar. Skärningspunkten mellan spänningslinjen och kombinationsmodulen anger blandkomponentens ideella påkänning σ_i i bruksstadiet. Denna motsvarar plåtpåkänningen σ_{ai} och plywoodpåkänningen σ_{yi} . Påkänningarna varierar med materialens dominerande statiska egenskaper inom blandkomponenten (jfr kombinationsmodul Alt. 1 och Alt. 2).

Som framgår i FIG. 1 kan plåtmaterialet ha uppnått flytgränsen redan i bruksstadiet och dess säkerhetsfaktor ha reducerats till noll. För skiktmaterial är emellertid påkänningen mindre och följaktligen säkerhetsfaktorn större än den normalt tillåtna.

Lättbärverk med samverkande blandkomponenter

FIG. 2 visar en sektion genom ett fritt upplagt bärverk, där basprofilen utgörs

Bygghorsningen Sammanfattningar

R56:1975

Nyckelord:

lättbärverk, blandkomponenter, tunnplåtprofiler/plywood, bärverkselement, hållfasthetsegenskaper

Rapport R56:1975 hänförs till forskningsanslag C 913 från Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen för Stålbyggnad, KTH, Stockholm.

UDK 624.016
691.7-415
SFB (29)
ISBN 91-540-2494-3

Sammanfattning av:

Larssen, J-F, 1975, *Lättbärverk med samverkande blandkomponenter*. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R56:1975, 218 s., ill. 33 kr + moms.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst,
Box 1403, 111 84 Stockholm
Tfn 08-24 28 60
Grupp: konstruktion

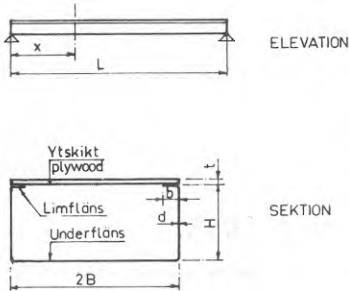


FIG. 2. Lättbärverk med samverkande blandkomponenter.

av tunnplåt och skiktet av plywood med elasticitetsmoduler E_a resp. E_y .

FIG. 3 visar i princip lättbärverkets arbetsdiagram vid på- och avlastning där brukspåkänningen i blandkomponentens plåtmaterial är lika med σ_s (modulstadium B). Den högra delen av diagrammet representerar bärverkets övre

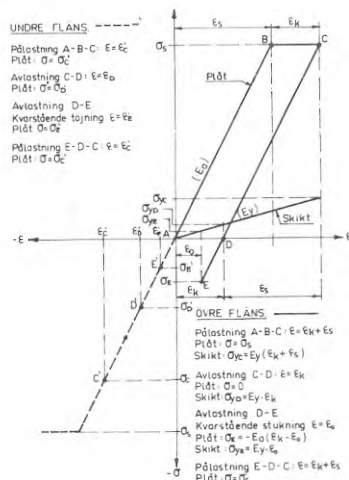


FIG. 3. Arbetsdiagram för lättbärverk inom modulstadium B.

Laststeg	Pålastning A-B-C	Avlastning C-D	Avlastning D-E	Pålastning E-D-C
Tvårsnittdeformation				
Tvårsnittspåkänning				
Elevation bärverk				

FIG. 4. Schematisk framställning av arbetskurvornas inverkan på spänningsfördelningen vid på- och avlastning inom modulstadium B.

fläns (blandkomponenten) och den vänstra delen dess undre fläns. Vidare anger FIG. 4 den schematiska framställningen av arbetskurvornas inverkan vid på- och avlastning inom bruksstadiet.

Pålastningen (A-B-C) motsvarar stukningen ($\epsilon_s + \epsilon_k$) i övre flänsen och påkänningen $E_y \cdot (\epsilon_s + \epsilon_k)$ i skiktet.

Avlastningen (C-D) medför att den kvarstående stukningen ϵ_k i flänsens plåtmaterial reducerar plåtpåkänningen till noll och skittpåkänningen till $\epsilon_k \cdot E_y$. Skiktmaterial, vars påkänningar under hela belastningsproceduren har legat inom sitt elasticitetsområde, eftersträvar vid den fortsatta avlastningen (D-E) att återgå till sin ursprungliga form. Stålmaterialet i övre flänsen med sin kvarstående stukning ϵ_k i sitt spänninglösa tillstånd utsättes för dragning under skiktmaterialens inverkan. Vid jämvikt erhålles en kvarstående stukning i övre fläns lika med ϵ_o , en dragspänning $E_a \cdot (\epsilon_k - \epsilon_o)$ i plåtmaterial och en kvarstående tryckpåkänning i skiktmaterial $E_y \cdot \epsilon_o$.

Bärverket har således erhållit en initialpåkänning. Pålastningen (E-D-C) ökar stukningen i övre flänsen från ϵ_o till $(\epsilon_s + \epsilon_k)$.

Spänningsfiguren har således fått samma utseende som efter första pålastningen. Påkänningen i övre flänsens plåtmaterial har återgått till σ_s utan att detta flyter.

Föreliggande rapport berör huvudsakligen bärverk där påkänningarna i blandkomponenten ligger inom delkomponenternas elastiska område i bruksstadiet (modulstadium A). Detta gäller för de i marknaden mest förekommande plåtmaterial med relativt hög sträckgräns.

Böjningsteoriens förutsättningar och villkor

FIG. 5 visar i princip delsträckan $d_x \approx$

d_x av ett belastat bärverk.

Skiktets och undre flänsens tvärsnittskrafter får på grund av vinkeländringen en nedåt- resp. uppåtriktad komponent $p_y \approx d\varphi \cdot T_x$ resp. $p_z \approx d\varphi \cdot D_x$ som verkar vinkelrät mot det deformerade skiktets resp. undre flänsens plan och ger upphov till en nedböjning av skiktet och en upphöjning av underflänsen i betraktad sektion, FIG. 6.

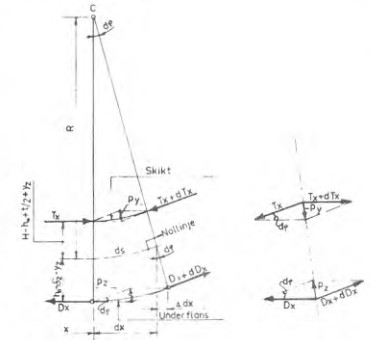


FIG. 5. Upp- och nedböjningskrafter p_z resp. p_y till följd av underflänsens resp. skiktets formändringar.

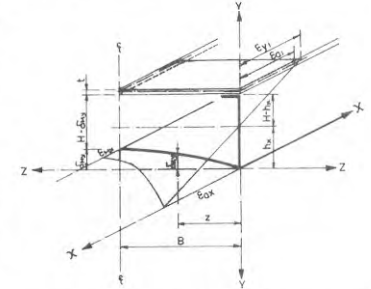


FIG. 6. Perspektiv av bärverk i snitt x-x med angivna tvärsnittsdeformationer.

För de i praktiken aktuella bärverkstyperna är skiktets böjstyvhet 60-90 ggr större än underflänsens böjstyvhet i bärverkets tvärriktning, varför det bortses från skiktets nedböjning i tvärlid vid härledning av bärverkets momentupptagningsförmåga.



Bild 1. Underflänsens uppböjning vid belastat bärverk.

Underflänsens uppböjning (jfr bild 1) reducerar det belastade bärverkets böjstyvhets. Vid beräkning av bärverkets lastupptagningsförmåga och motsvarande tvärsnittspåkänningar måste den varierande böjstyvheten (EJ_x) och det varierande nollinjeavståndet (h_x) samt underflänsens uppböjning ($\delta_{z,x}$), medverkande bredd (a) och töjningsförhållande

$$\left(\frac{\epsilon_{z,x}}{\epsilon_{a,x}}\right)$$

vid snitt z och livunderkant betraktas som obekanta.

Rapporten redogör för livets medverkan vid böjning och antagandet av bärverkets varierande böjstyvhets och nollinjeavstånd.

För beräkning av det givna bärverkets lastupptagningsförmåga betraktas följande villkor:

Jämviktstvillkoret: Förhållandet (m) mellan bärverkets nollinjeavstånd vid fältmitt och vid upplagen uttryckes som en funktion av underflänsens medverkande bredd (a), $m = f_1(a)$.

Böjstyvhetsvillkoret: Förhållandet (n) mellan bärverkets böjstyvhets vid fältmitt och vid upplagen uttryckes som en funktion av m och a , $n = f_2(m, a)$. Samhörande värden för m , n och a redovisats i diagramform. (FIG. 7.)

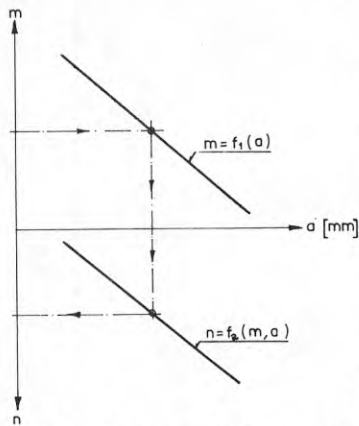


FIG. 7. Samband mellan underflänsens medverkande bredd a , och böjstyvhets- respektive nollinjeavståndsförhållandet n resp. m . (m - n - a diagram i princip)

Momentvillkoret: Påkänningen (σ_a) vid livunderkant i fältmitt erhålles som en funktion av belastningen (P), m och n .

Tvärsnittstvillkoret: Förhållandet

$$\left(\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}\right)$$

mellan underflänsens töjning vid tvärsnittets mitt och vid livunderkant i fältmitt (FIG. 6) uttryckes som en funktion av a . Med hjälp av m - n - a diagrammet (FIG. 7) erhålles samhörande värden för

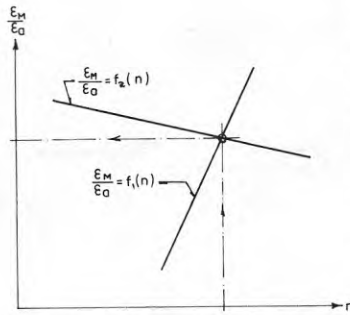


FIG. 8. Samband mellan förhållandet $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ och n i princip ($\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ - n diagram)

n varvid sambandet redovisas som kurva

$$\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a} = f_1(n)$$

i diagrammet FIG. 8. Med hjälp av tvärsnittstvillkoret erhålles även underflänsens upphöjning vid tvärsnittets mitt (δ_M) i fältmitt som en funktion av m och n .

Upplagsvillkoret: Snittet i fältmitt förutsättes fast varvid upplagen vid det belastade och deformerade bärverket erhåller förskjutningar. Dessa uttryckes som en funktion av m , n och a . Vidare förutsättes att tvärsnittet vid upplagen förblir odeformerat. Detta försäkras ett visst

$\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ -förhållande i underflänsen.

Med hjälp av m - n - a diagrammet (FIG. 7) erhålles samhörande värden för n varvid sambandet redovisas som kurva $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a} = f_2(n)$ i ovan nämnda diagram, FIG. 8.

Skärningspunkten mellan kurvorna i diagrammet anger det sökta värdet för $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ och n . Med hjälp av m - n - a diagrammet erhålles samhörande värden för m och a , varvid de övriga obekanta storheterna bestäms.

Praktiska försök

Verifierande försök i samband med böjningsteoriens utarbetande har givit ett kunskapsunderlag om påkänningsfördelningen i tvärsnittet, som dels styrker teoriens förutsättningar och som dels har givit upphov till frågeställningar som vid den fortsatta forskningen inom ämnet bör utrönas.

Den grundläggande böjningsteorien grundar sig delvis på ideella förutsättningar. Teorien tar ej hänsyn till initialpåkänningar i plåtmaterialen uppkomna i samband med valsningen. Dessa påkänningar framkallar bucklor i mitten av det obelastade bärverkets underflänsparti. I första belastningskedet har denna del av flänsen begränsad

lastupptagningsförmåga och bärverkets böjstyvhets är motsvarande mindre. Vid pålastning får underflänsen, på grund av bärverkets bøjdeformation, en större medverkande bredd och en motsvarande större böjstyvhets. Innan den medverkande bredden är maximal och bucklorna utjämnade, har underflänsens randpartier erhållit påkänningar som överskrider de enligt böjningsteorien beräknade (FIG. 9).

Samtidigt existerar inget linjärt samband mellan nedböjningen y_M och belastningen P , utan bärverket får ett nedböjningstillskott Δy_M (FIG. 10). Detta förorsakar en ytterligare ökning av påkänningarna vid randpartierna på grund av relationen mellan bärverkets nedböjning och underflänsens uppböjning.

Bortsett från nedböjningstillskottet Δy_M som bärverket erhåller på grund av initialpåkänningarnas indirekta inverkan, visar FIG. 10 att det linjära sambandet mellan nedböjningen y_M och belastningen P överensstämmer med det enligt böjningsteoriens beräknade, när tvärsnittspåkänningarna ligger inom det elastiska området.

Böjningsteorien förutsätter ett böjningsstyvt skikt i bärverkets tvärriktning och en konstant påkänning längs tvärsnittet. I realiteten koncentreras tvärsnittspåkänningarna till skiktets randpartier (FIG. 9). Påkänningskoncentrationen accentueras med ökande belastning. Orsaken är främst det tryckta skiktets utbuckling. En utkragning av skiktet över livet och en samtidig reduktion av livavståndet skulle dels öka skiktets böjstyvhets i tvärriktningen och minska de koncentrerade påkänningarna, dels bidra till en bättre utjämnning av påkänningarna och således fördröja brottet.

Praktiska erfarenheter

För att närmare studera den praktiska användningen av lättbärverk med samverkande blandkomponenter tillverkades i samband med utbyggnaden av Plywoodfabriken Otterbäcken 12 m långa takkassetter. Elementen med bredden 1200 mm motsvarade plywoodskivornas standardbredd. Profilen utgjordes av 1,7 mm förzinkad plåt med standardbredden 1070 mm. (FIG. 11.) Relationen mellan profilens höjd och basmått valdes med beaktande av ett statiskt optimalt utnyttjande. Kassetterna utformades med utkragade skikt och sammanfogades med en skarvremsa av plywood som även fungerade som skiktavstyvning.

Bild 2 visar en kasset under montering och delar av det färdigmonterade

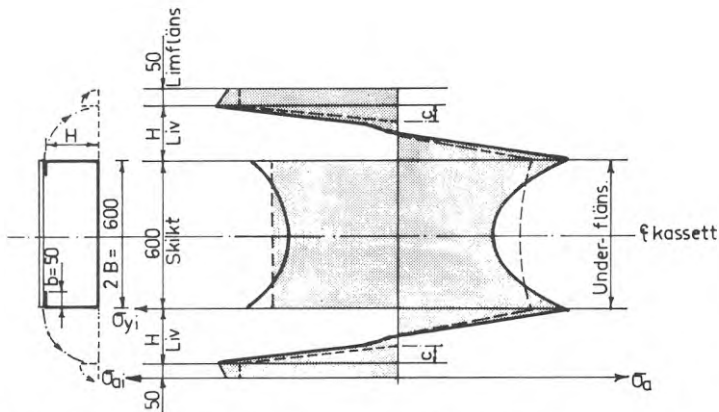


FIG. 9. Verklig och beräknad påkänningsfördelning vid utvikt tvärsnitt i princip.

taket. Byggherren och entreprenören redovisar positiva erfarenheter främst gällande ekonomin på grund av dels den uppnådda stora spännvidden och tillhörande enkelt stomsystem, dels den rationella monteringen.

Kommentar och utblick

Den härledda böjningsteorin grundar sig, som ovan nämnts, delvis på ideella förutsättningar. Det kunskapsunderlag de verifierande försöken har givit har även väckt frågeställningar som vid den fortsatta forskningen bör utrönas.

En sektionsutformning av bärverket med målsättningen att minska skiktets utbuckling och påkänningskoncentration kan öka lastupptagningsförmågan avsevärt. Problemet kartläggs lämpligen med hjälp av praktiska försök.

Initialpåkänningarnas effekt får större aktualitet vid relativt stora plana ytor. Det vore därför önskvärt att finna en

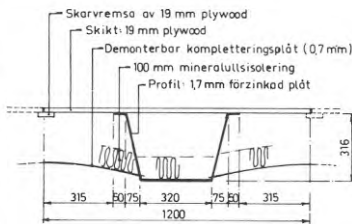
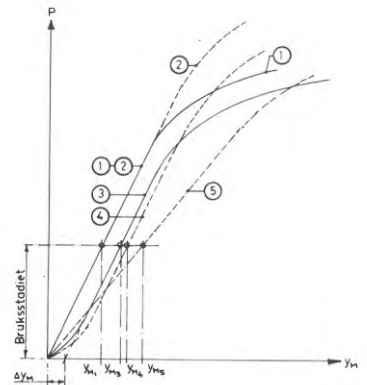


FIG. 11. Takkassett vid utbyggnaden av Plywoodfabriken i Otterbäcken - tvärsektion.

tillverkningsmetod som begränsar initialpåkänningarna i plåten.

Försöksresultaten ger vid handen att bärverkets lastupptagningsförmåga är väsentligt större än den som motsvarar livplåtbucklingen enligt den klassiska elasticitetsteorin. Även stabilitetsproblem på grund av livplåtbuckling utgör en viktig frågeställning för aktuella bärverk och är en uppgift som i fortsättningen bör prioriteras.



- Kurva 1: Verklig nedböjning utan inialpåkänning i plåten
 2: Beräknad
 3: Verklig med
 4: Beräknad
 5: utan
 men med begränsad medverkande bredd hos skikt och underfläns.

FIG. 10. Alternativa nedböjningskurvor i princip - dels verkliga - dels beräknade enligt böjningsteorin.

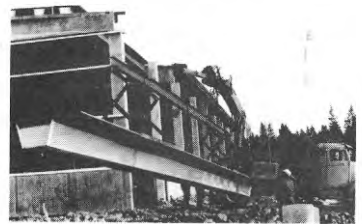


Bild 2: Kassetten under monteringen.

Böjningsteoriens giltighet vid olika lastkombinationer, bärverkets beteende vid långtidsbelastning och klimatändringarnas inverkan på lastupptagningsförmågan är likaledes frågeställningar som motiverar ett närmare studium.

Lightweight composite loadbearing elements

Jens-Fredrik Larssen

This report relates to the development of a fundamental bending theory for composite loadbearing elements spanning in one direction which are acted upon by a uniformly distributed load, and also gives an account of fullscale tests performed to verify this theory. It constitutes a subproject within the framework of the research being conducted by the Department of Steel Structures at the Royal Institute of Technology, Stockholm, which relates to 'Sheet metal panels for use in building structures'.

Background

The rapidly increasing output of sheet metal products of guaranteed strengths and high degrees of finish by the metal industry, and of different board products by the forestry and wood processing industries, has provided the impetus for a lightweight construction technique in the housing sector, in which several structurally interacting materials make up the loadbearing structure. Loadbearing elements consist of a sheet metal section as the basic component and a surface layer of a different material.

The advantage in using composite components is that the choice of materials can be optimised with regard to structural and functional requirements. In this way, boards which had previously been used only as cladding material are given another function as the loadbearing surface layer, with the result that the total material consumption is reduced.

An outline treatment of the structural problems involved in using composite loadbearing elements appeared in a previous report (R75:1973). The derived expressions and equations are based on ideal conditions regarding, for instance, the flexural stiffness of the loaded element and the distribution of stresses over the cross section. In the case of lightweight loadbearing elements made up of thin-walled sections, however, a number of instability conditions can occur which will affect the loadbearing capacity.

Composite components

The composite component consists of two or more materials which are joined together and interact structurally.

This report deals with loadbearing elements made up of a sheet metal section as the basic component and a surface layer of plywood. This means that the two materials have different load-deformation curves, and that the safety problems and also the nominal factors of safety are different.

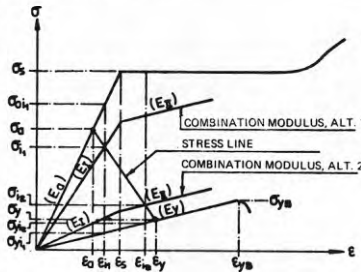


FIG. 1. Load-deformation curves for the interacting materials.

FIG. 1. shows the typical load-deformation curves for the sheet metal and the plywood. If the composite component (sheeting and plywood) is regarded as one ideal material, then its ideal elastic modulus, also referred to as the combination modulus, can be expressed as a function of the cross sectional dimensions and elastic moduli of the two materials.

The assessment of the composite component as a whole is based on the strength properties of each material. The line between the points σ_a/ϵ_a and σ_y/ϵ_y is designated the stress line; σ_a and σ_y are the permissible stresses in the sheeting and plywood respectively. The point of intersection between the stress line and the combination modulus gives the ideal stress σ_i of the composite component in the working range. This is equivalent to the stress σ_{ai} in the metal sheeting and the stress σ_{yi} in the plywood. This stress varies depending on which material it is whose structural properties predominate in the composite component. (Compare the combination moduli of Alt. 1 and Alt. 2).

As will be seen in FIG. 1, it is possible for the sheeting to have reached yield stress σ_s while the composite component is still in the working range, and for its factor of safety to have been reduced to nought. As far as the surface material is concerned, however, its stress is smaller and consequently the

Swedish Building Research Summaries

R56:1975

Key words:

light-weight load-bearing elements, composite components, sheet metal section, load-bearing elements, strength properties

Report R56:1975 refers to research grant C 913 from the Swedish Council for Building Research to the Department of Steel Construction at the Royal Institute of Technology, Stockholm.

UDC 624.016
691.7-415
SfB (29)
ISBN 91-540-2494-3

Summary of:

Larssen, J-F, 1975, *Lättbärverk med samverkande blandkomponenter*. Lightweight composite loadbearing elements. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Report R56:1975, 218 p., ill. Skr. 33.

The report is in Swedish with summaries in Swedish and English.

Distribution:

Svensk Byggtjänst,
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

factor of safety larger than those normally permitted.

Lightweight composite loadbearing elements

FIG. 2 shows a cross section through a simply supported loadbearing element in which the basic section consists of metal sheeting and the surface layer of

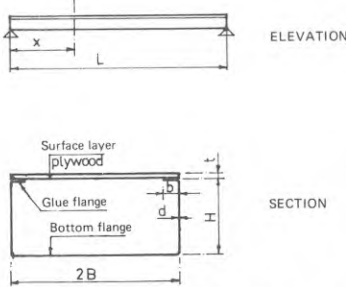


FIG. 2. Composite lightweight loadbearing element.

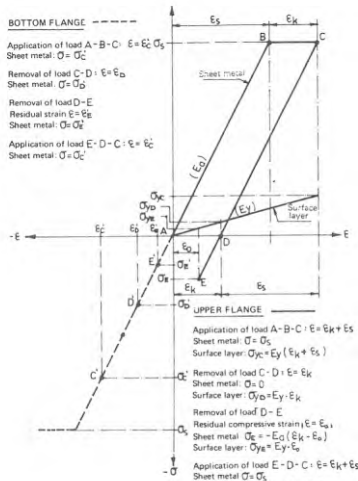


FIG. 3. Load-deformation diagram for the loadbearing element within modular stage B.

Loading stage	Application of load A-B-C	Removal of load U-D	Removal of load D-E	Application of load E-D-C
Deformations in the cross section				
Stresses in the cross section				
Elevation of element				

FIG. 4. Schematic representation of the effect of the load-deformation curves on the stress distribution during application and removal of the load in modular stage B.

plywood, the elastic moduli being E_a and E_y , respectively.

FIG. 3 shows the typical load-deformation diagram of the lightweight element on application and removal of the load, the working stress in the sheeting constituent of the composite component being σ_s (modular stage B). The right-hand part of the diagram represents the upper flange of the element (the composite component), and the left-hand part the bottom flange. FIG. 4 gives a schematic representation of the effect of the load-deformation diagrams on application and removal of the load in the working range.

Application of load (A-B-C) is accompanied by the compressive strain ($\epsilon_s + \epsilon_k$) in the upper flange and the stress $E_a(\epsilon_s + \epsilon_k)$ in the surface layer. As a result of removal of the load (C-D), the residual compressive strain ϵ_k in the sheeting material of the flange reduces the sheeting stress to nought and the surface layer stress to $\epsilon_k \cdot E_y$. The surface material, stresses in which have been within its elastic range throughout the loading process, endeavours during continued unloading (D-E) to return to its initial shape. Owing to the influence of the surface material, the steel in the upper flange, with the residual compressive strain ϵ_k in its unstressed state, is subjected to tension. When equilibrium is established, there is a residual compressive strain equal to ϵ_0 in the upper flange, a tensile stress $E_a(\epsilon_k - \epsilon_0)$ in the sheeting material and a residual compressive stress $E_y \cdot \epsilon_0$ in the surface material. The element has thus attained an initial stress. Load application (E-D-C) raises compressive strain in the upper flange from ϵ_0 to $(\epsilon_s + \epsilon_k)$.

The stress diagram is thus of the same shape as after first application of load. Stress in the sheet material of the upper flange has returned to σ_s , without this material yielding.

This report deals mainly with loadbearing elements in which the stresses in the composite component are within the

elastic ranges of the constituents (molecular stage A). This is the case with regard to the most common grades of sheeting in the market which have a relatively high yield stress.

The assumptions and conditions in the bending theory

FIG. 5 shows, in principle, the part $d_y \approx d_x$ of a loadbearing element under load. Owing to the angular movement, the cross sectional forces in the surface material and the bottom flange have a downward component $P_y \approx d_\phi \cdot T_x$ and an upward component $P_z \approx d_\phi \cdot D_x$, respectively which act at right angles to the planes of the deformed surface ma-

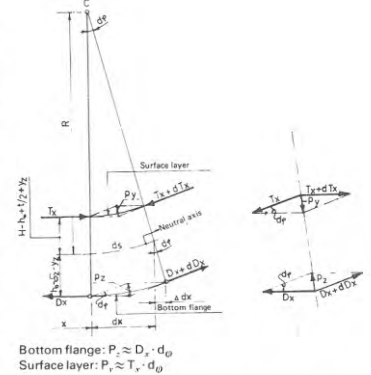


FIG. 5. Upward and downward deflection forces p_z and p_y respectively due to deformations of the bottom flange and the surface layer.

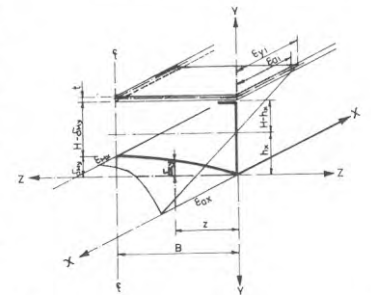


FIG. 6. Perspective of element at section X with the given deformations of the cross section.



Photograph 1. Upward deflection of bottom flange when element is loaded.

material and bottom flange, and cause a downward deflection of the surface material and an upward deflection of the bottom flange in the section under consideration, FIG. 6.

In the types of loadbearing element of practical interest, the flexural stiffness of the surface material is 60–90 times as much as that of the bottom flange in a direction transverse to the centre line, and for this reason the downward deflection of the surface material is ignored when an expression is derived for the moment capacity of the element.

The upward deflection of the bottom flange (see photograph 1) reduces the flexural stiffness of the loaded element. In calculating the loadbearing capacity of the element and the corresponding stresses in the cross section, the variable flexural stiffness (EJ_x) and the variable distance to the neutral axis (h_x), as well as the upward deflection of the bottom flange ($\delta_{z,x}$), the effective width (a) and the ratio of strains ($\epsilon_{z,x}/\epsilon_{a,x}$) at section z and the bottom of the web, must be regarded as unknowns.

The report describes the part played by the web in bending, and the assumptions regarding the variable flexural stiffness of the loadbearing element and the variable distance to its neutral axis.

In calculating the loadbearing capacity of this element, the following conditions are taken into consideration:

Equilibrium condition: The ratio (m) of the distance to the neutral axis at midspan to that at the supports is expressed as a function of the effective width (a) of the bottom flange. $m = f_1(a)$.

Flexural stiffness condition: The ratio (n) of the flexural stiffness of the element at midspan to that at the supports is expressed as a function of m and a . $n = f_2(m, a)$. Related values of m , n and a are given in the form of a diagram (FIG. 7).

Moment condition: The stress (σ_a) at the bottom of the web at midspan is ob-

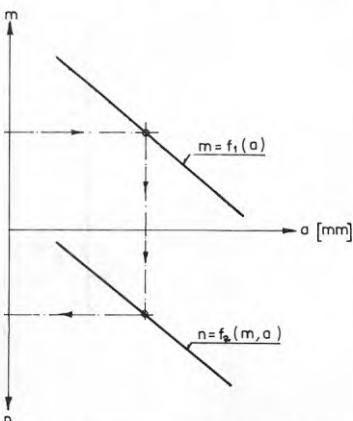


FIG. 7. Relationship between the effective width a of the bottom flange, the flexural stiffness ratio n and the ratio m of the depths to the neutral axis (typical m - n - a diagram)

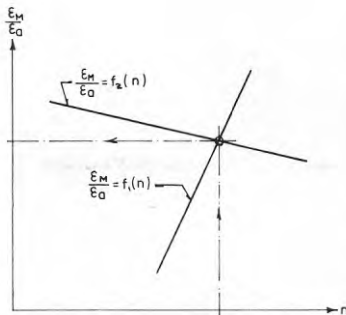


FIG. 8. Typical relationship between the ratio ϵ_M/ϵ_a and n (ϵ_M/ϵ_a - n diagram)

tained as a function of the load (p), m and n .

Cross sectional condition: The ratio (ϵ_M/ϵ_a) of the strain in the bottom flange at the centre of the cross section to that at the bottom of the web, at midspan (FIG. 6), is expressed as a function of a . With the aid of the m - n - a diagram (FIG. 7), related values of n are obtained, and the relationship is plotted as the curve $\epsilon_M/\epsilon_a = f_1(n)$ in the diagram in FIG. 8. Using the cross sectional condition, the upward deflection of the bottom flange at the centre of the cross section (δ_{Mz}) at midspan is also obtained as a function of m and n .

Support condition: The cross section at midspan is assumed to be fixed in position, and the support sections of the loaded and deformed element are consequently displaced. These are expressed as a function of m , n and a . It is also assumed that the section at the supports is not deformed. This gives rise to a certain ϵ_M/ϵ_a ratio in the bottom flange. Using the m - n - a diagram (FIG. 7), related values of n are obtained, and the relationship is plotted as the curve $\epsilon_M/\epsilon_a = f_2(n)$ in the above diagram in FIG. 8.

The point of intersection of the curves in this diagram gives the sought values of ϵ_M/ϵ_a and n . With the aid of the m - n - a diagram, related values are obtained for m and a , and the remaining unknowns can be determined.

Practical tests

Tests performed in conjunction with development of the bending theory, in order to verify this, have provided information concerning stress distribution in the cross section which partly confirms the assumptions made in the theory, and have also raised questions which should be looked into during future research in this matter.

The fundamental bending theory is based partly on ideal conditions. The theory takes no account of initial stresses in the sheet metal caused during rolling. These stresses give rise to dents at the centre of the bottom flange of the unloaded element. During the first part of the loading cycle, this part of the

flange has a reduced loadbearing capacity, and the flexural stiffness of the element is reduced to the same extent. When load is applied, the bottom flange has a larger effective width and a correspondingly higher flexural stiffness as a result of the bending deformation of the element. Before the effective width has reached its maximum extent and the dents have been straightened out, the edges of the bottom flange will have reached stresses which exceed those calculated according to the bending theory (FIG. 9).

At the same time, there is no linear relationship between the deflection y_M and the load P , but the element has an additional deflection Δy_M (FIG. 10). This causes further increase in the stresses at the edges, due to the relationship between downward deflection of the element and the upward deflection of the bottom flange.

FIG. 10 shows that, disregarding the additional deflection Δy_M which the element has due to the indirect effect of the initial stresses, the linear relationship between the deflection y_M and the load P agrees with that calculated by the bending theory when the stresses in the cross section are within the elastic range.

The bending theory assumes that there is a flexurally stiff surface layer in the transverse direction and that the stress across the section is constant. In reality, the stresses are concentrated at the edges of the surface layer (FIG. 9). As the load is increased, this concentration of stress is accentuated. The main reason for this is buckling of the surface material in compression. If the surface material was made to cantilever over the edge of the web and the distance between the webs was reduced at the same time, this would increase flexural stiffness of the surface material in the transverse direction and reduce stress concentration, and would also be instrumental in better equalisation of the stresses and thus in delaying failure.

Practical experience

In order to study more closely the practical use of lightweight composite loadbearing elements, roof cassettes of 12 m length were manufactured in conjunction with the extension of the Plywood Works at Otterbäcken. Elements of 1200 mm width were made with sheets of plywood of standard width. The sheet metal section consisted of 1.7 mm thick galvanized steel with the standard width of 1070 mm (FIG. 11). The relationship between the height and base width of the sheet metal section was determined on the basis of optimum structural utilisation. The cassettes were designed in such a way that the surface layer projected on each side of the sheet metal section; the surface layers of adjacent elements were jointed by means of splice strips of plywood which also

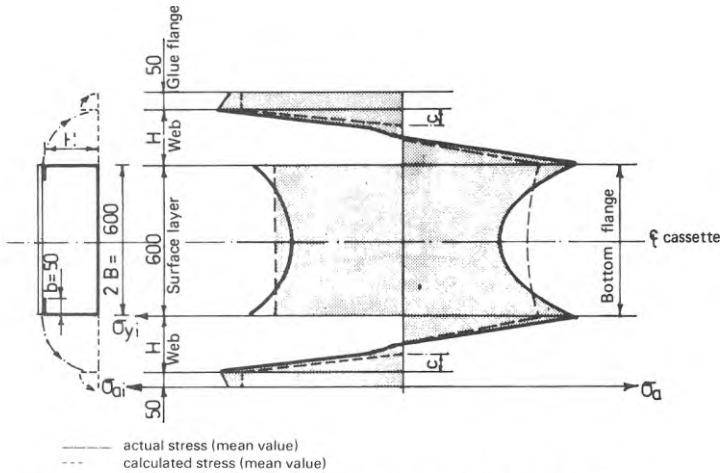


FIG. 9. Typical stress distributions over the cross section (shown in the unfolded state)

had the function of stiffening the surface layer.

Photograph 2 shows a cassette being erected and also parts of the finished roof. The client and the contractor state that their experience is positive, mainly because of the economy due to the large span and the consequent simplicity of the skeleton system, and also because of the rational erection procedure.

Comments and prospects

As mentioned before, the bending theory which has been developed is based partly on ideal conditions. The data obtained in the course of verifying tests have also given rise to questions which should be locked into during further research.

Design of the cross section of the element so as to reduce buckling of the surface layer and concentration of stress in this can increase considerably the loadbearing capacity. This problem is investigated most conveniently by means of practical tests.

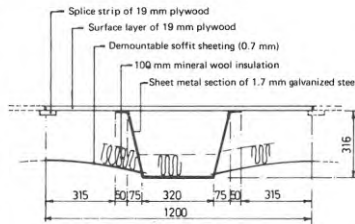


FIG. 11. Roof cassette used for extending the Plywood Works at Otterbäcken - cross section.

The effect of initial stresses is of major importance when the plane surfaces are relatively large. It would therefore be desirable to find a manufacturing method which limits the initial stresses in the sheet metal.

Tests results show that the loadbearing capacity of the element is substantially higher than that corresponding to buckling of the web plate according to the classical elastic theory. The stability problem due to buckling of the web plate is also an important matter, and is a

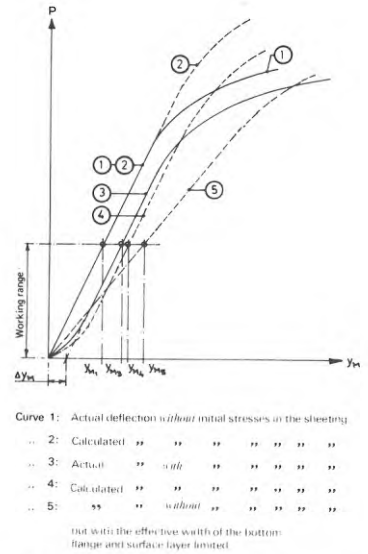


FIG. 10. Typical alternative deflection curves, both actual ones and ones calculated by the bending theory.



Photograph 2. Cassette being erected.

research task which should receive priority in future work.

The validity of the bending theory in conjunction with different load combinations, the behaviour of the element on long-term loading and the effect of climatic changes on the loadbearing capacity, are further problems which merit closer study.

Rapport R56:1975

LÄTTBÄRVERK MED SAMVERKANDE BLANDKOMPONENTER

av civ.ing. Jens-Fredrik Larssen

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag C 913 från
Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen för
Stålbyggnad, KTH, Stockholm.

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
ISBN 91-540-2494-3

LiberTryck Stockholm 1975

INNEHÅLL

	sid		sid	
FÖRORD	4	4	PRAKTISKA FÖRSÖK AV LÄTTBÄRVERK UTSATTA FÖR BÖJNING	88
BETECKNINGAR	5			
FIGURFÖRTECKNING	7	4.1	Provkroppar	88
TABELLFÖRTECKNING	13	4.2	Belastningsanord- ning och mätinstru- ment	93
RITNINGSFÖRTECKNING	14	4.3	Referensförsök	97
BILDFÖRTECKNING	15	4.3.1	Dragprovning av plåt	99
1 INLEDNING	16	4.3.2	Tryckprovning av plywood	103
2 GRUNDLÄGGANDE BÖJ- NINGSTEORI FÖR LÄTT- BÄRVERK MED SAMVER- KANDE BLANDKOMPO- NENTER	17	4.3.3	Limfog	106
2.1 Förutsättningar	17	4.4	Analys av försöks- resultaten	110
2.2 Livets medverkan vid böjning	21	4.4.1	Försöksserie F	118
2.3 Deformationer	26	4.4.2	Försöksserie E	121
2.4 Jämviktsvillkoret ..	35	4.4.3	Försöksserie C	131
2.5 Bøjstyvhetsvill- koret	38	4.4.4	Försöksserie A, B, D och H	136
2.6 Momentvillkoret	39	4.4.5	Försöksserie G	146
2.7 Tvärsnittsvill- koret	40	4.4.6	Instabilitet på grund av livplåt- utbuckling	150
2.8 Upplagsvillkoret ...	51	4.5	Praktiska erfaren- heter	153
2.9 Kontroll av bland- komponentens skikt- och plåtpåkänning ..	58	5	SAMMANFATTNING	156
2.10 Bärverk med bland- komponent inom modulstadium B i bruksstadiet	59		LITTERATUR	162
2.11 Deformationer och påkänningsfördel- ning för bärverk inom modulsta- dium B	61		APPENDIX 1: RITN. nr 1-3	
2.12 Sammanfattning	65		APPENDIX 2: Töjnings-stuk- ningsdiagram. Påkännings- diagram (FIG 68-125)	
3 BERÄKNINGSEXEMPEL .	68			
3.1 Beräknings- exempel 1	68			
3.2 Beräknings- exempel 2	79			

FÖRORD

Det snabbt ökande utbudet av tunnplåt med garanterade hållfasthetsvärden och hög förädlingsgrad från metallindustrin och olika skivprodukter från skogs- och övriga industrier har givit impulser till en lättbyggnadsteknik inom husbyggnadssektorn, där flera samverkande material ingår i bärverket. Ytbärverkselementen är uppbyggda av tunnplåtsprofiler som baskomponent med skikt av artfrämmande material.

Statiska frågeställningar rörande bärverkselement av samverkande blandkomponenter har i en tidigare rapport (R75:1973) översiktligt behandlats. Föreliggande rapport omfattar dels utarbetning av en grundläggande böjningsteori för enkelspända bärverk påverkad av jämnt fördelad belastning, dels en redovisning av verifierande försök.

Ämnesområdet utgör ett delprojekt inom ramen för det forskningsarbete, som med ekonomiskt stöd från BFR bedrivs vid Avdelningen för Stålbyggnad (KTH) och som avser "Plåtpaneler i byggnadsteknisk användning".

Professor Rolf Baehre har som handledare på ett stimulerande sätt bidragit till arbetets genomförande.

Försöken har utförts i avdelningens laboratorium under ledning av forskningsingenjör Börje Löfvén. Följande företag har bidragit med försöksmateriel:

Norrbottnens Järnverk AB (NJA), Luleå,
Skogsägarnas Vänerindustrier AB, Karlstad,
Svenska Cellulosa AB (SCA), Sundsvall, och
AB Casco, Stockholm.

Arbetet har krävt insatser från ett flertal håll. Bland annat har det ställt stora krav på min medarbetare, ingenjör Lennart Olsson, som har visat stort tålamod och intresse.

Vidare har jag under arbetets gång haft förmånen att föra givande diskussioner med civilingenjör Jan Sjölund. Utskrift och viss redigering av manuskriptet har på ett förtjänstfullt sätt utförts av fru Gunvor Öjemo.

Till ovan nämnda samt övriga som medverkat till att arbetet har kunnat genomföras framför jag mitt varma tack.

Stockholm i augusti 1975.

Jens-Fredrik Larssen

BETECKNINGAR

B	Profil- resp. sektionsbredd	[mm]
H	Profilhöjd	[mm]
D_x	Undre flänsens dragkraft i snitt x (tvärsnittskraft)	[N]
T_x	Skiktets tryckkraft i snitt x (tvärsnittskraft)	[N]
M_A	Tvärsnittsmoment vid u.k. liv	[N·mm]
E_a	Plåtmaterialiets elasticitetsmodul	[N/mm ²]
E_y	Skiktmaterialiets elasticitetsmodul	[N/mm ²]
E_L	Limmets elasticitetsmodul	[N/mm ²]
E_I	Blandkomponentens elasticitetsmodul för $\varepsilon < \varepsilon_s$	[N/mm ²]
E_{II}	Blandkomponentens elasticitetsmodul för $\varepsilon > \varepsilon_s$	[N/mm ²]
G	Plåtmaterialiets skjuvmodul	[N/mm ²]
EI_0	Bärverkets böjstyvhets vid upplag ($x = 0$)	[N·mm ²]
$EI_{L/2}$	Bärverkets böjstyvhets vid fältmitt ($x = L/2$)	[N·mm ²]
EI_a	Underflänsens böjstyvhets i bärverkets tvärriktning	[N·mm ²]
EI_{90}	Skiktets böjstyvhets i bärverkets tvärriktning	[N·mm ²]
a	Underflänsens medverkande bredd	[mm]
b	Profilens plåtbredd vid övre fläns (limfläns)	[mm]
c	Livets tryckta "effektiva" höjd	[mm]
d	Profilens plåttjocklek	[mm]
h_0	Nollinjeavståndet från u.k. liv vid upplagen	[mm]
m	Förhållandet mellan nollinjeavståndet vid fältmitt och vid upplagen	-
n	Förhållandet mellan bärverkets böjstyvhets vid fältmitt och vid upplagen	-
t	Sektionens skivtjocklek (skikttjocklek)	[mm]
t'	Summan av fanertjockleken i bärverkets längdriktning	[mm]

t''	Summan av fanertjockleken i bärverkets tvärriktning	[mm]
p_y	Nedböjningskraft per ytenhet till följd av skiktets formändring	[N/mm ²]
p_z	Uppböjningskraft per ytenhet till följd av undre flänsens formändring	[N/mm ²]
y_M	Bärverkets nedböjning vid $x = L/2$	[mm]
σ_a	Tillåten plåtpåkänning (påkänning i u.k. liv)	[N/mm ²]
σ_{ai}	Blandkomponentens plåtpåkänning i bruksstadiet	[N/mm ²]
σ_{az}	Underflänsens påkänning i snitt $z \neq 0$	[N/mm ²]
σ_{aM}	Underflänsens påkänning i snitt $z = B$	[N/mm ²]
σ_y	Tillåten skiktupåkänning	[N/mm ²]
σ_{yi}	Blandkomponentens skiktupåkänning i bruksstadiet	[N/mm ²]
σ_{Li}	Blandkomponentens limpåkänning i bruksstadiet	[N/mm ²]
σ_i	Blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet	[N/mm ²]
σ_s	Plåtmateriallets sträckgränspåkänning	[N/mm ²]
δ_M	Underflänsens uppböjning vid tvärsnittets mitt	[mm]
δ_z	Underflänsens uppböjning i snitt z	[mm]
ε_a	Underflänsens töjning vid u.k. liv	-
ε_{az}	Underflänsens töjning vid snitt $z \neq 0$	-
ε_i	Blandkomponentens stukning i bruksstadiet	-
ε_{ai}	Plåtens stukning i blandkomponenten	-
ε_{yi}	Skiktets stukning i blandkomponenten	-
$d\phi$	Kontingensvinkel för delsträckan dx	-

$$\text{N/mm}^2 = 10^{-1} \text{ kp/mm}^2 = 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\text{N/m}^2 = 10^{-7} \text{ kp/mm}^2 = 10^{-6} \text{ N/mm}^2$$

Övriga beteckningar definieras i anslutning till texten.

FIGURFÖRTECKNING

- FIG 1 Lättbärverk med samverkande blandkomponenter
- FIG 2 Provtav av samverkande material-blandkomponent
- FIG 3 Arbetskurvor för samverkande material
- FIG 4 Livets medverkan vid böjning; typisk töjningsfördelning vid böjmomentpåverkat livtvärsnitt
- FIG 5 Samband mellan stukning ϵ_{ai} och livets "effektiva" höjd i förhållande till tjockleken (ϵ_{ai} -c/d-diagram)
- FIG 6 Samband mellan stukning ϵ_{ai} och "effektiv" höjd c vid aktuell godstjocklek d (ϵ_{ai} -c-diagram)
- FIG 7 Arbetskurvor för blandmaterialen - limfläns och skikt (modulstadium A)
- FIG 8 Upp- och nedböjningskrafter p_z resp. p_y till följd av underflänsens resp. skiktets formändringar
- FIG 9 Perspektiv av bärverk i snitt x med angivna tvärsnittsdeformationer
- FIG 10 Sambandet mellan bärverkets böjstyvhets EI_x och nollinjeavstånd h_x i snitt x (exempel)
- FIG 11 Moment, böjstyvhets, nollinjeavstånd, elastiska vikter och nedböjning för bärverk påverkat av jämnt fördelad belastning
- FIG 12 Samband mellan nedböjningen i fältmitt och böjstyvhetsförhållandet n (Y_M -n-diagram)
- FIG 13 Tvärsnittskrafter, nollinjeavstånd och böjstyvhets för avstyvat liv och underfläns
- FIG 14 Tvärsnittskrafter, nollinjeavstånd och böjstyvhets vid snitt $x/L = 0,5$
- FIG 15 Samband mellan underflänsens medverkande bredd a och böjstyvhets- resp. nollinjeavståndsförhållandet n resp. m (m-n-a-diagram i princip)
- FIG 16 Underflänsens uppböjning på grund av uppböjningskraften p_z
- FIG 17 Antagna uppböjningar δ_{Mz}
- FIG 18 Perspektiv av bärverkstväschnitt med angivna upp- och nedböjningskrafter p_z resp. p_y
- FIG 19 Geometriska förhållanden vid belastat och deformerat bärverk

- FIG 20 Basprofil i princip visande bucklig underfläns och förskjutningsmättet ΔL_4 efter framställningen
- FIG 21 Bedömning av förskjutningsmätt ΔL_1 , ΔL_2 , ΔL_3 för er-hållande av upplagsvillkoret
- FIG 22 Samband mellan förhållandet $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ och n i princip ($\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ -n-diagram)
- FIG 23 Arbetskurvor för blandmaterialen - limfläns och skikt (modulstadium B)
- FIG 24 Tvärsnittskrafter för bärverk inom modulstadium B
- FIG 25 Arbetsdiagram för lättbärverk inom modulstadium B
- FIG 26 Schematisk framställning av arbetskurvornas inverkan på spänningsfördelningen vid på- och avlastning inom modulstadium B
- FIG 27 Bärverk utsatt för böjning - beräkningsexempel 1
- FIG 28 m-n-a-diagram - beräkningsexempel 1
- FIG 29 $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ -n-diagram - beräkningsexempel 1
- FIG 30 Påkänningsfördelningen vid snitt $x = L/2$ - beräkningsexempel 1
- FIG 31 Bärverk utsatt för böjning - beräkningsexempel 2
- FIG 32 Momentupptagningsförmågan i relation till tvärsnittets utformning - beräkningsexempel 2
- FIG 33 q-L-y-diagram - beräkningsexempel 2
- FIG 34 Antagna arbetskurvor för plåt och plywood i princip
- FIG 35 Provkasset med angivna tvärsnitt och tvärsnittspåkänningar i snitt $x/L = 0,5$
- FIG 36 Liv- och flänsavstyvningar för kasset G2
- FIG 37 Belastningsanordning Plan och Elevation
- FIG 38 Belastningsanordning Sektion
- FIG 39 Mätutrustningens placering i princip
- FIG 40 Provstav (SIS 11 21 21)
- FIG 41 Plåtmaterialets arbetskurvor, sammanställning av resultat från 23 dragprov
- FIG 42 Karakteristiska last- och formändringsdiagram för tunnplåt

- FIG 43 Provkroppar till samt resultat av i fiberriktningen tryckt plywood
- FIG 44 σ - ϵ -diagram för i fiberriktningen tryckt plywood. Serie F 1.
- FIG 45 Arbetskurvor i princip för kombinationsmaterialet plåt, plywood och lim
- FIG 46 Orienterande limförsök med dels förzinkade och dels avzinkade limytor
- FIG 47 Töjnings-stukningsdiagram vid utvikt tvärsnitt i princip
- FIG 48 Verklig och beräknad påkänningsfördelning vid utvikt tvärsnitt i princip
- FIG 49 Plåtmateriallets arbetskurva i princip
- FIG 50 Nedböjningsdiagram i princip vid snitt $x/L = 0,5$
- FIG 51 Diagram i princip visande uppböjningen δ_M av undre fläns och nedböjningen δ_y av skiktet i snitt $x/L = 0,5$
- FIG 52 Nedböjningsdiagram. Serie F
- FIG 53 Uppböjningen δ_M i underfläns för $x/L = 0,5$. Kassett F 1
- FIG 54 Nedböjningsdiagram. Serie E
- FIG 55 Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kassett E 1
- FIG 56 Nedböjningsdiagram. Serie C
- FIG 57 Plywoodmateriallets arbetskurva i princip
- FIG 58 Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Serie C
- FIG 59 Nedböjningsdiagram. Serie A
- FIG 60 Nedböjningsdiagram. Serie B
- FIG 61 Nedböjningsdiagram. Serie D
- FIG 62 Nedböjningsdiagram. Serie H
- FIG 63 Nedböjningsdiagram. Serie G
- FIG 64 Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kassett G 1
- FIG 65 Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kassett G 2

- FIG 66 Takkassett vid utbyggnaden av Plywoodfabriken i Otterbäcken - tvärsektion
- FIG 67 Alternativa nedböjningskurvor i princip - dels verkliga, dels beräknade enligt böjningsteorin
- FIG 68 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_4 = 223$ kp. Kassett F1
- FIG 69 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_6 = 304$ kp. Kassett F1
- FIG 70 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_8 = 386$ kp. Kassett F1
- FIG 71 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{10} = 467$ kp. Kassett F1
- FIG 72 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{12} = 548$ kp. Kassett F1
- FIG 73. Stukningsdiagram för ytskikt vid $P_{12} = 548$ kp. Kassett F1
- FIG 74 Stukningsdiagram för ytskikt vid $P_{\text{Brott}} = 650$ kp. Kassett F1
- FIG 75 Påkänningsdiagram vid $P_4 = 223$ kp. Kassett F1
- FIG 76 Påkänningsdiagram vid $P_6 = 304$ kp. Kassett F1
- FIG 77 Påkänningsdiagram vid $P_8 = 386$ kp. Kassett F1
- FIG 78 Påkänningsdiagram vid $P_{10} = 467$ kp. Kassett F1
- FIG 79 Påkänningsdiagram vid $P_{12} = 548$ kp. Kassett F1
- FIG 80 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_4 = 225$ kp. Kassett E1
- FIG 81 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_6 = 307$ kp. Kassett E1
- FIG 82 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_8 = 388$ kp. Kassett E1
- FIG 83 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{10} = 469$ kp. Kassett E1
- FIG 84 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{12} = 551$ kp. Kassett E1
- FIG 85 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{14} = 632$ kp. Kassett E1
- FIG 86 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{16} = 713$ kp. Kassett E1
- FIG 87 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{19} = 795$ kp. Kassett E1
- FIG 88 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{23} = 876$ kp. Kassett E1
- FIG 89 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{26} = 937$ kp. Kassett E1
- FIG 90 Stukningsdiagram för ytskikt vid $P_{23} = 876$ kp. Kassett E1
- FIG 91 Stukningsdiagram för ytskikt vid $P_{\text{Brott}} = 937$ kp. Kassett E1
- FIG 92 Påkänningsdiagram vid $P_4 = 225$ kp. Kassett E1

- FIG 93 Påkänningsdiagram vid $P_6 = 307$ kp. Kasset E1
- FIG 94 Påkänningsdiagram vid $P_8 = 388$ kp. Kasset E1
- FIG 95 Påkänningsdiagram vid $P_{10} = 469$ kp. Kasset E1
- FIG 96 Påkänningsdiagram vid $P_{12} = 551$ kp. Kasset E1
- FIG 97 Påkänningsdiagram vid $P_{14} = 632$ kp. Kasset E1
- FIG 98 Påkänningsdiagram vid $P_{16} = 713$ kp. Kasset E1
- FIG 99 Påkänningsdiagram vid $P_{19} = 795$ kp. Kasset E1
- FIG 100 Påkänningsdiagram vid $P_{23} = 876$ kp. Kasset E1
- FIG 101 Påkänningsdiagram vid $P_{26} = 937$ kp. Kasset E1
- FIG 102 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_4 = 222$ kp. Kasset C1
- FIG 103 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_5 = 263$ kp. Kasset C1
- FIG 104 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_6 = 303$ kp. Kasset C1
- FIG 105 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_8 = 385$ kp. Kasset C1
- FIG 106 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{10} = 466$ kp. Kasset C1
- FIG 107 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{12} = 507$ kp. Kasset C1
- FIG 108 Påkänningsdiagram vid $P_4 = 222$ kp. Kasset C1
- FIG 109 Påkänningsdiagram vid $P_5 = 263$ kp. Kasset C1
- FIG 110 Påkänningsdiagram vid $P_6 = 303$ kp. Kasset C1
- FIG 111 Påkänningsdiagram vid $P_8 = 385$ kp. Kasset C1
- FIG 112 Påkänningsdiagram vid $P_{10} = 466$ kp. Kasset C1
- FIG 113 Påkänningsdiagram vid $P_{12} = 507$ kp. Kasset C1
- FIG 114 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_4 = 221$ kp. Kasset G1
- FIG 115 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_6 = 303$ kp. Kasset G1
- FIG 116 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_8 = 384$ kp. Kasset G1
- FIG 117 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{10} = 465$ kp. Kasset G1
- FIG 118 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{12} = 546$ kp. Kasset G1
- FIG 119 Töjnings-stukningsdiagram vid $P_{14} = 628$ kp. Kasset G1
- FIG 120 Påkänningsdiagram vid $P_4 = 221$ kp. Kasset G1
- FIG 121 Påkänningsdiagram vid $P_6 = 303$ kp. Kasset G1

- FIG 122 Påkänningsdiagram vid $P_8 = 384$ kp. Kasset G1
- FIG 123 Påkänningsdiagram vid $P_{10} = 465$ kp. Kasset G1
- FIG 124 Påkänningsdiagram vid $P_{12} = 546$ kp. Kasset G1
- FIG 125 Påkänningsdiagram vid $P_{14} = 628$ kp. Kasset G1

TABELLFÖRTECKNING

- TABELL 1 Elastiska vikter
- TABELL 2 Vinkeländringar
- TABELL 3 Uppböjningen δ_z i snitt z/B
- TABELL 4 Elastiska vikter
- TABELL 5 Vinkeländringar
- TABELL 6 Vinkeländringen $y'_M - \delta'_M$ i snitt x/L
- TABELL 7 Momentupptagningsförmåga i relation till tvärsnittsutformningen
- TABELL 8 Relationerna mellan y, L och q
- TABELL 9 Data beräknade enligt böjningsteorin där $\sigma_{ai} = \sigma_s = 340$ [N/mm²], $E_a = 21 \cdot 10^4$ [N/mm²] och $E_y = 0,9 \cdot 10^4$ [N/mm²]
- TABELL 10 Tarering av belastningsanordningens hävarmar
- TABELL 11 Resultat från dragprovning av plåt
- TABELL 12 Beräkning av elasticitetsmodulen E_a och E_y

RITNINGSFÖRTECKNING

RITNING 1 Plåtprofiler

RITNING 2 Plywood

RITNING 3 Lastuppställning, töjningsgivare

BILDFÖRTECKNING

- BILD 1 Belastningsanordningen
- BILD 2 Provkropp för i fiberriktningen tryckt plywood
- BILD 3 Provkropp vid orienterande limförsök
- BILD 4 Detalj av limfogens brottyta
- BILD 5 Kasset F1 efter brott
- BILD 6 Kasset F2 efter brott
- BILD 7 Kasset F3 efter brott
- BILD 8 Kasset F3 - detalj vid limfläns
- BILD 9 Kasset E1 efter brott
- BILD 10 Kasset E1 - detalj vid limfläns
- BILD 11 Kasset E2 efter brott
- BILD 12 Kasset E3 efter brott
- BILD 13 Kasset E2 - detalj vid limfläns
- BILD 14 Kasset E2 - detalj vid limfläns
- BILD 15 Underflänsens uppböjning vid belastat bärverk
- BILD 16 Livens sidoutböjning vid belastat bärverk
- BILD 17 Kasset C3 efter brott
- BILD 18 Kasset A1 efter brott
- BILD 19 Kasset A2 efter brott
- BILD 20 Kasset B2 efter brott
- BILD 21 Kasset H1 vid belastning
- BILD 22 Kasset H3 efter brott
- BILD 23 Livbuckling vid kasset G1:s upplag
- BILD 24 Kasset G1 efter brott
- BILD 25 Kasset G2 efter brott
- BILD 26 Kasset G2:s liv efter brott
- BILD 27 Kasset under montering
- BILD 28 Takinteriör

1 INLEDNING

Statiska frågeställningar rörande bärverkselement av samverkande blandkomponenter har i en tidigare rapport från byggforskningen (R75:1973) översiktligt behandlats. De härledda uttrycken och ekvationerna grundar sig på ideella förutsättningar bland annat i fråga om det belastade bärverkets böjstyvhet och påkänningarnas fördelning i tvärsnittet.

Vid lättbärverk av tunnväggiga profiler kan ett flertal instabilitetsformer bli aktuella som inverkar på lastupptagningsförmågan. Denna redogörelse koncentrerar sig kring ett studium av fritt upplagda bärverk med samverkande blandkomponenter, där basprofilen utgörs av förzinkad tunnplåt och det relativt styva skiktet, som representerar den tryckta delen inom tvärsnittet, av plywood. Bärverken är påverkade av en jämnt fördelad belastning.

Arbetet har huvudsakligen rört sig kring ett ingående studium av påkänningsfördelningen vid ren böjning inom modulstadium A, vilket innebär att påkänningarna i blandkomponenten (limfläns + skikt) ligger inom delkomponenternas elastiska område i brukstadiet. Detta gäller för de i marknaden mest förekommande plåtkvaliteterna med relativt hög sträckgräns.

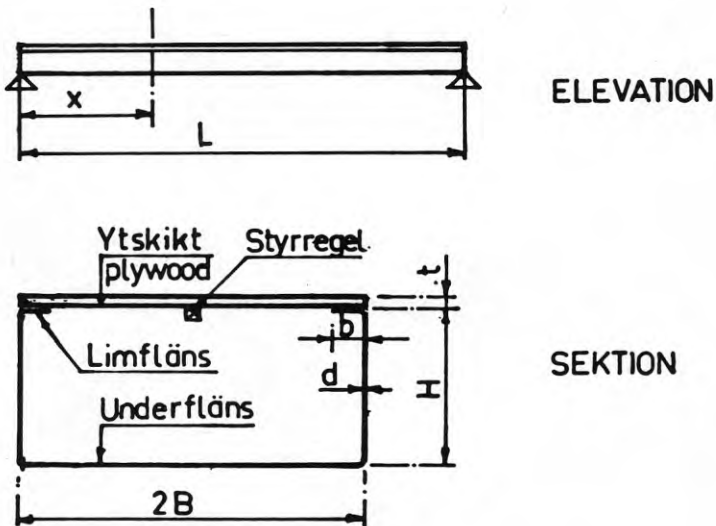
För plåtkvaliteter med relativt låg sträckgräns kan påkänningen i limflänsen ligga utanför materialets elastiska område i brukstadiet. Detta motsvarar modulstadium B.

Målsättningen har varit att över en teoretisk behandling och verifierande försök ge ett grundläggande beräkningsunderlag för dimensionering av fritt upplagda kassettbärverk, påverkade av jämnt fördelad belastning.

2 GRUNDLÄGGANDE BÖJNINGSTEORI FÖR LÄTTBÄRVERK MED SAMVERKANDE BLANDKOMPONENTER

2.1 Förutsättningar

FIG 1 visar en elevation av och sektion genom ett fritt upplagt bärverk, där basprofilen utgörs av tunnplåt med tjockleken d [mm]. Basprofilens bredd och höjd är lika med $2B$ [mm] resp. H [mm] och limflänsbredden b [mm]. Skiktet med tjockleken t [mm] bildar tillsammans med limflänsen och limskiktet blandkomponenten i bärverket. Det förutsättes att full samverkan råder mellan de båda komponenterna.



BASPROFIL.

Förzinkad tunnplåt.

Elasticitetsmodul: E_0

Tjocklek: d

YTSKIKT

Plywood

Elasticitetsmodul: E_y

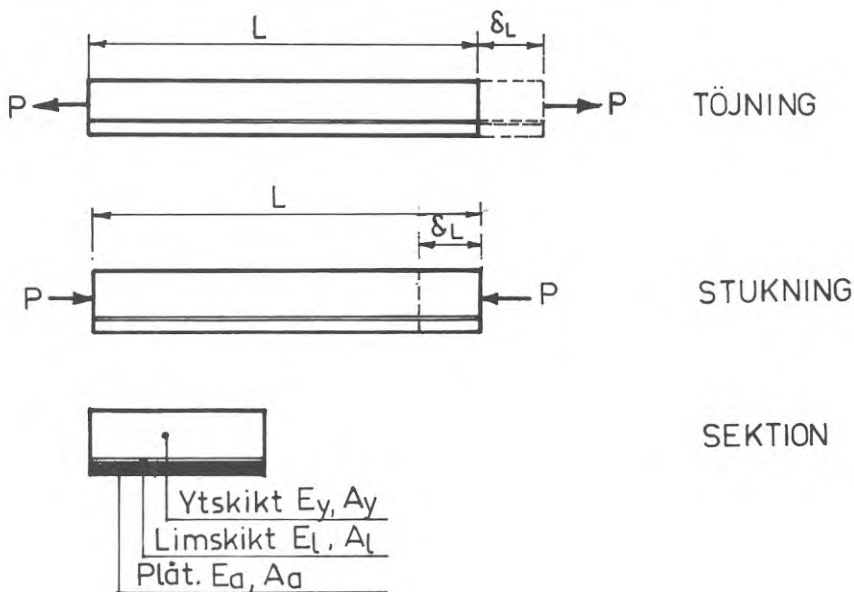
Tjocklek: t

Effektiv tjocklek i längdriktning: t'

—•—•—•— i tvärriktning: t''

FIG 1. Lättbärverk med samverkande blandkomponenter

För att belysa blandkomponentens funktionssätt betraktas en provstav enligt FIG 2 bestående av två med lim hopfogade material - det ena av tunnplåt och det andra av en plywoodskiva. Dessa tillsammans med limskiktet är samverkande och bildar en så kallad blandkomponent. Tvärsnittsarea och elasticitetsmodul för tunnplåten, plywoodskivan och limmet är A_a och E_a , A_y och E_y resp. A_L och E_L . Utsätts staven för en yttre drag- eller tryckkraft P , får denna en förlängning resp. en hoptryckning $\delta_L = L \cdot \varepsilon$. Påkänningen σ varierar med ε enligt FIG 3, som i princip visar arbetskurvorna för plåt- och skiktmaterial samt limmet. För den följande behandlingen förutsättes att skiktmateriallets elastiska område sträcker sig till brott och att arbetskurvan för plåtmaterialiet uppvisar ett typiskt flytområde.



Töjningen resp. stukningen: $\delta_L = \varepsilon \cdot L$

Vidare är A_y, E_y , $A_L \cdot E_L$, och $A_a \cdot E_a$

ytskiktets, limskiktets resp. plåtens area och elasticitetsmod.

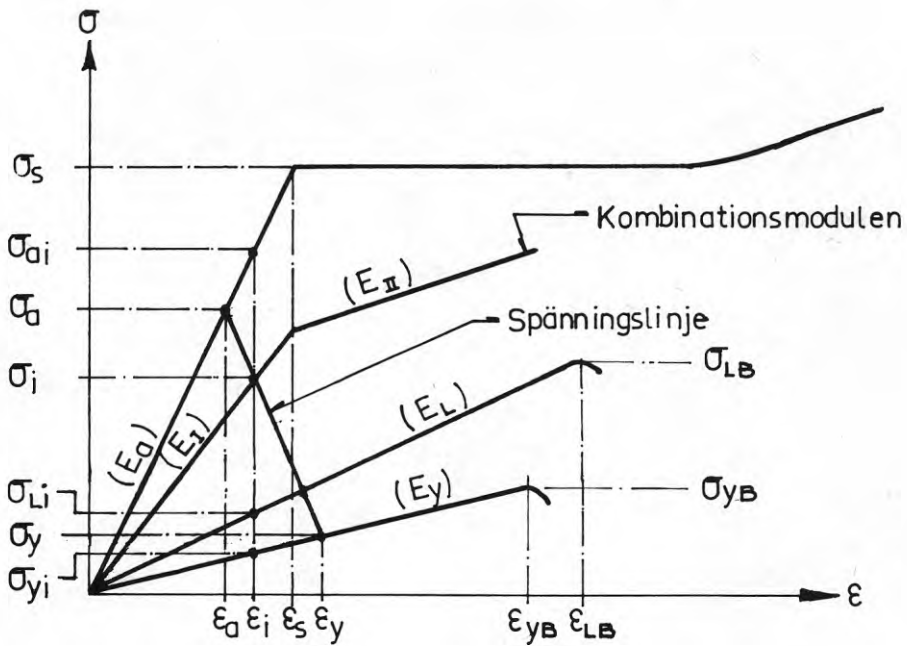
Inom det elastiska området är enligt Hookes lag:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{E_y} = \frac{\sigma_L}{E_L} = \frac{\sigma_a}{E_a} \quad \text{varvid inom blandkomponenten}$$

Limmets lastupptagning motsvarar:

$$P_L = \frac{A_L \cdot E_L}{A_a \cdot E_a + A_y \cdot E_y + A_L \cdot E_L} \cdot P$$

FIG 2. Provstav av samverkande material-blandkomponent



Kombinationsmodulen E_I resp. E_{II}

$$E_I = \frac{E_y \cdot A_y + E_a \cdot A_a + E_L \cdot A_L}{A_a + A_y + A_L} \approx \frac{E_y \cdot A_y + E_a \cdot A_a}{A_a + A_y} \quad (0 < \varepsilon < \varepsilon_s)$$

$$E_{II} = \frac{E_y \cdot A_y + E_L \cdot A_L}{A_y + A_L} \approx E_y \quad (\varepsilon > \varepsilon_s)$$

FIG 3. Arbetskurvor för samverkande material

Betraktas blandkomponenten som ett ideellt material, kan dess ideella elasticitetsmodul (E_I , E_{II}) uttryckas som en funktion av de tre blandmaterialens areor och elasticitetsmoduler:

$$\text{För } 0 < \varepsilon < \varepsilon_s \text{ är } E_I = \frac{E_y \cdot A_y + E_a \cdot A_a + E_L \cdot A_L}{A_y + A_a + A_L}$$

$$\text{För } \varepsilon > \varepsilon_s \text{ är } E_{II} = \frac{E_y \cdot A_y + E_L \cdot A_L}{A_y + A_L},$$

vilket alltså förutsätter att arbetskurvan för plåtmaterialiet är av ideal-elastoplastisk typ.

Som framgår av uttrycken för kombinationsmodulen närmar sig kurvans utseende plåtmaterialiets resp. skiktmaterialiets arbetskurvor, allt i förhållande till delmaterialens relativa lastupptagning. På grund av limmets relativt tunna skikt bortses från detta vid beräkningen av delmaterialens påkänningar. Arbetskurvan för limmet bör ha ett sådant utseende i förhållande till skiktets arbetskurva att limpåkänningen i brukssta-diet $\sigma_{L_i} = \epsilon_i \cdot E_L$ har en betryggande säkerhet mot brott σ_{LB} [FIG 3]. Är förutsättningen

$$\epsilon_{yB} \leq \epsilon_{LB} \quad \text{eller} \quad E_L \leq E_y \cdot \frac{\sigma_{LB}}{\sigma_{yB}}$$

uppfyllt bortses helt från limmets tryckhållfasthet vid beräkning av den ideella påkänningen i blandkomponenten.

Förhållandet mellan skiktets och underflänsens böjstyvhet i bärverkets tvärriktning är för aktuella utformade bärverk relativt stort ($EI_{90} \approx 60 \rightarrow 90 EI_a$). Redan vid måttlig belastning inträffar emellertid en utbuckling av skiktet i en longitudinell vågform med halvvågornas längd approximativt lika med bärverkets bredd. Vågamplituden ökar med ökande belastning, varför risk för fläkbrott i limflänsen förekommer vid de konvexa partierna. För undvikande av denna effekt har det vid de praktiska försöken visat sig motiverat att komplettera bärverket med en långsgående styrregel fastlimmad vid tvärsnittets mitt och underkant skikt [FIG 1], varvid dennas tyngdpunkt förflyttas nedåt. Tvärsnittskraftens excentricitet tvingar skiktet att intaga en långsgående nedböjning. Den longitudinella vågformen försvinner, varvid risken för skiktets lyftning från limflänsen med påföljande fläkbrott elimineras. Styrregelns dimension anpassas bl a till förhållandet mellan bärverkets längd och bredd samt skiktets styvhet i tvärled. Ökas dimensionen antar skiktet en större nedböjning. Den ökade nedböjningen reducerar påkänningen i skiktet, men lastupptagningen kompenseras av styrregelns större dimension.

Vid behandlingen av bärverkets grundläggande böjningsteori bortses från skiktets nedböjning i bärverkets tvärriktning samtidigt som styrregeln ej medtages vid beräkningen av bärverkets lastupptagningsförmåga. Denna förutsättning bygger på det ideella antagandet att skiktet är helt böjningsstyvt. Försöksresultaten visar emellertid att vid vald tvärsnittsutförning effekten av nedböjningen ej är försumbar.

Vidare har hänsyn ej tagits till "shear lag"-effekten i skiktet - den avtagande påkänningen mot tvärsnittets mitt på grund av skjuvdeformationerna. I en tidigare redogörelse har Göran Larsson och Georg Wästlund ["Plywood som konstruktionsmaterial" - Statens Komitté för Byggnadsforskning - meddelande nr 21, 1953] påvisat att för bärverk där $L/2B \geq 7$ hela skiktbredden

kan räknas som medverkande, vilket är fallet vid här aktuell bärverksgeometri.

I de följande avsnitten behandlas bärverk med blandkomponenten inom modulstadium A, varvid delmaterialens påkänningar i bruksstadiet ej överskrider proportionalitetsgränsen. Härvid bestäms påkänningsfördelningen i tvärsnittets olika delar. Beräkningsgången redovisas i sin helhet i avsnitt 2.12 "Sammanfattning".

2.2 Livets medverkan vid böjning

Redan vid en måttlig belastning inträffar en förändring av den linjära påkänningsfördelningen i livets tryckta del (FIG 4) till följd av en begynnande livplåtsutbuckling. Bucklingsformen och tidpunkten för utbucklingen är direkt avhängiga av livets slankhet H/d . En ökning av profilhöjden H och av stukningen ϵ_{ai} i limflänsen samt en minskning av plåttjockleken d reducerar livets medverkan vid lastupptagningen.

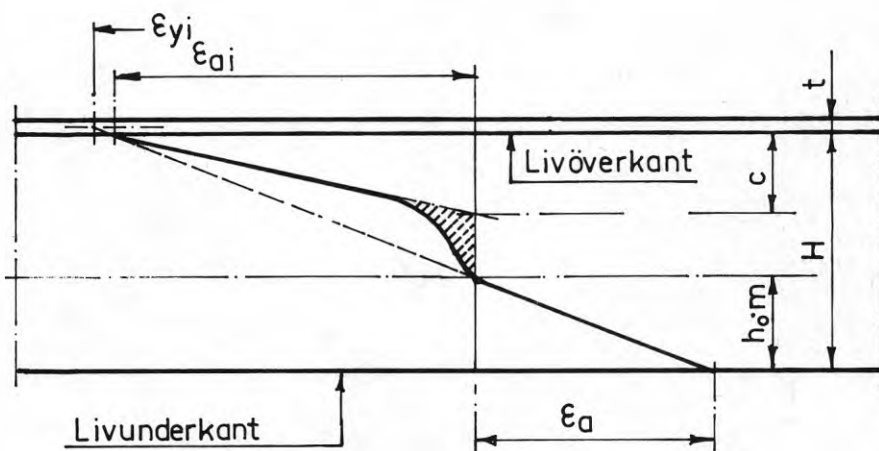


FIG 4. Livets medverkan vid böjning; typisk töjningsfördelning vid böjmomentpåverkat livtvärsnitt

Skiktets avstyvande effekt medför att böjpåkänningsfördelningen vid livets övre del är linjär. Betecknas den del av livhöjden som bildas av den linjära påkänningsfördelningen enligt FIG 4 med c , så råder ett visst förhållande mellan denna del av livhöjden, plåttjockleken d och stukningen ϵ_{ai} .

Med hjälp av resultaten från de verifierande försöken [Appendix 2] har sammanhörande värden av förhållandet c/d och ϵ_{ai} markerats i diagrammet FIG 5. På grund av det begränsade antalet

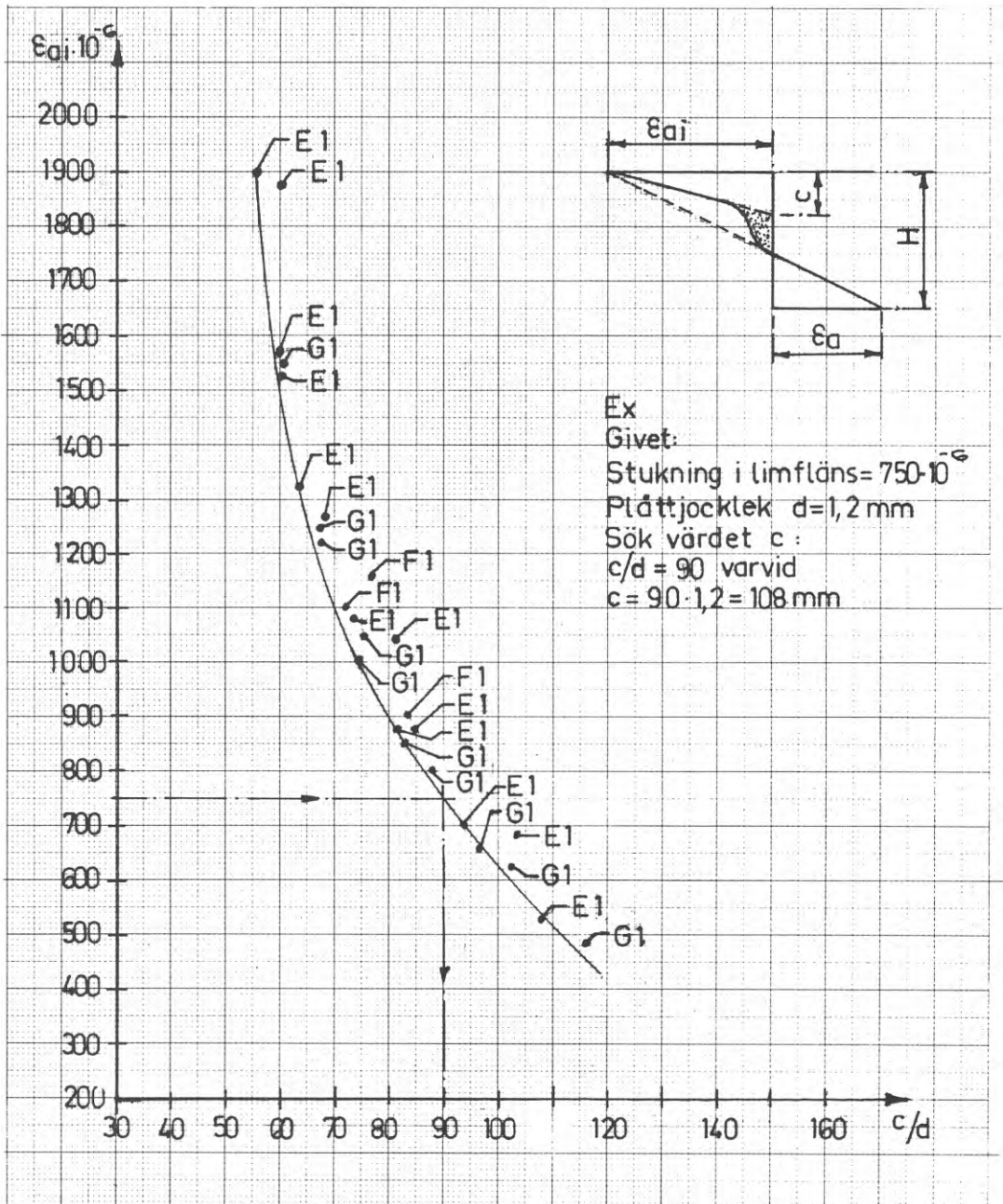


FIG 5. Samband mellan stukning ϵ_{ai} och livets "effektiva" höjd i förhållande till tjockleken (ϵ_{ai} - c/d -diagram)

mätvärden och den relativt stora spridningen har vid bestämning av kurvans läge hänsyn enbart tagits till de ogynnsammaste värdena.

Genom omarbetning av kurvan avläses värdet c direkt i ϵ_{ai} -diagrammet FIG 6 för en given plåttjocklek d och en antagen stukning ϵ_{ai} .

Vid behandlingen av böjningsteorin används dessa kurvor för bestämning av det tryckta livets lastupptagningsförmåga, varvid det bortses från spänningsandelen på tvärsnittshöjden $H - (h_0 + c)$ enligt FIG 4 (skrafferat område).

För erhållandet av c enligt FIG 6 måste ett värde för stukningen ϵ_{ai} preliminärt uppskattas. Det ligger då nära till hands att utgå ifrån blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet σ_i . Enligt tidigare rapport (R75:1973) är inom modulstadium A:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_a \cdot \sigma_y \cdot \left[\frac{1}{E_y} - \frac{1}{E_a} \right]}{\frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_a}{E_a} + \frac{1}{E_I} \cdot (\sigma_a - \sigma_y)}$$

där σ_a och E_a samt σ_y och E_y anger plåt- respektive skiktmaterialens tillåtna påkänningar och elasticitetsmoduli. Enligt FIG 7, som i princip visar arbetskurvorna för blandmaterialen limfläns och skikt, är uttrycket för kombinationsmodulen E_I inom modulstadium A:

$$E_I = \frac{A_a \cdot E_a + A_y \cdot E_y}{A_a + A_y}$$

där A_a och A_y anger limflänsens area $d \cdot b$ respektive skiktets area $B \cdot t'$ (jfr FIG 1).

Vidare är på grund av att $t \ll H$:

$$\epsilon_{ai} \approx \epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_I}$$

som motsvarar stukningen i limflänsen (jfr FIG 7).

Visar slutresultatet att stukningen ϵ_{ai} är mindre än den antagna motsvarar detta ett större värde för c , varför en viss överdimensionering föreligger. Emellertid visar kurvornas branta lutning (FIG 6) vid de aktuella ϵ_{ai} -områdena att en reducering av ϵ_{ai} endast i begränsad utsträckning bidrar till en ökning av lastupptagningsförmågan.

Är avvikelserna stora bör beräkningen upprepas med ett annat antaget värde för ϵ_{ai} .

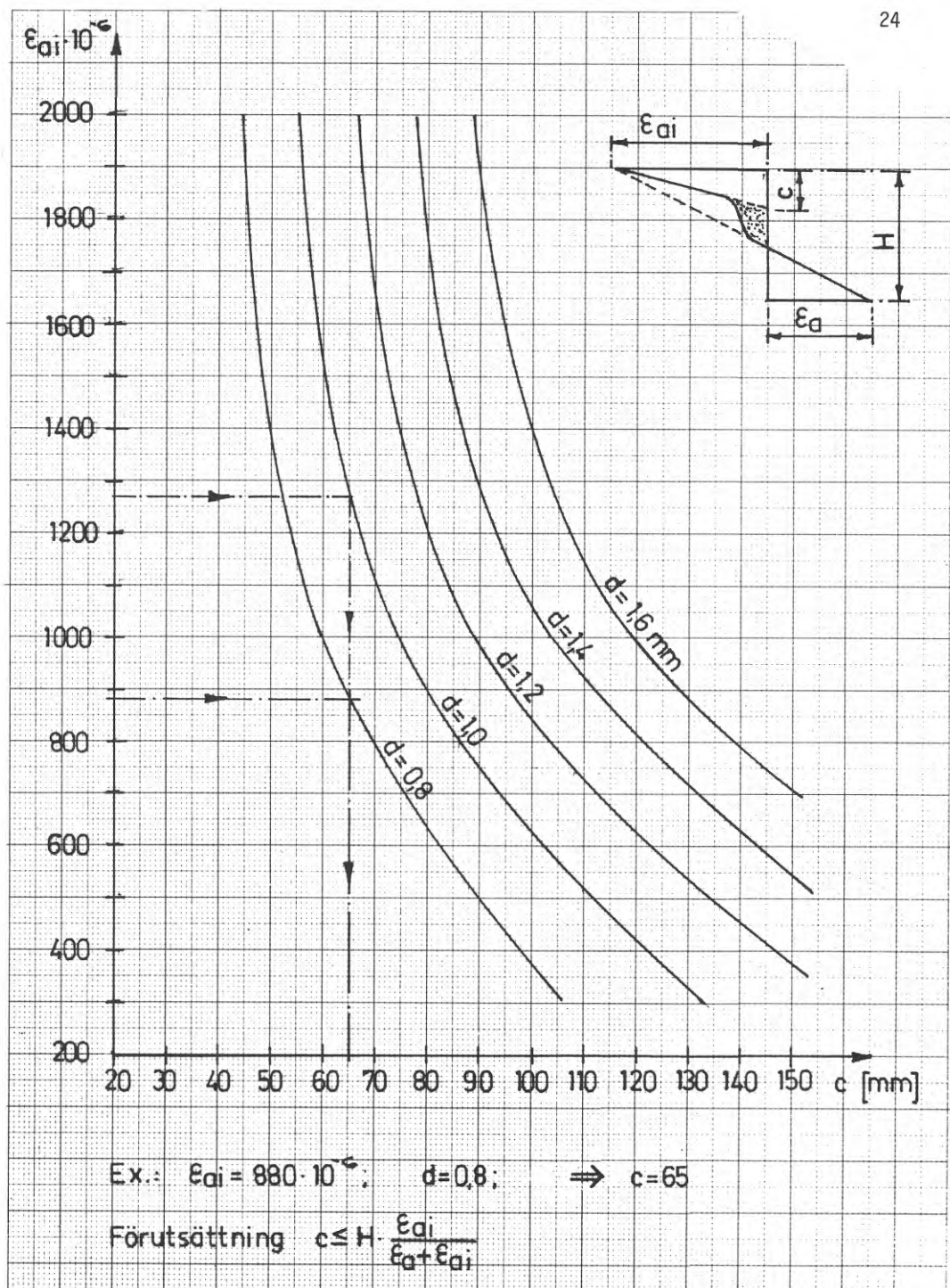
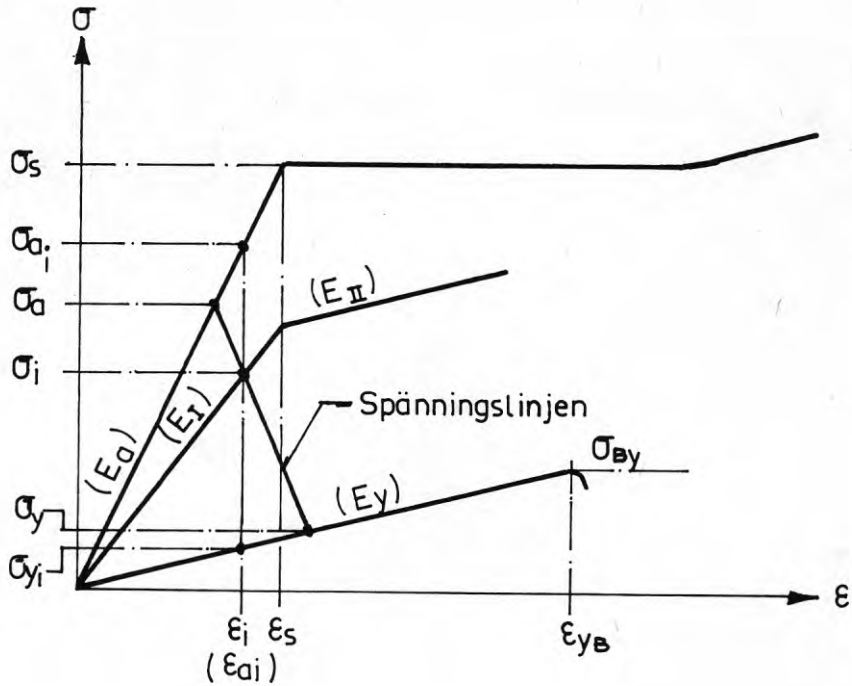


FIG 6. Samband mellan stukning ϵ_{ai} och "effektiv" höjd c vid aktuell godstjocklek d (ϵ_{ai} - c -diagram)



Modulstadium A.

Förutsättning $0 < \varepsilon_i < \varepsilon_s$

Blandkomponentens ideella påkänning i bruktstadiet.

$$\sigma_i = \frac{\sigma_a \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{1}{E_y} - \frac{1}{E_a} \right)}{\frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_a}{E_a} + \frac{1}{E_I} (\sigma_a - \sigma_y)}$$

Kombinationsmodulen

$$E_I = \frac{E_y \cdot A_y + E_a \cdot A_a}{A_y + A_a} = \frac{E_y \cdot B \cdot t' + E_a \cdot d \cdot b}{B \cdot t' + b \cdot d}$$

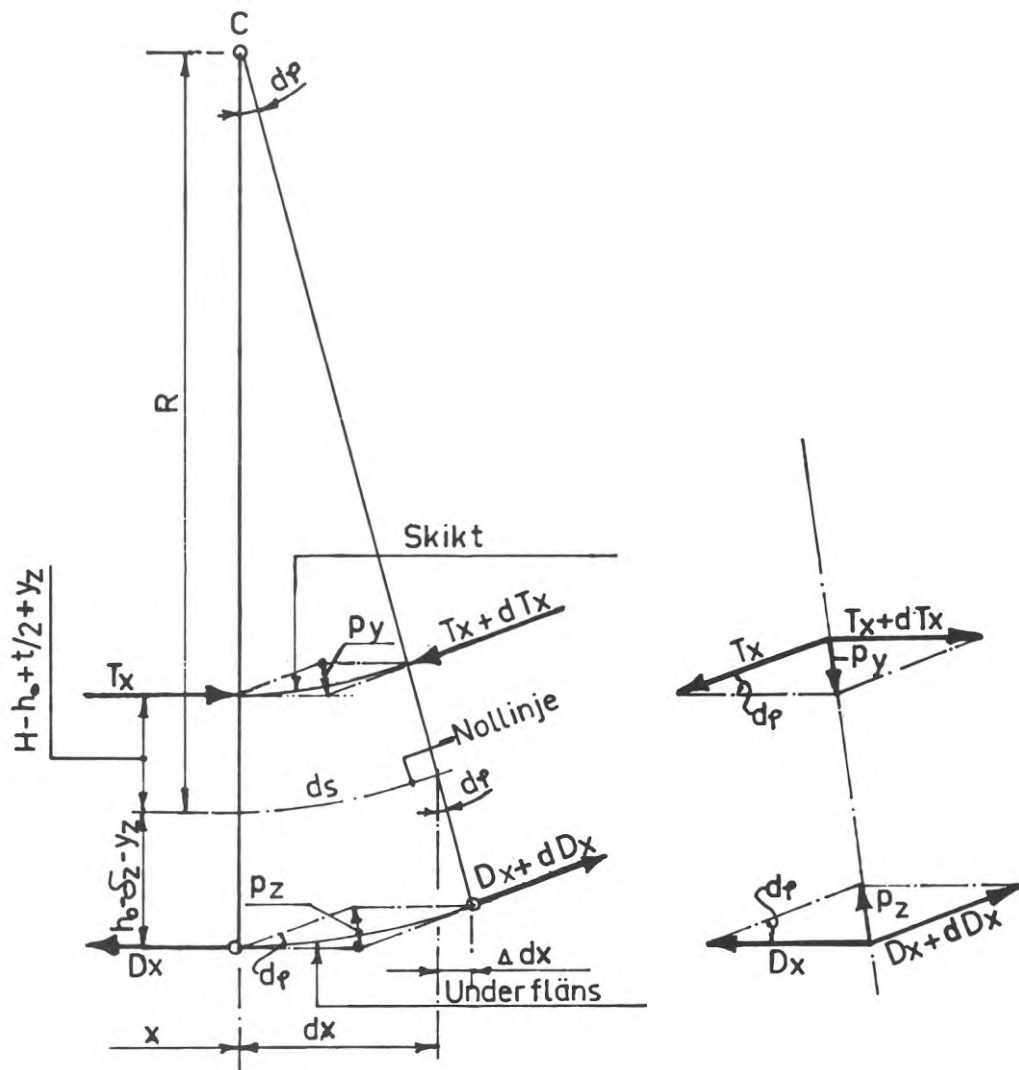
Stukningen i limflänsen

$$\varepsilon_{ai} \approx \varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_I}$$

FIG 7. Arbetskurvor för blandmaterialen - limfläns och skikt (modulstadium A)

2.3 Deformationer

FIG 8 visar i princip delsträckan $ds \approx dx$ av ett belastat bärverk. Skiktets och under flänsens tvärsnittskrafter T_x och $T_x + dT_x$ resp. D_x och $D_x + dD_x$ får på grund av vinkeländringen $d\phi$ en nedåt- resp. uppåtriktad komponent:



Vid underfläns: $p_z \approx D_x \cdot d\phi$

Vid skikt: $p_y \approx T_x \cdot d\phi$

FIG 8. Upp- och nedböjningskrafter p_z resp. p_y till följd av underflänsens resp. skiktets formändringar

$$p_y = \frac{1}{2} \cdot d\phi \cdot [T_x + (T_x + dT_x)] \approx d\phi \cdot T_x$$

resp.

$$p_z = \frac{1}{2} \cdot d\phi \cdot [D_x + (D_x + dD_x)] \approx d\phi \cdot D_x$$

varvid $\sin d\phi \approx \text{tg } d\phi \approx d\phi$.

Ned- och uppböjningskraften p_y resp. p_z är lika med produkten av tvärsnittskraft och kontingensvinkel för delsträckan dx .

Dessa krafter verkar vinkelrätt mot det deformerade skiktets resp. undre flänsens plan och ger upphov till en nedböjning av skiktet och en uppböjning av undre flänsen i betraktad sektion.

För de i praktiken aktuella bärverkstyperna är skiktets böjstyvhet 60-90 ggr större än undre flänsens böjstyvhet i bärverkets tvärriktning. Reduktionen av bärverkets böjstyvhet till följd av skiktets deformation är förhållandevis liten, varför det bortses från skiktets nedböjning i tvärled vid härledning av bärverkets momentupptagningsförmåga

FIG 9 visar i princip ett perspektiv av bärverkstvårsnitt med angivna tvärsnittsdeformationer.

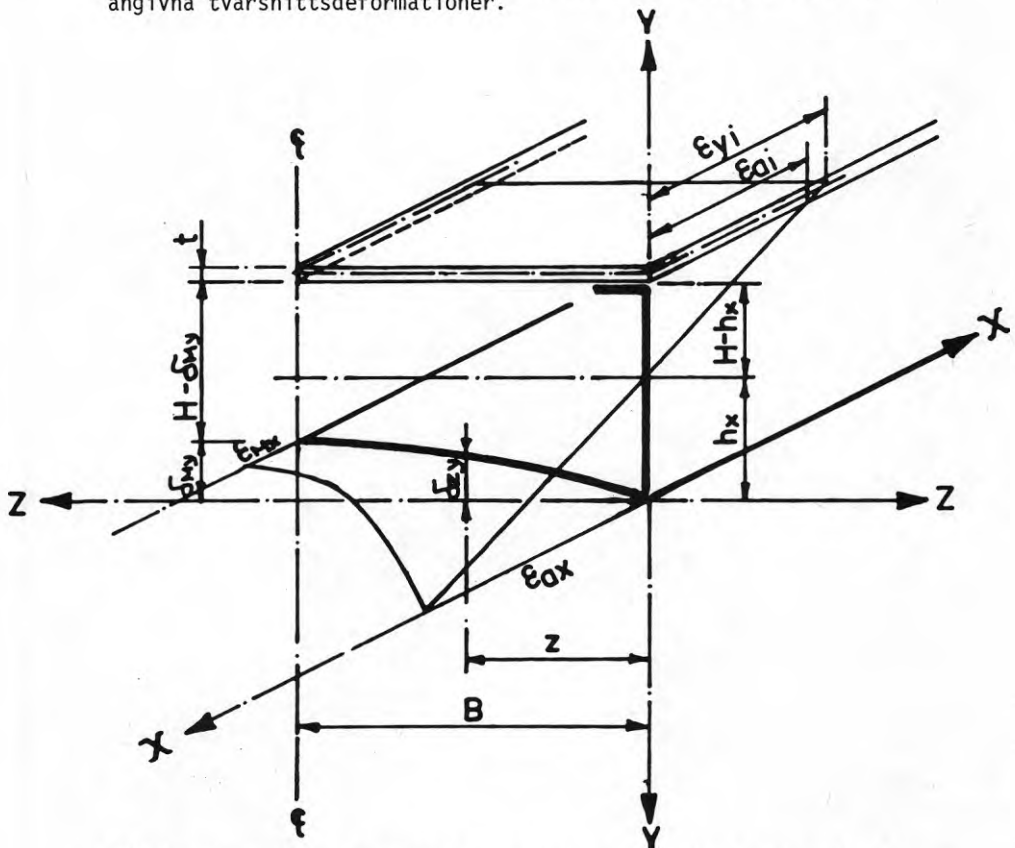


FIG 9. Perspektiv av bärverk i snitt x med angivna tvärsnittsdeformationer

Undre flänsens uppböjning reducerar det belastade bärverkets böjstyvhet och momentupptagningsförmåga.

Vid beräkning av bärverkets lastupptagningsförmåga och motsvarande tvärsnittspåkänningar måste den varierande böjstyvheten (EI_x) och det varierande nollinjeavståndet (h_x) samt underflänsens uppböjning (δ_{zy}) och medverkande bredd (a) i snitt x betraktas som obekanta. Uttrycken för dessa obekanta storheter kan härledas för olika typer av belastningsfall. I fortsättningen redogörs emellertid för bärverk påverkade av jämnt fördelad belastning.

Böjstyvheten EI_x är en funktion av dels nollinjeavståndet h_x och dels medverkande flänsbredd och livhöjd i snitt x .

Sambandet mellan dessa storheter kan illustreras med utgångspunkt från geometrin av det belastade och deformerade bärverket i FIG 10. Här förutsättes att enbart flänsarna är verksamma, har samma elasticitetsmodul E och att undre flänsens medverkande bredd varierar.

I snitt x är momentet:

$$M_x = \frac{q \cdot L^2}{2} \cdot \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad [1]$$

Två fall betraktas. Antingen förutsättes att underflänsens medverkande bredd kan uttryckas som en funktion av momentet M_x :

$$B \cdot a_x = B \cdot f(M_x) = B \left[1 + 4(a_{L/2} - 1) \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right) \right]$$

eller som en funktion av uppböjningskraften $p_z = d\phi \cdot D_x$:

$$B \cdot a_x = B \cdot f\left(\frac{1}{d\phi \cdot D_x}\right)$$

där $B \cdot a_{L/2}$ motsvarar underflänsens medverkande bredd vid fältmitt ($x = L/2$).

Båda fallen betraktas som gränsfall. Det bör emellertid beaktas att övriga instabilitetsfenomen förekommer som reducerar tvärsnittets effektivitet i proportion till momentet.

Oavsett vilka förutsättningar som antages är för aktuella bärverk felmarginalen relativt liten och utan praktisk betydelse vid den fortsatta behandlingen av böjningsteorin.

Med god approximation förutsättes därför att a_x är affin med momentet. Enligt FIG 10 är i snitt x :

$$h_x = \frac{H}{a_x + 1}$$

som i kombination med böjstyvheten:

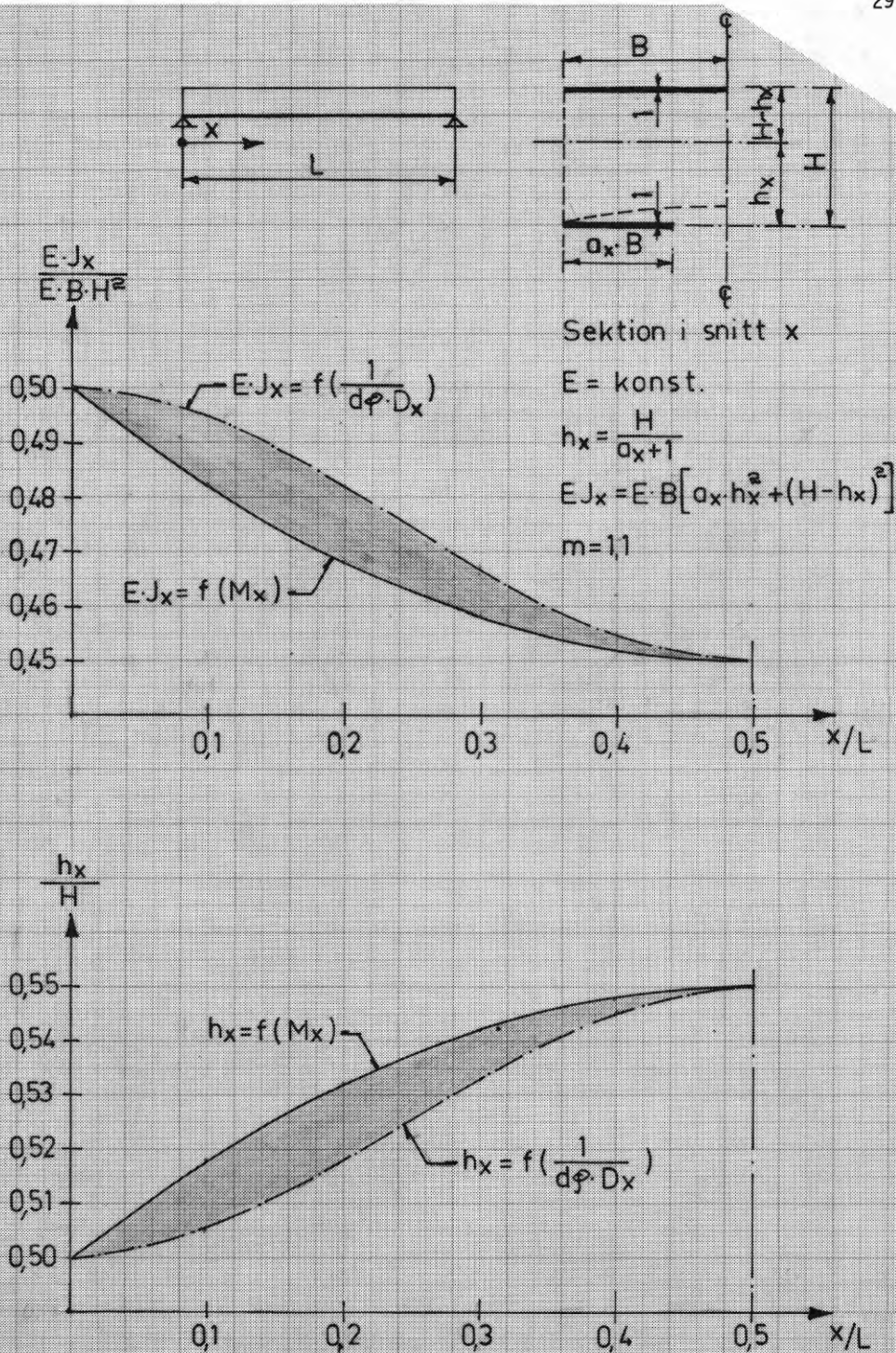


FIG 10. Sambandet mellan bärverkets böjstyvhet EI_x och noll-linjeavstånd h_x i snitt x (exempel)

$$EI_x = E \cdot B \cdot [a_x \cdot h_x^2 + (H - h_x)^2]$$

anger sambandet:

$$\frac{EI_x}{E \cdot B \cdot H^2} = \frac{a_x}{1 + a_x}$$

Vid aktuella värden för a_x råder ett i det närmaste linjärt samband mellan EI_x och a_x , varför böjstyvheten EI_x betraktas som affin med momentet M_x :

$$EI_x = EI_0 [1 + 4(n - 1)(\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2)] \quad [2]$$

Det linjära sambandet mellan h_x och a_x förutsätter vidare att även nollinjeavståndet h_x kan betraktas som affint med momentet M_x :

$$h_x = h_0 [1 + 4(m - 1)(\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2)] \quad [3]$$

där EI_0 och h_0 anger böjstyvheten resp. nollinjeavståndet vid upplagen ($x = 0$ och $x = L$). Vidare betecknar n och m förhållandet mellan bärverkets böjstyvhet resp. nollinjeavstånd vid fältmitt ($x = L/2$) och vid upplagen.

Diagrammen i FIG 10 redovisar sambandet mellan bärverkets böjstyvhet EI_x och nollinjeavstånd h_x för $m = 1,1$.

Med hjälp av den elastiska linjens ekvation

$$y'' = - \frac{M_x}{EI_x}$$

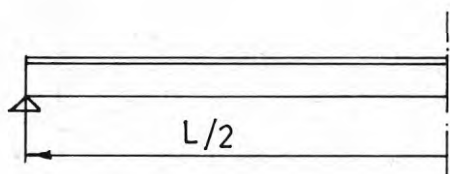
beräknas vinkeländringen y'_x och nedböjningen y_x i snitt x :

$$y'_x = - \int \frac{M_x}{EI_x} \cdot dx = - \frac{q \cdot L^2}{2 \cdot EI_0} \cdot \sum \frac{\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2}{1 + 4(n-1)(\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2)} \cdot \Delta x$$

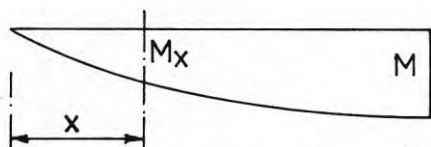
Bärverklängden L indelas t ex i 10 lika stora intervaller (FIG 11). De elastiska vikterna:

$$N = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2}{1 + 4(n - 1)(\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2)}$$

i snitt:

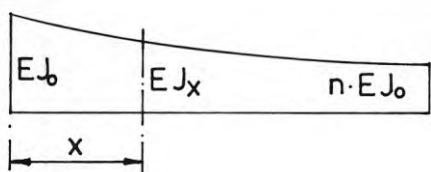


Elevation



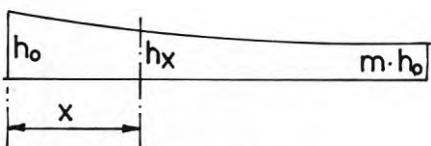
Momentet:

$$M_x = \frac{q \cdot L^3}{2} \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right]$$



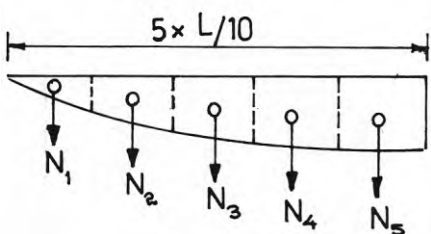
Böjstyvheten:

$$EJ_x = EJ_0 \left[1 + 4(n-1) \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \right]$$



Nollinjeavståndet

$$h_x = h_0 \left[1 + 4(m-1) \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \right]$$



Elastiska vikter i snitt:

$$\frac{x}{L} = 0,05: N_1 = \frac{q \cdot L^3}{20 \cdot EJ_0} \cdot \frac{0,0475}{1 + 0,19(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,15: N_2 = \frac{q \cdot L^3}{20 \cdot EJ_0} \cdot \frac{0,1275}{1 + 0,51(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,25: N_3 = \frac{q \cdot L^3}{20 \cdot EJ_0} \cdot \frac{0,1875}{1 + 0,75(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,35: N_4 = \frac{q \cdot L^3}{20 \cdot EJ_0} \cdot \frac{0,2275}{1 + 0,91(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,45: N_5 = \frac{q \cdot L^3}{20 \cdot EJ_0} \cdot \frac{0,2475}{1 + 0,99(n-1)}$$



Nedböjningen:

$$Y_M = \frac{L}{10} \left[0,5N_1 + 1,5N_2 + 2,5N_3 + 3,5N_4 + 4,5N_5 \right]$$

FIG 11. Moment, böjstyvhet, nollinjeavstånd, elastiska vikter och nedböjning för bärverk påverkat av jämnt fördelad belastning

$$\frac{x}{L} = 0,05 \text{ är: } N_1 = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{0,0475}{1 + 0,19(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,15 \text{ är: } N_2 = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{0,1275}{1 + 0,51(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,25 \text{ är: } N_3 = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{0,1875}{1 + 0,75(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,35 \text{ är: } N_4 = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{0,2275}{1 + 0,91(n-1)}$$

$$\frac{x}{L} = 0,45 \text{ är: } N_5 = \frac{qL^3}{20 EI_0} \cdot \frac{0,2475}{1 + 0,99(n-1)}$$

Vinkeländringen y_x' och nedböjningen y_x erhålles som skjuvkraften resp. momentet i snitt x när de elastiska vikterna betraktas som belastning.

Vinkeländringen i snitt:

$$\frac{x}{L} = 0 \quad \text{är: } y_0' = \sum N_1 \rightarrow N_5$$

$$\frac{x}{L} = 0,05 \text{ är: } y_{0,05}' = y_0' - \frac{1}{2} N_1$$

$$\frac{x}{L} = 0,15 \text{ är: } y_{0,15}' = y_0' - (N_1 + \frac{1}{2} N_2)$$

$$\frac{x}{L} = 0,25 \text{ är: } y_{0,25}' = y_0' - (N_1 + N_2 + \frac{1}{2} N_3)$$

$$\frac{x}{L} = 0,35 \text{ är: } y_{0,35}' = y_0' - (N_1 + N_2 + N_3 + \frac{1}{2} N_4)$$

$$\frac{x}{L} = 0,45 \text{ är: } y_{0,45}' = y_0' - (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + \frac{1}{2} N_5) = \frac{1}{2} N_5$$

och nedböjningen i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$.

$$y_M = \frac{L}{10} [0,5 \cdot N_1 + 1,5 \cdot N_2 + 2,5 \cdot N_3 + 3,5 \cdot N_4 + 4,5 \cdot N_5].$$

I TABELL 1 redovisas de elastiska vikterna och i TABELL 2 vinkeländringarna som en funktion av $\frac{y_M}{L}$ vid de aktuella snitten och för varierande n -värden.

Vidare anger diagrammet (FIG 12) nedböjningen y_M i relation till värdet n .

TABELL 1

n	Elastiska vikter - mult. $\frac{qL^3}{20 EI_0}$				
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
1,0	0,0475	0,1275	0,1875	0,2275	0,2475
0,95	0,0480	0,1308	0,1948	0,2383	0,2604
0,90	0,0484	0,1344	0,2027	0,2503	0,2747
0,85	0,0489	0,1381	0,2113	0,2635	0,2907
0,80	0,0494	0,1420	0,2206	0,2781	0,3086
0,75	0,0499	0,1461	0,2308	0,2945	0,3289
0,70	0,0504	0,1505	0,2419	0,3129	0,3521

TABELL 2

n	y_M mult. $\frac{qL^4}{200 EI_0}$	Vinkeländringar - mult. y_M/L				
		$y'_{0,05}$	$y'_{0,15}$	$y'_{0,25}$	$y'_{0,35}$	$y'_{0,45}$
1,0	2,594	3,137	2,800	2,193	1,393	0,477
0,95	2,713	3,127	2,797	2,197	1,399	0,480
0,90	2,845	3,115	2,794	2,202	1,405	0,483
0,85	2,990	3,104	2,791	2,207	1,413	0,486
0,80	3,151	3,091	2,787	2,212	1,421	0,490
0,75	3,332	3,077	2,783	2,217	1,429	0,494
0,70	3,535	3,063	2,778	2,223	1,439	0,498

För beräkning av det givna bärverkets lastupptagningsförmåga betraktas olika villkor som behandlas i de följande avsnitten.

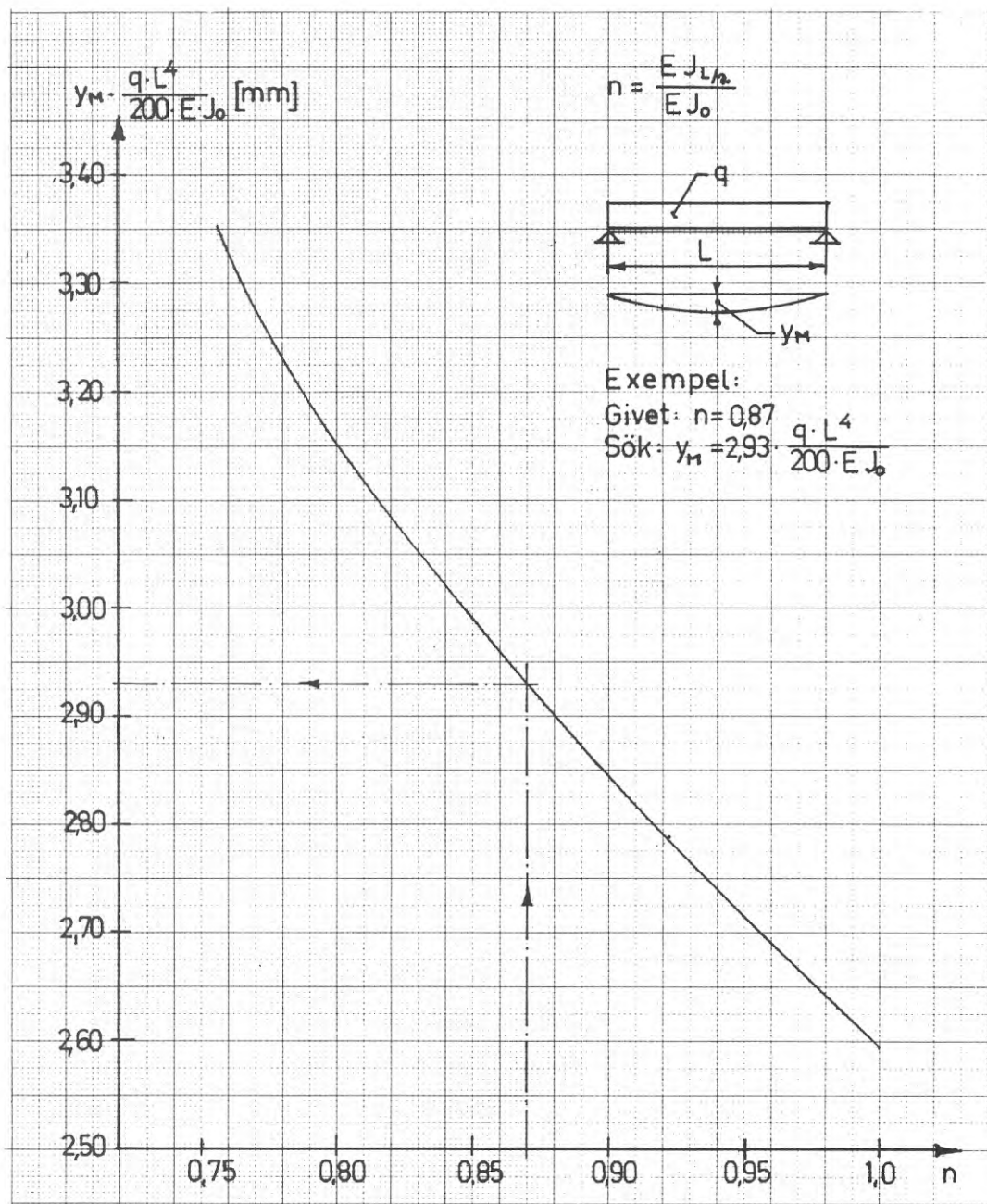


FIG 12. Samband mellan nedböjningen i fältmitt och böjstyvhetsförhållandet n (y_M - n -diagram)

2.4 Jämviktsvillkoret

Enligt FIG 13 och FIG 14 kan tvärsnittskrafterna för halva symmetriska tvärsnittet tecknas enligt följande:

För avstyvat liv och underfläns är enligt FIG 13:

$$K_1 = E_y \cdot t' \cdot \varepsilon_{yi} \cdot B = E_y \cdot t' \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_0} \cdot (H - h_0 + t/2) \cdot B$$

$$K_2 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_{ai} \cdot b = E_a \cdot d \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_0} \cdot (H - h_0) \cdot b$$

$$K_3 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_{ai} \cdot \frac{1}{2} \cdot (H - h_0) = E_a \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_0} \cdot (H - h_0)^2$$

$$K_4 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_a \cdot \frac{1}{2} \cdot h_0$$

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_a \cdot B$$

där t' anger summa tjockleken av faneren i bärverkets längdriktning. ε_{yi} och ε_{ai} motsvarar stukningen i skiktet resp. i limfläns (livöverkant) och ε_a töjningen i livunderkant.

För jämviktsvillkoret gäller att:

$$K_1 + K_2 + K_3 - K_4 - K_5 = 0$$

vilket motsvarar följande uttryck:

$$h_0 = \frac{\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \cdot (H + t/2) + H(b + H/2)}{\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + H + B} \quad [4]$$

För $x/L = 0,5$ är enligt FIG 14:

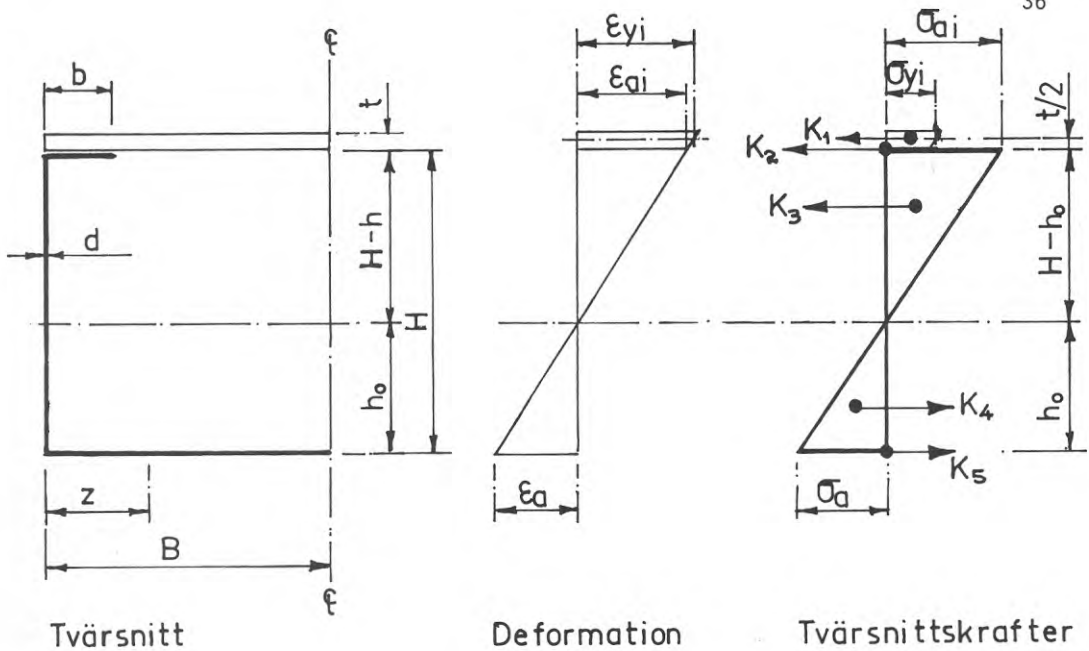
$$K_1 = E_y \cdot t' \cdot \varepsilon_{yi} \cdot B = E_y \cdot t' \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_x} \cdot (H - h_x + t/2) \cdot B$$

$$K_2 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_{ai} \cdot b = E_a \cdot d \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_x} \cdot (H - h_x) \cdot b$$

$$K_3 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_{ai} \cdot \frac{c}{2} = E_a \cdot d \cdot \frac{\varepsilon_a}{h_x} \cdot (H - h_x) \cdot \frac{c}{2}$$

$$K_4 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_a \cdot \frac{1}{2} \cdot h_x$$

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot \varepsilon_a \cdot a,$$



Tvärsnittskrafter:

$$K_1 = E_y \cdot t \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0} (H - h_0 + \frac{t}{2}) \cdot B$$

$$K_2 = E_a \cdot d \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0} (H - h_0) \cdot b$$

$$K_3 = E_a \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0} (H - h_0)^2$$

$$K_4 = E_a \cdot d \cdot \epsilon_a \cdot \frac{1}{2} \cdot h_0$$

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot \epsilon_a \cdot B$$

Deformation:

$$\epsilon_{ai} = \frac{\epsilon_a}{h_0} (H - h_0)$$

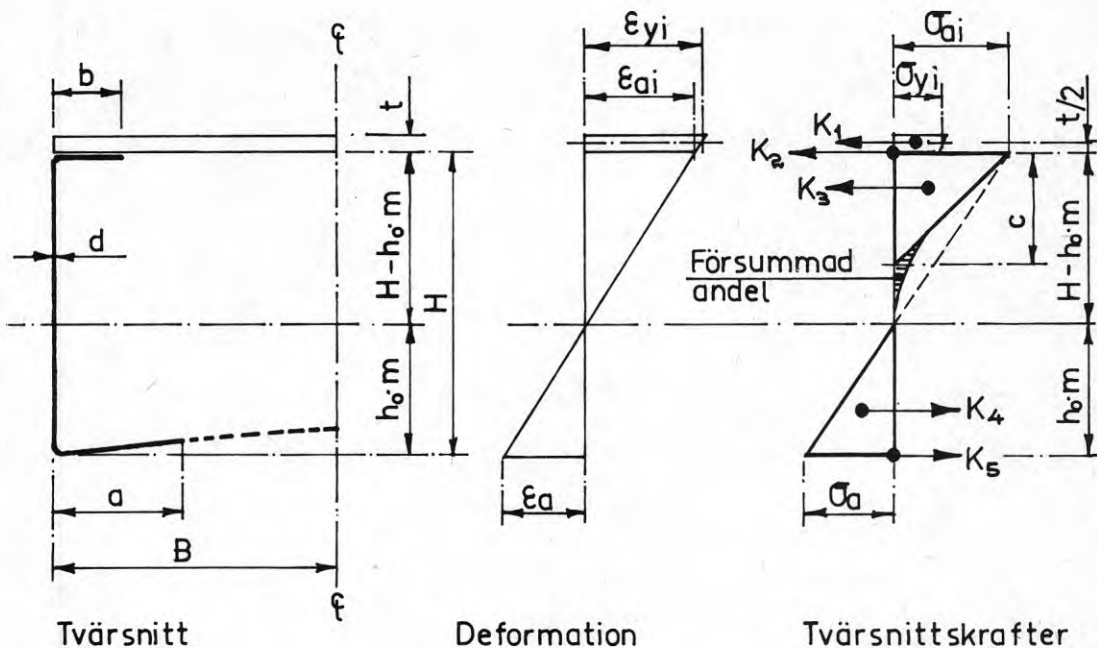
$$\epsilon_{yi} = \frac{\epsilon_a}{h_0} (H - h_0 + \frac{t}{2})$$

Tvärsnittsvillkoret: $K_1 + K_2 + K_3 - K_4 - K_5 = 0$

$$h_0 = \frac{\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B (H + \frac{t}{2}) + H (b + \frac{1}{2} H)}{\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + H + B}$$

$$EJ_0 = E_a \cdot d \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B (H - h_0 + \frac{t}{2})^2 + b (H - h_0)^2 + H (\frac{1}{3} H^2 - H h_0 + h_0^2) + B \cdot h_0^2 \right]$$

FIG 13. Tvärsnittskrafter, nollinjeavstånd och böjstyvheter för avstyvat liv och underfläns



Tvärsnittskrafter.

$$K_1 = E_y \cdot t' \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0 \cdot m} \left(H - h_0 \cdot m + \frac{t}{2} \right)$$

$$K_2 = E_a \cdot d \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0 \cdot m} (H - h_0 \cdot m) \cdot b$$

$$K_3 = E_a \cdot d \cdot \frac{\epsilon_a}{h_0 \cdot m} \cdot (H - h_0 \cdot m) \cdot \frac{c}{2}$$

$$K_4 = E_a \cdot d \cdot \epsilon_a \cdot \frac{1}{2} \cdot h_0 \cdot m$$

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot \epsilon_a \cdot a$$

Tvärsnittsvillkoret: $K_1 + K_2 + K_3 - K_4 - K_5 = 0$

$$h_0 \cdot m = - \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + a + \frac{c}{2} \right] + \sqrt{\left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + a + \frac{c}{2} \right]^2 + 2 \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \left(H + \frac{t}{2} \right) + H \left(b + \frac{c}{2} \right) \right]}$$

Böjstyvhetsvillkoret.

$$E \cdot J_b \cdot n = E_a \cdot d \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \left(H - h_0 \cdot m + \frac{t}{2} \right)^2 + b \left(H - h_0 \cdot m \right)^2 + \frac{c}{2} \left(H - h_0 \cdot m \right) \cdot \left(H - h_0 \cdot m - \frac{c}{3} \right) + \frac{1}{3} m^3 \cdot h_0^3 + a \cdot h_0^2 \cdot m^2 \right]$$

FIG 14. Tvärsnittskrafter, nollinjeavstånd och böjstyvhet vid snitt $x/L = 0,5$

där c anger den effektiva tryckta livhöjden (jfr ϵ_{ai} - c -diagrammet FIG 6) och a underflänsens medverkande bredd.

För jämviktstillståndet gäller att:

$$K_1 + K_2 + K_3 - K_4 - K_5 = 0$$

vilket motsvarar följande uttryck:

$$h_0 \cdot m = - \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + a + \frac{c}{2} \right] + \sqrt{\left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B + b + a + \frac{c}{2} \right]^2 + 2 \cdot \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \cdot \left(H + \frac{t}{2} \right) + H \cdot \left(b + \frac{c}{2} \right) \right]} \quad [5]$$

där $h_x = m \cdot h_0$.

m anger förhållandet mellan nollinjeavståndet vid fältmitt ($x/L = 0,5$) och vid upplagen ($\frac{x}{L} = 0$ och $\frac{x}{L} = 1$).

För ett givet bärverk kan med hjälp av [4] och [5] m erhållas som en funktion av a (jfr m - n - a -diagrammet FIG 15).

$$m = f_1(a).$$

2.5 Bøjstyvhetstvillkoret

Enligt FIG 13 och FIG 14 kan bøjstyvheten för halva symmetriska tvärsnittet tecknas enligt följande:

För $x/L = 0$ och $x/L = 1$ är enligt FIG 13:

$$EI_0 = E_a \cdot d \cdot \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \cdot (H - h_0 + t/2)^2 + b \cdot (H - h_0)^2 + H \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot H^2 - H \cdot h_0 + h_0^2 \right) + B \cdot h_0^2 \right] \quad [6]$$

och för $x/L = 0,5$ är enligt FIG 14:

$$EI_0 \cdot n = E \cdot d \cdot \left[\frac{E_y \cdot t'}{E_a \cdot d} \cdot B \cdot (H - h_0 \cdot m + t/2)^2 + b \cdot (H - h_0 \cdot m)^2 + \frac{c}{2} \cdot (H - h_0 \cdot m) \cdot (H - h_0 \cdot m - \frac{c}{3}) + \frac{1}{3} \cdot m^3 \cdot h_0^3 + a \cdot h_0^2 \cdot m^2 \right] \quad [7]$$

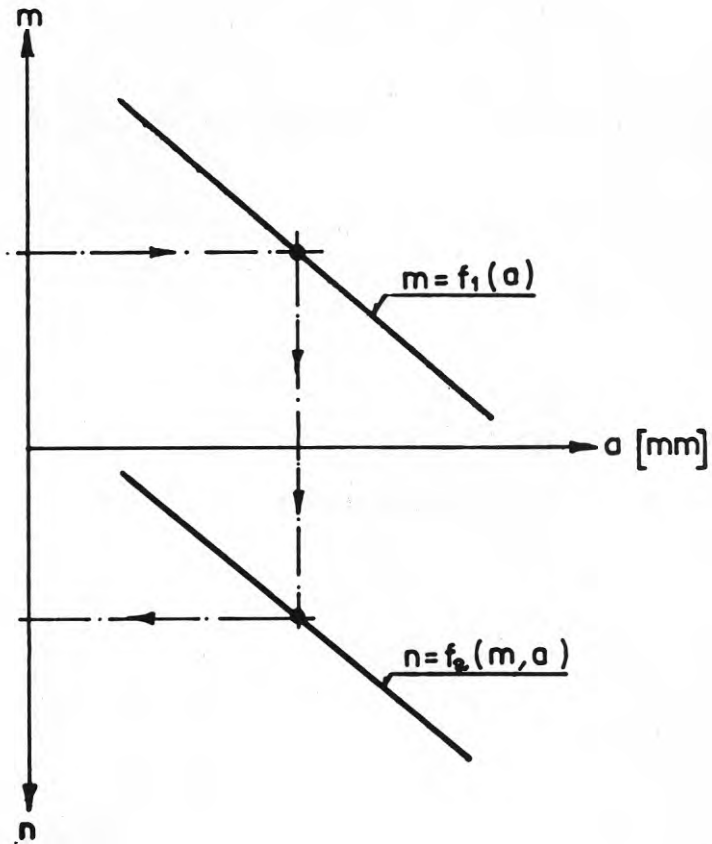


FIG 15. Samband mellan underflänsens medverkande bredd a och böjstyvhets- resp. nollinjeavståndsförhållandet n resp. m (m - n - a -diagram i princip)

där n anger förhållandet mellan böjstyvheten vid fältmitt ($x/L = 0,5$) och vid upplagen ($x/L = 0$ och $x/L = 1$).

För ett givet bärverk kan med hjälp av [4], [5], [6] och [7] n erhållas som en funktion av m och a (jfr m - n - a -diagrammet FIG 15):

$$n = f_2(m, a).$$

2.6 Momentvillkoret

Påkänningen i livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$) i snitt x är:

$$\sigma_{a_x} = \frac{M_x}{EI_x} \cdot E_a \cdot h_x.$$

Insättes uttrycken för M_x , EI_x och h_x enligt [1], [2] resp. [3] är:

$$\sigma_{a_x} = \frac{qL^2 \cdot E_a \cdot \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + 4 \cdot (m - 1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right) \right] \cdot h_0}{2 \cdot EI_0 \cdot \left[1 + 4 \cdot (n - 1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right) \right]}$$

Vid snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ är:

$$\sigma_a = \frac{q \cdot L^2 \cdot E_a \cdot m \cdot h_0}{8 \cdot EI_0 \cdot n} \quad [8]$$

där värden för n och samhörande värden för m erhålles ur m - n -a-diagrammet FIG 15.

2.7 Tvärsnittsvillkoret

Enligt FIG 16 antages för delsträckan $dx = 1$ uttrycket för uppböjningskraften i snitt z :

$$p_z = p_a - (p_a - p_M) \cdot \sin \frac{\pi z}{2B}$$

där p_a och p_M anger uppböjningskraften vid livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$) resp. vid tvärsnittets mitt ($z = B$). För roterande upplag vid A är:

$$T_z = - \int p_z \cdot dz = - \left[p_a \cdot z + \frac{2B}{\pi} \cdot (p_a - p_M) \cdot \cos \frac{\pi z}{2B} + c_1 \right]$$

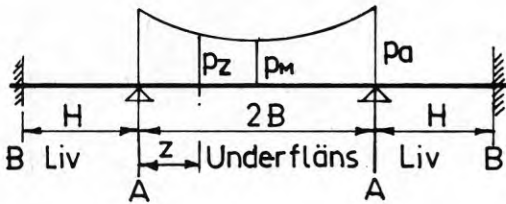
För $z = B$ är $T_z = 0$ och $c_1 = - p_a \cdot B$ varvid

$$T_z = p_a \cdot B - p_a \cdot z - \frac{2B}{\pi} \cdot (p_a - p_M) \cdot \cos \frac{\pi z}{2B}$$

Vidare är

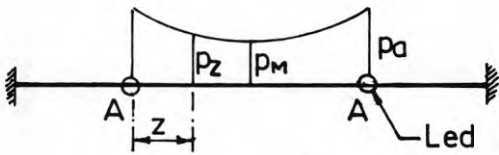
$$M_z = \int T_z \cdot dz = \left[p_a \cdot B \cdot z - \frac{1}{2} \cdot p_a \cdot z^2 - \frac{4 \cdot B^2}{\pi^2} \cdot (p_a - p_M) \cdot \sin \frac{\pi z}{2B} + c_2 \right]$$

För $z = 0$ är $M_z = 0$ och $c_2 = 0$ och



Utvikt tvärsnitt
Antagen uppböjningskraft.

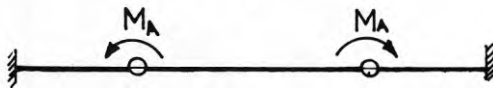
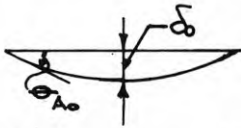
$$p_z = p_a - (p_a - p_m) \cdot \sin \frac{\pi z}{2B}$$



Led vid A:

$$\vartheta_{A_0} = \frac{B^3}{E J_0} \left[\frac{1}{3} p_a - \frac{8}{\pi^3} (p_a - p_m) \right]$$

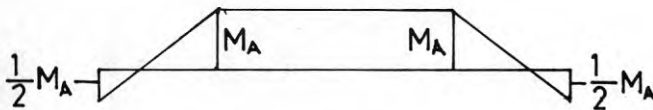
$$\delta_0 = \frac{B^4}{E J_0} \left[\frac{5}{24} p_a - \frac{16}{\pi^4} (p_a - p_m) \right]$$



$$\vartheta_{AM} = \frac{M_A \cdot B}{E J_0}$$

$$\vartheta'_{AM} = \frac{M_A \cdot H}{4 \cdot E J_0}$$

$$\vartheta_{A_0} - \vartheta_{AM} = \vartheta'_{AM}$$



$$M_A = \frac{4 \cdot B^3}{H + 4B} \left[\frac{1}{3} p_a - \frac{8}{\pi^3} (p_a - p_m) \right]$$

$$\delta_{MA} = \frac{M_A \cdot B^2}{2 \cdot E J_0}$$

Uppböjningen:

$$\delta_M = \delta_0 - \delta_{MA}$$

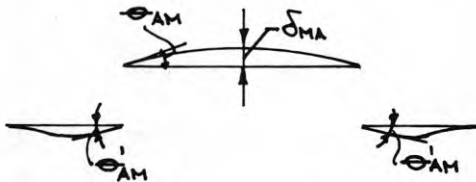


FIG 16. Underflänsens uppböjning på grund av uppböjningskraften p_z

$$\begin{aligned}\delta'_{Oz} &= - \int \frac{M_z}{EI_a} \cdot dz = \\ &= - \frac{1}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot p_a \cdot B \cdot z^2 - \frac{1}{6} \cdot p_a \cdot z^3 + \frac{8 \cdot B^3}{\pi} \cdot (p_a + p_M) \cdot \cos \frac{\pi z}{2B} + c_3 \right]\end{aligned}$$

För $z = B$ är $\delta'_{Oz} = 0$ och $c_3 = -\frac{1}{3} \cdot p_a \cdot B^3$

För $z = 0$ är vinkeländringen vid upplag A:

$$\theta_{A_0} = \frac{B^3}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{3} p_a - \frac{8}{\pi} (p_a - p_M) \right] \quad [9]$$

Slutligen är:

$$\begin{aligned}\delta_{Oz} &= \int \delta'_{Oz} \cdot dz = \frac{1}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot p_a \cdot B^3 \cdot z - \frac{1}{6} p_a \cdot B \cdot z^3 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{24} p_a \cdot z^4 - \frac{16B^4}{\pi} \cdot (p_a - p_M) \cdot \sin \frac{\pi z}{2B} + c_4 \right]\end{aligned}$$

För $z = 0$ är $\delta_{Oz} = 0$ och $c_4 = 0$.

För $z = B$ är uppböjningen vid tvärsnittets mitt för roterande upplag vid A:

$$\delta_o = \frac{B^4}{EI_a} \cdot \left[\frac{5}{24} \cdot p_a - (p_a - p_M) \cdot \frac{16}{\pi} \right] \quad [10]$$

Införes momentet M_A vid det roterande upplaget är enligt FIG 16 vinkeländringen vid A:

$$\theta_{AM} = \frac{M_A \cdot B}{EI_a} \quad [11]$$

och uppböjningen i snitt z :

$$\delta_{MAz} = \frac{M_A}{EI_a} \left[z \cdot B - \frac{1}{2} z^2 \right] \quad [12]$$

I tvärsnittets mitt är:

$$\delta_{MA} = \frac{M_A \cdot B^2}{2 \cdot EI_a} \quad [13]$$

Vinkeländringen vid A:

$$\theta'_{AM} = \frac{M_A \cdot H}{4 \cdot EI_a} \quad [14]$$

Följande betingelse gäller:

$$\theta_{A_0} - \theta_{AM} = \theta'_{AM}$$

eller

$$\frac{B^3}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{3} p_a - (p_a - p_M) \cdot \frac{8}{\pi^3} \right] - \frac{M_A \cdot B}{EI_a} = \frac{M_A \cdot H}{4 \cdot EI_a}$$

varvid

$$M_A = \frac{4 \cdot B^3 \cdot \left[\frac{1}{3} p_a - (p_a - p_M) \cdot \frac{8}{\pi^3} \right]}{H + 4B} \quad [15]$$

Uttrycket för M_A insättes i [12]:

$$\delta_{MAz} = \frac{4 \cdot B^3}{EI_a \cdot (H + 4B)} \cdot \left[\frac{1}{3} p_a - (p_a - p_M) \cdot \frac{8}{\pi^3} \right] \cdot \left(z \cdot B - \frac{1}{2} z^2 \right) \quad [16]$$

Den resulterande uppböjningen i snitt z :

$$\begin{aligned} \delta_z &= \delta_{oz} - \delta_{MAz} = \\ &= \frac{B^4 \cdot p_a}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{z}{B} - \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{z}{B} \right)^3 + \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{z}{B} \right)^4 - \left(1 - \frac{p_M}{p_a} \right) \cdot \frac{16}{\pi^4} \cdot \sin \frac{\pi z}{2B} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{4B}{H + 4B} \cdot \left[\frac{1}{3} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a} \right) \cdot \frac{8}{\pi^3} \right] \cdot \left(\frac{z}{B} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z}{B} \right)^2 \right) \right] \quad [17] \end{aligned}$$

För $z/B = 1$ är $\delta_z = \delta_M$:

$$\delta_M = \frac{B^4 \cdot p_a}{EI_a} \cdot \left[\frac{5}{24} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a} \right) \cdot \frac{16}{\pi^4} - \frac{2 \cdot B}{H + 4B} \cdot \left(\frac{1}{3} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a} \right) \cdot \frac{8}{\pi^3} \right) \right] \quad [18]$$

varvid

$$\frac{B^4 \cdot p_a}{EI_a} = \frac{\delta_M}{\left[\frac{5}{24} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a}\right) \cdot \frac{16}{\pi^4} - \frac{2B}{H + 4B} \cdot \left(\frac{1}{3} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a}\right) \cdot \frac{8}{\pi^3}\right) \right]}$$

insättes i ekv [17].

Uppböjningskraftens (p_z) variation över bredden B är enligt antagandet $p_z = p_a - (p_a - p_M) \cdot \sin \frac{\pi z}{2B}$ kvalitativt bestämd och motiverad av uppböjningsfiguren, som registrerats vid provningarna. Förhållandet p_M/p_a utnyttjas för att få en anpassning till aktuella uppböjningskurvor, varvid $0,5 \leq p_M/p_a \leq 1,0$.

Med olika värden för H/B beräknas uppböjningen dels för p_M lika med $1/2 p_a$, dels för p_M lika med p_a . Resultatet redovisas i TABELL 3.

TABELL 3

p_M	H/B	Uppböjningen δ_z i snitt z/B : (mult. δ_M)					
		0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
I:	0,5	0,037	0,083	0,201	0,481	0,747	0,933
	1,0			0,232	0,512	0,765	0,939
	1,5			0,250	0,530	0,776	0,942
	2,0			0,261	0,541	0,782	0,944
$\frac{1}{2} p_a$	0,5	0,039	0,087	0,207	0,489	0,754	0,936
	1,0			0,238	0,520	0,771	0,941
	1,5			0,256	0,537	0,781	0,943
	2,0			0,267	0,548	0,787	0,945
$\delta_z = \delta_M \cdot \sin \frac{\pi z}{2B}$		0,078	0,156	0,309	0,588	0,809	0,951

Som framgår av TABELL 3 är den resulterande uppböjningen δ_z endast i ringa grad beroende av förhållande p_M/p_a , varför med god approximation det idealiserade sambandet $p_z = p_a$ kan användas för den vidare behandlingen. Värdena δ_{Mz} redovisas för $0 \leq z \leq B$ vid gränfallen $H/B = 0,5$ resp. $H/B = 2,0$ i FIG 17 ($p_z = \text{konst.}$, $p_M = p_a$, belastningsfall I).

Vidare framgår att användningen av uttrycket $\delta_z = \delta_M \cdot \sin \frac{\pi z}{2B}$ är mindre lämplig och ger för ogynnsamma resultat vid beräkningen av påkänningen i livunderkant.

Insättes i [17] p_M lika med p_a är uttrycket för den antagna uppböjningen i snitt z:

$$\delta_z = \frac{B^4 \cdot p_a}{EI_a} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{z}{B} - \frac{1}{6} \left(\frac{z}{B}\right)^3 + \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^4 - \frac{4B}{H+4B} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z}{B} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{B}\right)^2\right) \right] \quad [19]$$

där p_a anger uppböjningskraften vid livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$) för delsträckan $dx = 1$ och EI_a basprofilens böjstyvhet i bärverkets tvärriktning för delsträckan $dx = 1$:

$$EI_a = E_a \cdot \frac{1}{12} \cdot d^3.$$

Enligt FIG 8 är uppböjningskraften i snitt x_{1z} :

$$p_{xz} = D_{x,z} \cdot d\phi_{x,z}$$

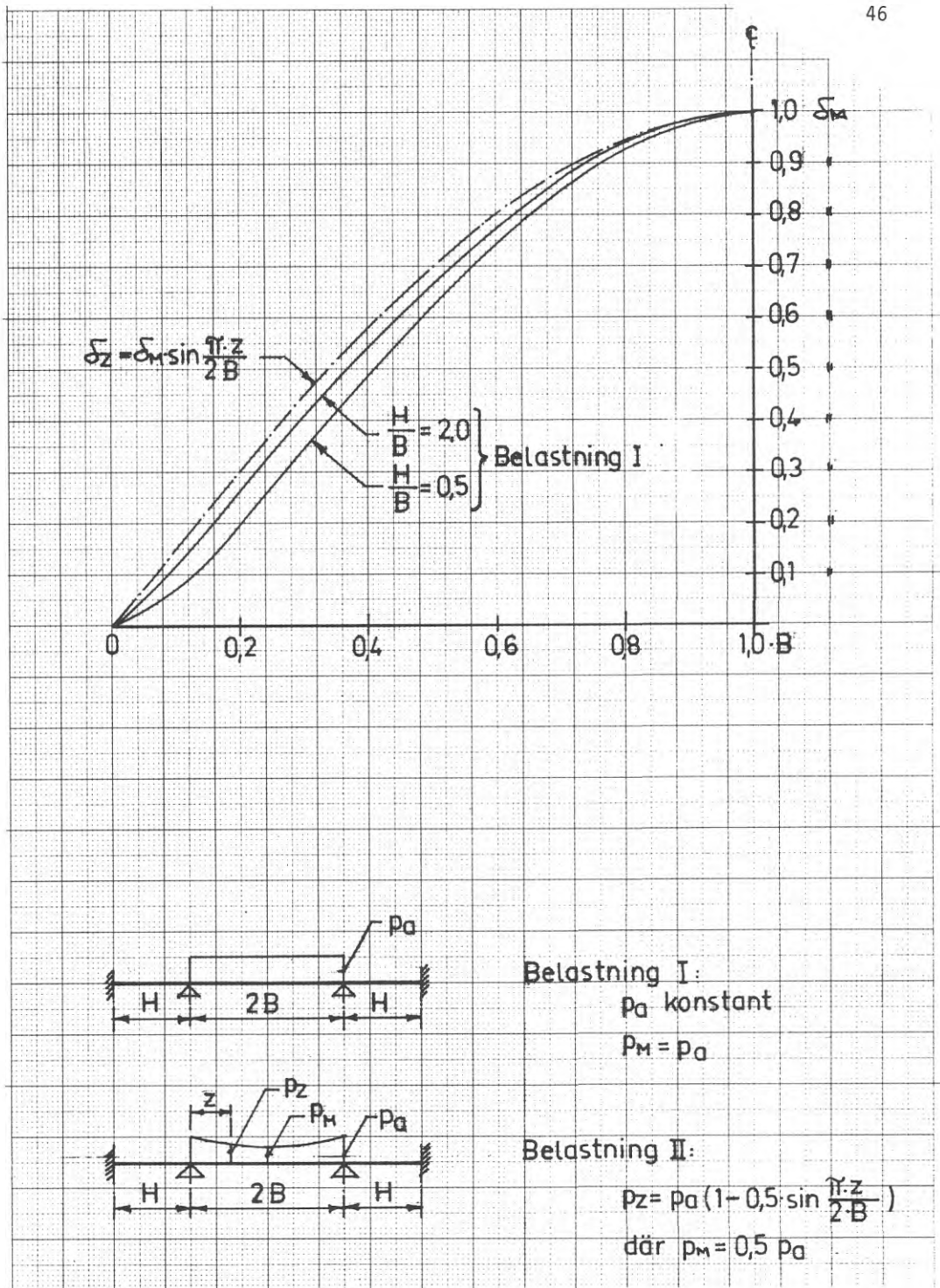
där $D_{x,z}$ motsvarar tvärsnittskraften för delsträckan dz i snitt x och $d\phi_{x,z}$ kontingensvinkeln för delsträckan dx vid längdsnittet z:

$$D_{x,z} = \epsilon_{x,z} \cdot E_a \cdot d \cdot dz$$

och

$$d\phi_{x,z} = \frac{dx}{R_{x,z}} = (y''_{x,z} - \delta''_{x,z}) \cdot dx$$

där $(y''_{x,z} - \delta''_{x,z})$ anger uttrycket för den elastiska linjens ekvation för längdsnittet z.

FIG 17. Antagna uppböjningar δ_{Mz}

Vid tvärsnittets mitt ($z = B$) är uppböjningskraften i snitt x :

$$p_{M_x} = \varepsilon_{M_x} \cdot E_a \cdot d \cdot (y_x'' - \delta_{M_x}'') \cdot dx \cdot dz.$$

Vid livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$) är uppböjningskraften i snitt x :

$$p_{a_x} = \varepsilon_{a_x} \cdot E_a \cdot d \cdot y_x'' \cdot dx \cdot dz$$

varvid för snitt $x/L = 0,5$:

$$\frac{p_M}{p_a} = \left(1 - \frac{\delta_M''}{y_M''}\right) \cdot \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} \quad [20]$$

I uttrycket för p_{a_x} är:

$$\varepsilon_{a_x} \cdot E_a = \sigma_{a_x} = \frac{M_x}{EI_x} \cdot h_x \cdot E_a$$

och

$$y_x'' = \frac{M_x}{EI_x}$$

varvid

$$p_{a_x} = \left(\frac{M_x}{EI_x}\right)^2 \cdot h_x \cdot E_a \cdot d \cdot dx \cdot dz. \quad [21]$$

Insättes i [21] uttrycken för M_x , EI_x och h_x enligt [1], [2] icg [3] är:

$$p_{a_x} = \left[\frac{qL^2}{2 \cdot EI_0} \cdot \frac{\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2}{1 + 4(n-1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)} \right]^2 \cdot \left[1 + 4(m-1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \right] \cdot h_0 \cdot E_a \cdot d \cdot dx \cdot dz \quad [22]$$

och för snitt $x/L = 0,5$

$$p_a = \left[\frac{qL^2}{8 \cdot EI_0} \right]^2 \cdot h_0 \cdot E_a \cdot d \cdot \frac{m}{n^2} \cdot dx \cdot dz \quad [23]$$

Enligt m - n - a -diagrammet FIG 15 erhålles p_a för olika värden för n och tillhörande värden för m .

Uppböjningen står i relation till uppböjningskraften. Med god

approximation kan därför uppböjningen δ_{M_x} uttryckas som en funktion av uppböjningskraften p_{a_x} :

$$\delta_{M_x} = f \left[\left(\frac{M_x}{EI_x} \right)^2 \cdot h_x \right] \cdot \delta_M$$

För $x/L = 0,5$ är $\delta_{M_x} = \delta_M$ varvid:

$$\begin{aligned} \delta_{M_x} = \frac{16 \cdot n^2}{m} \cdot \left[\frac{\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2}{1 + 4 \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)} \right]^2 \cdot \left[1 + \right. \\ \left. + 4 \cdot (m-1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \right] \cdot \delta_M \end{aligned} \quad [24]$$

Sättes

$$\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2 = \alpha,$$

$$\frac{1}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \frac{x}{L}) = \beta \quad \text{och}$$

$$-\frac{2}{L^2} = \gamma$$

så är:

$$\delta_{M_x} = \frac{16 \cdot n^2 \cdot \alpha^2 \cdot [1 + 4 \cdot (m-1) \cdot \alpha] \cdot \delta_M}{m \cdot [1 + 4 \cdot (n-1) \cdot \alpha]^2}$$

och

$$\delta_{M_x}^1 = \frac{32 \cdot n^2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \delta_M}{m \cdot [1 + 4 \cdot (n-1) \cdot \alpha]^3} \cdot [1 + (m-1) \cdot \alpha \cdot [6 + 8 \cdot \alpha \cdot (n-1)]] \quad [25]$$

Vidare är:

$$\delta_{M_x}'' = \frac{32 \cdot n^2 \cdot \delta_M}{m \cdot [1 + 4 \cdot (n - 1) \cdot \alpha]^4} \cdot \left[[\beta^2 + \alpha \cdot \gamma + 6 \cdot (m - 1) \cdot (2 \cdot \alpha \cdot \beta^2 + \alpha^2 \cdot \gamma) + \right. \\ \left. + 8 \cdot (m - 1) \cdot (n - 1) \cdot (3 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2 + \alpha^3 \cdot \gamma)] \cdot [1 + 4 \cdot (n - 1) \cdot \alpha] - \right. \\ \left. - 12 \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot (n - 1) \cdot [1 + 6 \cdot \alpha \cdot (m - 1) + 8 \cdot \alpha^2 \cdot (m - 1) \cdot (n - 1)] \right]$$

För $\frac{x}{L} = 0,5$ är $\beta = 0$ och $\alpha = 0,25$ varvid

$$\delta_M'' = - \frac{8 \cdot \delta_M}{L^2} \cdot \left[1 + \frac{2}{n} - \frac{1}{m} \right] \quad [26]$$

Vidare är:

$$y_x'' = - \frac{M_x}{EI_x} = - \frac{qL^2}{2EI_0} \cdot \frac{\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2}{1 + 4(n-1)\left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)}$$

För $x/L = 0,5$ är:

$$y_M'' = - \frac{qL^2}{8 \cdot EI_0} \cdot \frac{1}{n} \quad [27]$$

Insättes i [20] uttrycken för p_a , δ_M'' och y_M'' enligt [23], [26] resp. [27] erhålles med hjälp av m-n-a-diagrammet (FIG 15) p_M för olika n-värden - uttryckt som en funktion av δ_M och $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$.

Töjningen i undre flänsen varierar från livunderkant (ϵ_a) till tvärsnittets mitt (ϵ_M) och förutsättes stå i en relation till den antagna uppböjningen. [19].

I snitt z är

$$\epsilon_z = \epsilon_a - c_1 \cdot (\epsilon_a - \epsilon_M) \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z}{B}\right) - \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^3 + \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^4 - \right. \\ \left. - \frac{B}{H + 4B} \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{z}{B} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^2\right) \right].$$

För $z = B$ är $\varepsilon_z = \varepsilon_M$ enligt:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_a - c_1 \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_M) \cdot \left[\frac{5}{24} - \frac{B}{H + 4B} \cdot \frac{2}{3} \right]$$

varvid

$$\varepsilon_z = \varepsilon_a - 24 \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_M) \cdot \frac{H + 4B}{5H + 4B} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z}{B}\right) - \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^3 + \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^4 - \frac{4}{3} \cdot \frac{B}{H + 4B} \cdot \left(\frac{z}{B} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z}{B}\right)^2\right) \right]$$

Tvärsnittskraften i undre flänsen

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot \int_0^B \varepsilon_z \cdot dz = E_a \cdot d \cdot B \cdot \left[\varepsilon_a - \frac{16}{15} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_M) \cdot \frac{3H + 2B}{5H + 4B} \right]$$

Enligt FIG 14 är:

$$K_5 = E_a \cdot d \cdot a \cdot \varepsilon_a$$

varvid den medverkande bredden a är:

$$a = B \cdot \left[1 - \frac{16}{15} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a}\right) \cdot \frac{3H + 2B}{5H + 4B} \right]$$

eller

$$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} = 1 + \frac{\frac{a}{B} - 1}{\frac{16}{15} \cdot \left(\frac{3H + 2B}{5H + 4B}\right)} \quad [28]$$

Med hjälp av m-n-a-diagrammet (FIG 15) erhålles $\varepsilon_M/\varepsilon_a$ som funktion av n och redovisas som kurva i diagram (FIG 22).

$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a}$ insättes i ekv [20]. Slutligen erhålles uppböjningen:

$$\delta_M = f(n) \quad [29]$$

sedan ekv [18] har kompletterats med uttrycken för p_a och p_M enligt [23] resp. [20].

FIG 18 visar perspektiv av bärverkstvärsnitt med angivna upp- och nedböjningskrafter.

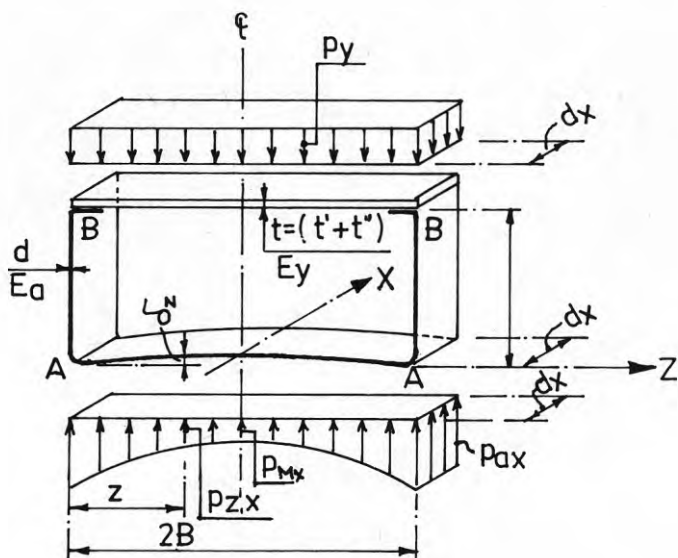


FIG 18. Perspektiv av bärverkstvärsnitt med angivna upp- och nedböjningskrafter p_z resp. p_y

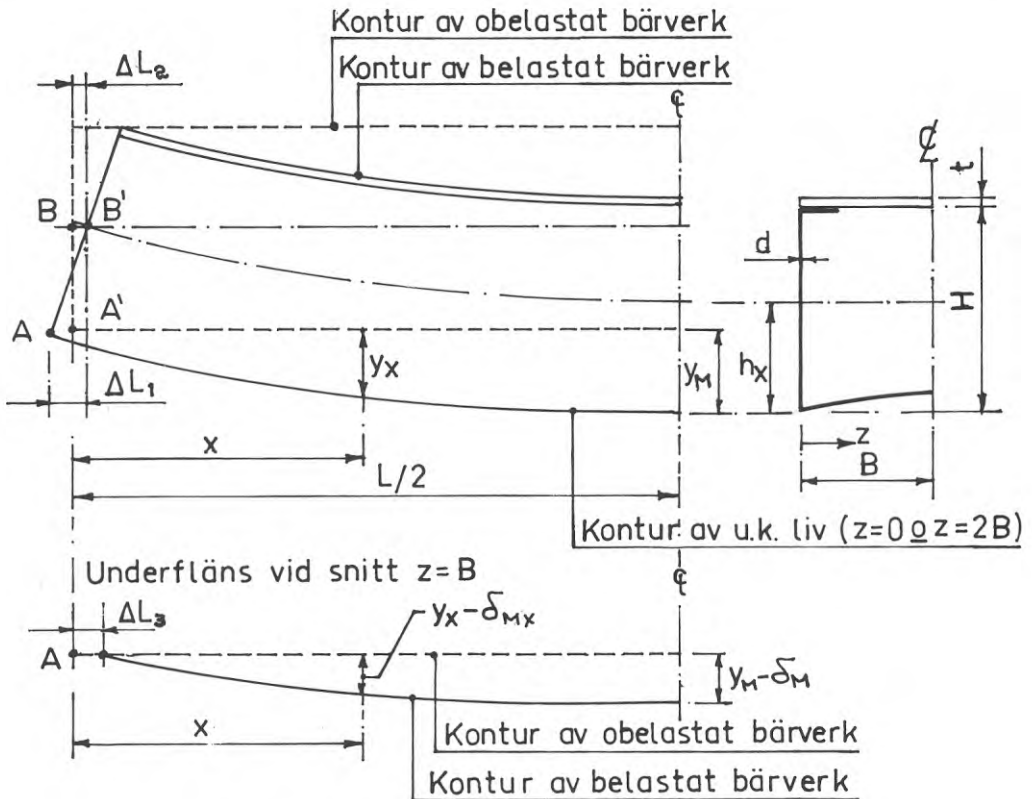
2.8 Upplagsvillkoret

FIG 19 visar i princip det belastade och deformerade bärverket, där snittet i fältmitt förutsättes fast. På grund av töjningen ϵ_{ax} vid livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$) förflyttas A sträckan A-A' lika med:

$$\Delta L_1 = \int_0^{L/2} \frac{M_x}{EI_x} \cdot h_x \cdot dx \quad [30]$$

Vid längdsnittet $z = B$ är töjningen ϵ_{M_x} beroende av dels förlängningen ΔL_1 , dels förkortningarna ΔL_2 och ΔL_3 på grund av bärverkets nedböjning y_x resp. nedböjning i längdsnittet $z = B$ motsvarande $y_x - \delta_{M_x}$.

För bestämning av förkortningarna ΔL_2 och ΔL_3 utnyttjas följande geometriska samband för det deformerade bärverket:



Vid snitt $z=0 \text{ } \underline{\text{ o }} \text{ } z=2B$ är:

$$\text{Förlängningen } \Delta L_1 = \int_0^{L/2} \frac{M_x}{EJ_x} \cdot h_x \cdot dx$$

$$\text{Villkor för bestämning av } \Delta L_2: L = 2 \int_0^{L/2 - \Delta L_2} \sqrt{1 + y_x'^2} \cdot dx$$

Vid snitt $z=B$ är:

$$\text{Villkor för bestämning av } \Delta L_3: L = 2 \int_0^{L/2 - \Delta L_3} \sqrt{1 + (y_x' - \delta_{Mx}')^2} \cdot dx$$

$$\text{Upplagsvillkoret: } \frac{\epsilon_M}{\epsilon_0} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2 + \Delta L_3}{\Delta L_1}$$

FIG 19. Geometriska förhållanden vid belastat och deformerat bärverk

$$L = 2 \cdot \int_0^{L/2 - \Delta L_2} \sqrt{1 + y_x'^2} \cdot dx \quad [31]$$

resp.

$$L = 2 \cdot \int_0^{L/2 - \Delta L_3} \sqrt{1 + (y_x' - \delta_{M_x}')^2} \cdot dx \quad [32]$$

där

$$y' = \int \frac{M_x}{EI_x} \cdot dx$$

och redovisas i TABELL 2.

δ_{M_x}' erhålles enligt [25] varvid uttrycken för α och β insättes:

$$\delta_{M_x}' = \frac{32 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \cdot (1 - 2 \cdot \frac{x}{L})}{m \cdot L \cdot [1 + 4 \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)]^3} \cdot \left[1 + 6 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \cdot (m-1) + 8 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)^2 \cdot (m-1) \cdot (n-1) \right] \cdot \delta_M \quad [33]$$

där δ_M motsvarar uppböjningen vid flänsmitt vid snitt $x = L/2$.

Förutsättes att tvärsnittet vid $x = 0$ och $x = L$ förblir odeformerat efter pålastningen, är förhållandet mellan töjningen ϵ_M vid flänsmitt ($z = B$) och töjningen ϵ_a vid livunderkant ($z = 0$ och $z = 2B$ i snitt $x = L/2$):

$$\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2 + \Delta L_3}{\Delta L_1} \quad [34]$$

Vid framställningen av basprofilen till provkroppar visade underflänsen en tendens till buckling på grund av initialpåkänningar i plåten uppkomna i samband med valsningen FIG [20]. Detta innebar att plåten kring flänsmitt hade begränsad lastupptagningsförmåga under det första belastningsskedet, vilket motiverar en komplettering av uttrycket [34] med storheten ΔL_4 :

$$\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2 + \Delta L_3 - \Delta L_4}{\Delta L_1} \quad [35]$$

där ΔL_4 är en term som är beroende av underflänsens initialbuckling [FIG 20] och till storlek och fördelning är beroende av plåtens egenspanningstillstånd.

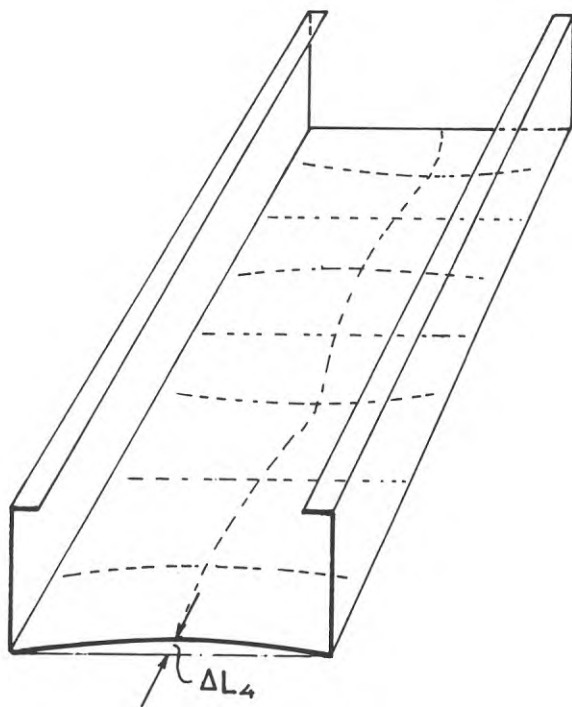


FIG 20. Basprofil i princip visande bucklig underfläns och förskjutningsmättet ΔL_4 efter framställningen

Vid den fortsatta teoretiska behandlingen förutsättes emellertid att plåten är initieellt spänningsfri och odeformerad, d v s $\Delta L_4 = 0$.

Vidare bortses från "shear-lag"-effekten i underflänsen som jämfört med effekten av plåtens egenspanningstillstånd är mycket liten.

Beräkningen av ΔL_1 , ΔL_2 och ΔL_3 sker lämpligen med hjälp av numerisk metod.

Uttrycken för M_x , EI_x och h_x enligt [1], [2] resp. [3] insättes i [30]. För halva bärverkslängden är:

$$\Delta L_1 = \int_0^{L/2} \frac{M_x}{EI_x} \cdot h_x \cdot dx.$$

Bärverkslängden indelas som tidigare i 10 lika stora intervaller [FIG 21]. Vidare motsvarar

$$N = \frac{M_x}{EI_x} \cdot \Delta x$$

de elastiska vikterna och redovisas i TABELL 1, varvid:

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= \Sigma N \cdot h_x \\ &= N_1 \cdot h_{x_{0,05}} + N_2 \cdot h_{x_{0,15}} + N_3 \cdot h_{x_{0,25}} + N_4 \cdot h_{x_{0,35}} + N_5 \cdot h_{x_{0,45}} = \\ &= h_0 \cdot [N_1 \cdot [1 + 0,19 \cdot (m - 1)] + N_2 \cdot [1 + 0,51 \cdot (m - 1)] + \\ &+ N_3 \cdot [1 + 0,75 \cdot (m - 1)] + N_4 \cdot [1 + 0,91 \cdot (m - 1)] + \\ &+ N_5 \cdot [1 + 0,99 \cdot (m - 1)]] \end{aligned}$$

Med hjälp av m-n-a-diagrammet [FIG 15] erhålles ΔL_1 som en funktion av n.

Beträffande förkortningen ΔL_2 insättes i [31] de olika värdena för y'_x enligt TABELL 2. För halva bärverkslängden gäller att:

$$\frac{L}{2} - \Delta L_2 = \int_0^{\frac{L}{2}} \sqrt{1 + y_x'^2} \cdot dx = \frac{1}{5} \cdot L - \Delta L_2 \cdot \Sigma \cdot \sqrt{1 + y_x'^2}$$

eller

$$\Delta L_2 = \frac{L}{2} \cdot \left[1 - \frac{5}{\Sigma \cdot \sqrt{1 + y_x'^2}} \right]$$

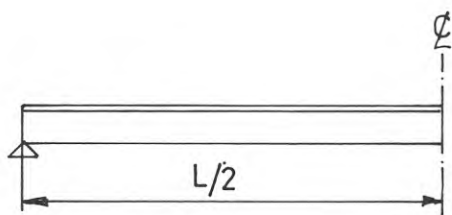
varvid ΔL_2 erhålles som en funktion av n.

Slutligen beräknas ΔL_3 med hjälp av [32], varvid för halva bärverkslängden:

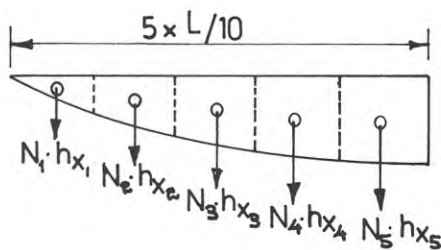
$$\frac{L}{2} - \Delta L_3 = \int_0^{\frac{L}{2}} \sqrt{1 + (y'_x - \delta_{M_x}^i)^2} \cdot dx = \frac{1}{5} \cdot L - \Delta L_3 \cdot \Sigma \cdot \sqrt{1 + (y'_x - \delta_{M_x}^i)^2}$$

eller

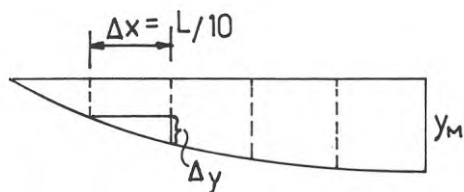
$$\Delta L_3 = \frac{L}{2} \cdot \left[1 - \frac{5}{\Sigma \sqrt{1 + (y'_x - \delta_{M_x}^i)^2}} \right]$$



Elevation

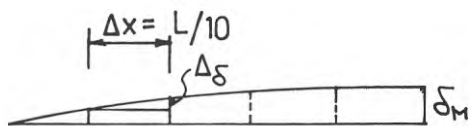


$$\begin{aligned}\Delta L_1 &= \sum_0^{L/2} \frac{M_x}{EJ_x} \cdot h_x \cdot \Delta x \\ &= \sum_0^{L/2} N_x \cdot h_x\end{aligned}$$



$$\Delta L_2 = \frac{L}{2} \left[1 - \frac{5}{\sum \sqrt{1 + y_x'^2}} \right]$$

$$\text{där: } y' = \frac{\Delta y}{L/10}$$



$$\Delta L_3 = \frac{L}{2} \left[1 - \frac{5}{\sum \sqrt{1 + (y_x' - \delta_{Mx}')^2}} \right]$$

$$\text{där } \delta_x' = \frac{\Delta \delta}{L/10}$$

FIG 21. Bedömning av förskjutningsmått ΔL_1 , ΔL_2 , ΔL_3 för erhållande av upplagsvillkoret

där y'_x redovisas i TABELL 2. δ'_M enligt [33] bestäms för varje aktuellt snitt med hjälp av m-n-a-diagrammet, varvid motsvarande tidigare uträknade värden för δ_M enligt [29] insättes.

Ekv [34] kompletteras med de beräknade värdena för ΔL_1 , ΔL_2 och ΔL_3 , varvid $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ erhålles som funktion av n och redovisas som kurva i diagram, FIG 22.

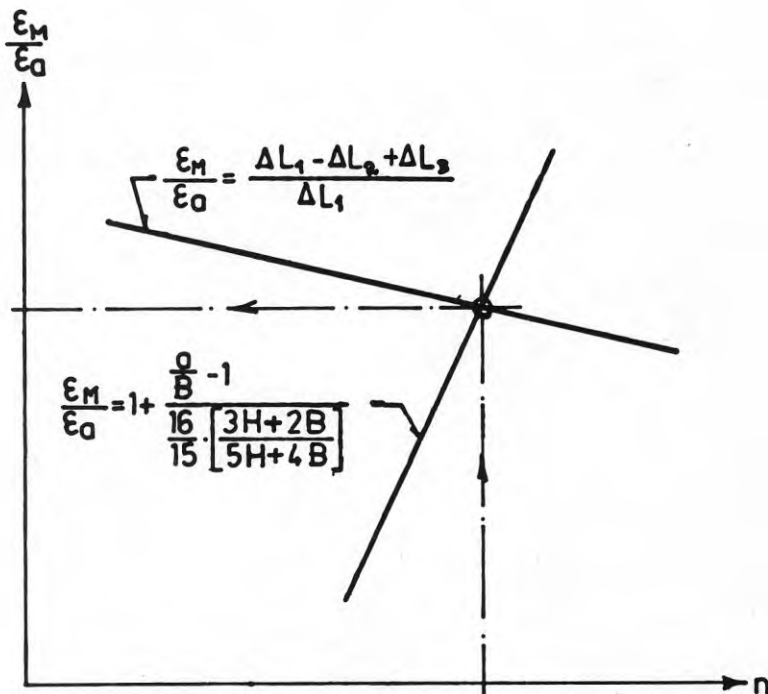


FIG 22. Samband mellan förhållandet $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ och n i princip
($\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ - n - diagram)

Skärningspunkten mellan kurvorna i diagrammet anger det sökta värdet för n och $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$. Ur m-n-a-diagrammet [FIG 15] avläses tillhörande värden för m och a med vars hjälp de övriga obekanta storheterna bestäms.

2.9 Kontroll av blandkomponentens skikt- och plåtpåkänning

Vid dimensioneringen av bärverket utgås från den maximalt tillåtna påkänningen σ_a i livunderkant utan hänsyn till uppträdande påkänningar i blandkomponenten.

FIG 7 visar i princip arbetskurvorna för skikt- och plåtmaterial vid limfläns. Inom modulstadium A är blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet (se avsnitt 2.2):

$$\sigma_i = \frac{\sigma_a \cdot \sigma_y \cdot \left[\frac{1}{E_y} - \frac{1}{E_a} \right]}{\frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_a}{E_a} + \frac{1}{E_I} \cdot (\sigma_a - \sigma_y)}$$

där σ_a och E_a samt σ_y och E_y anger plåt- resp. skiktmateriallets tillåtna påkänning och elasticitetsmodul. Vidare anger E_I kombinationsmodulen inom modulstadium A:

$$E_I = \frac{E_y \cdot B \cdot t' + E_a \cdot b \cdot d}{B \cdot t' + b \cdot d}$$

varvid

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_I} \approx \varepsilon_{ai} = \frac{\sigma_{ai}}{E_a}$$

Brukspåkänningarna för delmaterialen i blandkomponenten är σ_{ai} och σ_{yi} för plåt resp. skikt. Villkoret för att dessa påkänningar ej överskrids är:

$$\frac{m \cdot h_o}{\sigma_a} \geq \frac{H - h_o \cdot m}{\sigma_{ai}} = \frac{(H - h_o \cdot m) \cdot E_I}{\sigma_i \cdot E_a}$$

eller

$$h_o \geq \frac{1}{\frac{\sigma_i \cdot E_a}{\sigma_a \cdot E_I} + 1} \cdot H \cdot \frac{1}{m} \quad [36]$$

Om villkoret ej uppfylls reduceras påkänningen i livunderkant i motsvarande grad.

2.10 Bärverk med blandkomponent inom modulstadium B i bruksstadiet

Skärningspunkten σ_i/ε_i mellan spänningslinjen och kombinationsmodulen enligt FIG 7 anger, som tidigare nämnts, blandkomponentens tillåtna ideella påkänning σ_i motsvarande plåt- och skikt-påkänningen σ_{ai} resp. σ_{yi} .

Är $\sigma_{ai} < \sigma_s$ eller m.a.o. $\varepsilon_i < \varepsilon_s$ motsvarar detta modulstadium A [FIG 7]. Påkänningarna ligger inom delkomponenternas elastiska område. Är däremot $\sigma_{ai} > \sigma_s$ eller m.a.o. $\varepsilon_i > \varepsilon_s$ motsvarar detta modulstadium B.

FIG 23 visar i princip arbetskurvorna för blandkomponentens delmaterial plåt och skikt inom modulstadium B. Det förutsättes att skiktmaterialiet karakteriseras av ett linjärt spännings-töjnings-samband till brott och att arbetskurvan för plåtmaterial uppvisar ett typiskt flytområde.

Enligt den tidigare rapporten (R75:1973) är blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_s \cdot (\sigma_a - \sigma_y) \cdot (E_I - E_y)}{\sigma_a \cdot (E_a - E_y)} + \sigma_y \quad [37]$$

där kombinationsmodulen E_I är:

$$E_I = \frac{E_y \cdot B \cdot t' + E_a \cdot b \cdot d}{B \cdot t' + b \cdot d} \quad [38]$$

Kombinationsmodulen E_{II} bestäms till:

$$E_{II} = E_y = \frac{\sigma_i - E_I \cdot \varepsilon_s}{\varepsilon_i - \varepsilon_s}$$

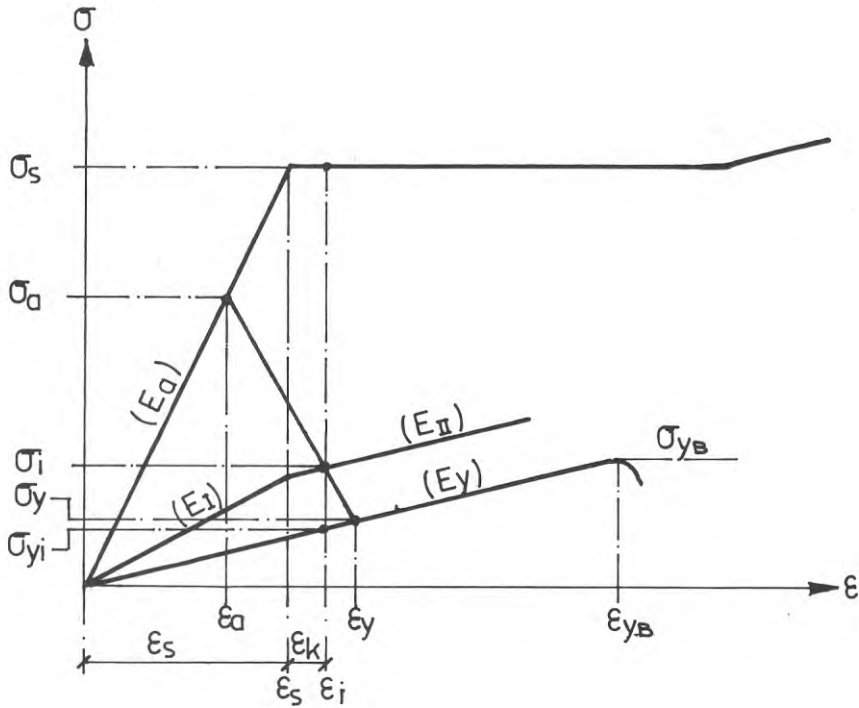
där $\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a}$, $\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y}$ och $\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_a}$

varvid:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_y} \cdot \left[\sigma_i - \frac{\sigma_s}{E_a} \cdot (E_I - E_y) \right], \quad [39]$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_i - \varepsilon_s$$

och blandkomponentens skikt och plåtpåkänning $\sigma_{yi} = \varepsilon_i \cdot E_y$ resp. σ_s .



Modulstadium B

Förutsättning $\varepsilon_i > \varepsilon_s$

Blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet

$$\sigma_i = \frac{\sigma_s \cdot (\sigma_a - \sigma_y) \cdot (E_I - E_y)}{\sigma_a \cdot (E_a - E_y)} + \sigma_y$$

och

$$E_I = \frac{E_y \cdot A_y + E_a \cdot A_a}{A_y + A_a} = \frac{E_y \cdot B \cdot t' + E_a \cdot d \cdot b}{B \cdot t' + d \cdot b}$$

Kombinationsmodulen

$$\sigma_i - E_I \cdot \varepsilon_s = E_y (\varepsilon_i - \varepsilon_s)$$

$$\text{där } \varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a}; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y}; \quad \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_a} \quad \text{och}$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_y} \left[\sigma_i - \frac{\sigma_s}{E_a} (E_I - E_y) \right]$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_i - \varepsilon_s$$

Blandkomponentens skikt påkänning: $\sigma_{yi} = \varepsilon_i \cdot E_y$

plåtpåkänning: $\sigma_{ai} = \sigma_s$

FIG 23. Arbetskurvor för blandmaterialen - limfläns och skikt (modulstadium B)

För blandkomponentlösningar gäller som regel att påkänningen i det ena delmaterialet således är större och i det andra mindre än vad som tillåts för resp. delmaterial. Den reducerade säkerheten för det ena delmaterialet kompenseras av den ökade säkerheten för det andra. Ju mer kombinationsmodulen närmar sig arbetskurvan för ett av delmaterialen, desto mer dominerande blir detta delmaterials lastupptagningsförmåga inom blandkomponenten.

2.11 Deformationer och påkänningsfördelning för bärverk inom modulstadium B

FIG 24 visar tvärsnittsdeformationerna för bärverk med blandkomponent inom modulstadium B.

Till skillnad från bärverk inom modulstadium A överskrider stål-påkänningen i blandkomponenten flytgränsen redan i bruksstadiet. En avlastning från bruksstadiet förorsakar initialpåkänningar i kombinationsmaterialet och blandkomponenten erhåller ändrade spänningsupptagande egenskaper.

FIG 25 visar i princip arbetsdiagram för lättbärverk inom modulstadium B. Diagrammets högra del representerar bärverkets övre fläns (blandkomponenten) och den vänstra delen dess undre fläns. Vidare anger FIG 26 den schematiska framställningen av arbetskurvornas inverkan på spänningsfördelningen vid på- och avlastning inom bruksstadiet.

Pålastning A-B-C:

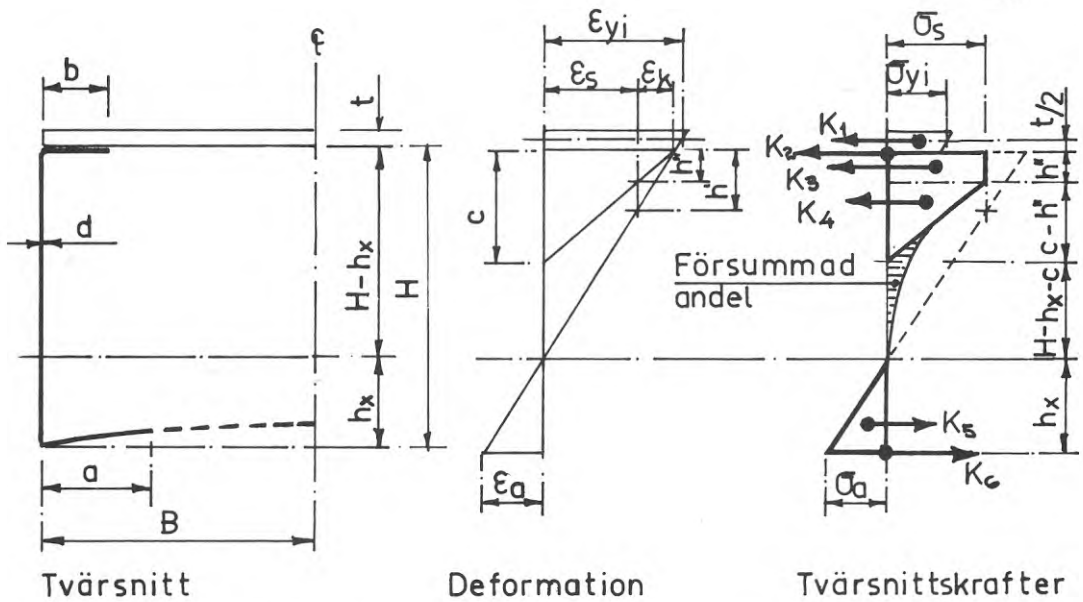
Bärverket utsättes för lasten $g + p_1 + p_2$, vilket motsvarar stukningen ($\epsilon_k + \epsilon_s$) i den övre flänsen och töjningen ϵ_c' vid underkant liv. Plåtpåkänningen i övre flänsen är σ_s och i underkant liv σ_c' . Påkänningen i skiktmaterialiet är $\sigma_{yc} = E_y \cdot (\epsilon_s + \epsilon_k)$.

Avlastning C-D:

Stukningen i övre flänsen reduceras till ϵ_k och töjningen vid underkant liv till ϵ_D' . Den kvarstående stukningen ϵ_k i övre flänsens plåtmaterial reducerar plåtpåkänningen till noll. Påkänningen vid underkant liv reduceras till $\sigma_D' = E_a \cdot \epsilon_D'$ och i skiktmaterialiet till $\sigma_{yD} = E_y \cdot \epsilon_k$.

Avlastning D-E:

Skiktmaterialiet, vars påkänningar under hela belastningsproceduren har legat inom sitt elasticitetsområde, eftersträvar att återgå till sin ursprungliga form. Stålmaterialet i övre flänsen med sin kvarstående stukning ϵ_k i sitt spänningslösa tillstånd utsättes för dragning under skiktmaterialiets inverkan. Vid jämvikt erhålles en kvarstående stukning i övre fläns lika



Deformation

$$\epsilon_{yi} = \frac{\epsilon_a}{h_x} \cdot (H - h_x + \frac{t}{2})$$

$$\epsilon_k = \frac{\epsilon_a}{h_x} (H - h_x) - \epsilon_s = \epsilon_a \cdot \frac{h'}{h_x}$$

$$h' = H - h_x - h_x \cdot \frac{\epsilon_s}{\epsilon_a}$$

$$h'' = h' \cdot \frac{c}{H - h_x} = c \left[1 - \frac{h_x}{H - h_x} \cdot \frac{\epsilon_s}{\epsilon_a} \right]$$

$$c - h'' = c \cdot \frac{h_x}{H - h_x} \cdot \frac{\epsilon_s}{\epsilon_a}$$

Tvärsnittskrafter.

$$K_1 = E_y \cdot t \cdot B \cdot \frac{\epsilon_a}{h_x} \cdot (H - h_x + \frac{t}{2}) = \frac{E_y}{E_a} \cdot t \cdot B \cdot \frac{\sigma_a}{h_x} (H - h_x + \frac{t}{2})$$

$$K_2 = E_a \cdot \epsilon_s \cdot d \cdot b = \sigma_s \cdot d \cdot b$$

$$K_3 = E_a \cdot \epsilon_s \cdot d \cdot h'' = \sigma_s \cdot d \cdot c \left(1 - \frac{h_x}{H - h_x} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_a} \right)$$

$$K_4 = E_a \cdot \epsilon_s \cdot d \cdot \frac{1}{2} (c - h'') = \frac{1}{2} \cdot \sigma_s \cdot d \cdot c \cdot \frac{1}{\sigma_a} \cdot \frac{h_x}{H - h_x}$$

$$K_5 = E_a \cdot \epsilon_a \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot h_x = \frac{1}{2} \cdot \sigma_a \cdot d \cdot h_x$$

$$K_6 = E_a \cdot \epsilon_a \cdot d \cdot a = \sigma_a \cdot d \cdot a$$

FIG 24. Tvärsnittskrafter för bärverk inom modulstadium B

UNDRE FLÄNS. - - - - -

Pålastning A-B-C: $\epsilon = \epsilon_c'$
 Plåt: $\sigma = \sigma_c'$

Avlastning C-D: $\epsilon = \epsilon_D$
 Plåt: $\sigma = \sigma_D'$

Avlastning D-E
 Kvarstående töjning $\epsilon = \epsilon_E$
 Plåt $\sigma = \sigma_E'$

Pålastning E-D-C: $\epsilon = \epsilon_c'$
 Plåt: $\sigma = \sigma_c'$

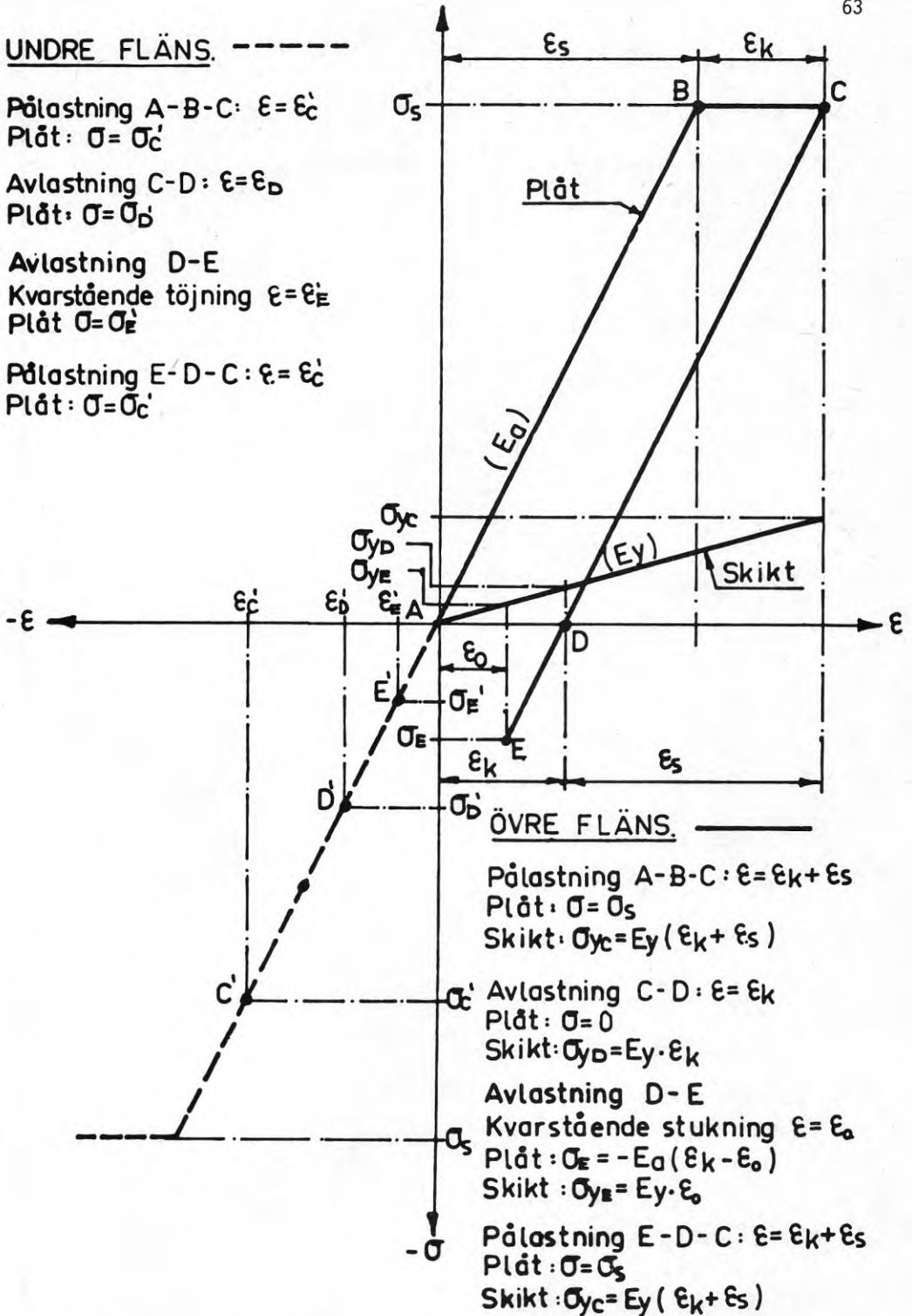


FIG 25. Arbetsdiagram för lättbärverk inom modulstadium B

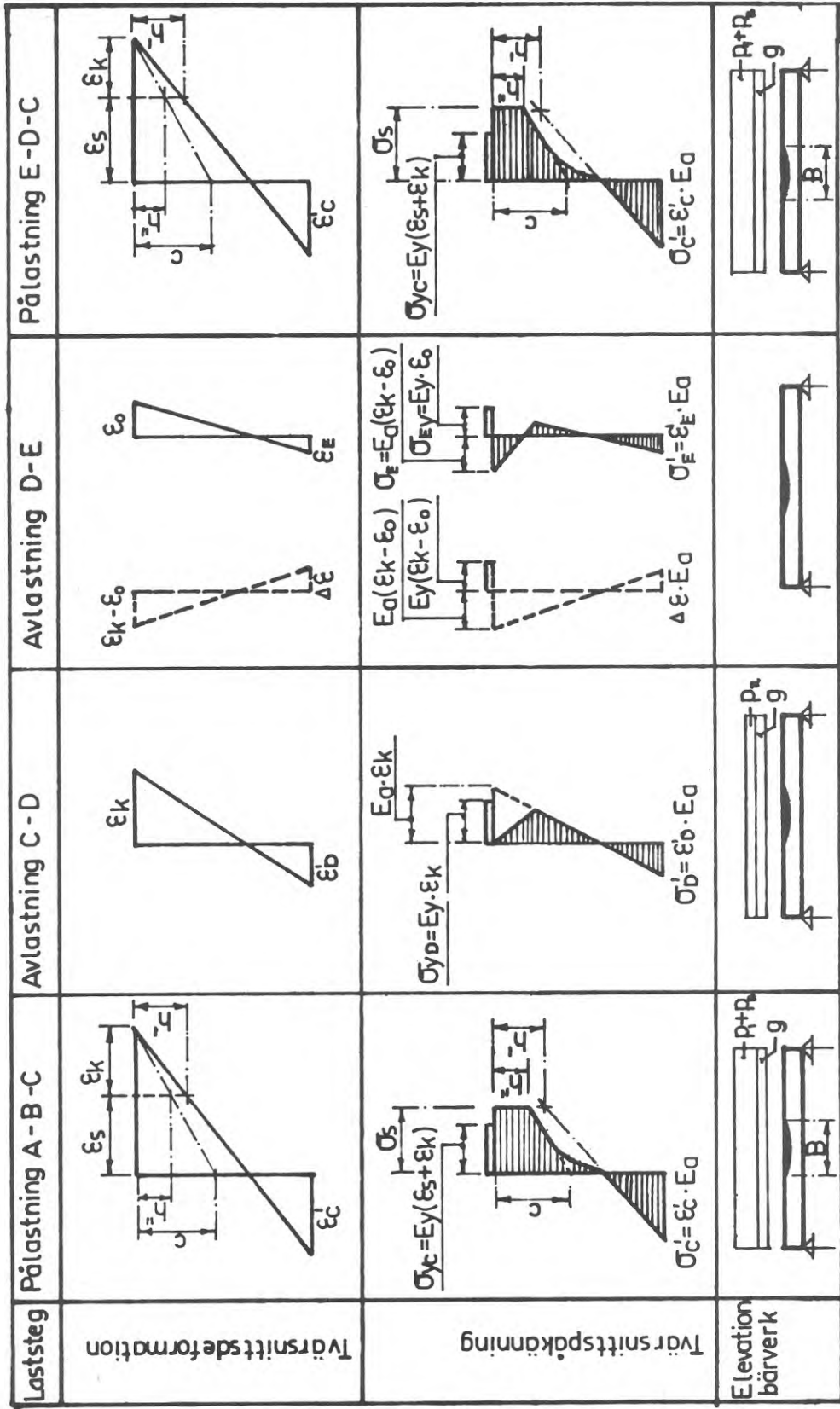


FIG 26. Schematisk framställning av arbetskurvornas inverkan på spänningsfördelningen vid på- och avlastning inom modulstadium B

med ε_0 och vid underkant liv en töjning lika med ε_E^I som motsvarar dragspänningarna $\sigma_E = E_a \cdot (\varepsilon_k - \varepsilon_0)$ i övre fläns och $\sigma_E^I = E_a \cdot \varepsilon_E^I$ i underkant liv. Den kvarstående påkänningen i skiktmaterialiet är $\sigma_{yE} = E_y \cdot \varepsilon_0$. Bärverket har således erhållit en initialpåkänning.

Pålastning E-D-C:

Stukningen i övre flänsen ökar från ε_0 till $(\varepsilon_s + \varepsilon_k)$ och töjningen i underkant liv från ε_E^I till ε_C^I . Spänningsfiguren har således fått samma utseende som efter första pålastningen. Påkänningen i övre flänsens plåtmaterial har återgått till σ_s utan att detta flyter.

Upprepade av- och pålastningar förorsakar både drag- och tryckpåkänningar i stålmaterialiet vid sektionens överkant, vilket under vissa förutsättningar kan förorsaka utmattningsproblem. Utan att närmare redogöra för detta bör det dock påpekas att påkänningarna i blandkomponenten lämpligen begränsas så att den ständiga lasten helt eliminerar dragpåkänningen i plåtmaterialiet.

För enkelhetens skull bortses från livets medverkan. Approximativt gäller följande villkor:

$$1/8 \cdot g \cdot L^2 \geq 2B \cdot H \cdot E_y \cdot t' (\varepsilon_i - \varepsilon_s)$$

eller

$$\varepsilon_i \leq \frac{1/8 \cdot g \cdot L^2 + 2B \cdot H \cdot E_y \cdot t' \cdot \varepsilon_s}{2B \cdot H \cdot E_y \cdot t'} \quad [40]$$

där g anger bärverkets ständiga last och ε_i motsvarar [39].

I övrigt gäller böjningsteorin för bärverk inom modulstadium B i princip som för bärverk inom modulstadium A. Jämvikts-, tvärsnitts- och upplagsvillkoren får emellertid uttryck som skiljer sig från motsvarande uttryck för bärverk inom modulstadium A.

2.12 Sammanfattning

Vid dimensionering av lättbärverk med samverkande blandkomponenter är beräkningsgången följande:

- 1) För den givna bärverkssektionen med kända moduler och tillåtna påkänningar för de ingående delmaterialen beräknas den ideella brukspåkänningen σ_i och stukningen ε_{ai} i blandkomponenten, varefter den "effektiva" tryckta livhöjden c enligt ε_{ai} - c -diagrammet FIG 6 bestäms.

- 2) Jämvikts- och böjstyvhetsvillkoren [4], [5], [6] och [7] uppställs, varvid m och n , motsvarande förhållandet mellan nollinjeavståndet resp. böjstyvheten vid fältmitt och upplag, samt a , motsvarande underflänsens medverkande bredd, betraktas som obekanta. Olika värden för n och tillhörande värden för m och a bestäms. Resultaten sammanställs i m - n - a -diagrammet, FIG 15.
- 3) Förhållandet mellan töjningen vid underflänsens mitt och vid livunderkant i snitt $x/L = 0,5$ ϵ_M/ϵ_a bestäms med hjälp av [28] och m - n - a -diagrammet FIG 15. Resultatet redovisas som kurva i ϵ_M/ϵ_a - n -diagrammet, FIG 22.
- 4) Uppböjningskraften p_a [23] vid livunderkant i snitt $x/L = 0,5$ beräknas som en funktion av n med hjälp av m - n - a -diagrammet, FIG 15.
- 5) Uppböjningskraften p_M [20] vid underflänsens mitt i snitt $x/L = 0,5$ bestäms som en funktion av n , varvid de tidigare erhållna värdena för ϵ_M/ϵ_a och p_a insättes.
- 6) Uppböjningen δ_M [18] vid flänsmitt i snitt $x/L = 0,5$ beräknas och erhålles som en funktion av n .
- 7) ΔL_1 , ΔL_2 och ΔL_3 bestäms i kombination med de erhållna värdena för δ_M . ϵ_M/ϵ_a enligt [34] beräknas som funktion av n . Resultatet redovisas som den andra kurvan i ϵ_M/ϵ_a - n -diagrammet, FIG 22. Skärningspunkten mellan dessa båda kurvor i diagrammet anger det sökta värdet för ϵ_M/ϵ_a och n . Med hjälp av m - n - a -diagrammet FIG 15 erhålles samhörande värden för m och a , varvid de övriga obekanta storheterna bestäms.
- 8) Delpåkänningarna i blandkomponenten kontrolleras.

För erhållande av statistiskt optimalt tvärsnitt utformas detta på ett sådant sätt att brukspåkänningen motsvarar de maximalt tillåtna påkänningarna både i livunderkant och i blandkomponentens delmaterial. I praktiken medför standardmåttan för plåt- och skiktmaterialen begränsade möjligheter vid utformningen av fullständiga statistiskt optimala tvärsnitt. Däremot kan för givna plåtbredder profilhöjden H i relation till bredden B bestämmas för erhållande av tvärsnitt med optimal momentupptagningsförmåga (jfr beräkningsexempel 2).

För undvikande av den reduktion i böjstyvhet som förorsakas av uppböjningen δ_M kan underflänsen kompletteras med en pålimmad böjstiv skiva till exempel i form av värmeisolering. Beräkningen av bärverk med avstyvad underfläns sker i princip som för ett bärverk med oavstyvad underfläns med det undantaget att i uttrycket för jämvikts- och böjstyvhetsvillkoret m och n bestäms med förutsättningen att $a = B$ och att tvärsnitts- och upplagsvillkoret ej är aktuellt.

Under vissa förutsättningar kan den ökade böjstyvheten på grund av underflänsens avstyvning förorsaka en negativ effekt på bärverkets momentupptagningsförmåga. Det mindre h_0 -avståndet ger upphov till en större påkänning i blandkomponentens delmaterial.

Den grundläggande böjteorin för lättbärverk med samverkande blandkomponenter belyses lämpligen i följande beräkningsexempel.

3 BERÄKNINGSEXEMPEL

3.1 Beräkningsexempel 1

Som beräkningsexempel 1 betraktas ett fritt upplagt bärverk med spännvidden $L = 6000$ mm påverkad av en jämnt fördelad belastning q kp/m [FIG 27]. Skiktet utgörs av plywood med elasticitetsmodul $E_y = 10^4$ N/mm². Tillåten tryckpåkänning i fibrernas längdriktning är $\sigma_y = 8$ N/mm². Som grundmaterial väljes 1 mm förzinkad plåt med antagen sträckgräns lika med 230 N/mm². Tillåten påkänning $\sigma_a = 150$ N/mm². Plåtmaterialets elasticitetsmodul är $E_a = 21 \cdot 10^4$ N/mm².

Plywoodtjockleken väljes 17,5 mm (7-skiktsplywood), där den effektiva tjockleken i bärverkets längd- och tvärriktning är lika med $t' = 4 \times 2,5 = 10$ mm resp. $t'' = 3 \times 2,5 = 7,5$ mm. Profilbredden 2B är lika med 600 mm, limflänsbredden b lika med 50 mm och profilhöjden $H = 250$ mm.

Följande frågeställningar skall utrönas:

Fall a: Bärverkets tillåtna belastning q kp/m inkl. egenvikt.

Fall b: Bärverkets maximala nedböjning y_M (bortse från skjuvkraftens inverkan).

Fall c: Tvärsnittets påkänningsfördelning i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$.

Blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet (modulstadium A):

$$\sigma_i = \frac{150 \cdot 8 \cdot \left(\frac{1}{10^4} - \frac{1}{21 \cdot 10^4} \right)}{\frac{8}{10^4} - \frac{150}{21 \cdot 10^4} + \frac{1}{1,328 \cdot 10^4} (150 - 8)} = 10,603 \text{ N/mm}^2$$

där kombinationsmodulen

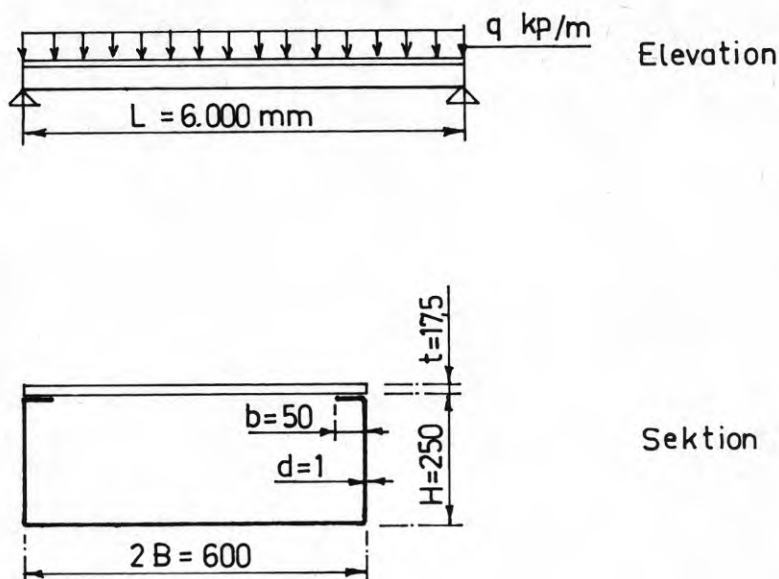
$$E_I = \frac{10^4 \cdot 300 \cdot 10 + 21 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 50}{300 \cdot 10 + 50 \cdot 1} = 1,328 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$$

varvid

$$\varepsilon_{ai} = \frac{10,603}{1,328 \cdot 10^4} = 798 \cdot 10^{-6}$$

Enligt ε_{ai} -c-diagrammet FIG 6 är för $d = 1,0$ mm:

$$c \approx 85 \text{ mm.}$$



Givet:

Spännvidd: $L = 6.000 \text{ mm}$

Profil: $\sigma_a = 150 \text{ N/mm}^2$; $E_a = 21 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

Skikt: Plywood: $\sigma_y = 8,0 \text{ N/mm}^2$; $E_y = 10^4 \text{ N/mm}^2$

$t' = 10 \text{ mm}$, $t'' = 7,5 \text{ mm}$, $t = 17,5 \text{ mm}$

Sökes:

Fall a: Bärverkets tillåtna belastning $q \text{ kp/m}$
(inkl. egenvikt)

Fall b: Bärverkets maximala nedböjning y_m
(bortse från skjuvpåkänningens inverkan)

Fall c: Tvärsnittets påkänningsfördelning i fältmitt.

FIG 27. Bärverk utsatt för böjning - beräkningsexempel 1

Jämviktsvillkoret

Vid upplagen [4]:

$$h_0 = \frac{\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 \cdot (250 + 8,75) + 250 \cdot (50 + 125)}{\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 + 50 + 250 + 300} = 108,7 \text{ mm}$$

Vid fältmitt [5]:

$$h_0 \cdot m = - \left[\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 + 92,5 + a \right] +$$

$$+ \sqrt{\left[\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 + 92,5 + a \right]^2 + 2 \cdot \left[\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 \cdot 258,75 + 250 \cdot 92,5 \right]}$$

För a = 250 mm är m = 1,022
 " a = 260 mm " m = 1,005
 " a = 270 mm " m = 0,989
 " a = 280 mm " m = 0,973
 " a = 290 mm " m = 0,957

Böjstyvhetsvillkoret

Vid upplagen [6]:

$$EI_0 = 2 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot \left[\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 \cdot (250 + 8,75 - 108,7)^2 + \right.$$

$$+ 50 \cdot (250 - 108,7)^2 + 250 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 250^2 - 250 \cdot 108,7 + 108,7^2 \right) +$$

$$\left. + 300 \cdot 108,7^2 \right] = 38337 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2$$

Vid fältmitt [7]:

$$EI_o \cdot n = 2 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot \left[\frac{10^4 \cdot 10}{21 \cdot 10^4 \cdot 1} \cdot 300 \cdot (250 - 108,7 \cdot m + 8,75)^2 + \right. \\ \left. + 50 \cdot (250 - 108,7 \cdot m)^2 + 42,5 \cdot (250 - 108,7 \cdot m) \cdot (250 - 108,7 \cdot m - \right. \\ \left. - \frac{85}{3}) + 1/3 \cdot m^3 \cdot 108,7^3 + a \cdot 108,7^2 \cdot m^2 \right]$$

För a = 250 mm är m = 1,022 och n = 0,907

" a = 260 mm " m = 1,005 " n = 0,920

" a = 270 mm " m = 0,989 " n = 0,932

" a = 280 mm " m = 0,973 " n = 0,944

" a = 290 mm " m = 0,957 " n = 0,956

Resultatet redovisas i m-n-a-diagrammet, FIG 28.

Tillåten påkänning i limfläns och livunderkant:

$$\sigma_{ai} = \varepsilon_{ai} \cdot E_a = 798 \cdot 10^{-6} \cdot 21 \cdot 10^4 = 167,6 \text{ N/mm}^2$$

resp.

$$\sigma_a = 167,6 \cdot \frac{h_o \cdot m}{H - h_o \cdot m}$$

Vid snitt z = 0 och z = 2B samt $\frac{x}{L} = 0,5$ är enligt [8]:

$$\sigma_a = \frac{qL^2 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot 108,7}{38337 \cdot 10^8 \cdot 8} \cdot \frac{m}{n} = 167,6 \cdot \frac{h_o \cdot m}{H - h_o \cdot m}$$

eller

$$qL^2 = \frac{24477,3 \cdot 10^6 \cdot n}{250 - 108,7 \cdot m}$$

Enligt m-n-a-diagrammet [FIG 28] är:

För n = 0,92, m = 1,005 och $qL^2 = 160,0 \cdot 10^6 \cdot \text{Nmm}$

" n = 0,93, m = 0,992 " $qL^2 = 160,1 \cdot 10^6 \cdot \text{Nmm}$

" n = 0,94, m = 0,978 " $qL^2 = 160,2 \cdot 10^6 \cdot \text{Nmm}$

" n = 0,95, m = 0,965 " $qL^2 = 160,3 \cdot 10^6 \cdot \text{Nmm}$

" n = 0,96, m = 0,952 " $qL^2 = 160,4 \cdot 10^6 \cdot \text{Nmm}$

och vid snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ [28]:

$$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} = 1 + \frac{\frac{a}{300} - 1}{\frac{16}{15} \cdot \left(\frac{3 \cdot 250 + 2 \cdot 300}{5 \cdot 250 + 4 \cdot 300} \right)}$$

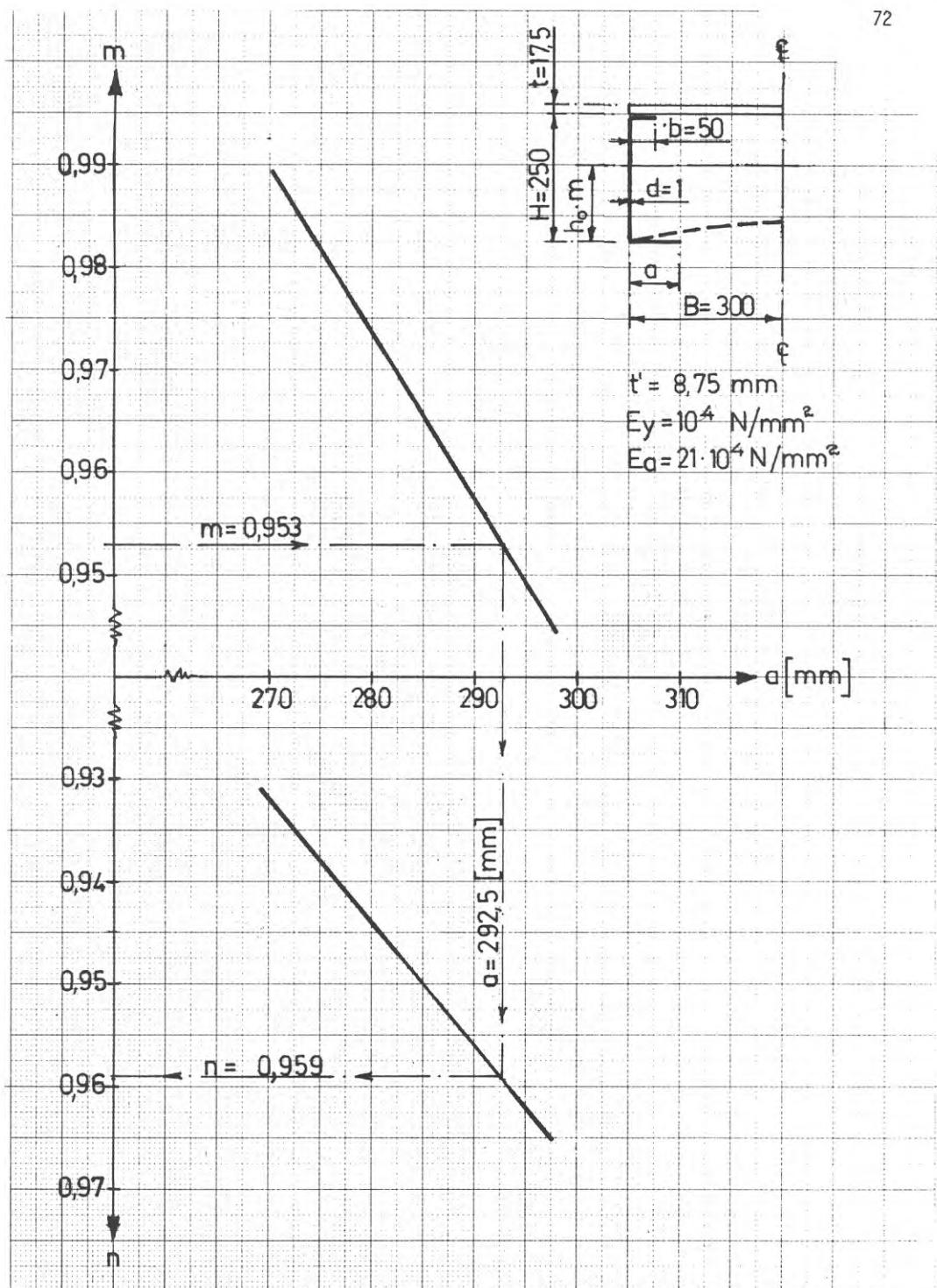


FIG 28. m-n-a-diagram - beräkningsexempel 1

Enligt m-n-a-diagrammet är

för	$n = 0,92$,	$a = 260 \text{ mm}$	och	$\epsilon_M/\epsilon_a = 0,773$
"	$n = 0,93$,	$a = 268 \text{ mm}$	"	$\epsilon_M/\epsilon_a = 0,819$
"	$n = 0,94$,	$a = 277 \text{ mm}$	"	$\epsilon_M/\epsilon_a = 0,870$
"	$n = 0,95$,	$a = 285 \text{ mm}$	"	$\epsilon_M/\epsilon_a = 0,915$
"	$n = 0,96$,	$a = 293 \text{ mm}$	"	$\epsilon_M/\epsilon_a = 0,960$

Resultatet redovisas som kurva i ϵ_M/ϵ_a -n-diagrammet, FIG 29.

Uppböjningskraften p_a vid livunderkant i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ [23]:

$$p_a = \left[\frac{qL^2}{8 \cdot 38337 \cdot 10^8} \right]^2 \cdot 108,7 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot \frac{m}{n^2} \cdot dx$$

För $n = 0,92$ och $\frac{m}{n^2} = 1,187$ är $p_a = 0,7377 \cdot 10^{-3} \cdot dx \cdot \text{N/mm}$

" $n = 0,93$ " $\frac{m}{n^2} = 1,147$ " $p_a = 0,7134 \cdot 10^{-3} \cdot dx \cdot \text{N/mm}$

" $n = 0,94$ " $\frac{m}{n^2} = 1,107$ " $p_a = 0,6885 \cdot 10^{-3} \cdot dx \cdot \text{N/mm}$

" $n = 0,95$ " $\frac{m}{n^2} = 1,069$ " $p_a = 0,6668 \cdot 10^{-3} \cdot dx \cdot \text{N/mm}$

" $n = 0,96$ " $\frac{m}{n^2} = 1,033$ " $p_a = 0,6450 \cdot 10^{-3} \cdot dx \cdot \text{N/mm}$

Uppböjningskraften p_M vid flänsnitt ($z = B$) i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ [20]:

$$p_M = p_a \cdot \left[1 - \frac{\delta_M''}{y_M''} \right] \cdot \frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$$

där enligt [26]:

$$\delta_M'' = - \frac{8 \cdot \delta_M}{6000^2} \left[1 + \frac{2}{n} - \frac{1}{m} \right]$$

och [27]:

$$y_M'' = - \frac{qL^2}{8 \cdot EI_o \cdot n} = - \frac{1}{8 \cdot 38337 \cdot 10^8} \cdot \frac{qL^2}{n}$$

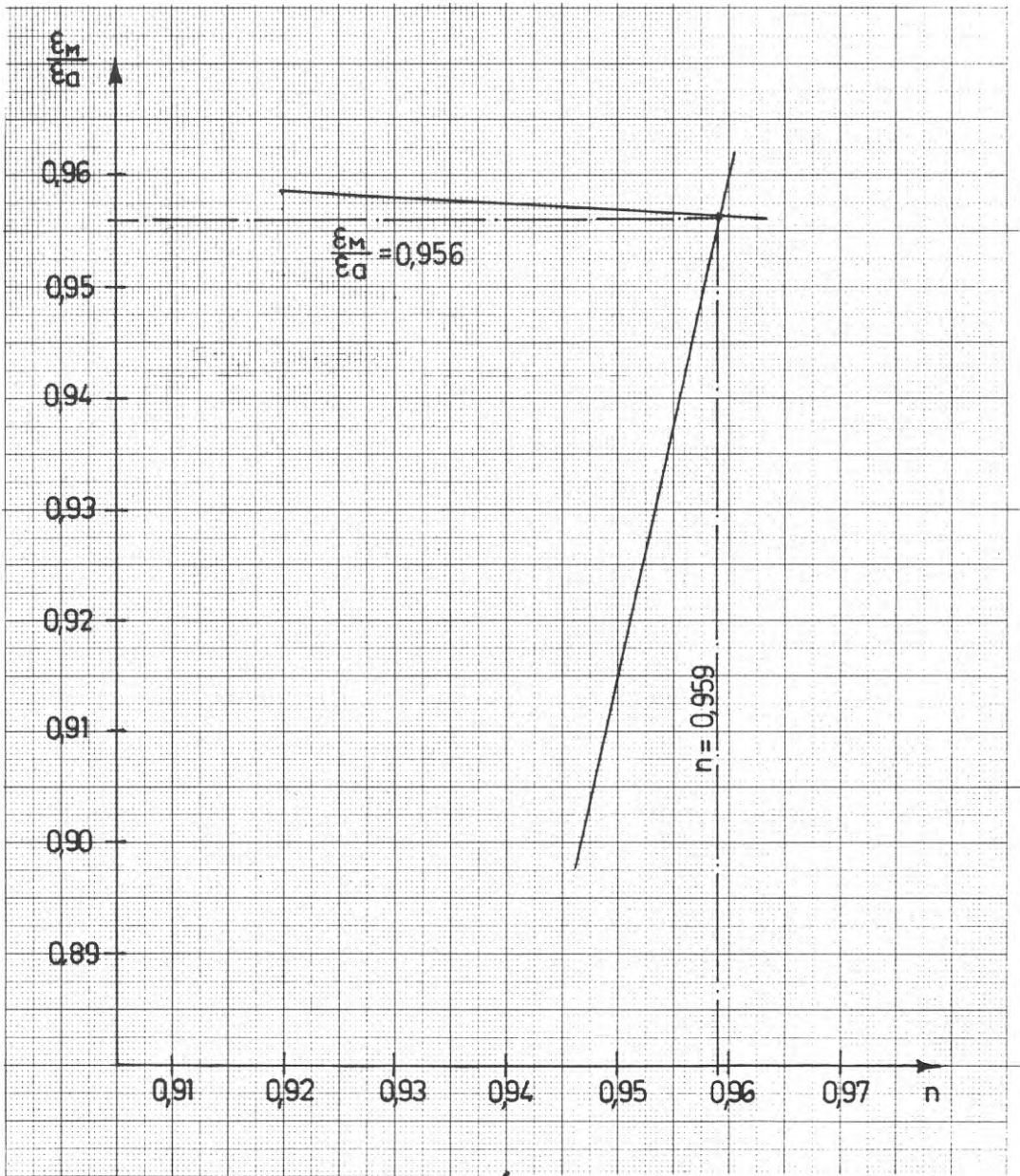


FIG 29. $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_a}$ - n -diagram - beräkningsexempel 1

$$\begin{aligned} \text{För } n = 0,92 \text{ är } m = 1,005 \text{ och } \frac{\delta_M''}{y_M''} &= 0,08539 \cdot \delta_M \\ \text{" } n = 0,93 \text{ " } m = 0,992 \text{ " } \frac{\delta_M''}{y_M''} &= 0,08482 \cdot \delta_M \\ \text{" } n = 0,94 \text{ " } m = 0,978 \text{ " } \frac{\delta_M''}{y_M''} &= 0,08424 \cdot \delta_M \\ \text{" } n = 0,95 \text{ " } m = 0,965 \text{ " } \frac{\delta_M''}{y_M''} &= 0,08362 \cdot \delta_M \\ \text{" } n = 0,96 \text{ " } m = 0,952 \text{ " } \frac{\delta_M''}{y_M''} &= 0,08292 \cdot \delta_M \end{aligned}$$

varvid uppböjningskraften p_M :

$$\begin{aligned} \text{för } n = 0,92 \text{ är } p_M &= 0,5702 \cdot (1 - 0,08539 \cdot \delta_M) \cdot 10^{-3} \cdot dx \text{ N/mm} \\ \text{" } n = 0,93 \text{ " } p_M &= 0,5843 \cdot (1 - 0,08482 \cdot \delta_M) \cdot 10^{-3} \cdot dx \text{ N/mm} \\ \text{" } n = 0,94 \text{ " } p_M &= 0,5990 \cdot (1 - 0,08424 \cdot \delta_M) \cdot 10^{-3} \cdot dx \text{ N/mm} \\ \text{" } n = 0,95 \text{ " } p_M &= 0,6101 \cdot (1 - 0,08362 \cdot \delta_M) \cdot 10^{-3} \cdot dx \text{ N/mm} \\ \text{" } n = 0,96 \text{ " } p_M &= 0,6192 \cdot (1 - 0,08292 \cdot \delta_M) \cdot 10^{-3} \cdot dx \text{ N/mm} \end{aligned}$$

Tvärsnittsvillkoret enligt [18] är:

$$\begin{aligned} \delta_M = \frac{p_a \cdot 300^4}{21 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{12} \cdot dx \cdot 1^3} \cdot \left[\frac{5}{24} - \left(1 - \frac{p_M}{p_a}\right) \cdot \frac{16}{\pi^4} - \frac{2 \cdot 300}{250 + 4 \cdot 300} \cdot \left(\frac{1}{3} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(1 - \frac{p_M}{p_a}\right) \cdot \frac{8}{\pi^3}\right) \right] = 5,90 \cdot 10^3 \cdot \frac{p_a}{dx} + 26,69 \cdot 10^3 \cdot \frac{p_M}{dx} \end{aligned}$$

Sätt in uttrycken för p_a och p_M varvid:

$$\begin{aligned} \text{för } n = 0,92 \text{ är } \delta_M &= 8,511 \text{ mm} \\ \text{" } n = 0,93 \text{ " } \delta_M &= 8,526 \text{ mm} \\ \text{" } n = 0,94 \text{ " } \delta_M &= 8,543 \text{ mm} \\ \text{" } n = 0,95 \text{ " } \delta_M &= 8,561 \text{ mm} \\ \text{" } n = 0,96 \text{ " } \delta_M &= 8,572 \text{ mm} \end{aligned}$$

Enligt FIG 12 är nedböjningen y_M :

$$\text{för } n = 0,92 \text{ är } y_M = 2,790 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 20,959 \text{ mm}$$

$$\text{" } n = 0,93 \text{ " } y_M = 2,765 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 20,785 \text{ mm}$$

$$\text{" } n = 0,94 \text{ " } y_M = 2,740 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 20,597 \text{ mm}$$

$$\text{" } n = 0,95 \text{ " } y_M = 2,715 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 20,434 \text{ mm}$$

$$\text{" } n = 0,96 \text{ " } y_M = 2,690 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 20,259 \text{ mm}$$

Upplagsvillkoret [34]:

$$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2 + \Delta L_3}{\Delta L_1}$$

De elastiska vikterna (N) och vinkeländringarna (y') erhålles ur TABELL 1 och TABELL 2 för de aktuella n-värdena med hjälp av interpolering:

TABELL 4

n	Elastiska vikter - mult. $\frac{qL^3}{20 EI_0}$				
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
0,92	0,0483	0,1329	0,1994	0,2455	0,2690
0,93	0,0482	0,1322	0,1978	0,2431	0,2661
0,94	0,0481	0,1315	0,1962	0,2407	0,2633
0,95	0,0480	0,1308	0,1948	0,2383	0,2604
0,96	0,0479	0,1301	0,1933	0,2361	0,2578

TABELL 5

n	Vinkeländringar - mult. y_M/L				
	$y'_{0,05}$	$y'_{0,15}$	$y'_{0,25}$	$y'_{0,35}$	$y'_{0,45}$
0,92	3,120	2,795	2,200	1,402	0,482
0,93	3,122	2,796	2,199	1,401	0,481
0,94	3,124	2,796	2,198	1,400	0,481
0,95	3,127	2,797	2,197	1,399	0,480
0,96	3,129	2,798	2,196	1,398	0,479

$$\Delta L_1 = 108,7 \cdot \left[N_1 \cdot [1 + 0,19 \cdot (m - 1)] + N_2 \cdot [1 + 0,51 \cdot (m - 1)] + \right. \\ \left. + N_3 \cdot [1 + 0,75 \cdot (m - 1)] + N_4 \cdot [1 + 0,91 \cdot (m - 1)] + \right. \\ \left. + N_5 \cdot [1 + 0,99 \cdot (m - 1)] \right]$$

För $n = 0,92$ och $m = 1,005$ är $\Delta L_1 = 1,2231$ mm

" $n = 0,93$ " $m = 0,992$ " $\Delta L_1 = 1,2008$ mm

" $n = 0,94$ " $m = 0,978$ " $\Delta L_1 = 1,1771$ mm

" $n = 0,95$ " $m = 0,965$ " $\Delta L_1 = 1,1562$ mm

" $n = 0,96$ " $m = 0,952$ " $\Delta L_1 = 1,1352$ mm

$$\Delta L_2 = \frac{L}{2} \cdot \left[1 - \frac{5}{\Sigma \cdot \sqrt{1 + y_x'^2}} \right]$$

För $n = 0,92$ är $\frac{y_M}{L} = 3,4932 \cdot 10^{-3}$ och $\Delta L_2 = 0,0900$ mm

" $n = 0,93$ " $\frac{y_M}{L} = 3,4642 \cdot 10^{-3}$ " $\Delta L_2 = 0,0885$ mm

" $n = 0,94$ " $\frac{y_M}{L} = 3,4328 \cdot 10^{-3}$ " $\Delta L_2 = 0,0870$ mm

" $n = 0,95$ " $\frac{y_M}{L} = 3,4057 \cdot 10^{-3}$ " $\Delta L_2 = 0,0856$ mm

" $n = 0,96$ " $\frac{y_M}{L} = 3,3765 \cdot 10^{-3}$ " $\Delta L_2 = 0,0842$ mm

$$\Delta L_3 = \frac{L}{2} \cdot \left[1 - \frac{5}{\Sigma \cdot \sqrt{1 + (y_x' - \delta_{Mx}')^2}} \right]$$

Enligt [33] är:

$$\delta_M' = \frac{32 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \cdot (1 - 2 \cdot \frac{x}{L}) \cdot \delta_M}{m \cdot 6000 \cdot [1 + 4 \cdot (n - 1) \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)]^3} \cdot \left[1 + 6 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right) \cdot (m - 1) + \right. \\ \left. + 8 \cdot \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)^2 \cdot (m - 1) \cdot (n - 1) \right]$$

TABELL 6

n	Vinkeländringen $y_M' - \delta_M'$ i snitt $\frac{x}{L}$ - mult. 10^{-3}				
	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
0,92	9,185	5,883	3,346	1,602	0,463
0,93	9,055	5,764	3,287	1,592	0,463
0,94	8,914	5,632	3,222	1,579	0,466
0,95	8,790	5,517	3,167	1,571	0,467
0,96	8,656	5,399	3,112	1,563	0,468

För $n = 0,92$ är $\Delta L_3 = 0,0399$ mm

" $n = 0,93$ " $\Delta L_3 = 0,0386$ mm

" $n = 0,94$ " $\Delta L_3 = 0,0373$ mm

" $n = 0,95$ " $\Delta L_3 = 0,0361$ mm

" $n = 0,96$ " $\Delta L_3 = 0,0349$ mm

varvid enligt [34] $\varepsilon_M/\varepsilon_a$

för $n = 0,92$ är: $\varepsilon_M/\varepsilon_a = 0,9590$

" $n = 0,93$ " : $\varepsilon_M/\varepsilon_a = 0,9584$

" $n = 0,94$ " : $\varepsilon_M/\varepsilon_a = 0,9578$

" $n = 0,95$ " : $\varepsilon_M/\varepsilon_a = 0,9572$

" $n = 0,96$ " : $\varepsilon_M/\varepsilon_a = 0,9566$

Resultatet redovisas som kurva i $\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a}$ -n-diagrammet FIG 29. Skärningspunkten $\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} = 0,956$ och $n = 0,959$. Enligt m-n-a-diagrammet [FIG 28] är de samhörande värdena för $m = 0,953$ och $a = 292,5$ mm.

Fall a: Bärverkets tillåtna belastning q :

$$qL^2 = \frac{24477,3 \cdot 10^6 \cdot n}{250 - 108,7 \cdot m}$$

$$q = 445,4 \text{ kp/m}$$

Fall b: Bärverkets maximala nedböjning y_M (se FIG 12):

$$y_M = 2,69 \cdot \frac{4,454 \cdot 6000^4}{200 \cdot 38337 \cdot 10^8} = 20,3 \text{ mm}$$

Fall c: Tvärsnittets påkänningsfördelning i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ [se FIG 30]:

Enligt [8] är:

$$\sigma_a = \frac{4,454 \cdot 6000^2 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot 108,7 \cdot 0,953}{8 \cdot 38337 \cdot 10^8 \cdot 0,959} = 118,6 \text{ N/mm}^2$$

I snitt $z = B$ är:

$$\sigma_{aM} = 118,6 \cdot \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_a} = 113,4 \text{ N/mm}^2$$

Vidare är:

$$\sigma_{yi} = \varepsilon_i \cdot E_y = 7,98 \text{ N/mm}^2.$$

3.2 Beräkningsexempel 2

Som beräkningsexempel 2 betraktas ett fritt upplagt bärverk med avstyvad underfläns och spännvidden L påverkad av jämnt fördelad belastning q - FIG 31.

Skiktet utgörs av plywood-kvalitet P.30, klimatklass 2 - med elasticitetsmodul $E_y = 0,6 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ och tillåten tryckpåkänning i fibrernas längdriktning $\sigma_y = 7,0 \text{ N/mm}^2$.

Som grundmaterial väljes 1,7 mm förzinkad plåt med antagen sträckgräns 300 N/mm^2 och tillåten påkänning $\sigma_a = 200 \text{ N/mm}^2$. Plåtmaterialets elasticitets- och skjuvmodul är $E_a = 21 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ resp. $G = 8,1 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$.

Plywoodtjockleken väljes 19 mm (5-skiktsplywood), där den effektiva tjockleken i bärverkets längdriktning är lika med $t' = 11,4 \text{ mm}$. Vid framställningen av bärverket utnyttjas oavkortat de ingående materialens standardmått, där både plåtens och skiktets bredd är lika med 1200 mm. Av praktiska skäl är skiktets utkragning från livöverkant 300 mm (se FIG 31).

Följande frågeställningar skall utrönas:

Fall a): Momentupptagningsförmågan i relation till profilens höjd H och bredd $2B$.

Fall b): Det statistiskt optimala tvärsnittet.

Fall c): Lastupptagningsförmågan och motsvarande maximala nedböjningar för varierande spännvidd L under förutsättning av att profilbredden $2B = 450 \text{ mm}$.

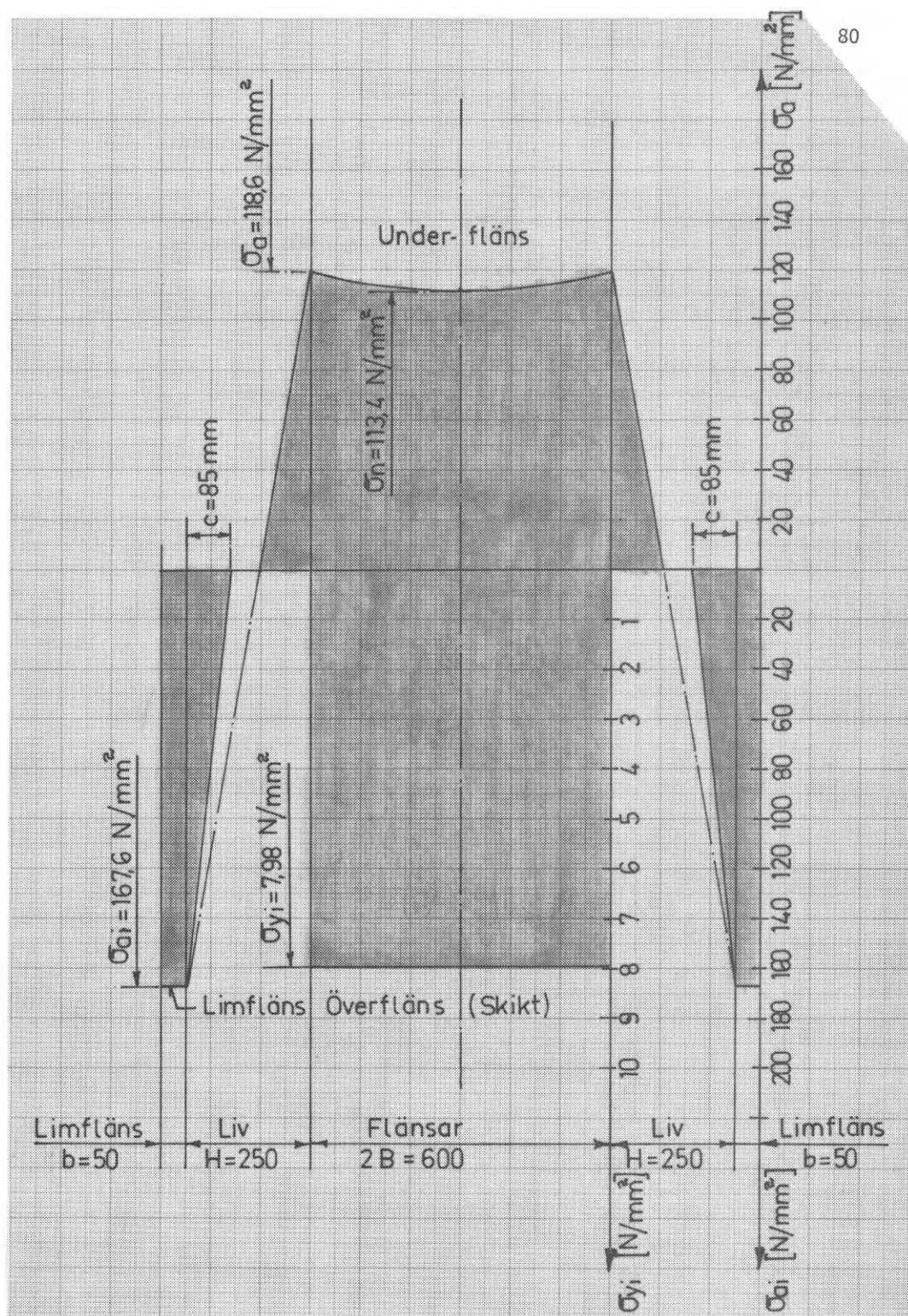


FIG 30. Påkänningsfördelningen vid snitt $x = L/2$ - beräknings-exempel 1

Fall a):

Enligt FIG 31 är halva plåtbredden:

$$600 = \sqrt{H^2 + (300 - B)^2} + 50 + B$$

varvid profilhöjden

$$H = 10 \cdot \sqrt{2125 - 5 \cdot B}$$

Sök den effektiva tryckta livhöjden c:

Kombinationsmodulen

$$E_I = \frac{0,6 \cdot 600 \cdot 11,4 + 21 \cdot 50 \cdot 1,7}{600 \cdot 11,4 + 50 \cdot 1,7} \cdot 10^4 = 0,850 \cdot 10^4 \cdot \text{N/mm}^2$$

Blandkomponentens ideella påkänning i bruksstadiet:

$$\sigma_i = \frac{200 \cdot 7 \cdot \left[\frac{1}{0,6} - \frac{1}{21} \right] \cdot \frac{1}{10^4}}{\left[\frac{7}{0,6} - \frac{200}{21} + \frac{1}{0,85} \cdot (200 - 7) \right] \cdot \frac{1}{10^4}} = 9,89 \text{ N/mm}^2$$

och

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_I} = \frac{9,89}{0,85 \cdot 10^4} = 1163 \cdot 10^{-6}$$

Enligt ε_{ai} -c-diagrammet, FIG 6, är:

$$c \approx 115 \text{ mm.}$$

Enligt jämviktsvillkoret [5] är nollinjeavståndet i fältmitt ($\frac{x}{L} = 0,5$) för $a = B$:

$$h_x = -A + \sqrt{A^2 + C}$$

där:

$$A = \left[\frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} \cdot 600 + B + 50 + \frac{115}{2} \right]$$

och

$$C = 2 \cdot \left[\frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} \cdot 600 \cdot (H + 9,5) + H \cdot \left(50 + \frac{115}{2} \right) \right]$$

Enligt böjstyvhetsvillkoret [7] är för $\frac{x}{L} = 0,5$ och $a = B$:

$$EI_x = 2 \cdot E_a \cdot 1,7 \cdot \left[\frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} \cdot 600 \cdot (H - h_x + 9,5)^2 + 50 \cdot (H - h_x)^2 \right. \\ \left. + \frac{115}{2} \cdot (H - h_x) \cdot (H - h_x - \frac{115}{3}) + \frac{1}{3} h_x^3 + B \cdot h_x^2 \right]$$

Påkänningar i u.k. liv:

$$\sigma_a = \frac{M \cdot h_x \cdot E_a}{EI_x}$$

varvid

$$M = 3,4 \cdot \frac{\sigma_a}{h_x} \left[114,96 \cdot (H - h_x + 9,5)^2 + 107,5 \cdot (H - h_x)^2 - \right. \\ \left. - \frac{115^2}{6} \cdot (H - h_x) + \frac{1}{3} h_x^3 + h_x^2 \cdot B \right]$$

Vidare är förutsättningarna att:

$$\sigma_a \leq 200 \text{ N/mm}^2 \text{ och}$$

$$\sigma_{yi} \leq \frac{E_y \cdot \sigma_a}{E_a \cdot h_x} \cdot (H - h_x + t/2) = \frac{0,6 \cdot \sigma_a}{21 \cdot h_x} \cdot (H + 9,5 - h_x) = 7,0 \text{ N/mm}^2$$

Alltså:

$$\sigma_a \leq 245 \frac{h_x}{H + 9,5 - h_x} \text{ N/mm}^2$$

och

$$\sigma_{yi} \leq \frac{40}{7 \cdot h_x} \cdot (H + 9,5 - h_x) \text{ N/mm}^2$$

Välj olika värden för B och beräkna samhörande värden för H, h_x , σ_a , σ_{yi} och M med hjälp av ovanstående uttryck. Resultaten redovisas i TABELL 7 samt i diagram FIG 32.

Fall b):

Som framgår ur tabellen uppträder maximalt tillåtna påkänningar samtidigt vid u.k. liv och i skikt för ett tvärsnitt där B = 186 mm och H = 345,7 mm, vilket motsvarar det statistiskt optimala tvärsnittet.

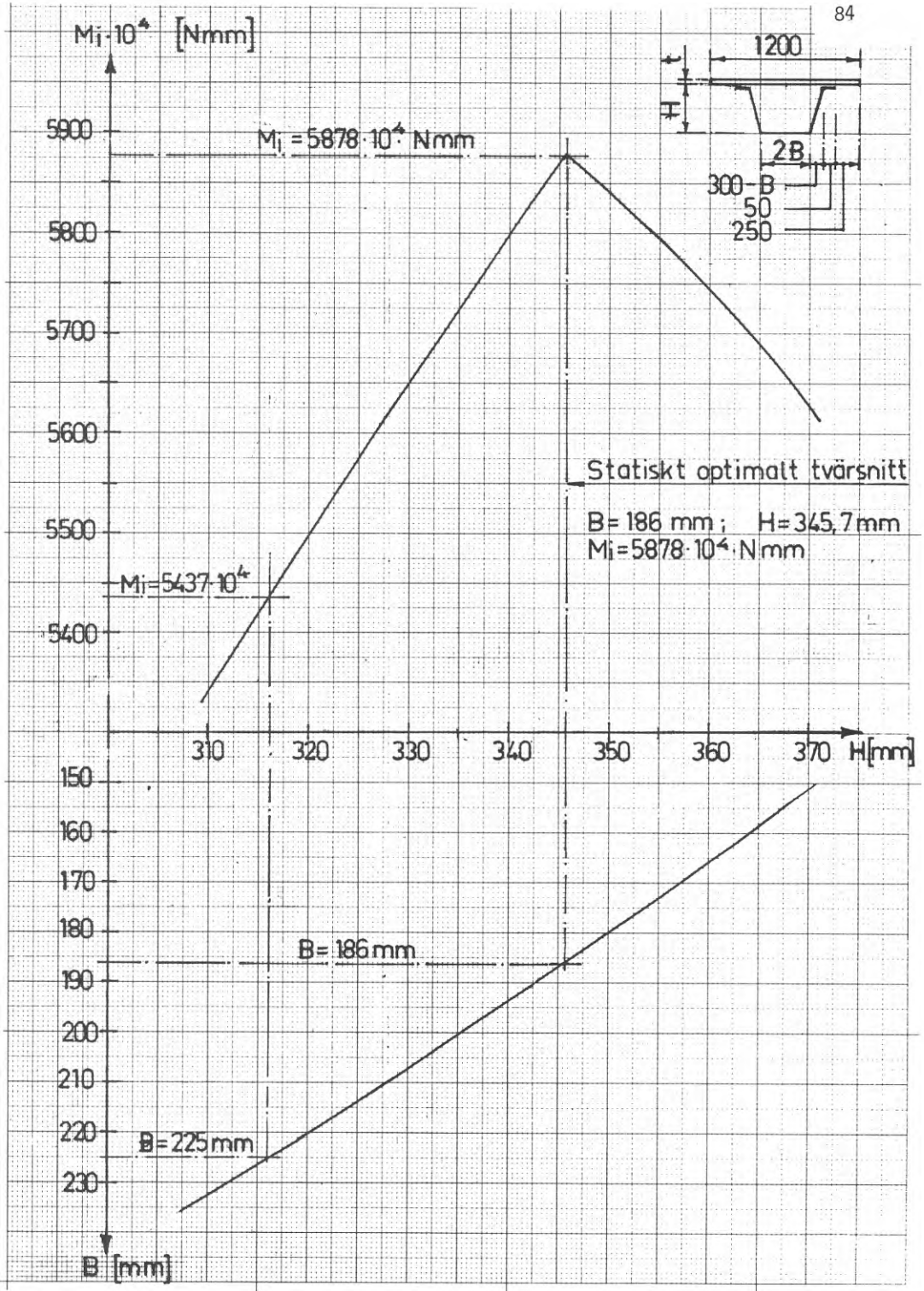


FIG 32. Momentupptagningsförmågan i relation till tvärsnittets utformning - beräkningsexempel 2

TABELL 7 - Momentupptagningsförmåga i relation till tvärsnittets utformning

B mm	H mm	h_x mm	σ_a N/mm ²	σ_{yi} N/mm ²	M N · mm	
150	370,8	180,6	200	6,3	5614 · 10 ⁴	
160	364,0	174,7	200	6,5	5698 · 10 ⁴	
170	357,1	168,8	200	6,7	5777 · 10 ⁴	
180	350,0	163,1	200	6,9	5842 · 10 ⁴	
186	345,7	159,7	200	7,0	5878 · 10 ⁴	STATISTKT OPTIMALT
190	342,8	157,5	198,1	7,0	5842 · 10 ⁴	
200	335,4	151,9	192,8	7,0	5731 · 10 ⁴	
210	327,9	146,4	187,8	7,0	5618 · 10 ⁴	
220	320,2	141,0	183,1	7,0	5501 · 10 ⁴	
225	316,2	138,3	180,8	7,0	5437 · 10 ⁴	
230	312,2	135,6	178,5	7,0	5373 · 10 ⁴	
240	304,1	130,3	174,2	7,0	5245 · 10 ⁴	

Fall c):

För 2B = 450 mm är enligt TABELL 7 och diagram FIG 32

$$H = 316,2 \text{ mm}, h_x = 138,3 \text{ mm för } c = 115 \text{ mm},$$

$$\sigma_a = 180,8 \text{ N/mm}^2 \text{ och } M = 5437 \cdot 10^4 \cdot \text{Nmm}.$$

För $c = (H - h_x)$ är enligt jämviktsvillkoret [4]

$$h_0 = \frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4 \cdot 600 \cdot (316,2 + 9,5) + 316,2 \cdot (50 + \frac{1}{2} \cdot 316,2)}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} = 146,2 \text{ mm}$$

$$\frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} \cdot 600 + 50 + 316,2 + 225$$

Enligt [6] är böjstyvheten vid upplagen:

$$EI_0 = 2 \cdot 21 \cdot 10^4 \cdot 1,7 \cdot \left[\frac{0,6 \cdot 10^4 \cdot 11,4}{21 \cdot 10^4 \cdot 1,7} \cdot 600 \cdot (316,2 + 9,5 - 146,2)^2 + \right. \\ \left. + (316,2 - 146,2)^2 \cdot 50 + 316,2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 316,2^2 - 316,2 \cdot 146,2 + \right. \right. \\ \left. \left. + 146,2^2 \right) + 225 \cdot 146,2^2 \right] = 90232 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Vidare är böjstyvheten vid fältmitt ($\frac{x}{L} = 0,5$):

$$EI_x = \frac{h_x \cdot E_a}{\sigma_a} \cdot M = \frac{138,3 \cdot 21 \cdot 10^4}{180,8} \cdot 5437 \cdot 10^4 = 87338 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$$

Enligt FIG 12 är för $n = \frac{EI_x}{EI_0} = 0,968$ nedböjningen på grund av momentet:

$$y_M = 2,67 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot EI_0} = 2,67 \cdot \frac{qL^4}{200 \cdot 90232 \cdot 10^8} = 14,795 \cdot 10^{-16} \cdot qL^4$$

På grund av skjuvkraften är nedböjningen:

$$y_s = \frac{M}{2H \cdot d \cdot G} = \frac{qL^2}{8 \cdot 2 \cdot 316,2 \cdot 8,1 \cdot 10^4 \cdot 1,7} = 0,1435 \cdot 10^{-8} \cdot qL^2$$

varvid den totala nedböjningen i snitt $\frac{x}{L} = 0,5$ är

$$y = y_M + y_s = \left[14,795 \cdot 10^{-16} \cdot L^2 + 0,1435 \cdot 10^{-8} \right] \cdot qL^2$$

där

$$qL^2 = 8 \cdot M = 8 \cdot 5437 \cdot 10^4 = 43496 \cdot 10^4 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

och

$$L = \sqrt{\frac{y - 0,6242}{0,6435}} \cdot 10^3 \text{ mm.}$$

Insättes olika värden för y erhålles motsvarande värden för L och q . Resultaten redovisas i TABELL 8 samt i diagram FIG 33.

TABELL 8 - Relationen mellan y , L och q

y mm	L mm	q kp/m	y mm	L mm	q kp/m
5	2608	6396	55	9192	515
10	3817	2985	60	9606	471
15	4727	1947	65	10002	435
20	5487	1445	70	10383	403
25	6155	1148	75	10751	376
30	6756	953	80	11106	353
35	7309	814	85	11451	332
40	7822	711	90	11785	313
45	8304	631	95	12110	297
50	8760	567	100	12427	282

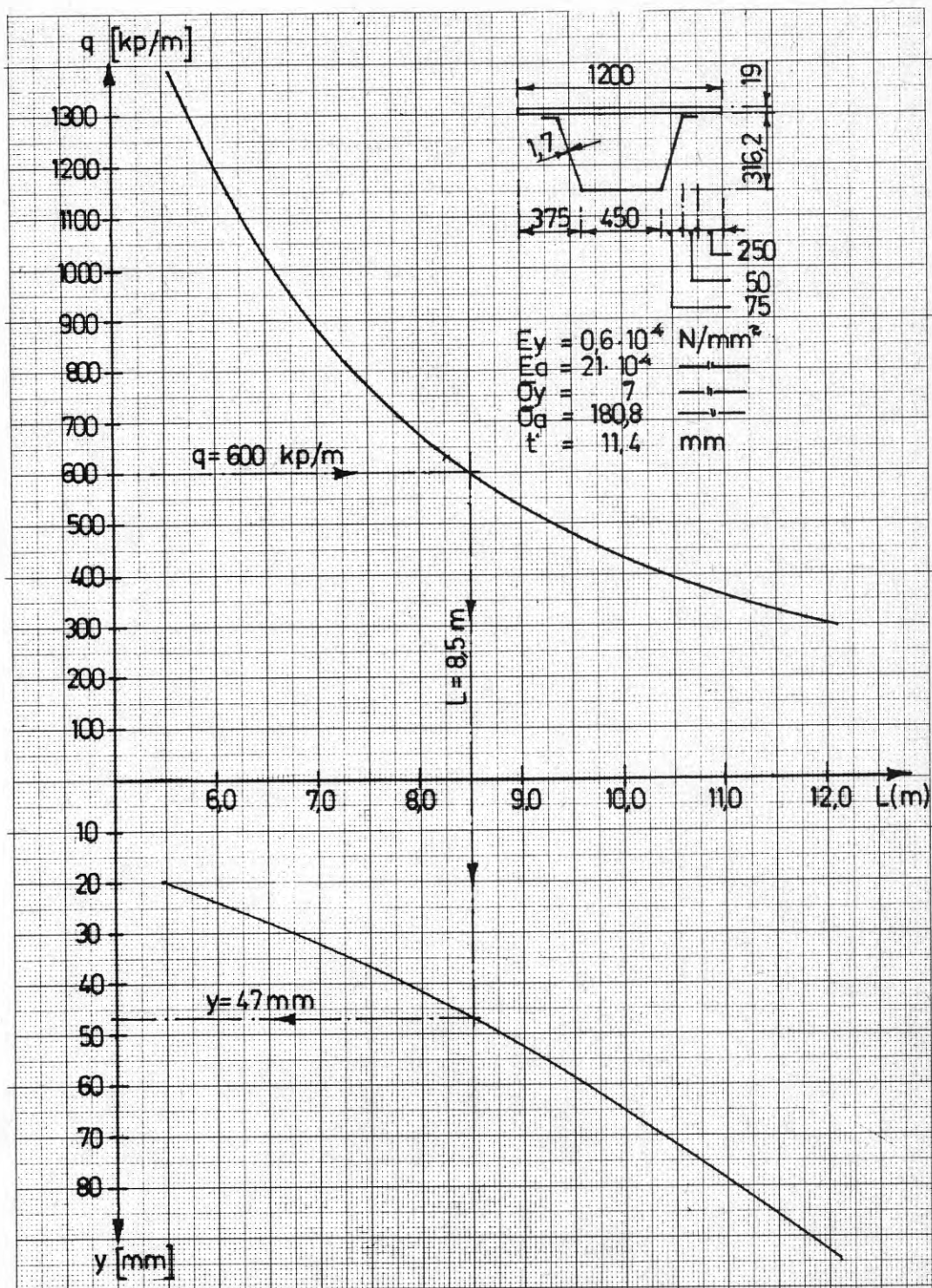


FIG 33. q-L-y-diagram - beräkningsexempel 2

4 PRAKTISKA FÖRSÖK AV LÄTTBÄRVERK UTSATTA FÖR BÖJNING

4.1 Provkroppar

Försöken indelades i 8 serier. Varje serie utgjordes av 3 st nominellt lika kassetter med undantag för serie G - se TABELL 9. Totalt provades 23 st kassetter.

RITNING 1 (appendix 1) visar basprofilernas utformning. Profilhöjden H var dels 150 mm, dels 250 mm. Den nominella plättjockleken d varierade för varje serie, varvid kassetter med olika H/d-förhållanden erhöles. Underflänsens och limflänsens bredd var för samtliga kassetter $2B = 600$ mm resp. $b = 50$ mm. Basprofilernas totala längd var 6150 mm. Varje upplag kompletterades med 2 mm avstyvningsplåtar punktsvetsade till basprofilen. Avståndet mellan dessa var 6000 mm, vilket motsvarade kassetternas spännvidd.

Skikten bestod av plywoodskivor (1200 x 2400 mm) av kvalitet P.30 med nominella tjockleken t varierande från 10 till 19 mm, tillkapade och skarvade med skäftfog genom presslimning med ytfaneren i kassetternas längdriktning - se RITNING 2 (appendix 1). För erhållande av så nära som möjligt symmetriskt uppbyggda kassetter var delskivorna vid de båda kassetändarna tagna från samma plywoodskiva. Skiktmaterialiet samt de framställda provkropparna förvarades i en lokal med relativ fuktighet och temperatur varierande mellan 30-40 % resp. 16-18°C.

Skikten applicerades till basprofilerna med hjälp av Cascos industrilim 1820 och hårdare 1821 - en tvåkomponentig polyuretanprodukt. Då limningen enbart kräver ett presstryck motsvarande god foganläggning erhöles detta med hjälp av skiktets egenvikt kompletterad med enkla 5 kg:s vikter. Fixerings- och härdningstiden var ca 8 timmar resp. 7 dygn vid den aktuella rumstemperaturen 16-18°C.

Som en orientering innan de praktiska försöken utfördes beräknades med hjälp av böjningsteorin tvärsnittspåkänningarna σ_a , σ_{aM} och σ_{yi} i livunderkant och underflänsens mitt resp. i skiktet samt underflänsens maximala uppböjning δ_M och bärverkets nedböjning y_M vid snitt $x/L = 0,5$. Vidare beräknades motsvarande belastning P (egenvikt inkl.), förhållandet P_k/P vid snitt $x/L = 0$, $x/L = 0,5$ och $x/L = 1$ samt den maximala skiktskjuvningen τ_s i limfogen - se TABELL 9. Beräkningen förutsatte att plåt- och skiktmateriallets elasticitetsmoduler var $E_a = 21 \cdot 10^4$ N/mm² resp. $E_y = 0,9 \cdot 10^4$ N/mm² och att arbetskurvan uppvisade en plåt av ideal-elastoplastiskt material - FIG 34. Vidare förutsatte beräkningen en påkänning och stukning i limflänsen $\sigma_s = 340$ N/mm² resp. $\epsilon'_s = 1,619 \cdot 10^{-3}$ samt en belastningsfördelning motsvarande den för de efterföljande praktiska försöken - se FIG 34 och FIG 35.

TABELL 9.

Tabell 9. Data beräknade enligt böjningsterion: $\sigma_{01} = 0,5 \cdot 34,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$, $E_0 = 21 \cdot 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ och $E_1 = 0,9 \cdot 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ - Orientering

Serie	Antal	H mm	d mm	t mm	t' mm	h ₀ mm	c mm	E ₀ N/mm ²	n	m	a mm	$\frac{E_1}{E_0}$	$\frac{H}{d}$	σ_{01} N/mm ²	P kp	Smitt $x/L = 0,5$						$x/L = 0$ resp 1			
																σ_{01} N/mm ²	σ_{02} N/mm ²	σ_{03} N/mm ²	σ_{04} N/mm ²	σ_{05} N/mm ²	λ_4 mm	P ₀₁ /f kp	P ₀₂ /f kp	P ₀₃ /p kp	σ_{05} N/mm ²
A	3	150	2,00	17,5	10,0	51,3	98,7	20028 · 10 ⁶	0,971	1,055	274	0,847	75	806	730	13,7	192	163	15,9	63	1731	>1	3600	>1	0,63
B	3	"	1,25	16	9,5	57,2	65	14 352 · 10 ⁶	0,9325	1,035	260	0,768	120	70	530	25,7	222	170	15,9	66	491	0,93	875	>1	0,57
C	3 ¹⁾	"	1,00	19	11,4	63,2	55	13 582 · 10 ⁶	0,9235	1,048	255	0,737	150	45	553	36,5	284	210	16,3	73	329	0,59	450	0,81	0,71
D	3	"	0,80	17,5	10,0	67,0	45	11 206 · 10 ⁶	0,914	1,045	252	0,721	187,5	29	461	41,8	298	215	16,2	75	175	0,38	232	0,50	0,61
E	3 ^{1)a)}	250	1,25	16	9,5	98,8	65	42 114 · 10 ⁶	0,9105	0,910	284	0,910	200	25	862	15,7	191	174	15,3	37	286	0,33	521	0,60	0,50
F	3 ¹⁾	"	1,00	16	9,5	104,2	55	36 202 · 10 ⁶	0,911	0,924	280	0,901	250	16	73	19,7	213	192	15,3	39	166	0,21	267	0,35	0,50
G1	1 ¹⁾	"	0,80	17,5	10,0	112,2	45	31 990 · 10 ⁶	0,921	0,938	281	0,895	372,5	10	46	24,2	247	221	15,5	41	99	0,14	133	0,18	0,54
G2	1 ²⁾	"	0,80	16	9,5	110,5	45	31 290 · 10 ⁶	0,937	0,905	300	1,000	Förstärkt	-	46	0	227	227	15,3	40	95	0,14	-	-	0,51
H	3	150	2,00	10	6,3	46,3	103,7	17 338 · 10 ⁶	0,974	1,055	274	0,853	75	180	601	11,7	164	140	15,3	60	1425	>1	-	>1	0,38

1) En kassett utrustad med tåningsgivare på basprofil och skikt

a) " " " " skikt

b) Förstärkt liv vid upplag - avstympning av underifräns med 100 mm cellplast (15 kp/m²)

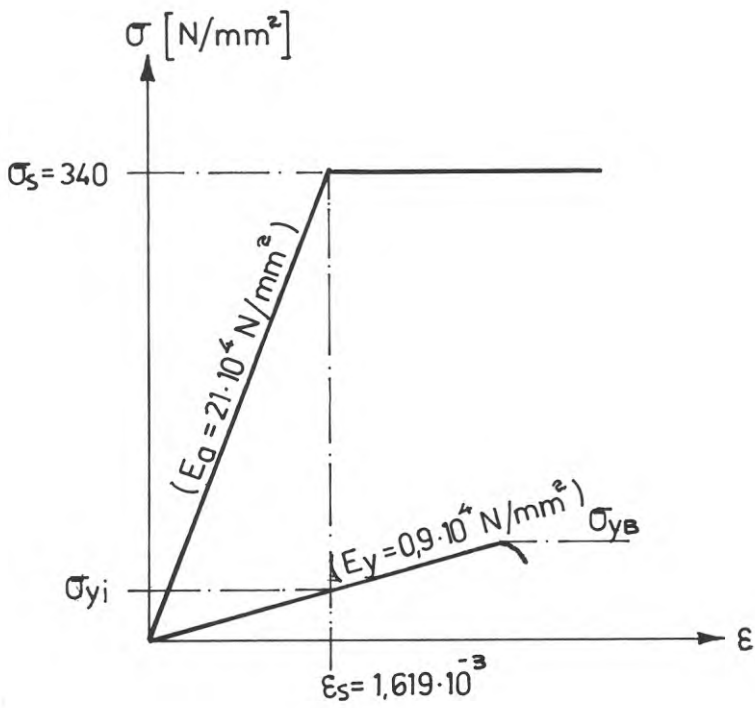


FIG 34. Antagna arbetskurvor för plåt och plywood i princip

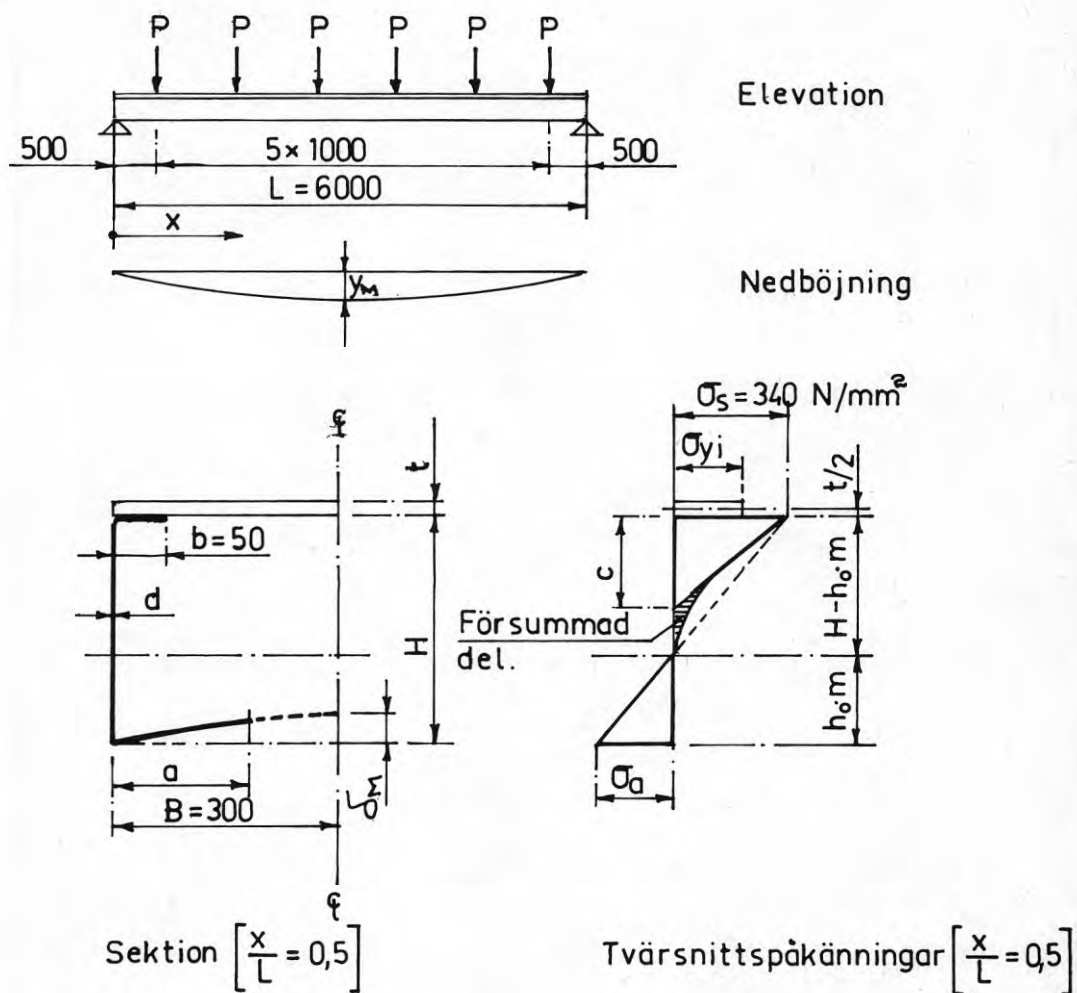
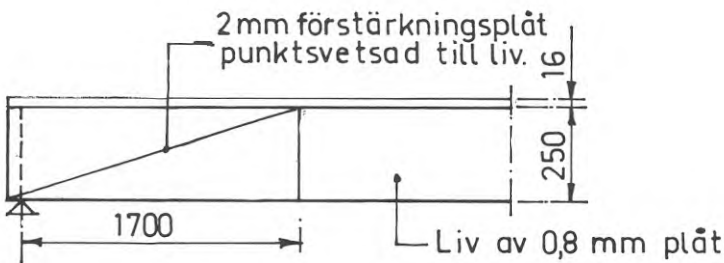


FIG 35. Provkassetten med angivna tvärsnitt och tvärsnittspåkänningar i snitt $x/L = 0,5$

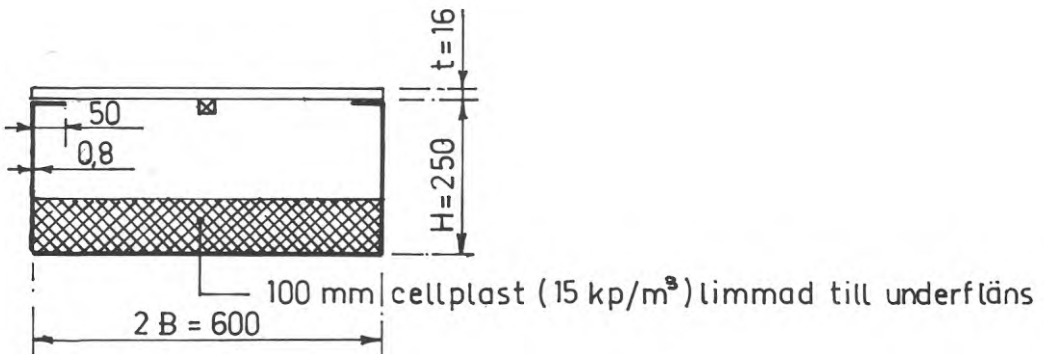
För att närmare studera påkänningsfördelningen i tvärsnittet ($X/L = 0,5$) för varierande H/d -förhållanden utrustades kassetter från serierna C, E, F och G med töjningsgivare - se RITNING 3 i appendix 1.

Lastupptagningsförmågan för en provkropp med stort H/d -förhållande utsatt för ren böjning belystes med hjälp av kassett G2, vars liv kompletterades med förstärkningsplåtar närmast upplagen för undvikande av instabilitet på grund av skjuvpåkänningen - FIG 36. Bärverket kompletterades dessutom med en 100 mm böjningsstyv skiva av cellplast som fastlimmades till underflänsen.

Resultaten i TABELL 9 tjänstgjorde i första hand som en orientering för tendensen av de efterföljande försöksresultaten samt vid analys av dessa.



Elevation visande livförstärkningar vid båda upplagen.



Sektion visande underflänsens avstyvning

FIG 36. Liv- och flänsavstyvningar för kassett G2.

4.2 Belastningsanordning och mätinstrument

Belastningsanordningen bestod av 6 st hävarmar av stålprofiler med ett inbördes avstånd av 1000 mm - FIG 37. Med hjälp av den reglerbara armen och det reglerbara belastningsupplaget - FIG 38 - uppmättes så noggrant som möjligt avståndet $a = 3050$ mm och $b = 750$ mm från lastkorgens upphängning resp. från belastningsupplaget till centrum av hävarens lager, vars led medgav rotationsmöjlighet i alla riktningar.

Prov kropparna placerades centriskt under belastningsupplagen. Lasten överfördes från hävarmen via en med fett insatt stålkula till den böjningsstyva fördelningsbalken - FIG 38. Reaktionen P_1 på grund av hävarens egenvikt (se TABELL 10) bestämdes med hjälp av en våg. För erhållande av reaktionen P_2 förorsakad av hävarens samt lastkorgens (Q_1) egenvikt anordnades, på grund av vågens begränsade kapacitet, en motvikt vars hävarm med villkorlig längd provisoriskt monterades till belastningsanordningens hävarm, varvid reaktionen P_2 mättes. Sedan belastades korgen med vikten 5 kp och reaktionen P_3 noterades. Proceduren utfördes för samtliga hävarmar. För erhållande av ur belastnings-synpunkt lika armar kompletterades varje lastkorgs egenvikter med lasten Q_2 (hagel) enligt följande:

$$P_0' = P_1 + n \cdot (Q_1 + Q_2)$$

eller

$$Q_2 = \frac{1}{n} \cdot (P_0' - P_1) - Q_1$$

där P_0' är konstant för samtliga hävarmar och där $n = a/b = 4,0667$.

Slutligen kunde belastningsreaktionen för samtliga hävarmar i nolläge utan lastökning bestämmas:

$$P_0 = P_0' + P_0''$$

där P_0'' anger egenvikt av fördelningsbalken och stålkulan. Varje lastökning lika med 5 kp motsvarade reaktionsökningen:

$$\Delta P = n \cdot 5 = 4,0667 \cdot 5 = 20,33 \text{ kp.}$$

Förhållandet $n = \frac{1}{5} \cdot (P_3 - P_2)$ varierade vid varje hävarm. Medelvärdet $n_{\text{med}} = 4,0667$ överensstämde emellertid med förhållandet mellan de ursprungligen uppmätta värdena för a och b . Differensernas väsentliga orsak berodde på apparaturens robusthet. Felprocenten förutsågs dock ligga inom de tillåtna gränserna.

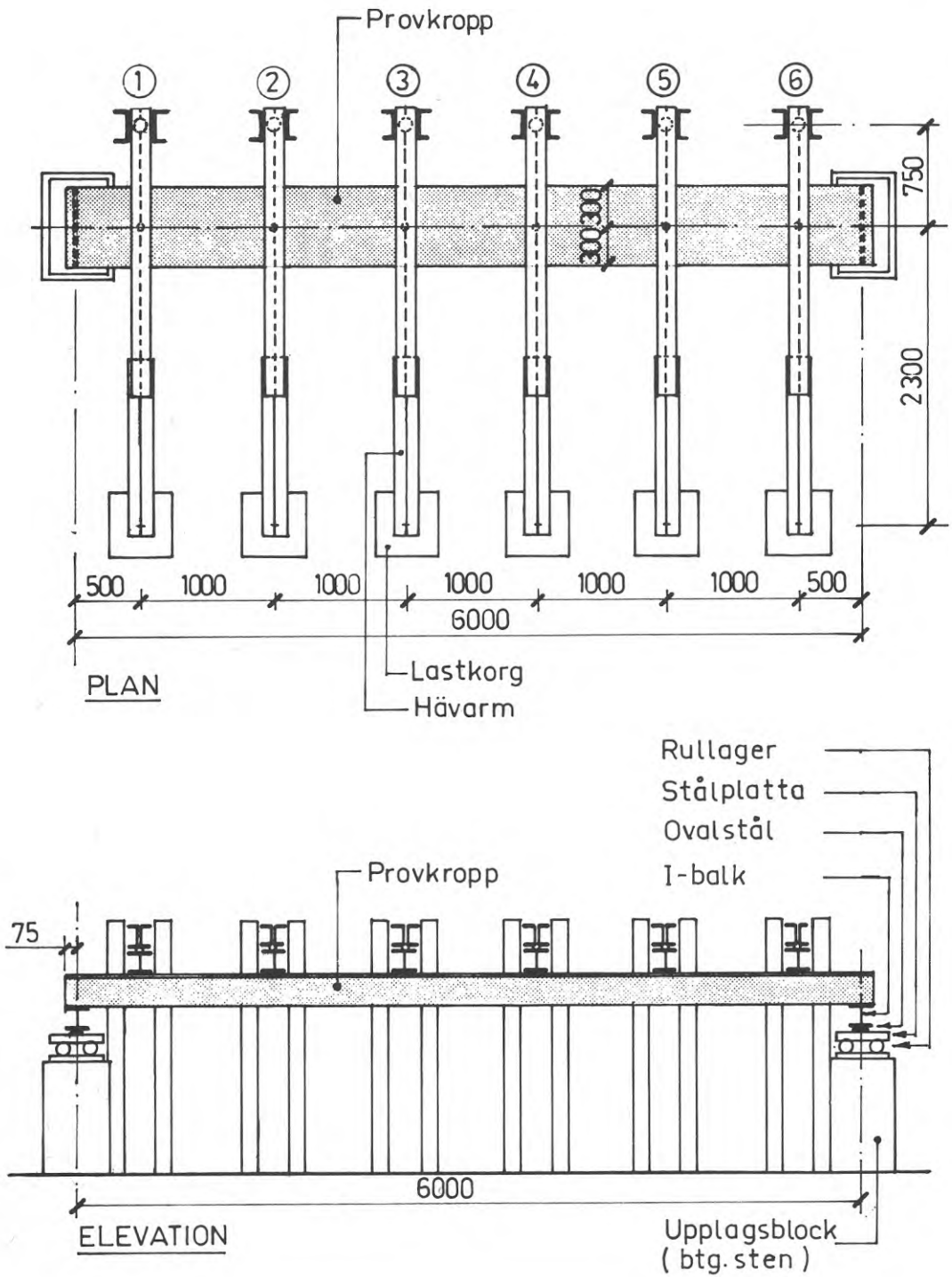
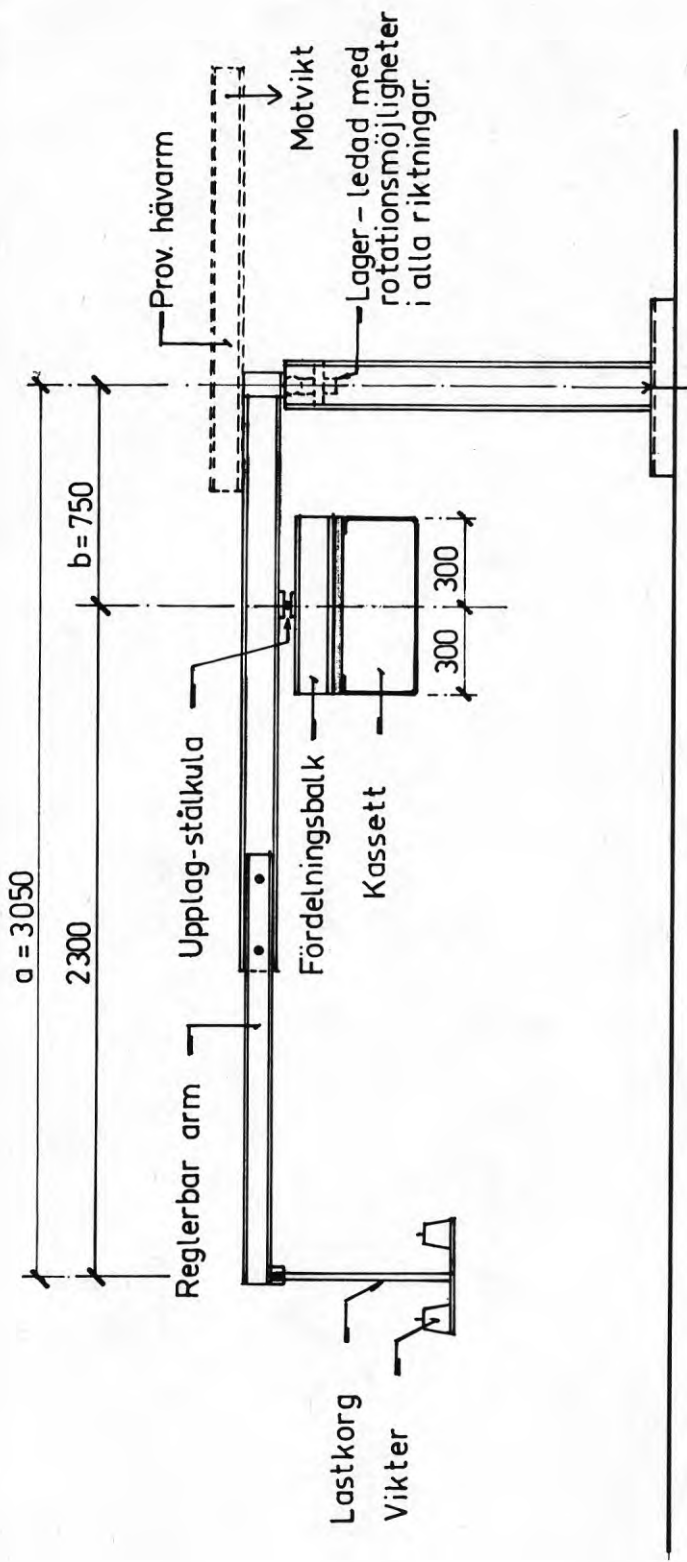


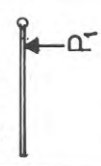
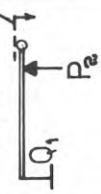
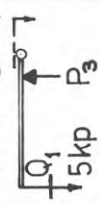
FIG 37. Belastningsanordning

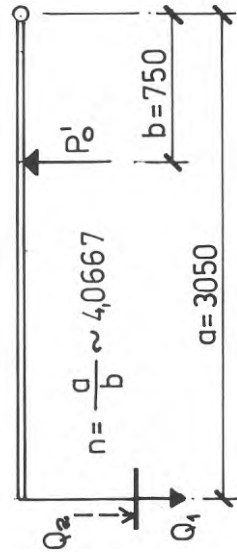


SEKTION

FIG 38. Belastningsanordning

TABELL 10. Tarering av belastningsanordningens hävarmar.

Häv- arm nr.	A Egv. hävarm  P_1 (kp)	B Prov hävarm  P_2 (kp)	C Viktökning 5kp  P_3 (kp)	D $P_3 - P_2$ (kp)	E $n = \frac{a}{b} \left[\frac{P_3 - P_2}{5} \right]$	F Egv. last- korg Q_1 (kp)	G Tara Q_2 (kp)	H $P_1 + n \cdot Q_1 + n \cdot Q_2 = P'_0$ (kp)	J Egv. för- dord- balk. P''_0 (kp)	K Noll- läge P_0 (kp)	L Vikt- ökning för 5kp ΔP (kp)	M Fel- procent %
1	147,6	123,4	144,0	20,6	4,12	10,5	0	190,3	18,0	208,3	20,33	+1,33
2	147,2	121,2	141,5	20,3	4,06	10,4	0,20	—	—	—	—	-0,15
3	147,6	122,5	142,7	20,2	4,04	10,3	0,20	—	—	—	—	-0,64
4	146,6	121,6	141,0	20,4	4,08	10,3	0,44	—	—	—	—	+0,34
5	144,4	119,5	139,8	20,3	4,06	9,85	1,44	—	—	—	—	-0,15
6	145,9	118,4	138,7	20,3	4,06	9,85	1,07	—	—	—	—	-0,15



$$P'_0 = P_1 + n(Q_1 + Q_2) = 190,3 \text{ kp}$$

$$P_0 = P'_0 + P''_0 = 208,3 \text{ kp}$$

$$n_{\text{dim}} = \frac{\sum n}{6} = 4,0667$$

FIG 39 visar i princip mätklockornas placering. Klockorna ① till ⑩ var fästade till stativ placerade på golvet och angav kassetternas deformation i relation till den påförda lasten vid resp. ställen. Med hjälp av mätklockorna ⑪ och ⑫ i snitt $x/L = 0,5$, fästade i en ram fast förbunden med kassetterna, noterades skiktets upp- eller eventuella nedböjning resp. underflänsens uppböjning för varje laststeg.

Som tidigare nämnts utrustades kassetter i serierna C, E, F och G med töjningsgivare. Placeringen av dessa framgår ur RITNING 3 (appendix 1).

FIG 37 visar i princip belastningsanordningens rörliga upplag. Med hjälp av gipsbruk mellan den böjningsstyva upplagsbalken och kassetternas underkant erhöles en jämn upplagsyta.

BILD 1 visar belastningsanordningen i funktion.

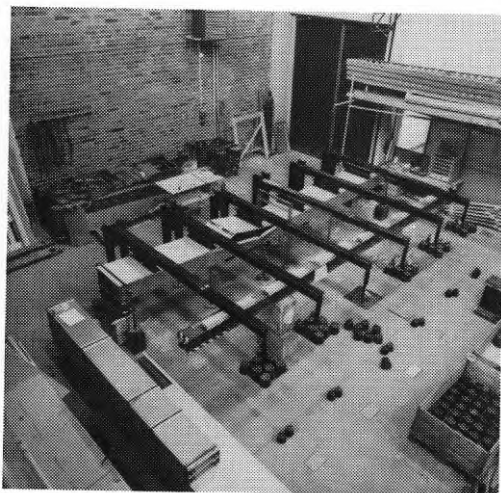
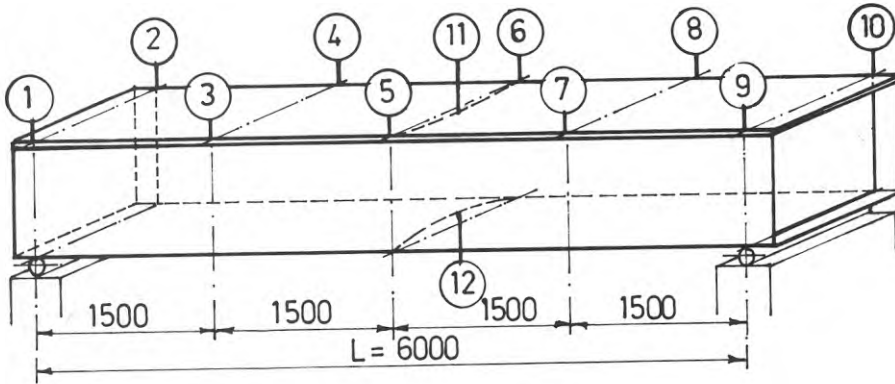


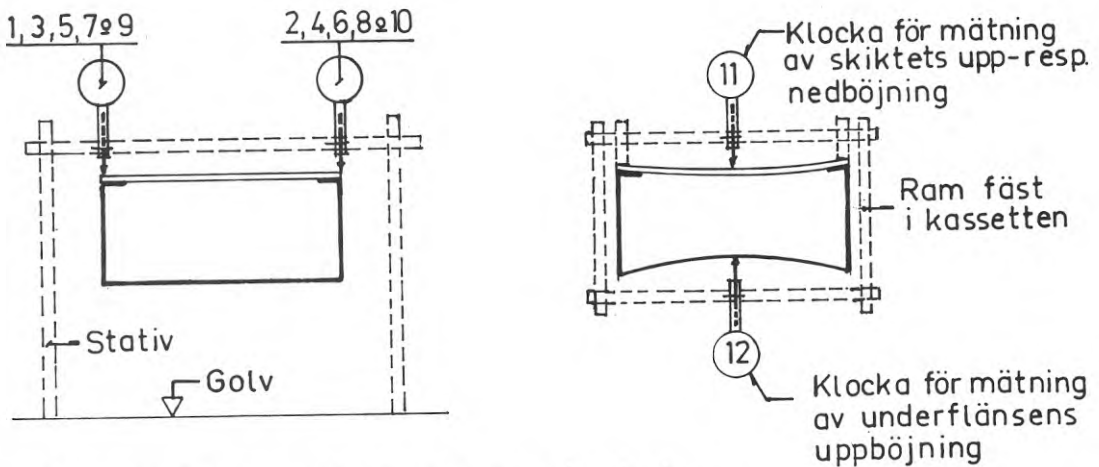
BILD 1. Belastningsanordningen.

4.3 Referensförsök

I anslutning till försöksseriens genomförande utfördes referensprov för plåt och plywood som ingick i provkassetterna. Dessutom utfördes orienterande limprov för konstaterande av zinkbeläggningens eventuella betydelse för skjuvhållfastheten i fogen mellan plåt och plywood.



Perspektiv med angivna mätklockor i princip.



Klockornas fäste i stativ och ram i princip

FIG 39. Mätutrustningens placering i princip

4.3.1 Dragprovning av plåt

Provstavar utformades enligt SIS 11 21 21, FIG 40, och uttogs från de partier vid liv och underfläns som ej hade utsatts för en deformation motsvarande en kallbearbetning av plåtmaterial. Från varje kassett uttogs 6 st provstavar, som avzinkades före provningen. Plåtens nominella tjocklek varierade från 0,8 till 2,0 mm.

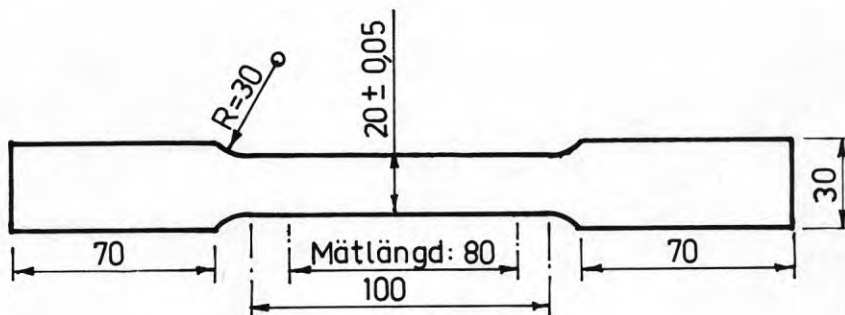


FIG 40. Provstav (SIS 11 21 21)

Provningsen utfördes i dragmaskin. Deformationen mättes med speciell mätklocka som fastsattes på provstaven, vars mätlängd var 80 mm. Belastningshastigheten motsvarade en spänningsökning som ej översteg $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ enligt SIS 11 21 10. Belastningen avlästes för varje längdändring motsvarande $0,015 \text{ mm}$.

TABELL 11 anger medelvärden av elasticitetsmodulen, sträckgräns- och brottpåkänningen för prov tagna från varje kassett. Som framgår av resultaten är variationerna stora - speciellt noteras de låga värdena för elasticitetsmodulen. Som en kontrollåtgärd fick Statens Provningsanstalt i uppdrag att utföra en fullständig och mycket noggrann dragprovning på en villkorligt vald provstav från en av kassetterna. De vid provningen erhållna töjningsvärdena uppmättes med Martens spegelapparat. Som resultat erhöles elasticitetsmodulen $E_a = 19,3 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$, sträckgränspåkänningen $\sigma_s = 350 \text{ N/mm}^2$ och brottpåkänningen $\sigma_B = 490 \text{ N/mm}^2$, vilket bestyrkte riktigheten av de tidigare utförda proven. Emellertid visade resultatet en relativt låg proportionalitetsgräns som enbart uppgick till $\sigma_p \approx 180 \text{ N/mm}^2$.

Arbetskurvans form har betydelse för främst stabilitetsproblem och risken för en överskattning av bärförmågan föreligger om man beräkningsmässigt utgår från ett idealelastiskt material nedanför sträckgränsen.

Serie	Prov	Nom. plåt- tjocklek d mm	Elasticitets- modul E_a N/mm ²	Sträckgräns- påkänning σ_s N/mm ²	Brott- påkänning σ_B N/mm ²	Arb- kurva Se fig
A	1	2,00	$20,4 \cdot 10^4$	356,6	503,3	40
	2	"	$19,2 \cdot 10^4$	356,2	500,6	
B	1	1,25	$21,6 \cdot 10^4$	360,4	484,2	41
	2	"	$21,6 \cdot 10^4$	370,9	489,2	42
	3	"	$21,8 \cdot 10^4$	371,1	490,8	43
C	1	1,00	$21,0 \cdot 10^4$	407,8	492,8	44
	2	"	$21,7 \cdot 10^4$	402,1	485,2	45
	3	"	$21,6 \cdot 10^4$	424,6	493,8	46
D	1	0,80	$21,5 \cdot 10^4$	403,9	498,6	47
	2	"	$21,9 \cdot 10^4$	403,2	493,4	48
	3	"	$21,4 \cdot 10^4$	396,4	495,3	49
E	1	1,25	$21,7 \cdot 10^4$	359,0	483,0	50
	2	"	$21,0 \cdot 10^4$	364,9	497,6	51
	3	"	$20,8 \cdot 10^4$	363,7	490,2	52
F	1	1,00	$20,8 \cdot 10^4$	392,9		53
	2	"	$21,3 \cdot 10^4$	409,5	488,6	54
	3	"	$21,5 \cdot 10^4$	406,8	488,5	55
G	1	0,80	$21,8 \cdot 10^4$	407,9	495,5	56
	2	"	$22,6 \cdot 10^4$	398,9	494,0	57
	3*)	"	$21,1 \cdot 10^4$	401,2	497,2	58
H	1	2,00	$20,5 \cdot 10^4$	355,4	500,7	59
	2	"	$19,5 \cdot 10^4$	356,2	500,6	60
	3	"	$19,8 \cdot 10^4$	352,8	495,9	61
Medelvärde:			$21,1 \cdot 10$	383,6	493,6	

*) Kassettt för skjuvprov.

TABELL 11. Resultat från dragprovning av plåt

Emellertid har vid dragprovningen ej hänsyn tagits till egen-spänningarna i plåten. Dessa framkallar anisotropa egenskaper hos materialet som är olika för varje provstav. Ett bättre och mera tillförlitligt resultat skulle kunna erhållas om mycket långa provstavar användes, vilket ej var möjligt på grund av de befintliga dragprovutrustningarnas begränsade kapacitet.

FIG 41 visar plåtmaterialets arbetskurvor, en sammanställning från 23 st dragprov. Slutligen anger FIG 42 exempel på karakteristiska last-formändringsdiagram, grafiskt registrerade. Deformationen är en aning missvisande, eftersom den inkluderar backarnas rörelse.

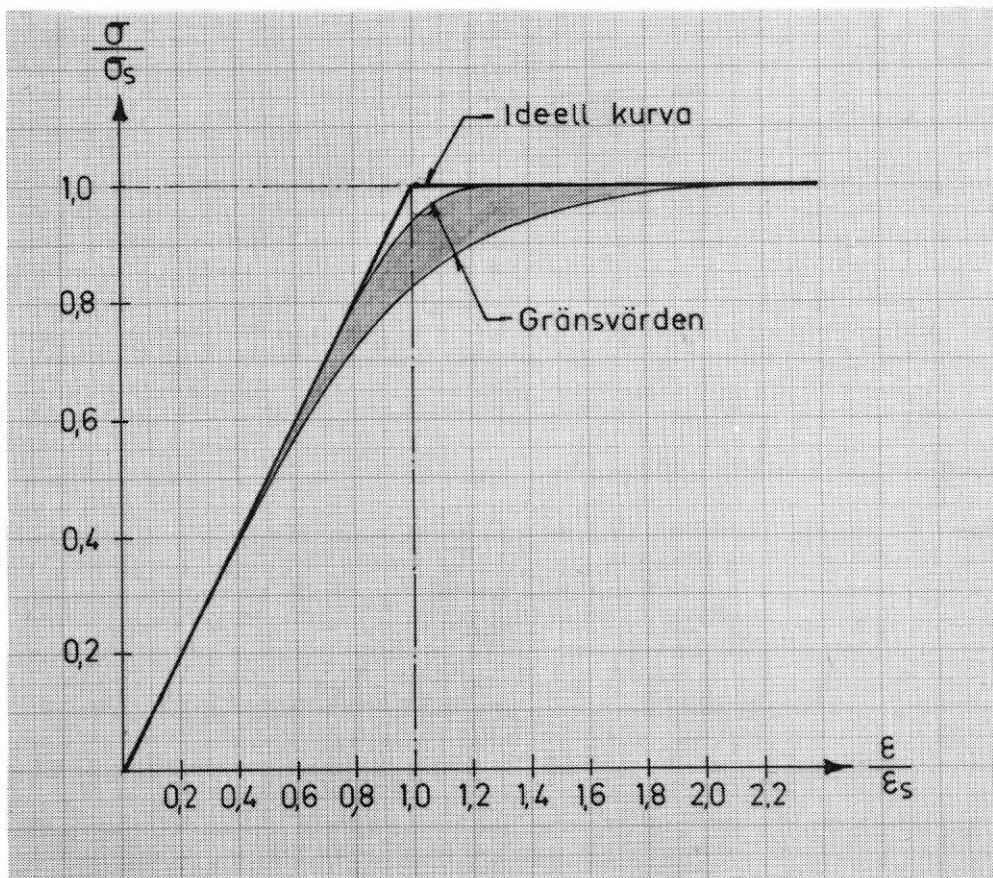


FIG 41. Plåtmaterialets arbetskurvor, sammanställning av resultat från 23 dragprov

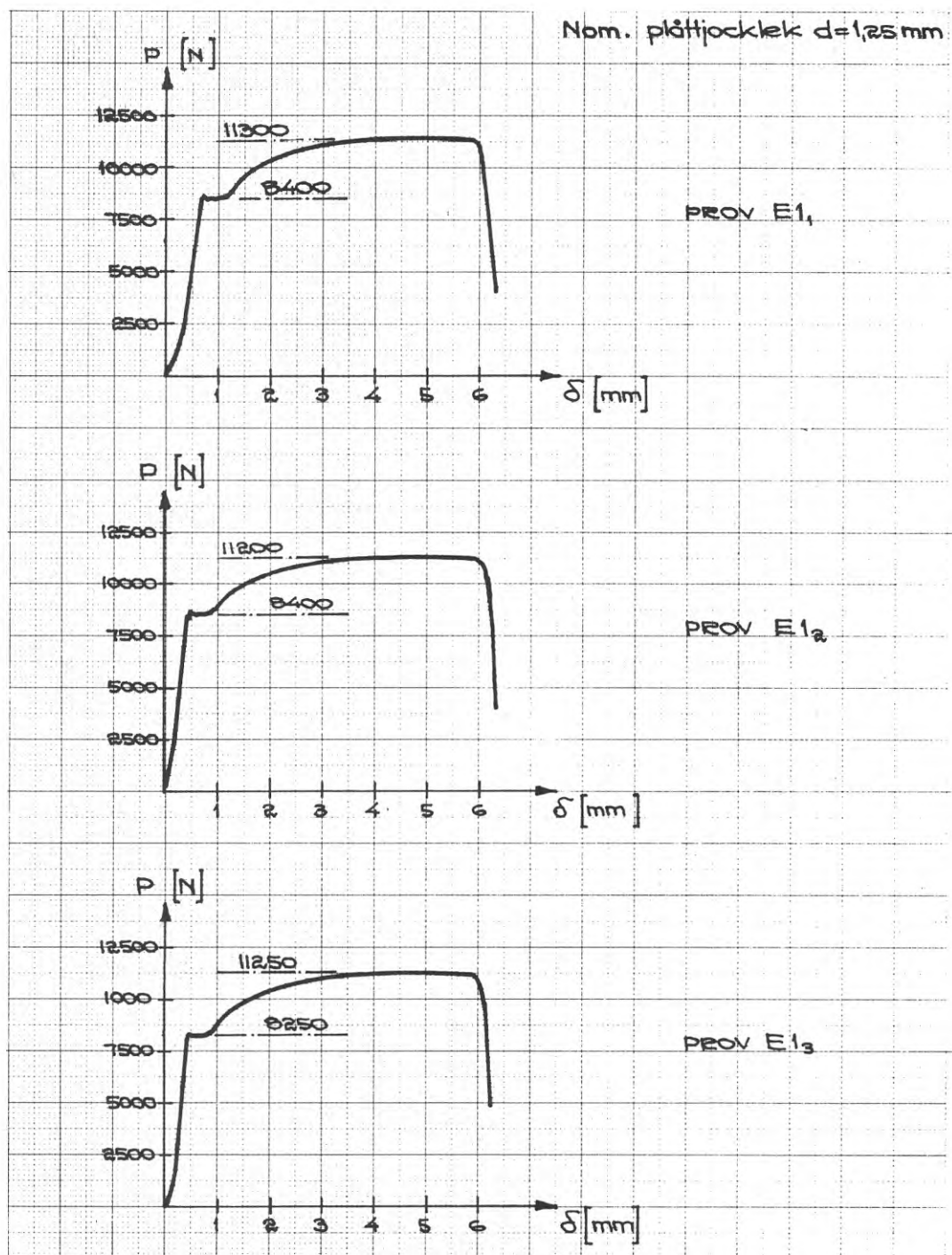
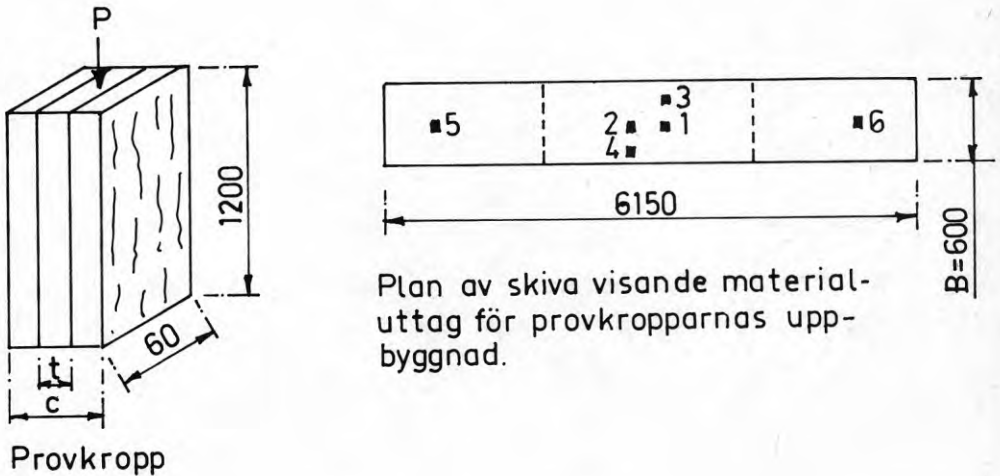


FIG 42. Karakteristiska last- och formändringsdiagram för tunnplåt

4.3.2 Tryckprovning av plywood

För bestämning av plywoodens arbetskurva uttogs från skiktet tillhörande kassett F1 material för 6 st provkroppar enligt FIG 43. Två av dessa hänförde sig till de båda delskivorna närmast upplagen (provkropparna 5 och 6) och övriga fyra från mittersta delskivan koncentrerad till bärverkets mittsnitt (provkropparna 1, 2, 3 och 4).



Elasticitetsmodul och brottpåkänning

Serie	Prov	E_y N/mm ²	σ_y brott N/mm ²
F 1	1	$1,27 \cdot 10^4$	50,0
	2	$1,56 \cdot 10^4$	48,2
	3	$1,06 \cdot 10^4$	41,2
	4	$1,47 \cdot 10^4$	47,0
	5	$1,06 \cdot 10^4$	41,3
	6	$1,27 \cdot 10^4$	41,3

$$t = 15,6 \text{ mm}$$

$$t' = 9,36 \text{ "}$$

$$c = 46,8 \text{ "}$$

FIG 43. Provkroppar till samt resultat av i fiberriktningen tryckt plywood

Provkropparna framställdes av tre hoplimmade plywoodstrimlor med längd och bredd 120 resp. 60 mm och med ytfaneren i belastningsriktningen. Dessutom utrustades provkropparna med töjningsgivare dels i limfogen mellan varje skiva, dels vid ytter-sidorna - se FIG 43 samt fotografi (BILD 2).

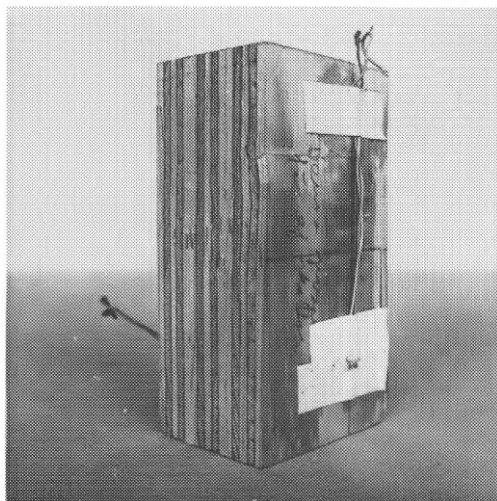


BILD 2. Provkropp för i fiberriktningen tryckt plywood

Tryckproven utfördes vid Statens Träforskningsinstitut, varvid även fuktkvoten och densiteten kontrollerades. Provresultaten redovisas i tabell FIG 43 samt i ϵ - σ -diagrammen FIG 44. Som framgår är variationerna stora för elasticitetsmodulen och brottpåkänningen samt för arbetskurvornas utseende, främst orsakat av plywoodens varierande struktur samt fanerens lokala knäckningstendens. Resultaten från tryckprovningarna visade med stor sannolikhet värden som ej var representativa för plywooden i kassetternas brottsnitt. En undersökning av plywooden enligt ovan för samtliga provkassetter skulle således vara utan värde vid analyseringen av kassetternas försöksresultat. För kassetterna C1, E1, F1 och G1 utrustade med töjningsgivare beräknades plywoodens elasticitetsmodul E_y i det aktuella snittet med hjälp av tvärsnitts- och momentvillkoren - se avsnitt 4.4.

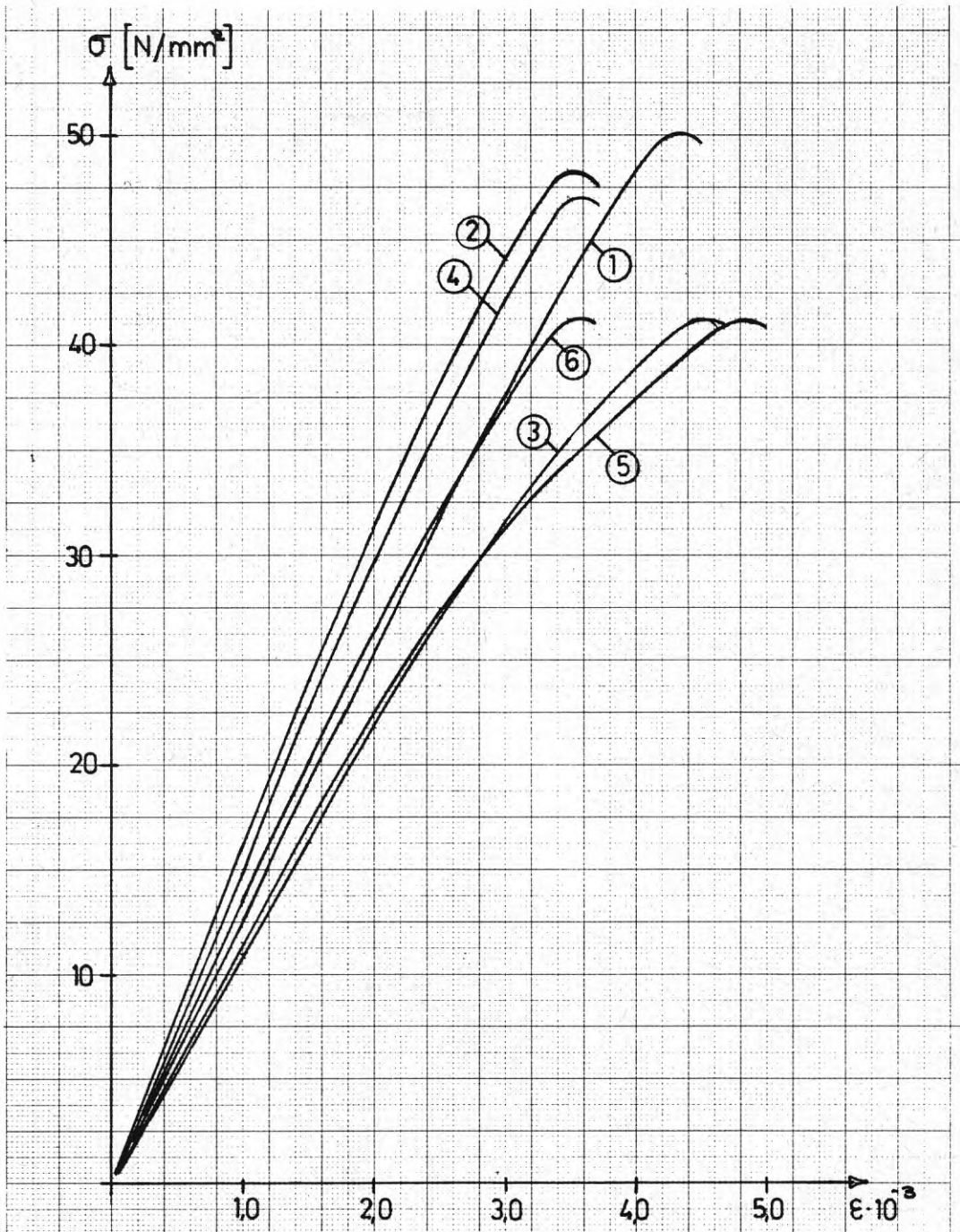


FIG 44. ϵ - σ -diagram för i fiberriktningen tryckt plywood.
Serie F 1

4.3.3 Limfog

I bärverk uppbyggt med blandkomponenter utgör förbandet mellan de olika materialen ett av de huvudproblem som kräver speciell uppmärksamhet.

Vid limning av stål och trä finns för närvarande huvudsakligen två typer av limningsförfaranden, dels med det direktverkande limmet med härdare, dels med något av de vanliga trälimmen, varvid stålet förbehandlas med en primer. Vid val av lim bör detta ha fogfyllande egenskaper och tillräcklig hållfasthet. Limmet bör vidare ha den nödvändiga "segheten", så att detta vid stukningen ej förorsakar brott i limfogen. Vid försöken användes direktlimningsmetoden med Casco's industrilim 1820 och härdare 1821 - en tvåkomponentig polyuretanprodukt. Enligt fabrikanter ansågs denna vara ett bättre alternativ till motsvarande epoxiprodukter bl a på grund av bättre värme- och köldbäständighet. FIG 45 visar i princip arbetskurvorna för kombinationsmaterialet plåt- plywood och lim, utsatt för stukning. Brottet inträder vid stukningen ϵ_{yB} , varvid påkänningen $\sigma_{yB} < \sigma_{LB}$.

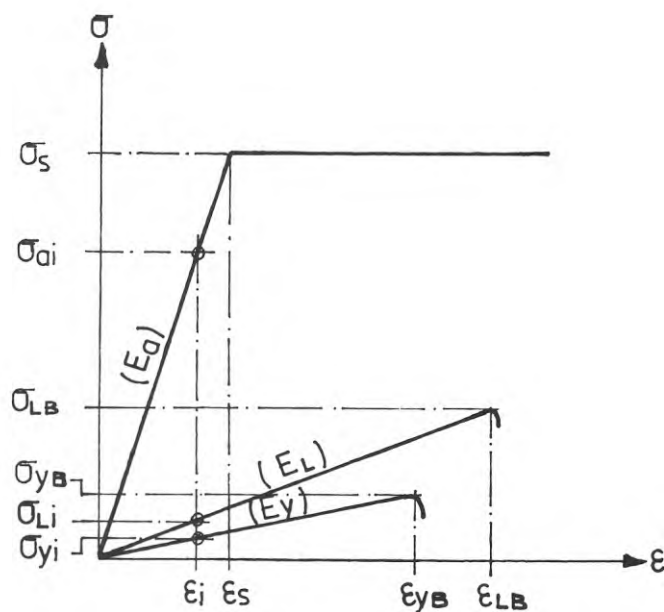
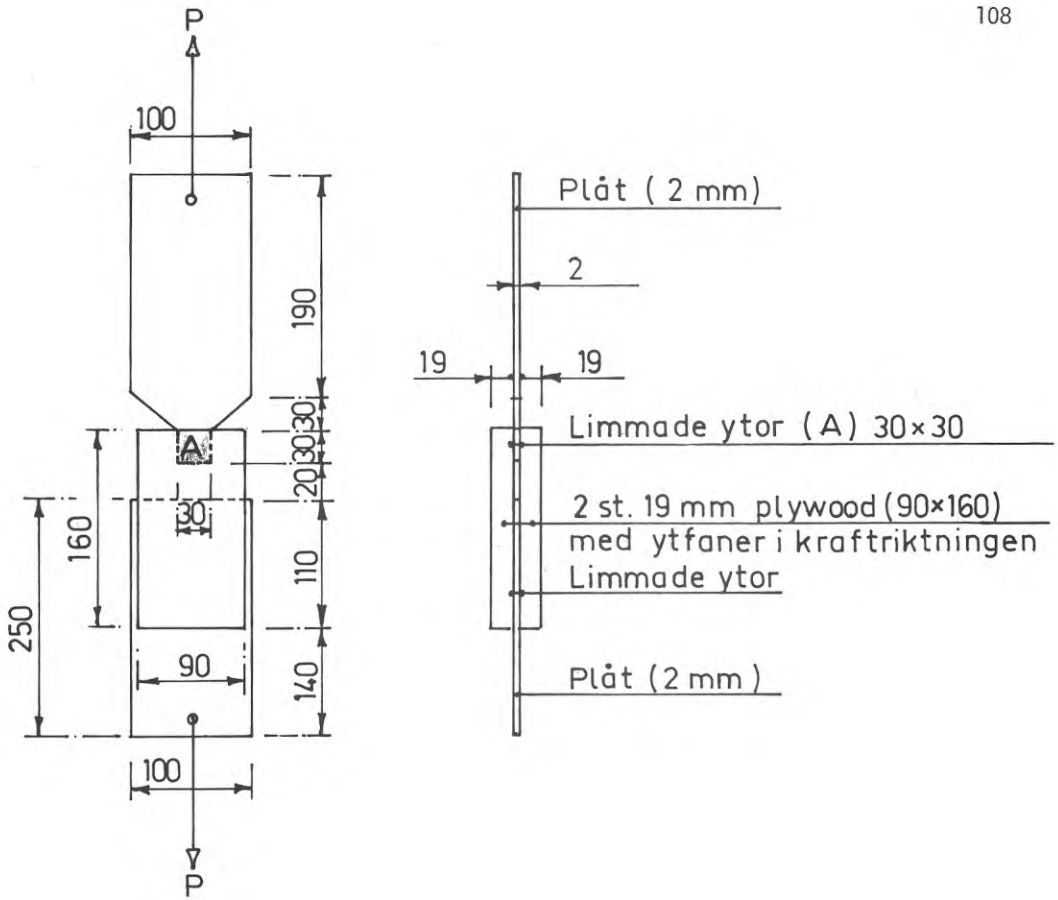


FIG 45. Arbetskurvor i princip för kombinationsmaterialet plåt, plywood och lim

Då limningen enbart kräver ett presstryck tillräckligt för att hålla limytorna mot varandra är det nödvändigt för en god fogfyllning att limmet har en lämplig konsistens, varvid eventuella ojämnheter i fogytorna utjämnas. Limmet blandades med förtjockningsmedlet aerocil. Fixerings- och sluthärdningstiden är ca 7 timmar resp. 7 dygn vid en rumstemperatur av 20°C.

Limfogen bör kunna uppta uppträdande statiska och dynamiska krafter, motstå klimatiska angrepp som växlingar i fukthalt och temperatur samt motstå angrepp från svampar och andra mikroorganismer. Slutligen bör limfogen under konstruktionens livstid ej kemiskt eller fysikaliskt åldras, varvid funktionen äventyras. Vid limning av stål och trä är resultatet mycket beroende av utförandet - framför allt av den limmade stålytans behandling. På grund av attraktionskrafternas korta räckvidd mellan lim och det limmade materialet bör limmet ges möjlighet till att verka mot så stor absolut ren materialyta som möjligt. Eftersom kohesionskrafterna hos föroreningarna i allmänhet är lägre än adhesionskrafterna mellan limmet och den rena materialytan nedsätter föroreningarna limfogens hållfasthet. Vid framställning av bärverket med samverkande blandkomponenter är en absolut rengöring av metallytan emellertid mycket arbetskrävande och av praktiska skäl olämplig. En borttagning av zinksikt skulle med tiden förorsaka rost i limflänsen. Även om många limkvaliteter har goda åldringsegenskaper så är de flesta lim på längre eller kortare sikt ej diffusionstäta. Syremolekyler tränger igenom och bildar oxidskikt på metallen. Då bindingskraften mellan oxidskikt och metall som regel är mindre än adhesionskraften mellan lim och metall försvagas limfogen i takt med oxidbildningen. Vid ren skjuvpåkänning skall dessutom limfogen i snittet vid metallytan vara överdimensionerad i förhållande till det svagare snittet vid träytan.

För undersökning av zinkbelägningens betydelse för hållfastheten gjordes ett orienterande limförsök. Provkroppar med dubbel överlappskarv enligt FIG 46 bestod av 2 st 19 mm's plywoodskivor med ytfaneren i kraftens riktning. Mellan dessa fastlimmades 2 mm tjocka plåtar. Försöksserien bestod av 6 st prov där 3 st av de dimensionerande limytorna A avzinkades. Vid samtliga prov tvättades metallytorna med tri. Provresultaten enligt tabell FIG 46 visar ingen tendens till en försämring av hållfastheten för proven med förzinkade ytor. Vid samtliga prov inträdde brotten i fanerskiktet och inga större "limsläpp" mellan lim och metallytorna noterades. De stora brottlastavvikelserna orsakades främst av fanerens lokalt varierande kvalitet. BILD 3 visar provkropp III med förzinkade limytor A och BILD 4 detalj av brottet, där den trätäckta brottytan tydligt framgår. Resultatet medgav att en avzinkning av provkassetternas limflänsar ej var nödvändig. I övrigt bör observeras att limfogens hållfasthet, som oftast är beroende av belastningens varaktighet vid långtidsbelastning, kan reduceras avsevärt.



Prov	Behandlad yta A.	P - brott N	τ - brott N/mm ²
I	Förzinkad	13500	7,50
II	— " —	11300	6,28
III	— " —	1100	6,11
IV	Avzinkad	8800	4,89
V	— " —	15200	8,44
VI	— " —	10650	5,92

FIG 46. Orienterande limförsök med dels förzinkade och dels avzinkade limytor

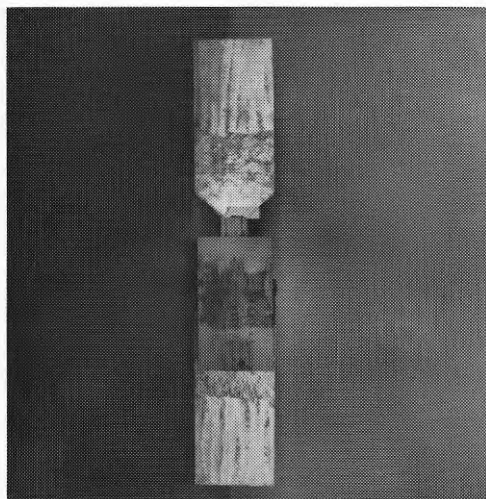


BILD 3. Provkropp vid orienterande limförsök

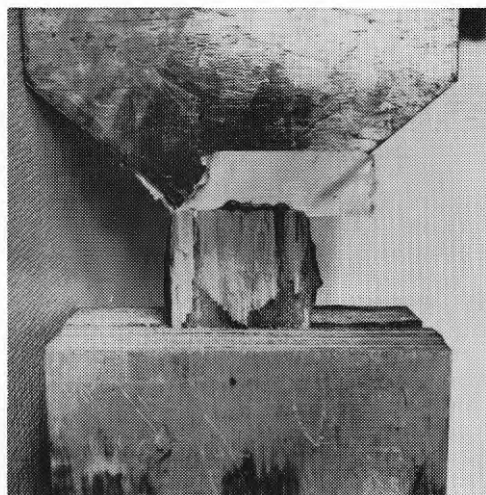


BILD 4. Detalj av limfogens brottyta

Limning av trä mot trä med korsande fiberriktningar misslyckas som regel på grund av de olika svällningsegenskaperna i träets olika riktningar. För plywood är emellertid den kraftupptagande limytan relativt mycket stor i förhållande till de olika fannerskiktens tvärsnittsarea, varvid skjupåkänningarna blir små. Vid limning av stål och trä uppstår motsvarande problem som vid limning av korslagda trästycken. De krafter som uppstår blir mindre på grund av att stålet närmast kan betraktas som orörligt. Enligt försök av Hj. Granholm, Armerat Trä 1954, kan en på trä limmad stålplåt utan olägenhet göras upp till 40 mm bred. Vid användning av tunnplåt är dennas tvärsnittsarea relativt liten i förhållande till limfogens kapacitet. Svällning och krympning tas upp genom elastiska deformationer i stål- och trämaterialen. Vid långsam dimensionsförändring är dessutom trämaterialen tämligen plastiskt. Gjorda försök och erfarenheter (Granholm) har visat att träets fuktrörelse i fiberriktningen ej menligt påverkar limfogens mellan stål och trä. Personliga erfarenheter kan även bekräfta påståendet. Ett provtak bestående av ett 40-tal 12 m långa kassetter har från mitten av januari till mitten av mars månad legat nedfuktade under bar himmel utan att limfogens vid någon av kassetterna har visat något tecken på försämring.

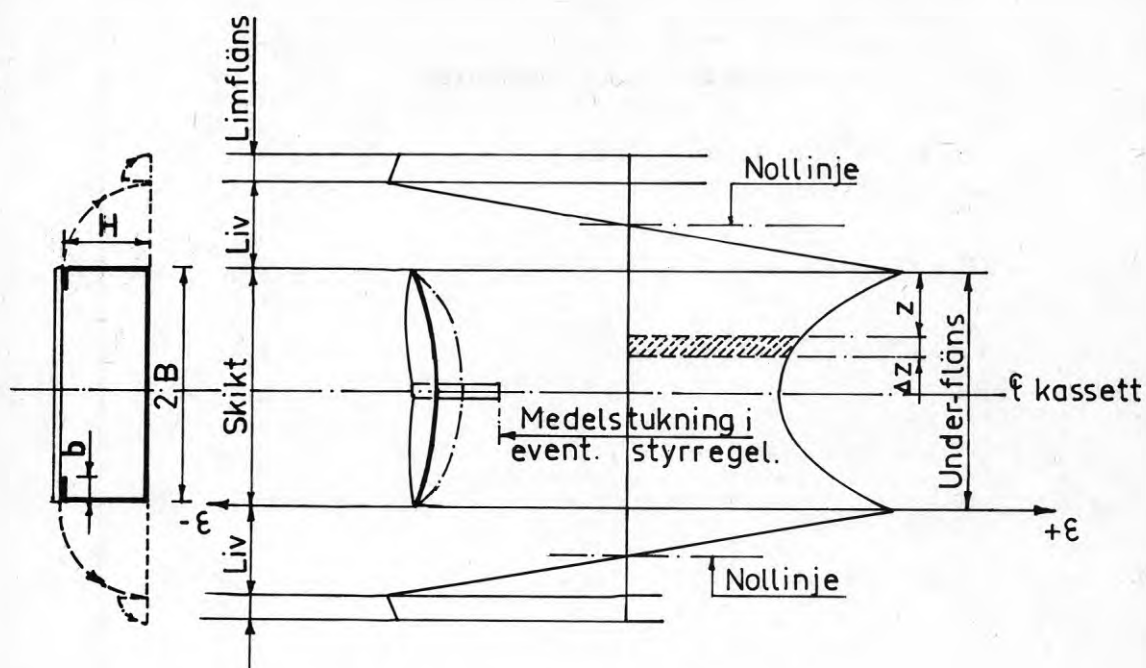
Vid kassetternas konstruktiva utformning måste även hänsyn tas till att en eventuell risk för fläckbrott ej inträder i limfogens (krafter lodrätt limytan). Slutligen bör vid transporten och monteringen av bärverken hårda stötar undvikas, vilka lätt förorsakar brott i limfogens.

4.4 Analys av försöksresultaten

Enligt avsnitt 4.1 indelades försöken i 8 serier. Varje serie utgjordes av 3 st nominellt lika kassetter med undantag för serie G. Totalt utfördes 23 st prov.

Kassetterna påverkades av 6 st lika stora punktlaster (RITNING 3 - appendix 1). Vid varje belastningsintervall var lastökningen $4,0667 \cdot 10 = 40,667$ kp motsvarande viktökningen 10 kp i lastkorgen och som närmare brott reducerades till hälften. Lastökningen skedde med 5 min. intervall och avläsningen av mät-klockorna [FIG 39] gjordes strax innan och efter denna, varför en viss relation mellan belastningshastigheten och deformationen kunde erhållas.

Som tidigare nämnts (4.2) utrustades en kassett från varje serie C, E, F och G med töjningsgivare (RITNING 3). Dessa placerades i dubbla rader vid bärverkets mittnitt på båda sidor om liv, underfläns och skikt. För varje laststeg bestämdes deformationen vid varje töjningsgivare. Med hjälp av det utvikta tvärsnittet [FIG 47] upprättades töjnings-stukningsdiagram, där medeltöjningen resp. medelstukningen anges (appendix 2). För bedömning av tilläggsåkänningen på grund av böjning har även stukningen i skiktets ö.k. och u.k. redovisats. FIG 47 är en principskiss och tjänstgör som en förklaring till de utarbetade töjnings-stukningsdiagrammen (appendix 2).



- Anger medelstukning i skikt.
 - - - - - stukning i u.k. skikt
 — — — — — i ök — — — — — samt medelstukning
 i livets övre del och i limfläns samt medel-
 tøjning i livets undre del och i underfläns.

FIG 47. Tøjnings-stukningsdiagram vid utvikt tvärsnitt i princip

Tøjnings-stukningsdiagrammen utgör underlag för beräkning av plåtens och plywoodens elasticitetsmodul E_a resp. E_y samt påkänningsfördelningen i tvärsnittet.

Enligt Hook's lag är:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

varvid tvärsnittskraften i plåten är:

$$K_a = \sum \varepsilon_a \cdot E_a \cdot d \cdot \Delta z$$

och i skiktet:

$$K_y = \sum \varepsilon_y \cdot E_y \cdot t' \cdot \Delta z$$

där d anger plåtens uppmätta tjocklek och t' summan av de uppmätta tjocklekarna av samtliga faner i bärverkets längdriktning. ϵ_a och ϵ_y erhålles direkt ur töjnings-stukningsdiagrammet och σ_y anger medelvärdet av töjningen eller stukningen i plåten resp. skiktet vid delsnittet Δz i tvärsnittet (jfr FIG 47).

Vid beräkning av elasticitetsmodulen E_a och E_y betraktas töjnings-stukningsdiagram för laststeg vars tvärsnittspåkänningar ligger inom plåt- och plywoodmaterialets elastiska område. Med hjälp av ekvationerna för jämvikts- och momentvillkoret beräknas E_a och E_y , varvid de erhållna värdena för E_a jämförs med de resp. resultaten från dragprovnings (4.3.1). Beräkningen utförs lämpligen i tabellform enligt exempel TABELL 12. På grund av plywoodens varierande struktur är den beräknade elasticitetsmodulen E_y ett medelvärde i det betraktade snittet.

Sedan plåtmaterialets arbetskurva och plywoodmaterialets elasticitetsmodul är kända redovisas analogt töjnings-stukningsdiagrammet påkänningsfördelningen i det utvikta tvärsnittet [FIG 48]. Ur plåtmaterialets arbetskurva erhålles plåtpåkänningen i relation till deformationen.

Skiktpåkänningen är:

$$\sigma_y = \epsilon_y \cdot E_a$$

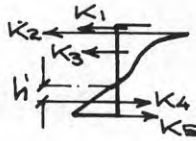
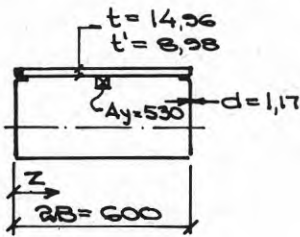
där det linjära sambandet mellan stukningen ϵ_y och påkänningen σ_y förutsätts föreligga till brott. Resultatet från referensförsöken (4.3.2) tyder på att förutsättningen är en god approximation inom större delen av belastningsområdet. Nedan redovisade försöksresultat verifierar påståendet.

FIG 48 anger även påkänningsfördelningen enligt böjningsteorin (kap. 2), där det förutsätts att plåten utgörs av ett ideal-elasto-plastiskt material, vars arbetskurva uppvisar ett typiskt flytområde [FIG 49]. I övrigt räknas med de ovan erhållna elasticitetsmodulerna.

FIG 48 är en principskiss och tjänstgör enbart som en förklaring till de utarbetade påkänningsdiagrammen (appendix 2).

FIG 50 visar i princip relationen mellan belastningen P och nedböjningen y_M vid bärverkets mitt, $x/L = 0,5$. Diagrammet anger dels den verkliga nedböjningen enligt de uppmätta medelvärdena från mätklockorna [FIG 39], dels den beräknade enligt böjningsteorin (kap. 2), där den maximala påkänningen i plåtmaterialet ej överstiger $340 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ motsvarande den antagna sträckgränspåkänningen. Den relativt stora nedböjningen i första belastningskedet (Δy_M) beror ej på gipsbrukets eftergivlighet vid de båda upplagen. Denna eventualitet har med hjälp av klockorna

①, ②, ⑨ och ⑩ tagits med i beräkningen.



PROV E 1

LASTSTEG: $P_0 = 3066 \text{ N}$

Snitt z/2B	K_1		K_2		K_5		M_1	M_2	M_5	
	Mult. $E_y \cdot t' \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_y \cdot A_y \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_y \cdot t' \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	Mult. $E_a \cdot d \cdot \Delta z \cdot 10^6$	
1/24	530	275	X	X	275	510	345	$H + t/2 - h_x$ $= 158,5$	$H - h_x$ $= 151$	h_x $= 99$
3/24	490					340	340			
5/24	455					340	340			
7/24	430					340	340			
9/24	420					340	340			
11/24	430					340	340			
Regel		375				59063				
13/24	440	235	X	X	235	345	345	$H + t/2 - h_x$ $= 156,5$	$H - h_x$ $= 149$	h_x $= 101$
15/24	455					345	345			
17/24	485					345	345			
19/24	510					350	350			
21/24	525					355	355			
23/24	535					360	360			
	5705	375	1035	4145		898343	155235	414555		

Läge	Tryckt liv			Draget liv			Tryckt liv		Draget liv	
	$E \cdot 10^6$	Δz	K_3 $d \cdot E_a \cdot 10^6$	$E \cdot 10^6$	Δz	K_4 $d \cdot E_a \cdot 10^6$	h'	$M_3 \cdot d \cdot E_a \cdot 10^6$	h'	$M_4 \cdot d \cdot E_a \cdot 10^6$
Liv 1	245	151	36995	172	99	17028	100,6	3721697	66	1123850
Liv 2	235	149	35015	180	101	18180	99,4	3480491	67,4	1225330
			72010			35208		7202188		2349180

1) $K_1 + K_2 + K_3 = K_4 + K_5$

2) $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = 4500 P$

1) $5705 \cdot 8,98 \cdot 50 \cdot E_y + 375 \cdot 530 \cdot E_y + 1035 \cdot 1,17 \cdot 50 \cdot E_a + 72010 \cdot 1,17 \cdot E_a = 35208 \cdot 1,17 \cdot E_a + 4145 \cdot 1,17 \cdot 50 \cdot E_a$

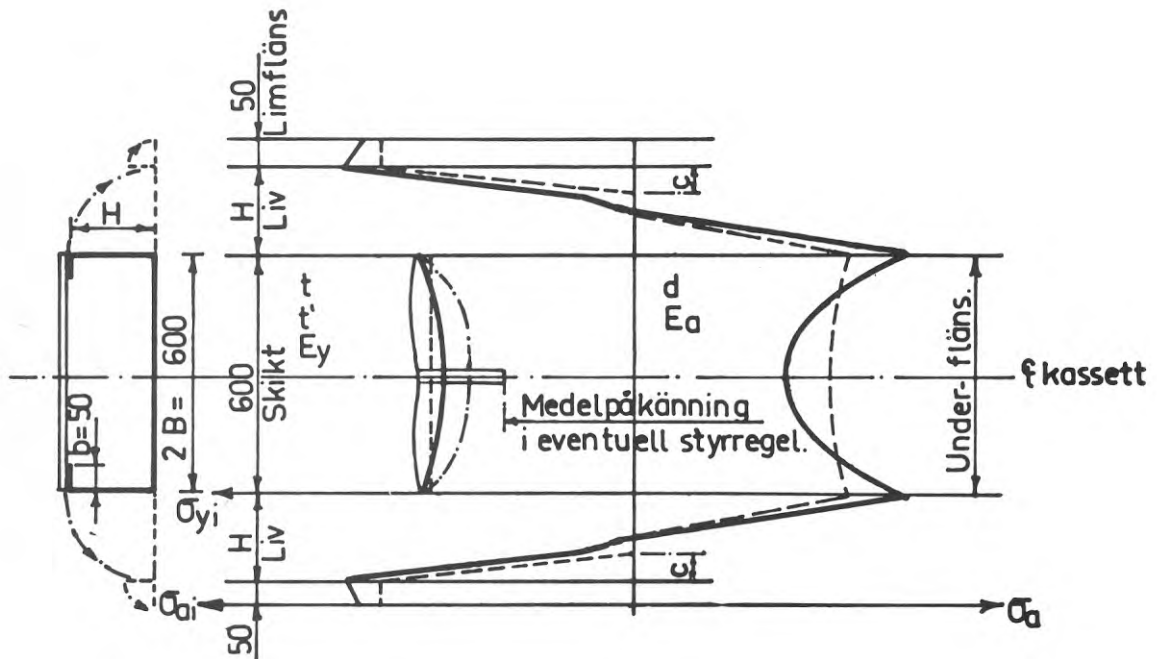
2) $898343 \cdot 8,98 \cdot 50 \cdot E_y + 59063 \cdot 530 \cdot E_y + 155235 \cdot 1,17 \cdot 50 \cdot E_a + 7202188 \cdot 1,17 \cdot E_a + 2349180 \cdot 1,17 \cdot E_a + 414555 \cdot 1,17 \cdot 50 \cdot E_a = 4500 \cdot 3066$

1) $E_a = 19,665 E_y$

2) $43465 E_y + 4451 E_a = 137970$

$E_y = 1,05 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

$E_a = 20,71 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$



- Anger verklig påkänning (medelpåkänning)
 - - - - - " " " " " i ö.k. skikt
 ······ " " " " " i u.k. " "
 - - - - - beräknad (medelpåkänning)
- t anger skiktets uppmätta tjocklek
 t' — den uppmätta tjockleken av samtliga faner i bärverkets längdriktning
 d — plåtens uppmätta tjocklek
 E_y — skiktets beräknade elasticitetsmodul.
 E_a — plåtens ————— "—————"

FIG 48. Verklig och beräknad påkänningsfördelning vid utvikt tvärsnitt i princip

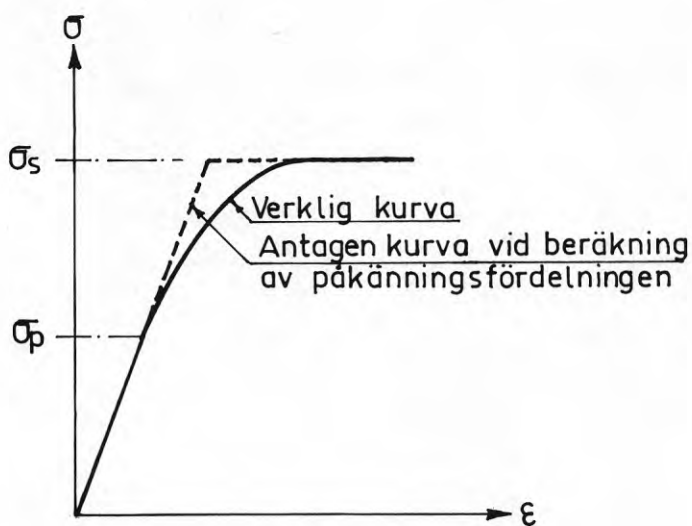


FIG 49. Plåtmaterialiets arbetskurva i princip

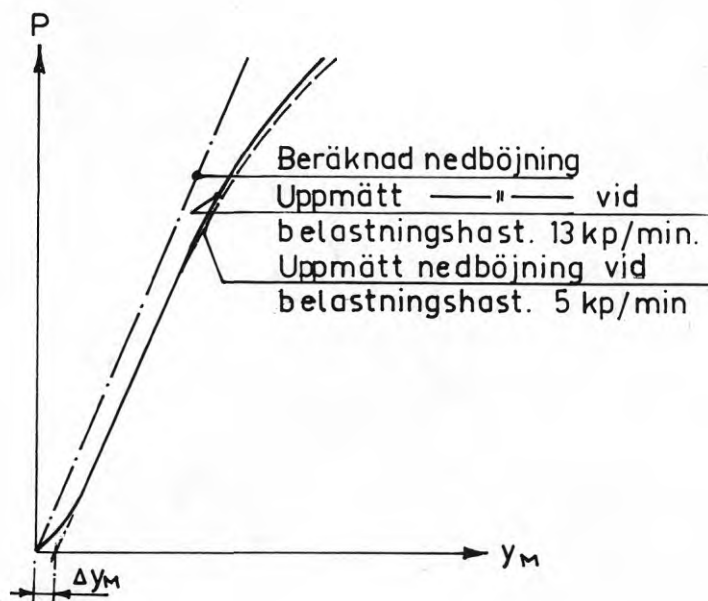


FIG 50. Nedböjningsdiagram i princip vid snitt $x/L = 0,5$

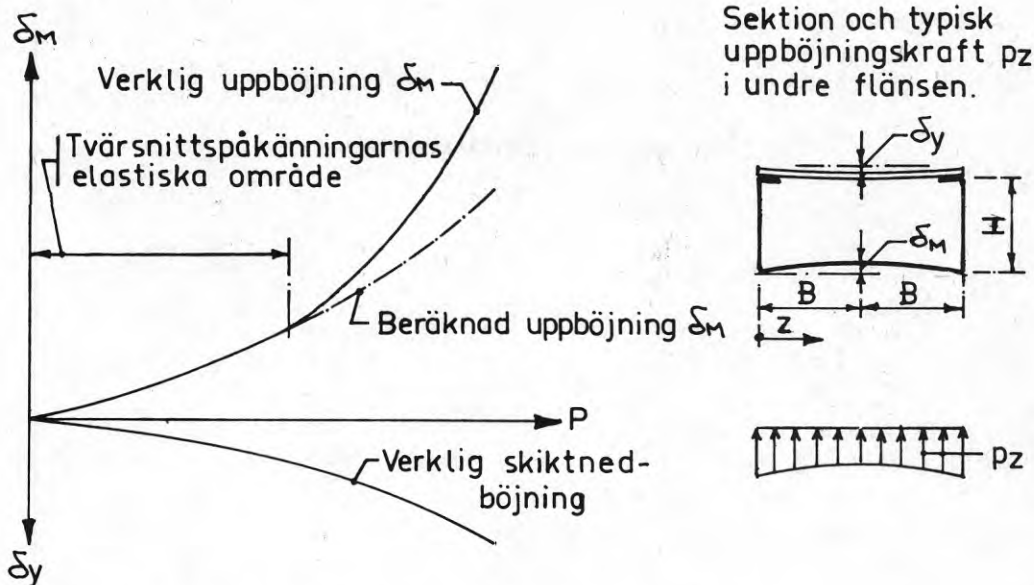
Avvikelsen mellan den uppmätta och den beräknade nedböjningen inom påkänningarnas elastiska område beror främst på den indirekta effekt plåtens eventuella initialpåkänningar utövar. Dessa påkänningar, uppkomna i samband med valsningen, framkallar bucklor i det obelastade bärverkets mittersta underflänsparti [FIG 20]. I första belastningsskedet har denna del av flänsen begränsad lastupptagningsförmåga och bärverkets böjstyvhet är motsvarande mindre. Detta kännetecknas av nedböjningskurvans till en början flacka lutning. Vid pålastning får underflänsen på grund av böjdeformationen en större medverkande bredd och en motsvarande större böjstyvhet. Bärverkets nedböjning avtar i förhållande till belastningsökningen till dess att hela flänsbredden är verksam och bucklorna utjämnade. Därefter löper den uppmätta och den enligt böjningsteorin beräknade nedböjningskurvan i det närmaste parallellt inom påkänningarnas elastiska område. Den uppmätta kurvan anger en aning större nedböjning i förhållande till den beräknade på grund av livens utböjning (jfr BILD 16) och mätklockornas placering vid skiktöverkant.

Tvårsnittspåkänningar utanför det elastiska området reducerar bärverkets böjstyvhet och ökar dess nedböjning i förhållande till lastökningen.

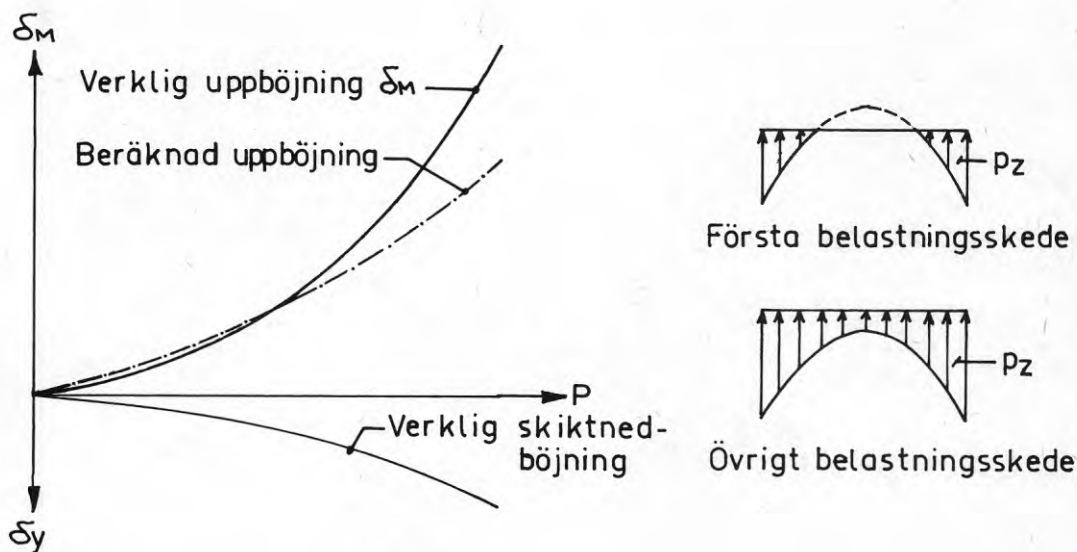
Skiktpåkänningen avtar mot tvärsnittets mitt beroende av dels skjuvdeformationen, dels skiktets nedböjning δ_y och den i princip likartade effekt som i samband med upplagsvillkoret redovisas för underflänsen (2.8). De koncentrerade påkänningarna vid skiktets randpartier kan i ett tidigt belastningsskede anta relativt höga värden och oavsett förutsättningarna överskrida elasticitetsgränsen. Bärverkets böjstyvhet minskar och nedböjningen ökar.

Underflänsens uppböjning δ_M och skiktets ned- och eventuella uppböjning δ_y vid bärverkets mitt i snittet $z = B$ uppmättes med hjälp av klockorna (12) resp. (11) [FIG 39] i samband med avläsningen av de övriga mätklockorna.

FIG 51 visar i princip relationerna mellan belastningen P och underflänsens uppböjning δ_M , dels den uppmätta, dels den enligt böjningsteorin beräknade uppböjningen (kap. 2). Vidare skiljer figuren på bärverk med och utan initialpåkänningar i plåten. Då uppböjningen δ_M är en funktion av bärverkets nedböjning y_M och undre flänsens tvärsnittskraft beror avvikelserna mellan den verkliga och den beräknade uppböjningen främst på vad som ovan berörts beträffande bärverkets nedböjning. Diagrammet för bärverk utan initialpåkänningar i plåten kännetecknas av att den verkliga och den enligt böjningsteorin beräknade uppböjningskurvan sammanfaller inom belastningsområdet, där tvärsnittspåkänningarna ej överskrider elasticitetsgränsen. Utanför det elastiska området reduceras bärverkets böjstyvhet i ökande takt med lastökningen. Uppböjningskraften p_z är en funktion av bärverkets nedböjning y_M , varför avvikelserna mellan den verkliga och den beräknade uppböjningskurvan ökar.



δ_M - P kurvor utan initialpåkänningar i plåten



δ_M - P kurvor med initialpåkänningar i plåten

FIG 51. Diagram i princip visande uppböjningen δ_M av undre fläns och nedböjningen δ_y av skiktet i snitt $x/L = 0,5$

Diagrammet för bärverk med initialpåkänningar i plåten kännetecknas av att den verkliga och den enligt böjningsteorin beräknade uppböjningskurvan i princip avviker sinsemellan under hela belastningsförloppet. Som ovan förklarats har vid första belastningsskedet undre flänsens mittparti begränsad lastupptagningsförmåga och tvärsnittspåkänningarna är koncentrerade till randpartierna vid livet. Flänsens reducerade medverkan minskar bärverkets böjstyvhet och ökar dess nedböjning. Underflänsens uppböjning δ_M är en funktion av dels bärverkets nedböjning y_M , dels storleken och fördelningen av underflänsens tvärsnittskraft. Nedböjningstillskottet i det tidiga belastningsskedet ökar med andra ord tvärsnittskraften men bidrar dock föga till en ökning av uppböjningen på grund av tvärsnittskraftens koncentration till underflänsens randpartier.

Diagrammet [FIG 51] anger även den uppmätta nedböjningen δ_y för skiktet. δ_M och δ_y har ingen större betydelse vid analyseringen av bärverkets lastupptagningsförmåga. Däremot har underflänsens uppböjning δ_M ett visst intresse i samband med verifieringen av den antagna böjningsteorin.

FIG 50 och FIG 51 är principskisser och tjänstgör enbart som en förklaring till de motsvarande utarbetade diagrammen i fortsättningen.

4.4.1 Försöksserie F

Som ett första orienterande försök provades den med tøjningsgivare utrustade kassetten F1, vars profilhöjd och nominella plåt- och skiktjocklek var $H = 250$ mm, $d = 1,0$ mm resp. $t = 16$ mm.

Redan vid måttlig belastning observerades en utbuckling av skiktet i en longitudinell vågform med halvvågornas längd ungefär lika med bärverkets bredd. Vågamplituden ökade med ökande belastning. Tøjnings-stuknings-diagrammen [FIG 68 → 74] (appendix 2) uppvisar största stukningen vid u.k. skikt, vilket tyder på en konvex utbuckling i det betraktade snittet. Detta innebar att skiktet utsattes för en lyftkraft lodrätt de limmade flänsytorna. Den accelererande stukningsökningen över det ena livet tyder antingen på en lokal defekt i plywooden eller ett lokalt brott i limskiktet. Vid en efterföljande granskning konstaterades att tapen som användes för tøjningsgivarnas fasthållande vid ö.k. limfläns täckte en relativt stor yta och förorsakade uteblivandet av direkt limkontakt mellan plåt och plywood.

Den ökande skillnaden mellan stukningen i skiktets ö.k. och u.k. förorsakade en motsvarande ökning av lyftkraften. Innan brottet inträffade hade utbucklingen antagit sådana proportioner att dragpåkänningar uppstod i skiktets överkant [FIG 74]. Trots de höga böj-tryckpåkänningarna i skiktets underkant var den direkta orsaken till kollapsen ett fläkbrott i limfogen, vilket karakteriseras av limskiktets släpp från metallytan.

Med hjälp av tøjnings-stuknings-diagrammen och de uppmätta me-

deltjocklekarna $d = 0,97$ mm och $t = 15,6$ mm ($t' = 9,36$ mm) har elasticitetsmodulerna enligt ovan beräknats till:

$$E_y = 1,19 \cdot 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E_a = 20,8 \cdot 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

där E_a ungefär överensstämmer med det erhållna resultatet från dragproven. Med hjälp av plåtmaterialets arbetskurva, tøjningsstuknings-diagrammen och det beräknade värdet för E_y har påkänningsdiagrammen [FIG 75 → 79] (appendix 2) utarbetats. Förutom vad som ovan nämnts angående skiktstukningen uppvisar dessa en utpräglad påkänningsreducering vid underflänsens mittparti i relation till den enligt böjningsteorin beräknade. Den ursprungliga orsaken har ovan berörts (4.4) och torde bero på den effekt initialpåkänningarna i plåtmaterialet utövade. Dessa förorsakade bucklor i det obelastade bärverkets mittersta flänsparti [FIG 20], som i första belastningsskedet hade begränsad lastupptagningsförmåga till dess att bucklorna hade utjämnats på grund av bärverkets deformation. Denna effekt förorsakade väsentligt större påkänningar i de styvare partierna vid livunderkant än de enligt böjningsteorin beräknade.

I övrigt framgår av FIG 79 att påkänningarna vid ena limflänsen överskred sträckgränsen redan vid en belastning motsvarande ca 84 % av brottlasten och att den maximala böj-tryckpåkänningen i skiktet uppgick till $48,8 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ under förutsättning att plywoodmaterialets elastiska område sträckte sig till brott. I realiteten upphörde det linjära sambandet mellan stukningen ϵ_y och påkänningen σ_y i ett tidigare belastningsskede, vilket innebär att det verkliga värdet för den maximala böj-tryckpåkänningen var något mindre än det diagrammet redovisar.

BILD 5 visar kassett F1 efter brott. Limflänsarna är blottlagda och hela limskiktet sitter kvar i plywoodskivan. Det ursprungliga lokala brottet vid limflänsen fortplantade sig till ett allmänt böj-tryckbrott över hela skiktets bredd vid bärverkets mittsnitt.

Med utgångspunkt från att det tidiga brottet i kassett F1 var en engångsföreteelse på grund av släpp i limfogen förorsakat av den ovannämnda fästtapan för tøjningsgivarna provades den nominellt lika kassett F2 inom samma serie. Redan vid en måttlig belastning utvisade skiktet samma bucklingstendens som vid föregående kassett och brottlasten var betydligt mindre - $P_{\text{brott}} = 550$ kp resp. $P_{\text{brott}} = 650$ kp. Den uppmätta medelskittjockleken var emellertid motsvarande mindre - $t = 14,6$ mm resp. $t = 15,6$ mm.

BILD 6 visar kassett F2 efter brottet. Dess utseende var nära identiskt med föregående och limsläpp i flänsen konstaterades.

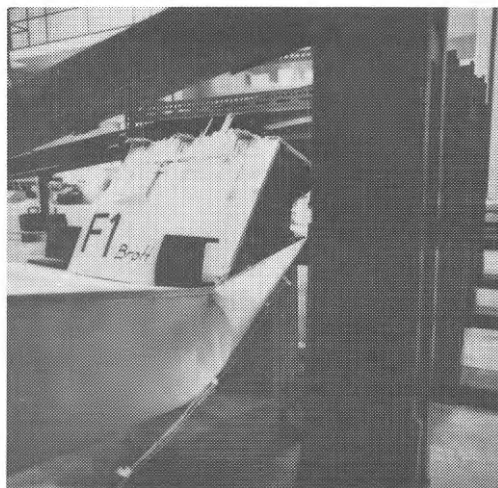


BILD 5. Kasset F1 efter brott



BILD 6. Kasset F2 efter brott

På grund av limskiktets ringa fläckhållfasthet måste uppkomsten av den ovan beskrivna utbucklingen av skiktet i longitudinell vågform undvikas. Kasset F3 utrustades därför med en styrregel 23 x 34 mm fastlimmad på högkant till skiktets undersida vid tvärsnittets mitt - se FIG 1 i princip. Tvärsnittskraften i skiktet skulle således påverka regeln excentriskt och ge denna en långsgående nedböjning. Åtgärden visade sig effektiv (se BILD 21 i princip). Den långsgående nedböjningen ökade i takt med den ökande belastningen. Uteblivandet av fläckkraften vid limflänsarna medförde en förhöjning av brottlasten till $P_{\text{brott}} = 793 \text{ kp}$ - ett typiskt böj-tryckbrott i plywooden. Den uppmätta medelskiktjockleken var 15,00 mm.

BILD 7 visar kasset F3 efter brott och BILD 8 detalj vid limfläns. Limmet sitter fortfarande kvar på metallytan och det sekundära brottet har uppstått i fanerskiktet.

Samtliga kassetter utfördes i fortsättningen med styrregel och inga försök uppvisade tecken på fläkning i limfogarna. Reglarnas dimension och utformning valdes från fall till fall med hänsyn till skiktets styvhet.

Nedböjningskurvorna i FIG 52 visar att dessa för samtliga tre bärverk nästan sammanfaller och att m.a.o. böjstyvheten i det närmaste var lika. Avvikelsen berodde främst på plywoodens varierande tryck- och böjstyvhet. Den relativt stora nedböjningen vid första belastningsskedet [FIG 52] och den karakteristiska avvikelsen mellan den uppmätta och den beräknade kurvan för underflänsens uppböjning δ_M under hela belastningsförloppet

[FIG 53] bekräftar närvaron av tidigare beskrivna initialpåkänningar i plåtmaterialet (jfr FIG 51).

4.4.2 Försöksserie E

Den nominella plåttjockleken $d = 1,25 \text{ mm}$ och styrregeln 23 x 23 mm för serie E skiljer uppbyggnaden av provkropparna från ovan beskrivna serie F.

Töjnings-stukningsdiagrammen [FIG 80 → 91] (appendix 2) för den med givare utrustade kassetten E1 anger i första belastningsskedet en i det närmaste konstant deformation i underflänsen. Detta tyder på att eventuella initialpåkänningar i plåtmaterialet ej förekom eller var av mindre betydelse. Skiktet utsattes för en långsgående nedböjning, som enligt diagrammen ökade med ökande belastning. Innan brottet inträffade hade nedböjningen antagit sådana proportioner att dragpåkänningar uppstod i regelns underkant (jfr FIG 90 och FIG 91).

Med ledning av töjnings-stukningsdiagrammen och de uppmätta medeltjocklekarna $d = 1,17 \text{ mm}$ och $t = 14,96 \text{ mm}$ ($t' = 8,98 \text{ mm}$) har elasticitetsmodulerna beräknats till:

$$E_y = 1,05 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \text{ och}$$

$$E_a = 20,7 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2,$$



BILD 7. Kassett F3 efter brott

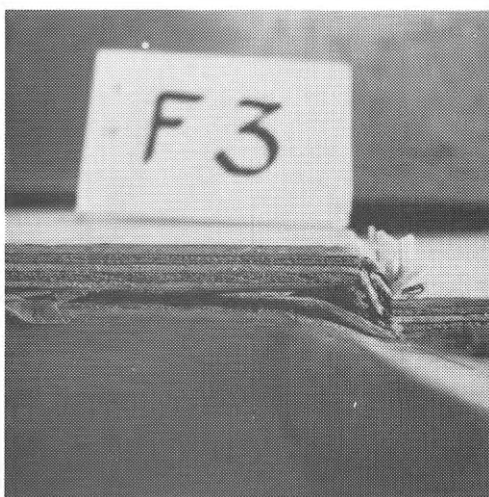


BILD 8. Kassett F3 - detalj vid limfläns

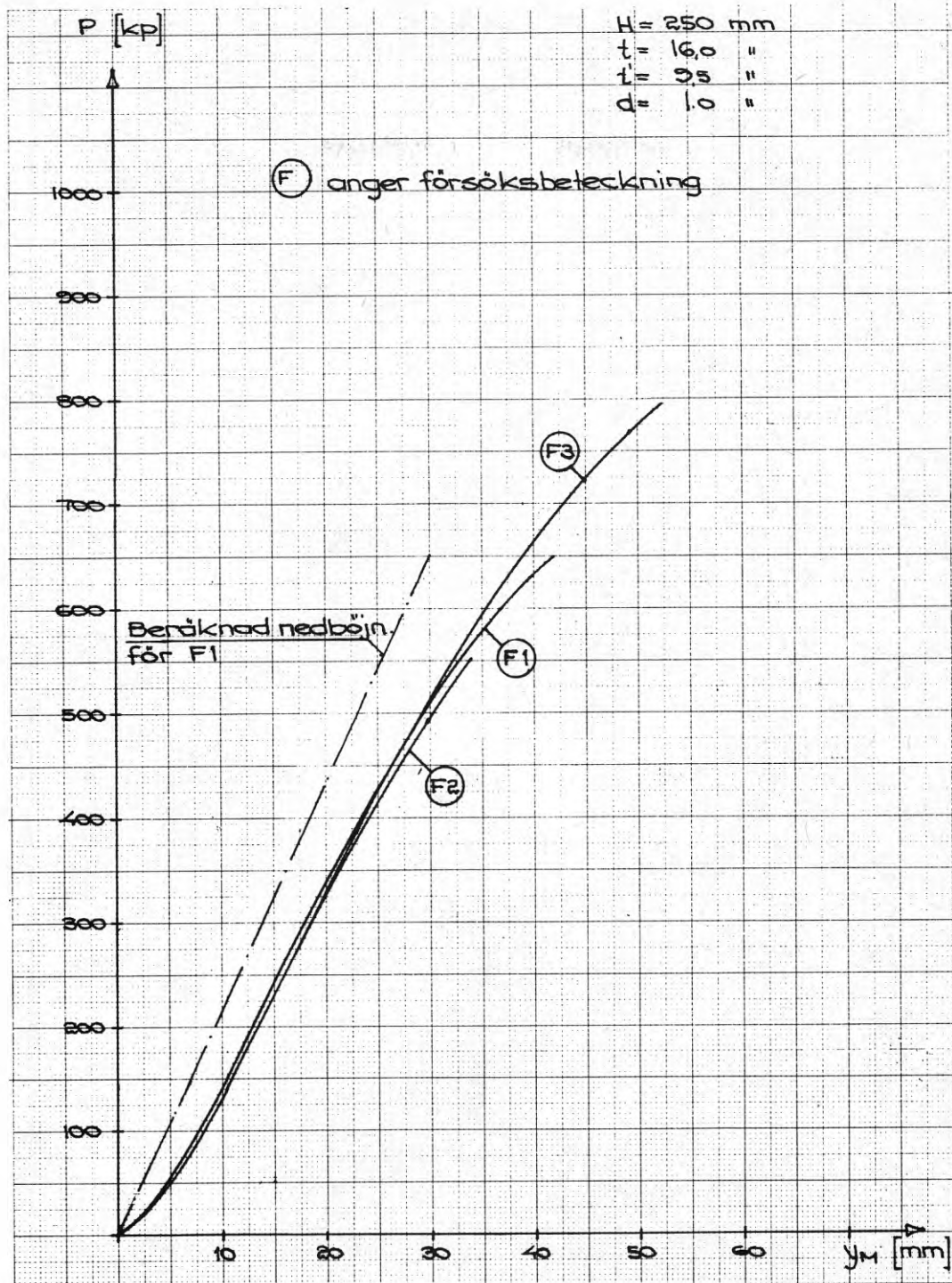


FIG 52. Nedböjningsdiagram. Serie F

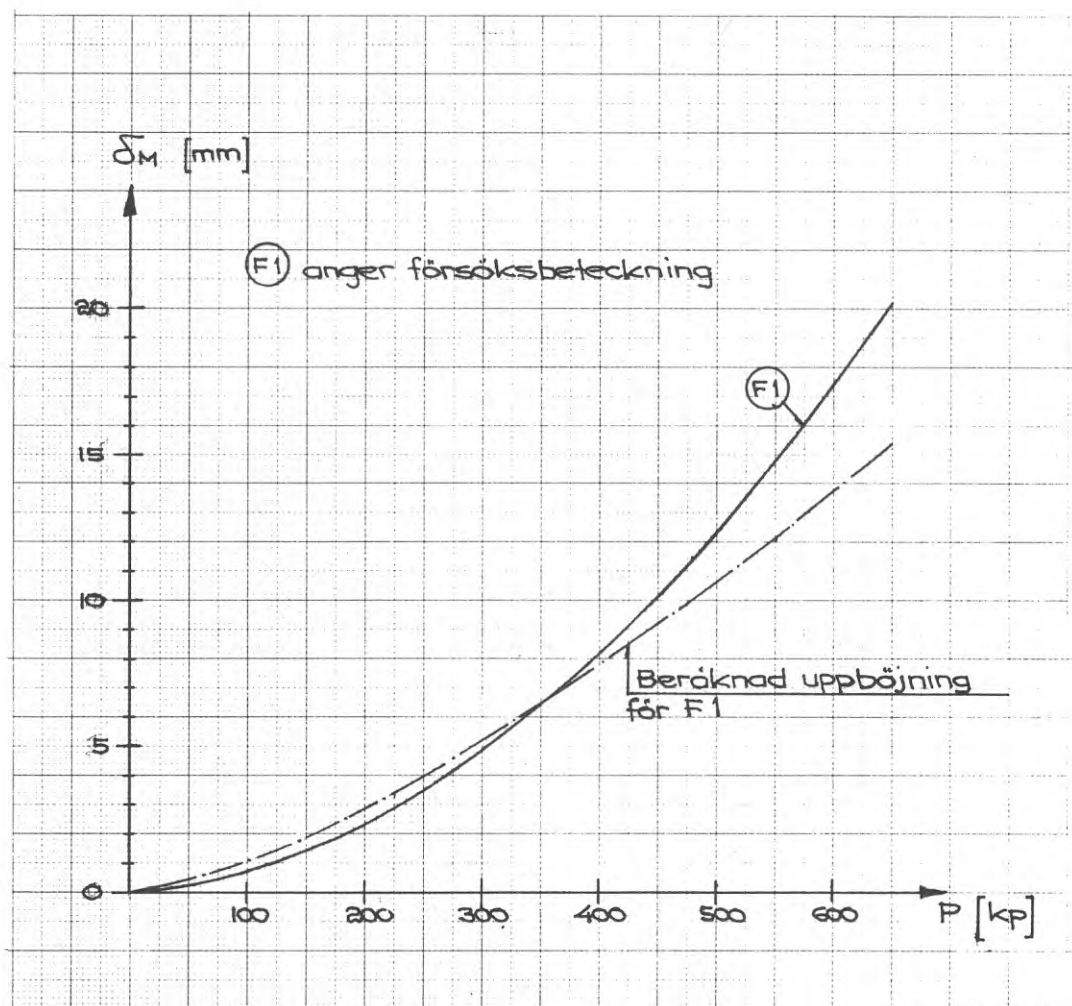


FIG 53. Uppböjningen δ_M i underfläns för $x/l = 0,5$.
Kassett F1

vilket även den erhållna arbetskurvan från dragproven anger. Med hjälp av denna kurva, töjnings-stukningsdiagrammen och det beräknade värdet för E_y har påkänningsdiagrammen [FIG 92 → 101]

(appendix 2) utarbetats. Dessa uppvisar inom påkänningarnas elastiska områden en påtaglig likhet mellan den uppträdande och den enligt böjningsteorin beräknade påkänningsfördelningen. När elasticitetsgränsen överskreds i lim- och även underflänsens plåtmaterial, erhöill bärverket en mindre böjstyvhet och en större nedböjning än beräknat. Uppböjningskraften och uppböjningen i underflänsen ökade i takt med bärverkets nedböjning, vilket förklarar avvikelserna i undre flänsens påkänningsfördelning vid de höga belastningsskedena.

Som även framgår av påkänningsdiagrammen ökade skiktets nedböjning i takt med den ökande belastningen, varvid påkänningarna koncentrerade sig till skiktets randpartier. Orsaken har tidigare berörts och avhänger främst av motsvarande effekt som upplagsvillkoret utövar på underflänsen samt skjudeformationerna i skiktet. Ett typiskt böj-tryckbrott inträffade i skiktet över ena limflänsen och vid en av de mittersta lasternas fördelningsbalk - se BILD 9. FIG 101 anger i det betraktade snittet en böj-tryckpåkänning i skiktet som uppgick till 66 N/mm^2 , vilket i realiteten var något mindre på grund av den ej riktiga förutsättningen att plywoodens elastiska område sträcker sig till brott (jfr FIG 57). Det sekundära brottet i limflänsen visade inga tecken till fläkning - se BILD 10.

Försöken med de övriga två nominellt lika provkropparna E2 och E3 med en aning större uppmätta medelskiktjocklekar $t = 15,09 \text{ mm}$ resp. $t = 15,14 \text{ mm}$ förlöpte tämligen lika som för kassett E1. Karakteristisk var den långsgående nedböjningen av skiktet och den ursprungliga brottorsaken - nämligen ett överskridande av böj-tryckpåkänningarna i skiktets randpartier som sedan fortplantade sig över hela dess bredd. BILD 11 och BILD 12 visar kassett E2 resp. E3 efter brott och BILD 13 och BILD 14 det typiskt ideella utseendet av limflänsen efter brottet - nämligen att hela limskiktet sitter kvar på metallytan.

Nedböjningsdiagrammet [FIG 54] anger en högre brottlast för kassetterna E2 och E3. Orsaken torde bl a bero på plywoodens varierande tryck- och böjstyvhet. Nedböjningskurvornas tämligen nära överensstämmelse sinsemellan och mellan den beräknade samt det konstanta linjära sambandet mellan nedböjningen y_M och belastningen P inom påkänningarnas hela elastiska område vittnar om en underfläns utan bucklor i det obelastade bärverket och en plåt fri från initialpåkänningar efter framställningen.

FIG 55 visar relationerna mellan dels underflänsens uppböjning δ_M , dels skiktets nedböjning δ_y och belastningen P för kassett E1. Kurvorna för den uppmätta och den beräknade uppböjningen δ_M är till synes sammanfallande inom påkänningarnas elastiska område, vilket överensstämmer med böjningsteorins förutsättningar (jfr FIG 51).

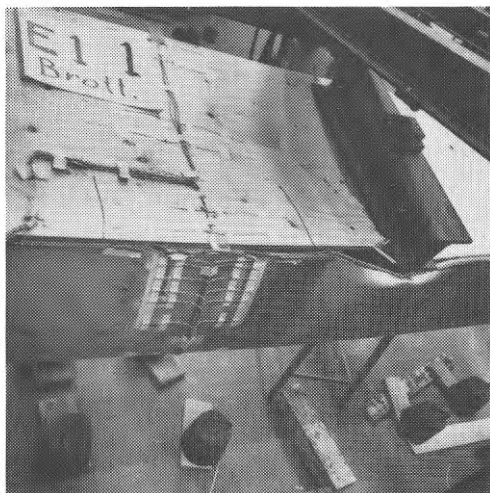


BILD 9. Kassetten E1 efter brott



BILD 10. Kassetten E1 - detalj vid limfläns



BILD 11. Kasset E2 efter brott

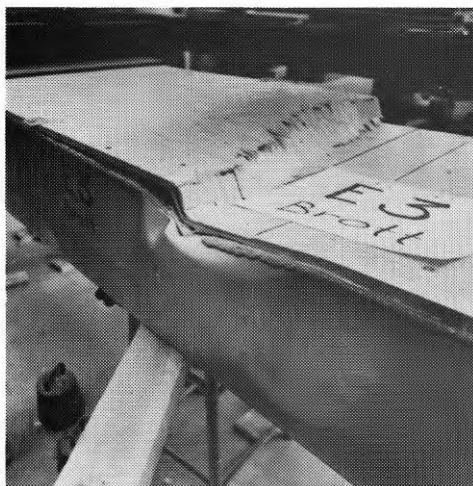


BILD 12. Kasset E3 efter brott

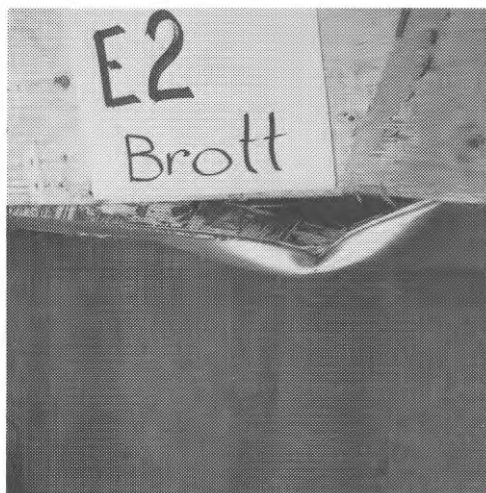


BILD 13. Kassett E2 - detalj vid limfläns

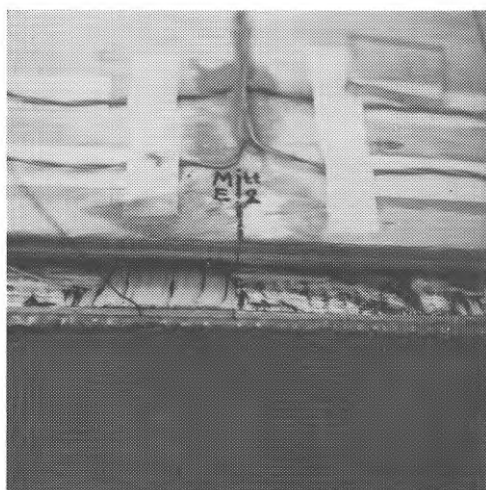


BILD 14. Kassett E2 - detalj vid limfläns

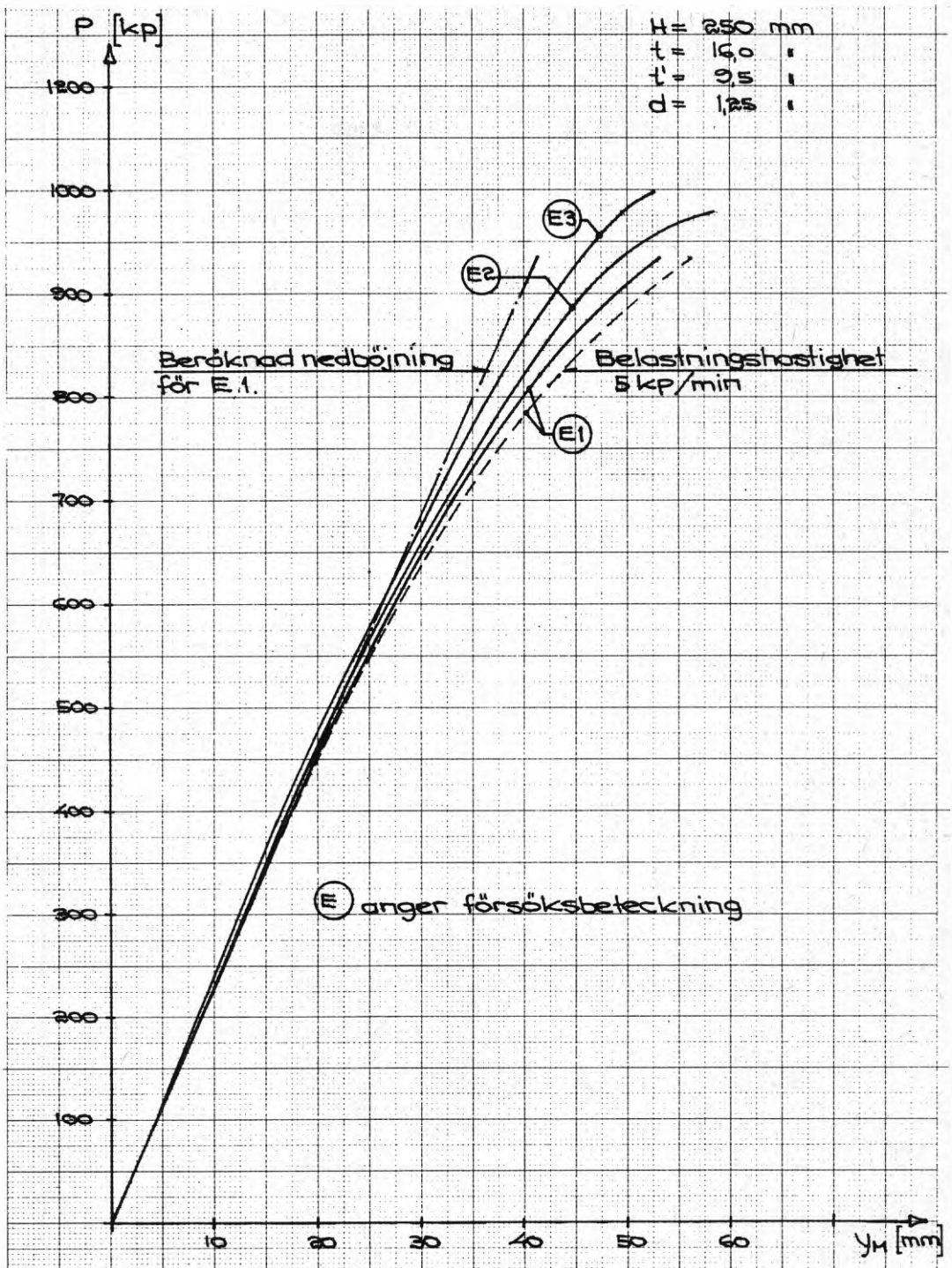


FIG 54. Nedböjningsdiagram. Serie E

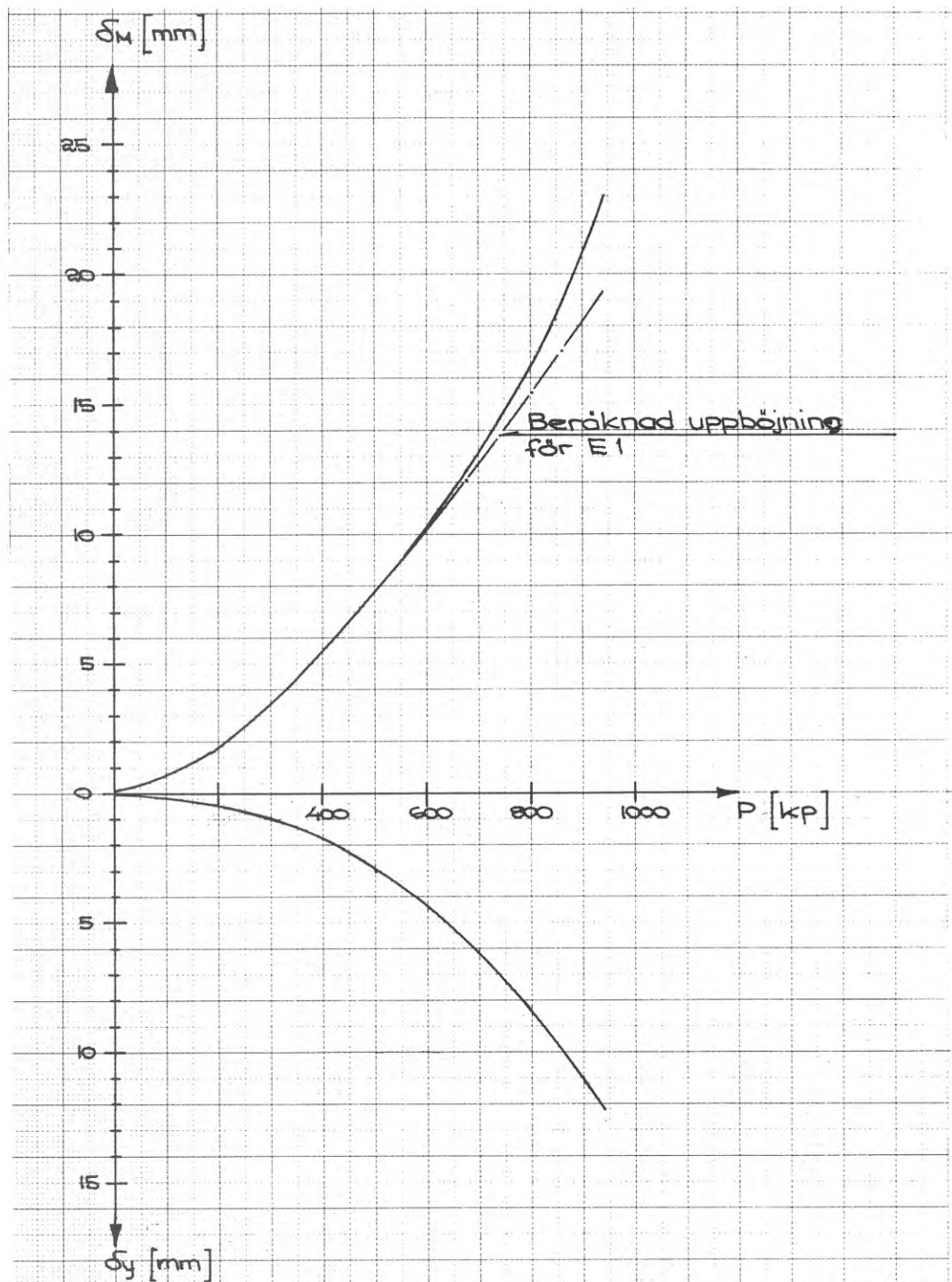


FIG 55. Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kasset E1

Vid överskridandet av elasticitetsgränsen redovisar den uppmätta kurvan ett brantare utseende än vad resultatet från böjningsteorins beräkningar anger. Framsta orsaken har tidigare berörts och berodde på en större uppböjningskraft i undre flänsen till följd av bärverkets reducerade böjstyvhet och motsvarande ökande nedböjning. En bidragande orsak till den ökade minskningen av bärverkets böjstyvhet var skiktets accelererande nedböjning δ_y (jfr FIG 55). Skiktpåkänningarna koncentrerades till randpartierna vid liven och överskred elasticitetsgränsen.

4.4.3 Försöksserie C

Vid följande försök provades de tre kassetterna inom serie C, vars profilhöjd och nominella plåt- och plywoodtjocklek var $H = 150$ mm, $d = 1,0$ mm resp. $t = 19$ mm. Styrregeln med dimensionerna 21×31 mm placerades på högkant. Töjnings-stukningsdiagrammen för kassett C1 med givare [FIG 102 → FIG 107] (appendix 2) visar ytterligare ett exempel på den indirekta effekt initialpåkänningarna i plåten utövade på påkänningsfördelningen i underflänsen.

Med hjälp av de uppmätta medeltjocklekarna $d = 0,95$ mm och $t = 18,17$ mm ($t' = 10,9$ mm) har elasticitetsmodulerna på liknande sätt som tidigare beräknats till:

$$E_y = 1,23 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \text{ och}$$

$$E_a = 21,0 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2,$$

vilket överensstämmer med den erhållna arbetskurvan från dragproven. Med ledning av bl a denna kurva, töjnings-stukningsdiagrammen och det beräknade värdet för E_y har påkänningsdiagrammen [FIG 108 → FIG 113] (appendix 2) utarbetats. Dessa redovisar, förutom vad som ovan berörts beträffande påkänningsfördelningen i underflänsen, den karakteristiska påkänningen i skiktet koncentrerad till dennas randpartier.

Vid belastningssteget $P = 507$ kp [FIG 113] motsvarande ca 96 % av brottlasten har plåtpåkänningen i livunderkant överskridit sträckgränsen samtidigt som diagrammet anger en maximal böjtryckpåkänning i skiktet uppgående till $\sigma_y = 28,4$ [N/mm²]. Vid ökande belastning fick bärverket en accelererande nedböjning och underflänsen och liven en motsvarande större uppböjning (BILD 15) resp. sidoutböjning (BILD 16) till dess att skiktets böjtryckpåkänningar i närheten av bärverkets mittnitt överskred brottgränsen. Provingen av de övriga nominellt lika kassetterna C2 och C3 uppvisade i princip samma karakteristiska deformationsförlopp. Den primära brottorsaken för kassetterna inom serie C var de höga påkänningarna i underflänsens randpartier (jfr FIG 113). I belastningens slutskede uppstod flytning i plåtmaterialet, bärverkets böjstyvhet reducerades och nedböjningen y_M samt skiktets böjtryckpåkänning ökade i snabbare takt än pålastningen, till dess att böjtryckpåkänningen i plywooden överskred brottgränsen (BILD 17).

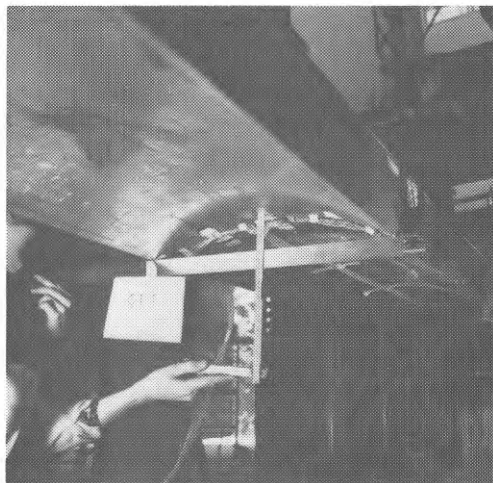


BILD 15. Underflänsens uppböjning vid belastat bärverk

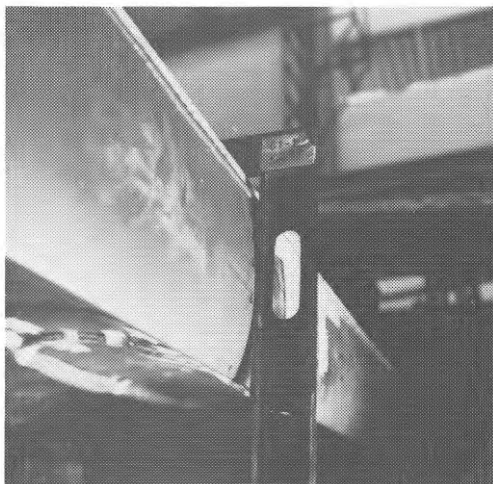


BILD 16. Livens sidoutböjning vid belastat bärverk

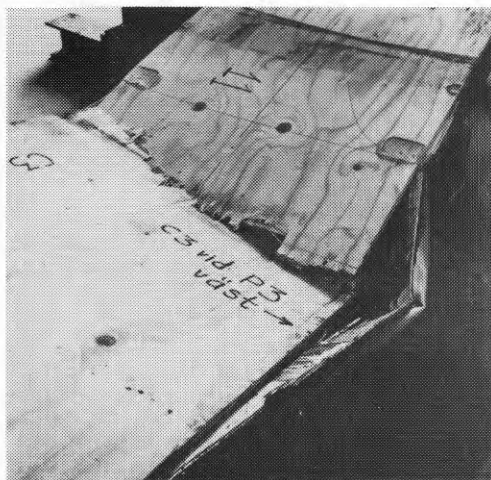


BILD 17. Kassetten C3 efter brott

En analysering av försöksserien i övrigt är i princip en upprepning av vad som tidigare har nämnts. Ur bärverkens nedböjningskurvor [FIG 56] kan följande avläsas: De förhållandevis större nedböjningarna i första belastningsskedet än i övrigt inom påkänningarnas elastiska område tyder på närvaron av de ovan beskrivna initialpåkänningarna i plåtmaterialiet och den indirekta effekt dessa utövade på underflänsens påkänningsfördelning (jfr föregående avsnitt). I första belastningsskedet hade det mittersta flänspartiet begränsad lastupptagningsförmåga och bärverkets böjstyvhet var motsvarande mindre. Allt efter som belastningen ökade fick underflänsen på grund av böjdeformationen en allt större medverkande bredd. Bärverkets böjstyvhet ökade till dess att hela flänsbredden var verksam, vilket motsvarar den böjstyvhet som beräkningarna enligt böjningsteorin anger och längs den sträckan i nedböjningsdiagrammet [FIG 56] där den uppmätta och den beräknade kurvan i det närmaste löper parallellt.

Den mindre effekt initialpåkänningarna utövade på kassetten C3 - jfr dennas brantare nedböjningskurva i första belastningsskedet [FIG 56] - minskade randpåkänningarna i underflänsen. Flytningen i plåtmaterialiet inträdde vid en högre belastning och förhalade böj-tryckbrottet i skiktet. Detta tyder på en bidragande orsak till kassetten C3:s högre brottlast. Dessutom utvisar dragproven en sträckgräns i plåten motsvarande 4 % - 6 % högre än för kassetten C1 och C2, medan den uppmätta verkliga plåt-tjockleken var densamma för samtliga tre kassetter.

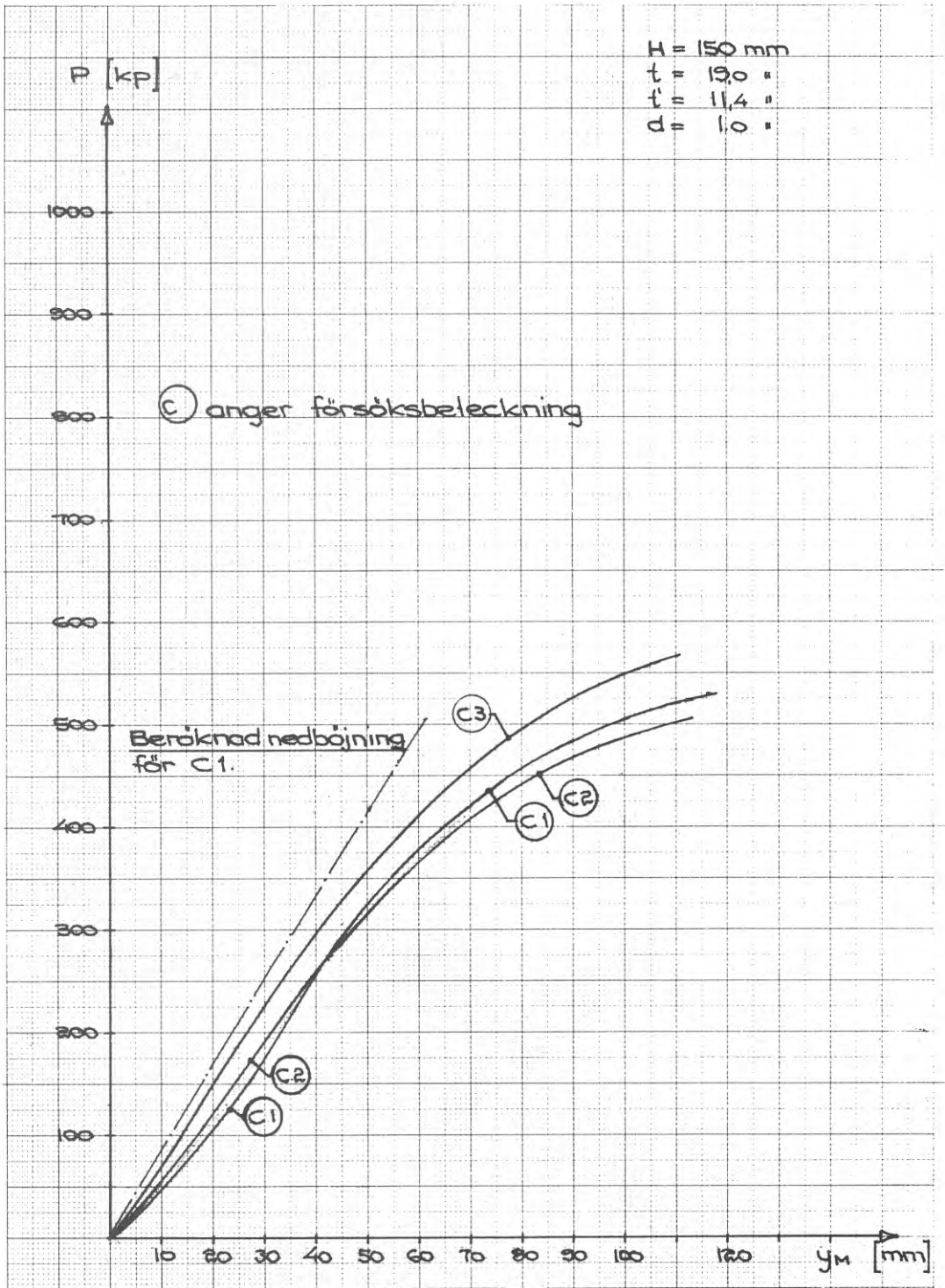


FIG 56. Nedböjningsdiagram. Serie C

Slutligen torde plätens tryck- och dragstyvhet samt skiktets tryck- och böjstyvhet vara av avgörande betydelse för brottlastens storlek. Plywoodens uppmätta medeltjocklek för kassetterna C1, C2 och C3 var $t = 18,17$ mm, $t = 17,75$ mm resp. $t = 18,38$ mm. Förutsatt att plywoodens karakteristiska arbetskurva var densamma för samtliga tre kassetter skulle alltså skiktets tryckstyvhet stå i proportion till de verkliga effektiva tjocklekarna. Arbetskurvorna för plywoodmaterialet är emellertid högst variabla (jfr FIG 44). Ur påkänningsdiagrammen [FIG 108 → FIG 113] (appendix 2) kan följande avläsas: För laststegen upp till P_8 anger diagrammen att de uppmätta tvärsnittskrafterna i skiktet ungefärligen överensstämmer med de beräknade. Vid laststeg P_{10} och upp till P_{12} ökar den uppmätta tvärsnittskraften i förhållande till den beräknade. Samma tendens konstateras hos kassett E1 [FIG 92 → FIG 101] (appendix 2). Förutsättningen att det linjära sambandet mellan påkänningen och deformationen i plywoodmaterialet sträcker sig till brott gäller alltså ej. De redovisade påkänningarna i skiktet, speciellt vid randpartierna, var i realiteten ej så höga som påkänningsdiagrammen anger.

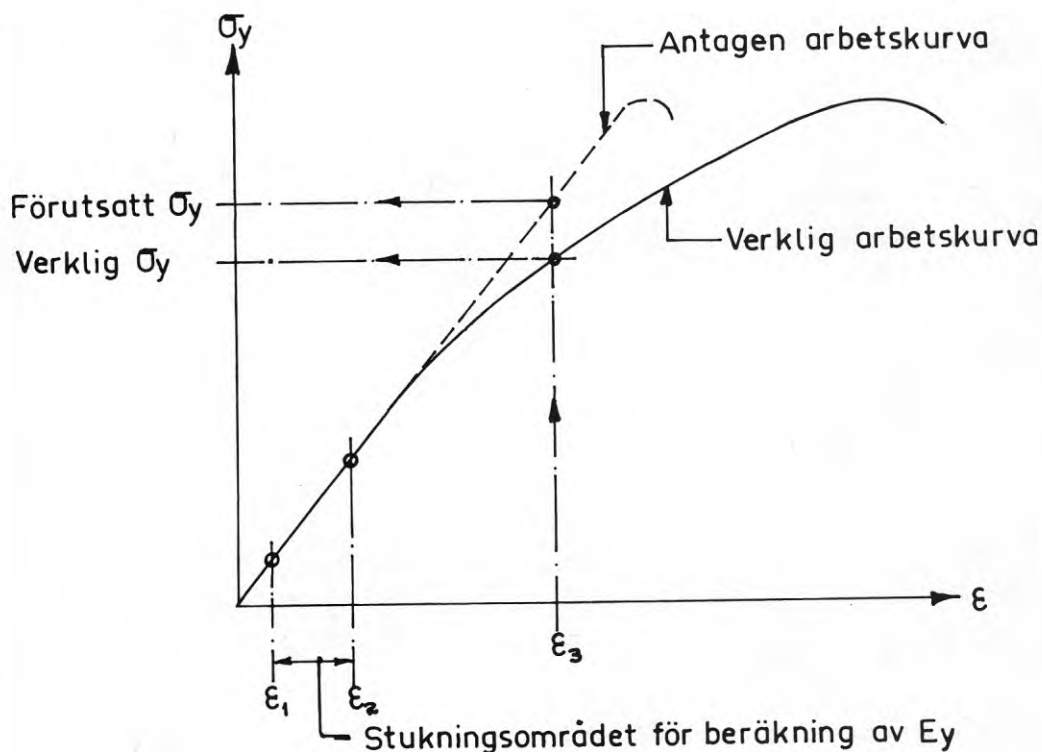


FIG 57. Plywoodmaterialets arbetskurva i princip

FIG 57 visar plywoodens arbetskurva i princip. Inom stukningsområdet $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ har elasticitetsmodulen E_y beräknats. Vid stukningen ε_3 anger förutsättningarna en påkänning σ_y som enligt figuren är mindre i verkligheten. Skiktets minskande styvhet reducerar bärverkets böjstyvhet och ökar dess nedböjning i motsvarande grad. Det bör påpekas att plåtens arbetskurva är tämligen rak upp till sträckgränsen och således ej i större grad inverkar på resonemanget.

Aven bärverkets nedböjningsdiagram [FIG 56] visar att nedböjningskurvorna för den uppmätta och den enligt böjningsteorin beräknade upphör att vara parallella när belastningen överstiger 350-400 kp - motsvarande laststegen mellan P_8 och P_{10} .

En jämförelse mellan underflänsens uppmätta och beräknade uppböjning δ_M [FIG 58] ger i likhet med bärverkets nedböjningskurvor svar på dels eventuella initialpåkänningar i plåtmaterialiet, uppkomna i samband med valsningen, dels ett principiellt utseende av de ingående materialens arbetskurvor.

4.4.4 Försöksserie A, B, D och H

Vid samtliga serier var, som för ovan beskrivna serie C, kassetternas profilhöjd $H = 150$ mm, varför resultaten från försöken lämpligen jämföres sinsemellan. Vidare utnyttjas de erhållna värdena från TABELL 9. Beräkningarna förutsätter emellertid att plywoodmaterialets elasticitetsmodul är $E_y = 0,9 \cdot 10^4$ [N/mm²] och att dess elastiska område sträcker sig till brott. Vidare är förutsättningarna att plåten utgörs av idealelastoplastiskt material, vars elasticitetsmodul och sträckgränspåkänning är $E_a = 21 \cdot 10^4$ [N/mm²] resp. $\sigma_s = 340$ [N/mm²]. Samtliga erhållna värden motsvarar påkänningen $\sigma_{ai} = 340$ [N/mm²] i limflänsen.

FIG 59 anger bärverkens nedböjningar y_M för serie A med nominell plåt- och plywoodtjocklek $d = 2,0$ mm resp. $t' = 17,5$ mm och med styrregel 36 x 23 mm på lågkant. Som framgår av diagrammet är avvikelserna mellan de uppmätta kurvorna små och nedböjningen i relation till lastökningen i det närmaste konstant under hela belastningsskedet där tvärsnittspåkänningarna ligger inom det elastiska området. Detta tyder på att effekten från initialpåkänningarna i plåten och variationerna av de ingående materialens tryck- och dragstyvheter var motsvarande liten. En del av förklaringen ligger i plåtens relativt stora tjocklek och dess mera stabila materialegenskaper i förhållande till plywoodens. Limflänsens lastupptagande bidrag utgör nämligen ca 70 % av skiktets.

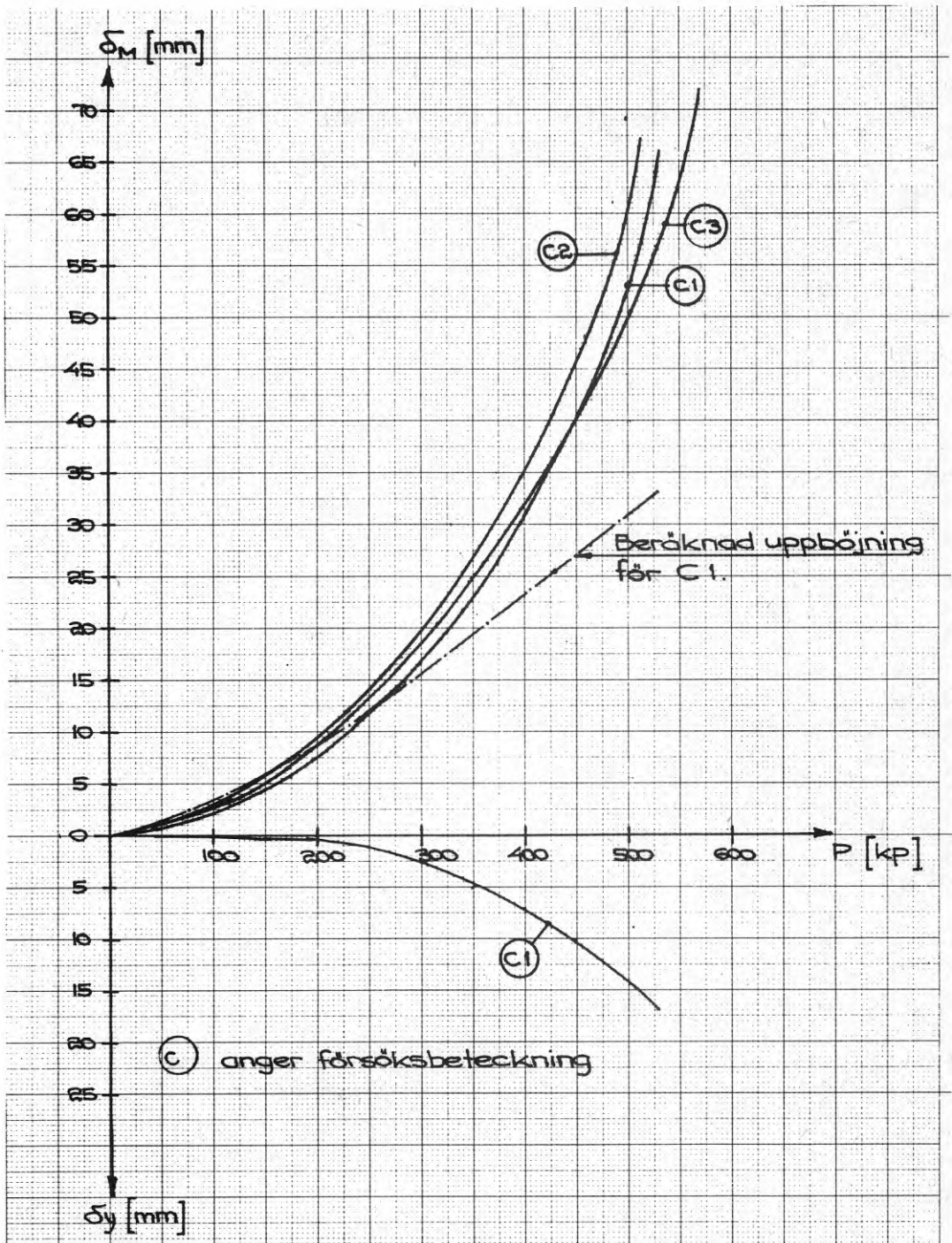


FIG 58. Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Serie C

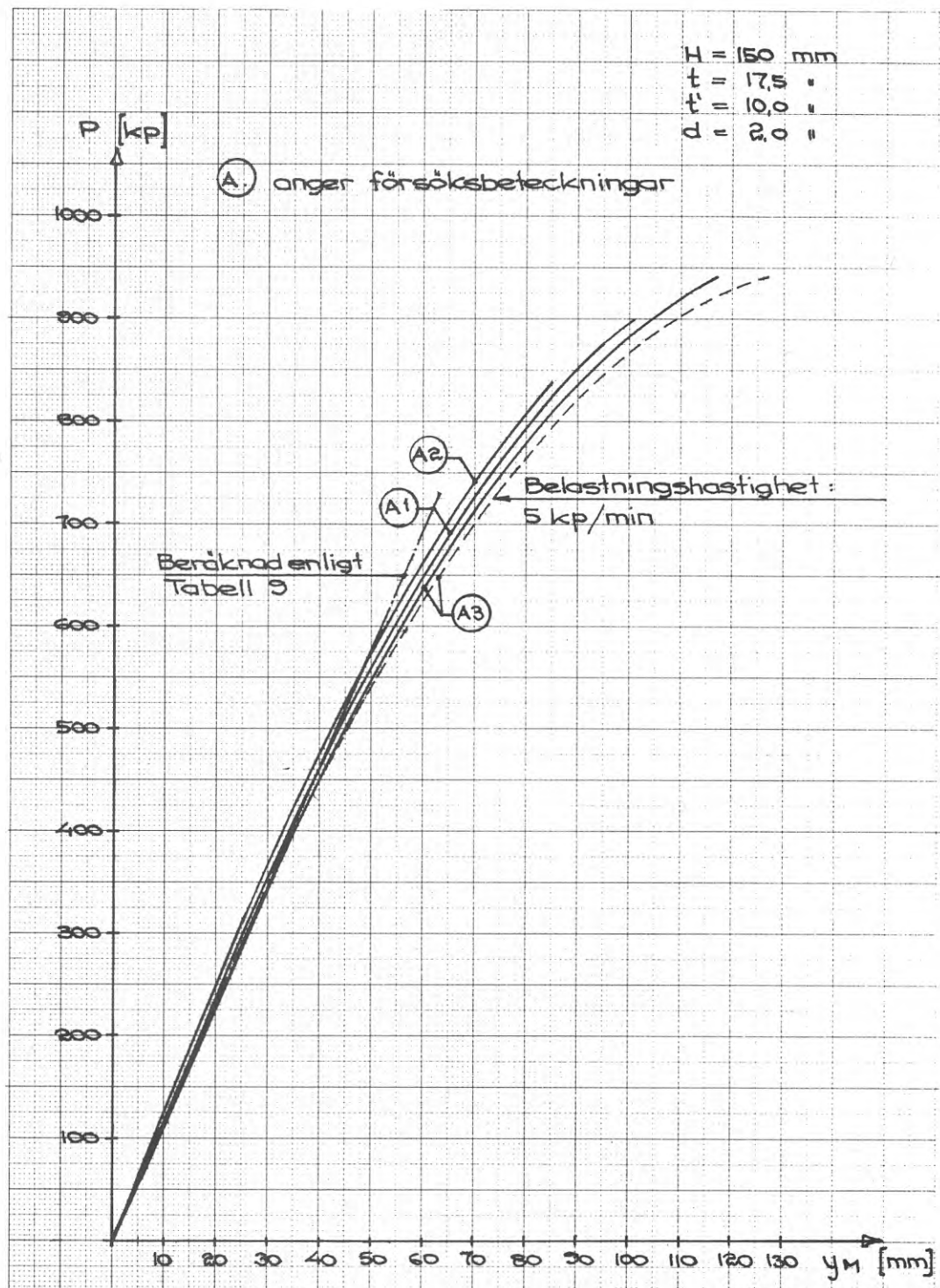


FIG 59. Nedböjningsdiagram. Serie A

En jämförelse mellan nedböjningskurvorna konstaterar ingen större skillnad av böjstyvheden för de uppmätta bärverken och för den enligt böjningsteorin beräknade. I realiteten förväntas en större elasticitetsmodul för plywoodmaterialet än vad beräkningarna förutsätter och brantare uppmätta nedböjningskurvor än vad diagrammet [FIG 59] redovisar. Det bör emellertid påpekas att plåtens verkliga drag- och tryckstyvhet för kassett A1 är:

$$E_a \cdot d = 20,4 \cdot 10^4 \cdot 1,93 = 39,37 \cdot 10^4 \quad [\text{N}] \text{ per mm plåtbredd,}$$

$$\text{vilket motsvarar: } \frac{39,37 \cdot 10^4}{21 \cdot 10^4 \cdot 2,0} \cdot 100 = 93,7 \% \text{ av den beräknade.}$$

d anger plåtens uppmätta tjocklek och E_a plåtmateriallets erhållna elasticitetsmodul. Däremot konstaterades att plywoodens effektiva medeltjocklek $t' = 10,15$ mm var ca 1 % större än vad beräkningarna förutsatte.

Utänför påkänningarnas elastiska område antar kurvorna sitt karakteristiska utseende - bärverkens böjstyvhet reducerades och deras nedböjning ökade i ökande takt med lastpåföringen. För kassett A1 var plåtens sträckgränspåkänning $\sigma_s = 357$ [N/mm²].

Jämföres denna med TABELL 9:s resultat motsvarar det i grova drag att sträckgränsen i limflänsens plåtmaterial överskreds vid belastningen $P \approx 770$ kp. Vid den ytterligare pålastningen utblev ökningen av limflänsens lastupptagande bidrag, flytning uppstod i plåtmaterial och skiktets påkänning ökade i motsvarande grad, till dess att det karakteristiska böj-tryckbrottet inträdde i plywooden. BILD 18 och BILD 19 visar kassett A1 resp. A2 efter brott, där även det typiskt ideella skjuvbrottet i limfogen observeras.

FIG 60 och FIG 61 visar nedböjningskurvorna för kassetterna inom serie B och serie D, där den nominella plåt- och skikt-tjockleken var $d = 1,25$ mm och $t = 16$ mm resp. $d = 0,8$ mm och $t = 17,5$ mm. Styrregelns dimension var vid samtliga kassetter 23×23 mm. Diagrammen uppvisar för samtliga bärverk last-deformationsförlopp som i princip liknar de ovan beskrivna inom serie A. En analysering skulle därför i det närmaste bli en upprepning. Nedböjningskurvornas utseende utanför påkänningarnas elastiska område tyder dock på att den primära brottorsaken var annorlunda. I samband med bärverkens reducerande böjstyvhet och tilltagande nedböjning ökade underflänsens uppböjning och randpåkänningar i ökande takt med lastpåföringen, till dess att nedböjningen var så stor att böj-tryckbrott uppstod i plywooden (BILD 20). Effekten var störst för kassetterna inom serie D, dels beroende på den relativt större påkänningen i underflänsen inom det elastiska påkänningsområdet, dels på grund av underflänsens mindre böjstyvhet i tvärriktningen. Det bör även påpekas att livens utböjning reducerar profilhöjden H och motsvarande bärverkets böjstyvhet.

En betydande faktor för lastupptagningsförmågan är underflänsens styvhet i tvärriktningen. FIG 62 visar nedböjningskurvorna för kassetterna inom serie H, vars nominella plåt- och plywoodtjocklek var $d = 2,0$ mm resp. $t = 10$ mm.

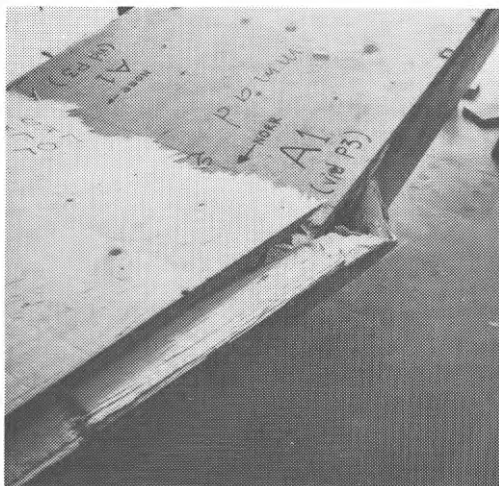


BILD 18. Kasset A1 efter brott

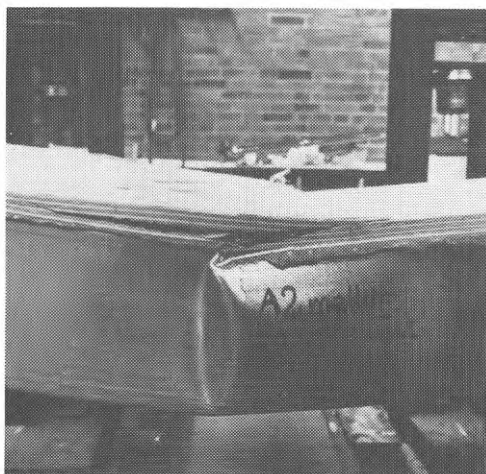


BILD 19. Kasset A2 efter brott

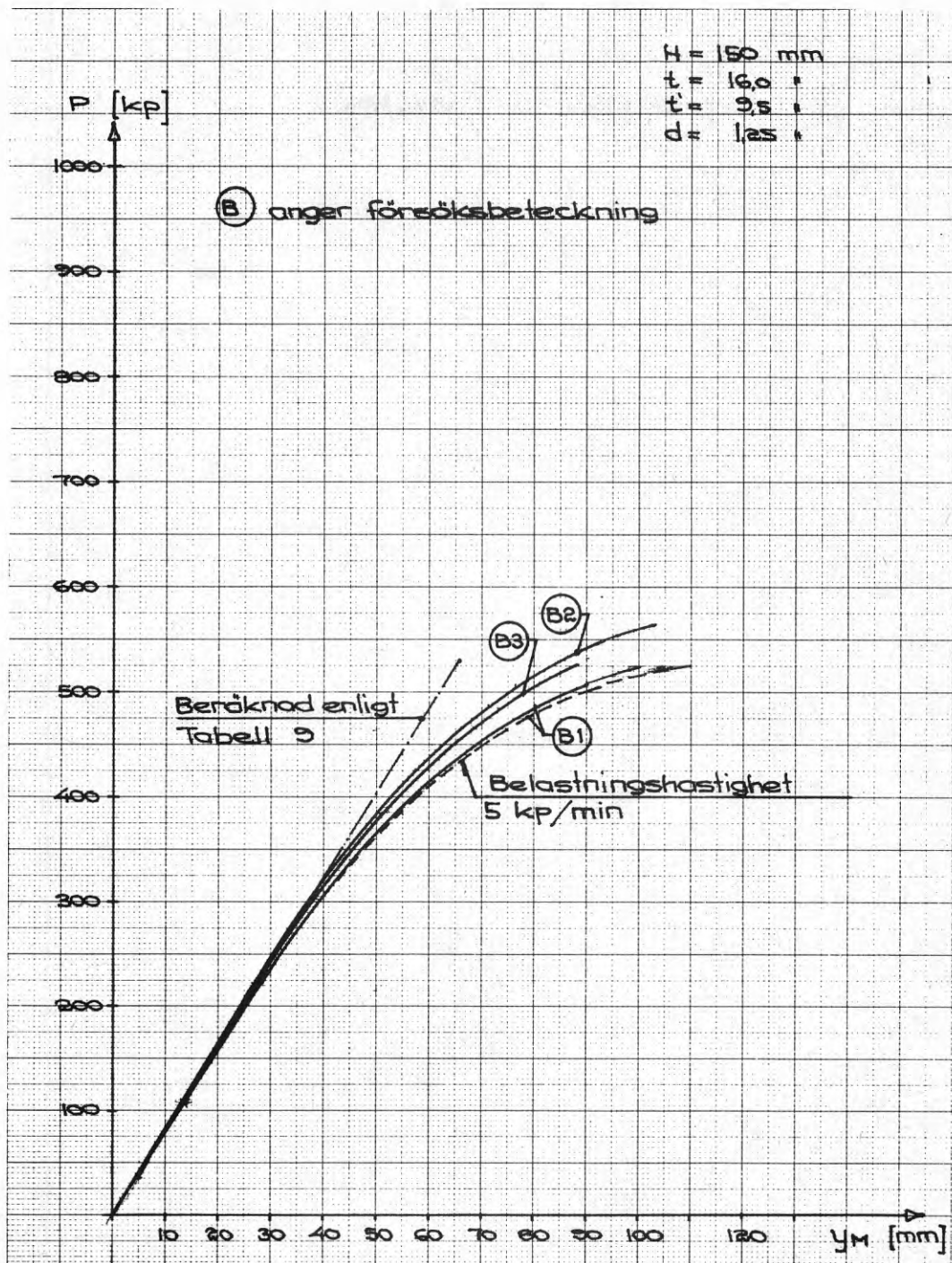


FIG 60. Nedböjningsdiagram. Serie B

$H = 150 \text{ mm}$
 $t = 17,5 \text{ ''}$
 $t' = 10,0 \text{ ''}$
 $d = 0,8 \text{ ''}$
 $P \text{ [kp]}$

1000

800

600

400

200

100

0

Ⓚ anger försöksbeteckning

Beräknad enligt
Tabell 9

Ⓚ1
Ⓚ3

Belastningshastighet
5 kp/min

Ⓚ2

300

200

100

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

120

 $y_M \text{ [mm]}$

FIG 61. Nedböjningsdiagram. Serie D

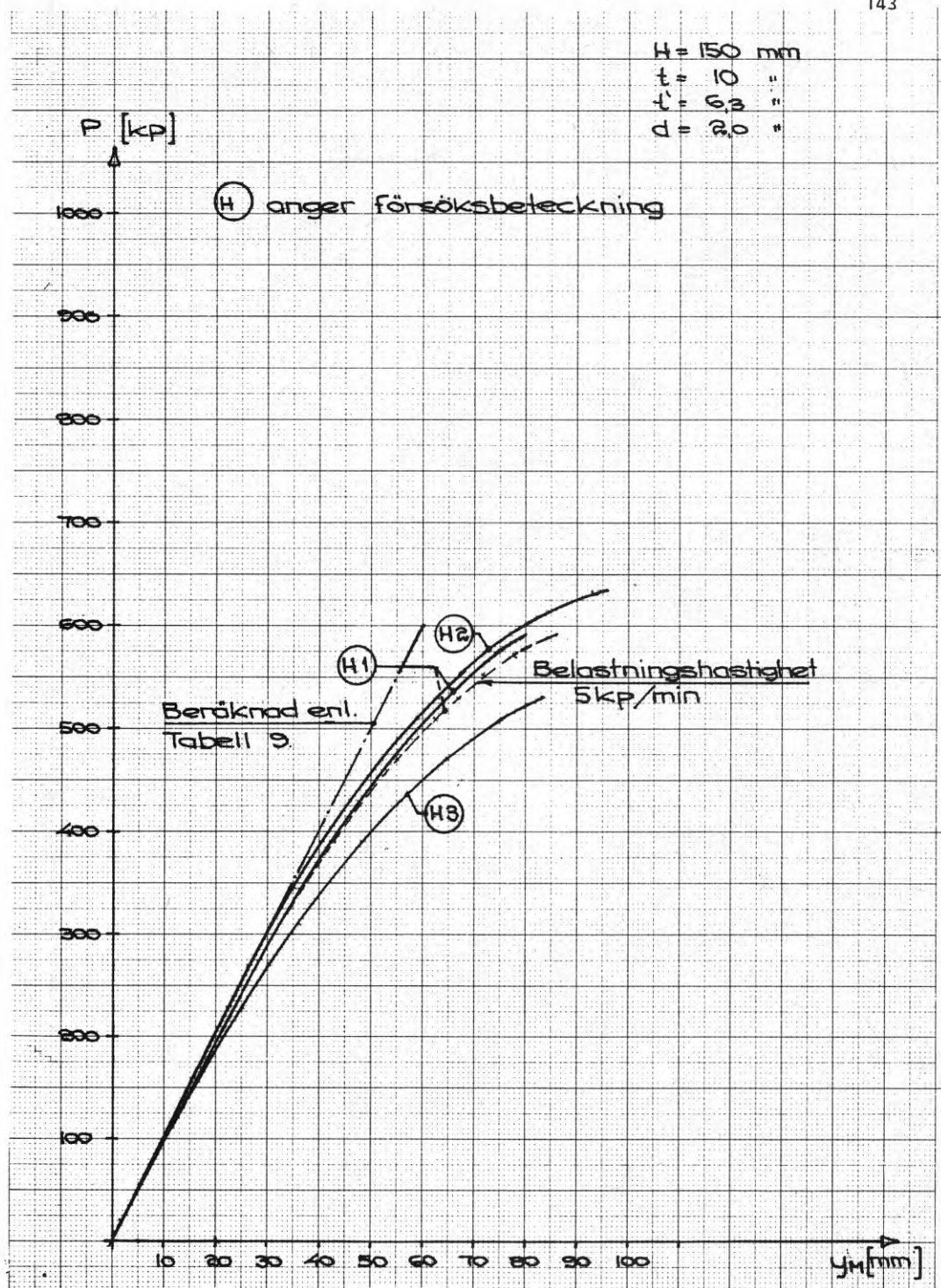


FIG 62. Nedböjningsdiagram. Serie H

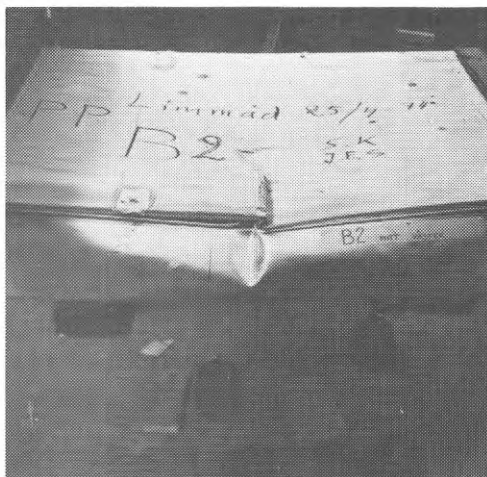


BILD 20. Kasset B2 efter brott

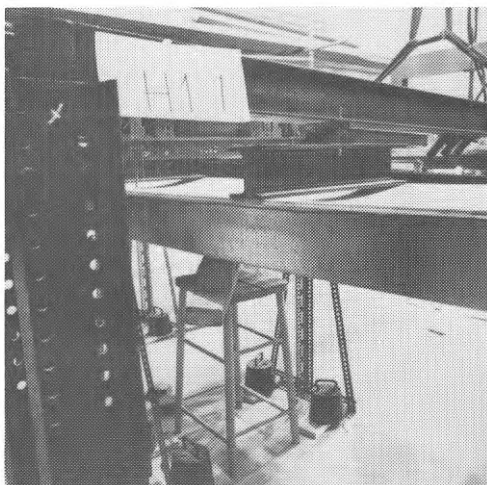


BILD 21. Kasset H1 vid belastning

Trots den mindre effektiva skiktjockleken motsvarande ca 67 % jämfört med bärverken inom serie B, så var brottlasten genomgående något större. Plåtmaterialens arbetskurvor från båda serierna är till utseendet lika och i det närmaste jämförbara.

Styrregelns dimension var 24 x 36 på lågkant och förorsakade vid belastning den karakteristiska längsgående skiktnedböjningen som innan brott uppgick till ca 80-100 mm (BILD 21). Kassett H2 utrustades med två styrreglar placerade 150 mm från liven, vilket förhållade brottet en aning (jfr FIG 62).

På grund av skiktets längsgående nedböjning koncentrerades dess påkänningar till randpartierna. Orsaken har tidigare berörts och berodde i princip främst på en motsvarande effekt som i samband med upplagsvillkoret (2.8) redovisas för underflänsen.

Skiktets och limflänsens lastupptagning var ungefär lika stora inom påkänningarnas elastiska område. På grund av de höga randpåkänningarna i skiktet och motsvarande stukningar i limflänsarna överskreds elasticitetsgränsen i plåtmaterialen redan i ett relativt tidigt belastningsskede. Utanför elasticitetsområdet minskades limflänsens lastupptagande bidrag samtidigt som skiktets ökade i relation till den påförda lasten, till dess att plåtpåkänningen i limflänsen överskred sträckgränsen. Vid en ytterligare pålastning upphörde ökningen av limflänsens lastupptagning, flytning uppstod i plåtmaterialen och skiktet påkänningen ökade i motsvarande grad, till dess att det karakteristiska böjtryckbrottet inträdde i plywooden. BILD 22 visar brottet för kassett H1 koncentrerat till randpartierna närmast liven.

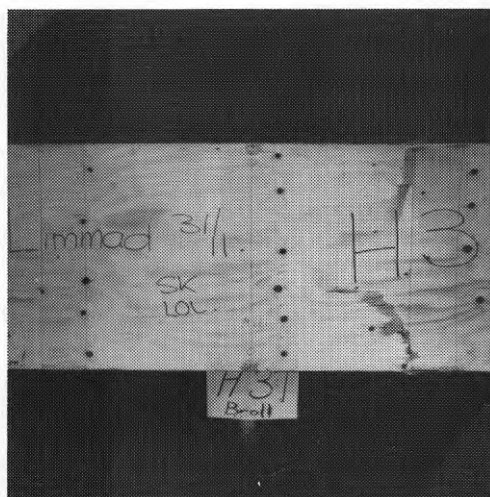


BILD 22. Kassett H3 efter brott

4.4.5 Försöksserie G

För att närmare studera beteendet vid bärverk med stort H/d-förhållande provades kassetterna G1 och G2, vars profilhöjd och nominella plåttjocklek var $H = 250$ mm resp. $d = 0,8$ mm. Styrreglarna 21×31 mm placerades på högkant och skiktens nominella tjocklek var $t = 17,5$ mm resp. $t = 16$ mm. Plåtmaterialens arbetskurvor anger elasticitetsmodulen $E_a = 21,8 \cdot 10^4$ [N/mm²] resp. $E_a = 22,6 \cdot 10^4$ [N/mm²] och sträckgränspåkänningen $\sigma_s = 408$ [N/mm²] resp. $\sigma_s = 399$ [N/mm²].

Kassett G1 utrustades med töjningsgivare i likhet med tidigare beskrivna bärverk, varvid påkänningsdiagrammen [FIG 120 → FIG 125] (appendix 2) utarbetades enligt samma metod som för dessa. Påkänningsfördelningen i undre flänsen [FIG 120] överensstämmer i det närmaste med den enligt böjningsteorin beräknade - det linjära sambandet mellan bärverkets nedböjning och belastning i första belastningsskedet [FIG 63] och de sammanfallande kurvorna (den uppmätta och den beräknade) för underflänsens uppböjning inom påkänningarnas elastiska område [FIG 64] tyder på att effekten av eventuella initialpåkänningar i plåten var obefintlig.

Främsta orsaken till undre flänsens ökande randpåkänningar i förhållande till de beräknade utanför påkänningarnas elastiska område har tidigare förklarats och var i princip följande: Bärverkets reducerande böjstyvhet ökade dess nedböjning i förhållande till den påförda lasten [FIG 63]. Underflänsens uppböjning δ_M är en funktion av bärverkets nedböjning y_M och ökar i en viss relation till denna [FIG 64], vilket resulterade i en påkänningsfördelning som koncentrerade sig till undre flänsens randpartier.

Redan vid ett relativt tidigt belastningsskede konstaterades en markant och karakteristisk utknäckning av livet på grund av skjuvpåkänningarna närmast upplagen (BILD 23), vilket slutligen ledde till brott (BILD 24). Den främsta orsaken till bärverkets större uppmätta än beräknade nedböjning inom påkänningarnas elastiska område [FIG 63] berodde tydligen på utknäckningens inverkan.

Det relativt tidiga brottet, förorsakat av skjuvpåkänningarna vid upplagen, hindrade möjligheten till ett närmare studium av livens beteende vid ren göjning. För att belysa problemet kompletterades kassett G2 med förstärkningsplåtar närmast upplagen för undvikande av instabilitet på grund av skjuvningen [FIG 36]. För hindrande av underflänsens uppböjning fastlimmades till denna en 100 mm tjock böjningsstyv skiva av cellplast (jfr FIG 36), vars indirekta verkan befrämjade risken för livens utknäckning på grund av normalpåkänningen. Den erhållna, i princip jämnt fördelade töjningen i undre flänsen bibehöll i motsats till skiktets och limflänsens stukning det linjära deformation-belastningssambandet även i det högre belastningsskedet. Nollinjeavståndet från u.k. liv minskade, varvid den tryckta delen av livet ökade och därmed även risken för utknäckning.

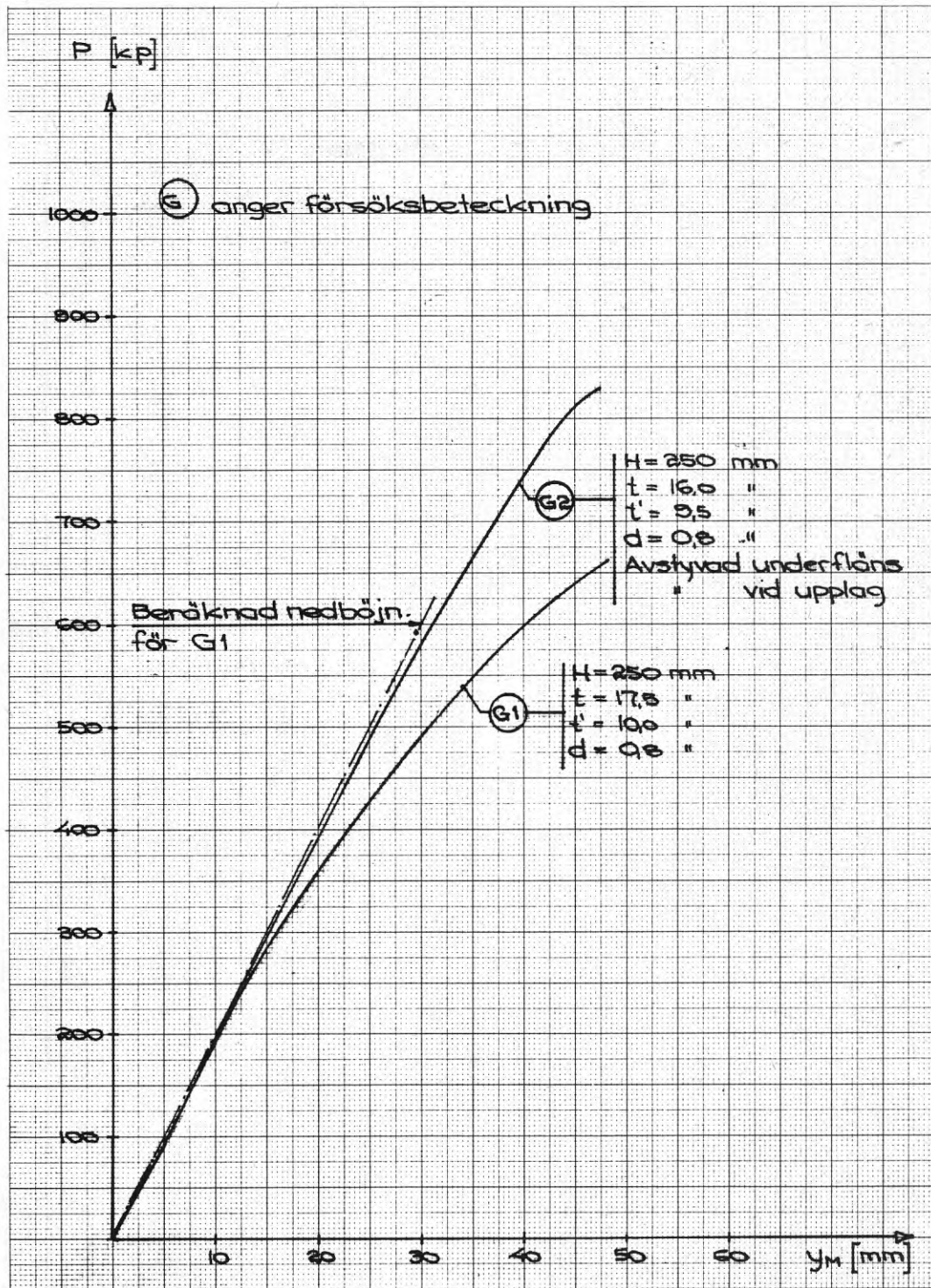


FIG 63. Nedböjningsdiagram. Serie G

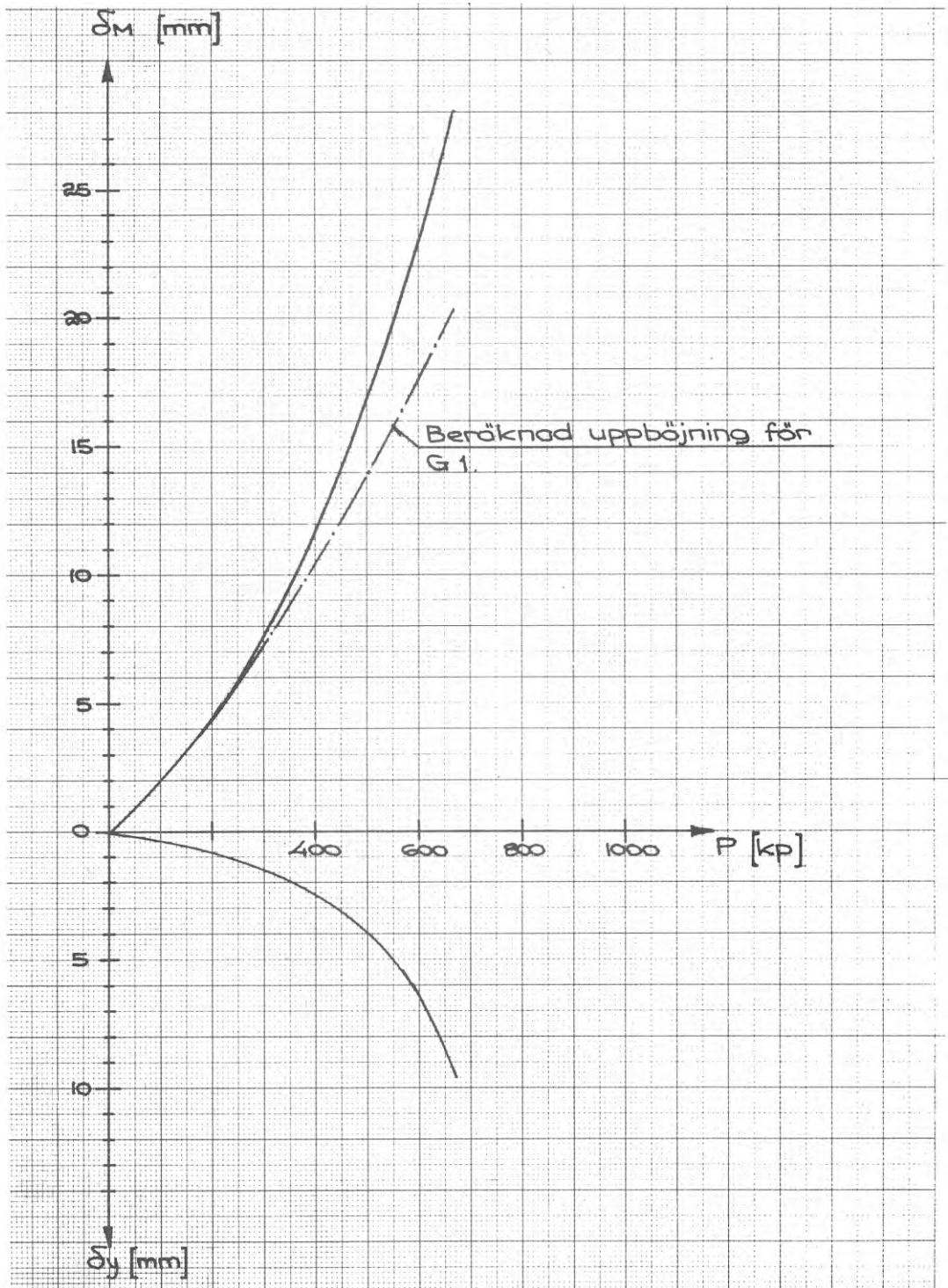


FIG 64. Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kasset G1

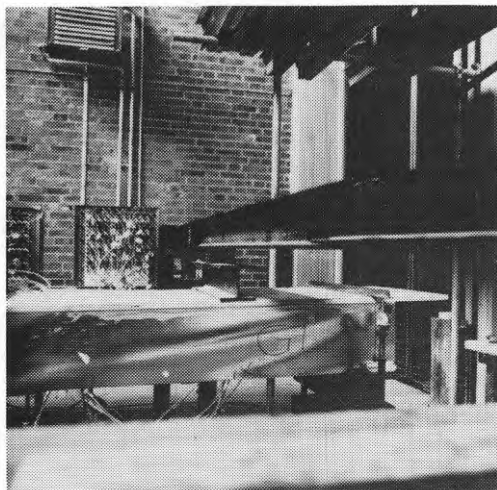


BILD 23. Livbuckling vid kasset G1:s upplag

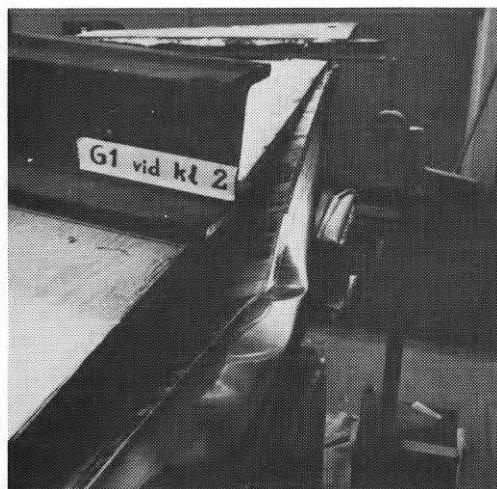


BILD 24. Kasset G1 efter brott

Med beaktande av plåtmateriallets arbetskurva och det i det närmaste linjära sambandet mellan bärverkets nedböjning y_M och belastningen P (jfr FIG 63) nästan helt upp till brott tyder detta på dels en effektiv avstyvning av undre flänsen (jfr FIG 65), dels ett linjärt deformations-påkänningsförlopp i skiktet.

I det högre belastningsskedet konstaterades markanta bucklor i livet vid bärverkets mittersta parti. Dessa ökade i takt med pålastningen och föranledde slutligen till brott, medan plywooden fortfarande var fullt intakt (BILD 25 och BILD 26). En grov uppskattning jämfört med TABELL 9 ger som resultat att påkänningarna i undre flänsen och i limflänsen långt underskred resp. just hade passerat sträckgränsen $\sigma_s = 399 \text{ N/mm}^2$ när brottet inträffade.

4.4.6 Instabilitet på grund av livplåtutbuckling

De härledda uttrycken och ekvationerna för beräkning av bärverk med samverkande blandkomponenter grundar sig på ideella förutsättningar. För att lättbärverket skall kunna motstå transversalbelastningar fordras förutom böjstyvhet en anpassad säkerhet mot instabilitet på grund av livplåtutbucklingen.

Som ovan redovisats för kassett G1 konstaterades redan i ett relativt tidigt belastningsskede markanta diagonalutformade bucklor i de skjuvpåkänningspåverkade livet vid bärverkets upplag (jfr BILD 23). Utbucklingen, som ökade i takt med belastningsökningen, resulterade slutligen i brott vid laststeget $P = 668 \text{ kp}$.

Plåtens uppmätta medeltjocklek var $d = 0,74 \text{ mm}$ varvid:

$$H/d = 337,8.$$

För ledad infästning längs flänsarna är den kritiska skjuvbucklingspåkänningen vid elastiska förhållanden:

$$\tau_{ki} = 5,34 \cdot 18,98 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,74}{250}\right)^2 = 8,88 \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

vilket motsvarar skjuvkraften:

$$P_{ki} = 8,88 \cdot 250 \cdot 0,74 \cdot \frac{1}{10} = 164,3 \text{ kp}.$$

Vid brott var den verkliga skjuvkraften:

$$P_B = 668 \cdot 1,5 = 1002 \text{ kp}$$

och skjuvpåkänningen:

$$\tau_B = 6,1 \cdot \tau_{ki}.$$

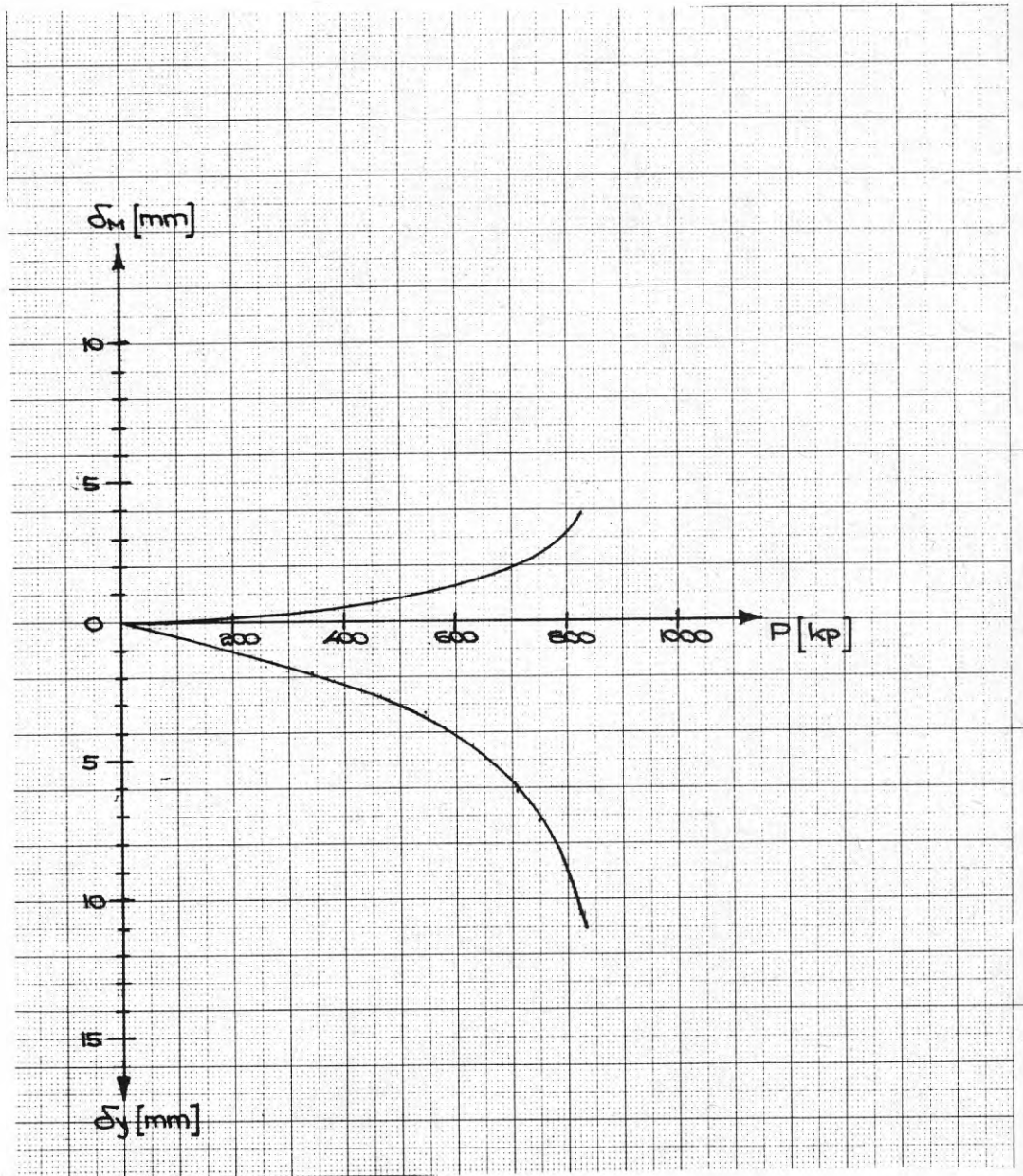


FIG 65. Uppböjningen δ_M i underfläns och nedböjningen δ_y i skikt för $x/L = 0,5$. Kasset G2

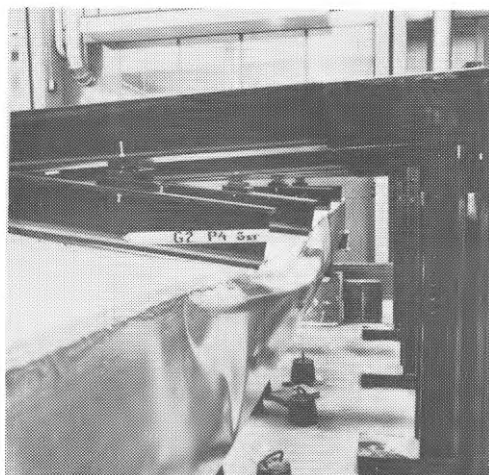


BILD 25. Kassett G2 efter brott

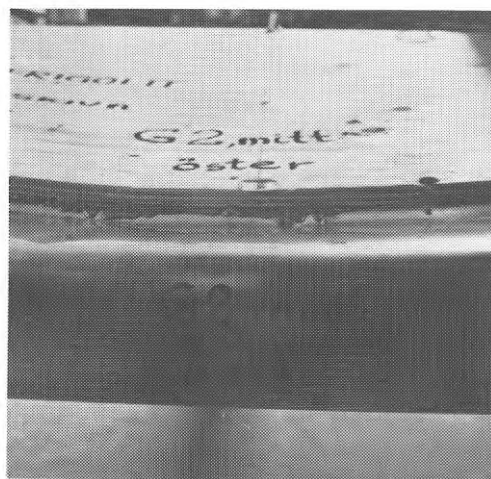


BILD 26. Kassett G2:s liv efter brott

Även för kassett G2 med avstyvade liv närmast upplagen (jfr FIG 36) observerades redan i ett relativt tidigt belastningsskede longitudinella bucklor i livet vid bärverkets mittersta parti. Dessa försakade av böjpåkänningen, ökade i takt med lastökningen och resulterade slutligen i kollaps. Belastningen var $P = 831$ kp och påkänningen i limflänsen uppskattades till

$\sigma_{ai} \approx 400$ [N/mm²] motsvarande plåtmateriallets ungefärliga sträckgränspåkänning.

För ledad infästning längs flänsarna är den ideella kritiska böjbucklingspåkänningen:

$$\sigma_{ki} = 23,9 \cdot 18,98 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,74}{250}\right)^2 = 39,7 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Vid brott var den verkliga böjpåkänningen:

$$\sigma_B \approx 10 \cdot \sigma_{ki}.$$

Följaktligen kan konstateras att bärverkets lastupptagningsförmåga är väsentligt större än den som motsvarar livplåtbucklingen enligt den klassiska elasticitetsteorin. Membrankrafter aktiveras och stabiliserar plattfältet. Livets förmåga att i utbucklat tillstånd uppta belastningsökningar ökar i relation till den kritiska bucklingspåkänningen med tilltagande slankhetstal H/d . Det relativt styva skiktet i den tryckta zonen bidrar även till en avstyvande verkan för den tryckspänningspåverkade livavstyvningen.

För bärverk av aktuell typ är därför effekten av överkritiskt område påfallande, varför den konventionella dimensioneringsmetodiken ej ger uttryck för den verkliga lastupptagningsförmågan. Förslagsvis skulle en tillåten bucklingspåkänning uttryckas som en funktion av den kritiska påkänningen och slankhetsförhållandet H/d .

4.5 Praktiska erfarenheter

För att närmare studera den praktiska användningen av lättbärverk med samverkande blandkomponenter tillverkades i samband med utbyggnaden av Plywoodfabriken i Otterbäcken 12 m långa takkassetter, vars tvärsektion framgår ur FIG 66.

Varje element hade bredden 1200 mm motsvarande plywoodskivornas standardbredd. Profilen utgjordes av 1,7 mm förzinkad plåt med standardbredden 1070 mm.

Relationen mellan profilens höjd- och basmått valdes med hänsyn till ett statistiskt optimalt utnyttjande. Kassetterna utformades med utkragande skikt och sammanfogades med en skarvremsa av plywood som även fungerade som skiktavstyvning.

Byggherren och entreprenören redovisar positiva erfarenheter främst gällande ekonomin på grund av dels den uppnådda stora spännvidden och tillhörande enkelt stomsystem, dels den rationella monteringen.

BILD 27 visar en kassett under montering och BILD 28 det färdigmonterade taket sett inifrån.

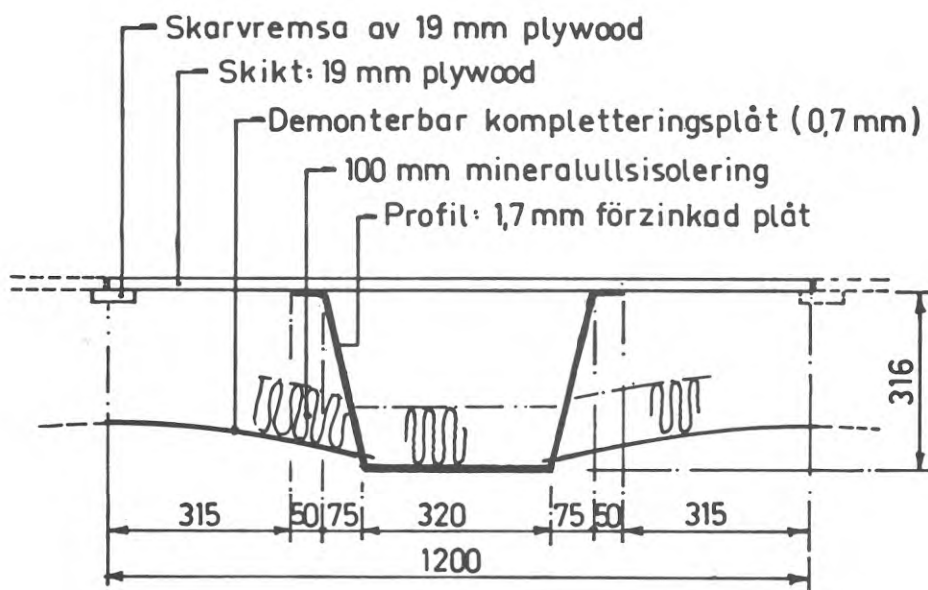


FIG 66. Takkassett vid utbyggnaden av Plywoodfabriken i Otterbäcken - tvärsektion

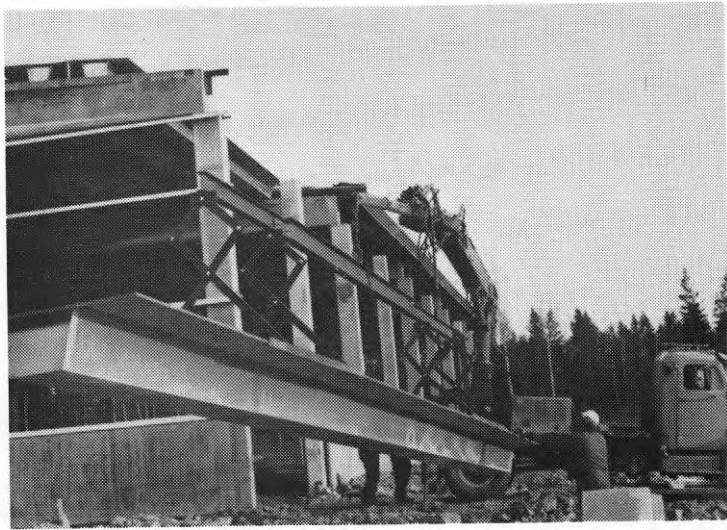


BILD 27. Kasset under montering

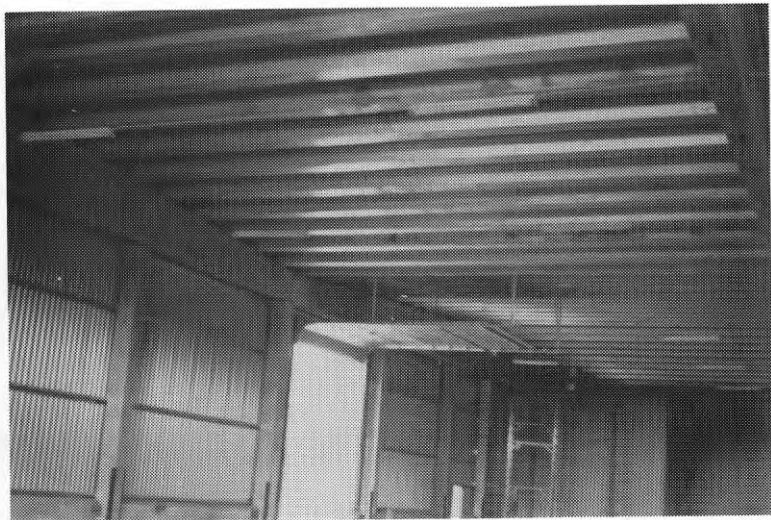


BILD 28. Takinteriör

5 SAMMANFATTNING

I bärverk uppbyggt av samverkande blandkomponenter utgör förbandet mellan de olika delmaterialen ett av de huvudproblem som kräver uppmärksamhet (4.3.3). Vid limning av stål och trä har försöksresultaten visat att en tidsödande avzinkning och absolut rengöring av metallytan är onödig. Denna skall emellertid vara fri från smuts och fett innan limningen sker.

Vid ren skjuvning är limfogen överdimensionerad i förhållande till den maximala skiktskjuvpåkänning som plywooden kan uppta. Brottet kännetecknas därför av att limskiktet och en del av trämaterialiet sitter kvar på metallytan (jfr BILD 18). Däremot har limfogen liten fläckhållfasthet. Brottet sker mera momentant och karakteriseras av att hela limskiktet släpper från metallytan (jfr BILD 6). Vid utformningen av bärverkets uppbyggnad måste därför tillses att en eventuell lyftkraft mellan limfläns och skikt undviks. Hos bärverk där utbuckling av skiktet i longitudinell vågform befaras uppstå vid belastning bör vid vissa omständigheter åtgärder vidtagas. Lämpligen avstyvas skiktet närmast limflänsarna eller kompletteras i u.k. med styrreglar (jfr FIG 1). Tvärsnittskraften i skiktet påverkar reglarna excentriskt, ger dessa en nedböjning längs hela bärverkets längd och hindrar uppkomsten av ovannämnda lyftkrafter. Styrreglarnas dimension och placering bestäms i relation till skiktets böjstyvhet i bärverkets tvärriktning. En för stor nedböjningseffekt ökar skiktpåkänningens koncentration till randpartierna och reducerar bärverkets böjstyvhet och lastupptagningsförmåga - i princip beroende på den motsvarande effekt som i samband med upplagsvillkoret redovisas för underflänsen (jfr försöksserie H, avsnitt 4.4.4).

Koncentration av påkänningarna vid randpartierna var en genomgående tendens hos samtliga försökskassetter, vars utformning får betraktas som olämplig. En utkragning av skiktet över liven och samtidigt en reducering av avståndet mellan dessa skulle dels öka skiktets böjstyvhet i tvärriktningen och minska nedböjningen och de koncentrerade påkänningarna, dels bidra till en bättre spridning av dessa och således fördröja brottet.

Vid dimensionering av det lätta bärverket bör hänsyn tagas till eventuella initialpåkänningar i plåtmaterialiet och den effekt dessa utövar på underflänsens påkänningsfördelning och bärverkets böjstyvhet. Initialpåkänningarna, uppkomna i samband med valsningen, framkallar bucklor i det obelastade bärverkets mittersta underflänsparti (jfr FIG 20). I första belastningsskedet har denna del av flänsen begränsad lastupptagningsförmåga och bärverkets böjstyvhet är motsvarande mindre. Vid pålastning får underflänsen, på grund av bärverkets böjdeforimation, en större medverkande bredd och en motsvarande större böjstyvhet.

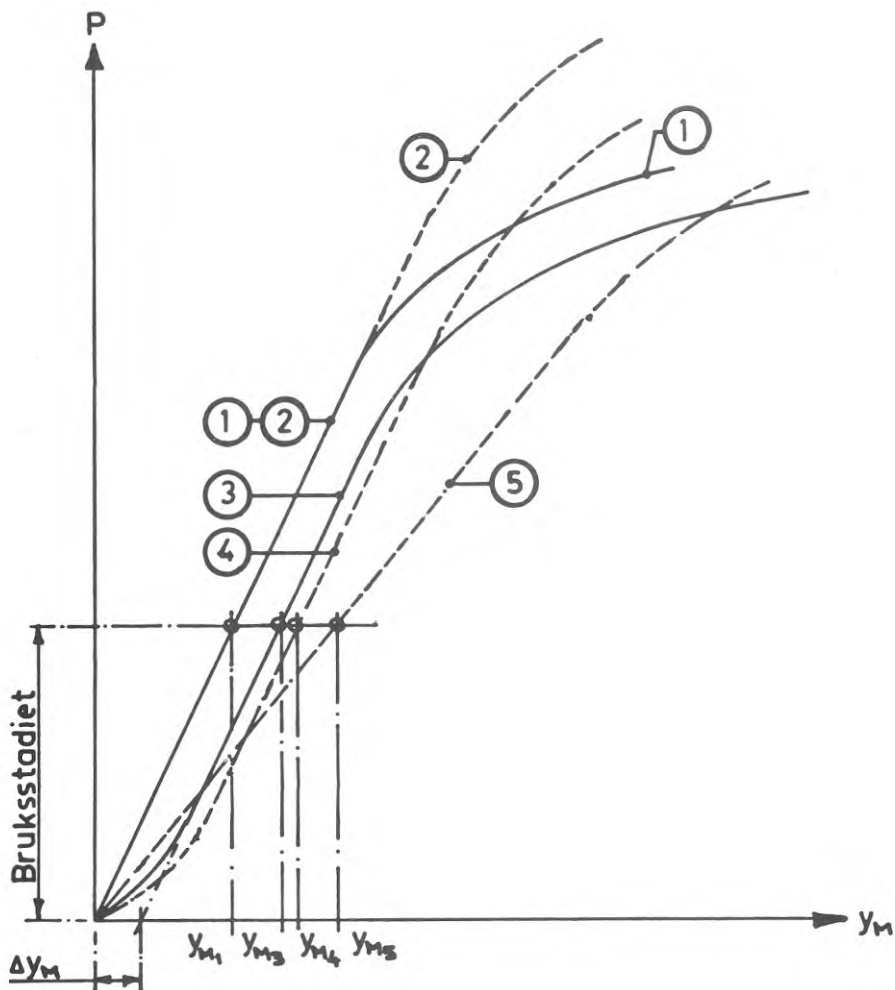
I motsats till bärverk utan initialpåkänningar i plåten och på grund av att underflänsens medverkande bredd varierar, existerar inget linjärt samband mellan nedböjningen y_M och belastningen P i det första belastningsskedet utan bärverket får ett nedböj-

ningstillskott Δy_M (jfr FIG 50). Innan underflänsens medverkande bredd är maximal och bucklorna utjämnade, har randpartierna erhållit påkänningar som under vissa omständigheter långt överskrider de enligt böjningsteorin beräknade (jfr FIG 75). Relationen mellan bärverkets nedböjning och underflänsens uppböjning kan dessutom, på grund av nedböjningstillskottet Δy_M , förorsaka en ytterligare ökning av randpåkänningarna. Dessa kan i verkligheten antaga värden som i ett visst belastningsskede oförutsett överskrider sträckgränsen och reducerar bärverkets böjstyvhet och lastupptagningsförmåga (jfr FIG 113).

Den osäkerhetsfaktor initialpåkänningarnas inverkan utgör för underflänsens påkänningsfördelning avhjälpas lämpligen i samband med dimensioneringen. Förslagsvis uppskattas en begränsad medverkande bredd hos underflänsen, alternativt beaktas problemet vid uppställningen av böjningsteorins upplagsvillkor (2.8). FIG 67 visar i princip alternativa förhållanden mellan bärverkets nedböjning y_M och belastningen P upp till brott. Figuren anger dels de verkliga, dels de enligt böjningsteorin beräknade förhållandena. Bortsett från det nedböjningstillskott Δy_M bärverket erhåller på grund av initialpåkänningarnas indirekta inverkan visar försöksresultaten att det linjära sambandet mellan nedböjningen y_M och belastningen P överensstämmer med det enligt böjningsteorin beräknade inom tvärsnittspåkänningarnas elastiska område. Påkänningarnas ökande koncentration till randpartierna utanför det elastiska området och motsvarande låga brottgräns motiverar en reducering av skiktets och underflänsens medverkande bredd vid dimensioneringen. Däremot skulle denna kunna ge ett ogynnsamt och ej riktigt nedböjningsresultat i bruksstadiet (jfr FIG 67). I stället rekommenderas en beräkningsgång, där böjningsteorin strikt följs och att hänsyn tas till eventuella initialpåkänningar i plåten vid uppställandet av upplagsvillkoret (2.8). Vidare anpassas delmaterialens tillåtna brukspåkänningar i relation till skiktets påkänningsfördelning i brottstadiet. En jämnare fördelning höjer brottlasten och motiverar för delmaterialen motsvarande högre tillåtna påkänningar i bruksstadiet.

Bärverkets lastupptagningsförmåga är väsentligt större än den som motsvarar livplätbucklingen enligt den klassiska elasticitetsteorin. Membrankrafter aktiveras och stabiliserar plattfallet, varför effekten av överkritiskt område är påfallande. Livets förmåga att i utbucklat tillstånd uppta belastningsökningar ökar i relation till den kritiska bucklingspåkänningen med tilltagande slankhetstal. En tillåten bucklingspåkänning bör således uttryckas som en funktion av den kritiska påkänningen och slankhetsförhållandet H/d (4.4.6).

Slutligen bör påpekas att bärverkets lastupptagningsförmåga till övervägande del beror på dess utformning. Utan närmare redogörelse kan emellertid nämnas att skiktets utkragning förbi livet och ett mindre avstånd mellan dessa dels ger en bättre skikt-påkänningsfördelning, dels minskar den effekt eventuella initialpåkänningar i plåten utövar vid en smalare underfläns.



- Kurva ① : Verklig nedböjning utan inialpåkning i plåten
 —" ② : Beräknad —" —" —" —" —" —"
 —" ③ : Verklig —" —" med —" —" —" —"
 —" ④ : Beräknad —" —" —" —" —" —"
 —" ⑤ : —" —" —" utan —" —" —" —"
 men med begränsad medverkande bredd hos skikt och underfläns.

FIG 67. Alternativa nedböjningskurvor i princip - dels verkliga, dels beräknade enligt böjningsteorin

Förutsättningar och slutsatser:

Syftet med föreliggande arbete har varit att framlägga ett grundläggande beräkningsunderlag för dimensionering av fritt upplagda kassettbärverk med blandkomponenter, företrädesvis plywood och plåt, samt att verifiera beräkningsresultaten genom experimentella undersökningar.

Avhandlingen har därvid begränsats till att omfatta kassettbärverk med fri uppläggning och jämnt fördelad belastning. Med höghållfast stålplåt och plywood som delmaterial i blandkomponenten har arbetet koncentrerats till fallet, att påkänningarna i bruksstadiet ligger inom det elastiska området (modulstadium A).

Till grund för analytisk behandling ligger en beräkningsmodell byggd på följande villkor:

- 1) jämviktsvillkoret
- 2) böjstyvhetsvillkoret
- 3) momentvillkoret
- 4) tvärsnittsvillkoret
- 5) upplagsvillkoret.

Den analytiska behandlingen innehåller följande grundläggande antaganden:

- att skiktet är helt böjningsstyvt i bärverkets tvärriktning,
- att "shear-lag"-effekten i skiktet och undre flänsen är försumbar,
- att plåten i undre flänsen är initiellt spänningsfri,
- att livets effektiva höjd är beroende av böjnormalpåkänningarna och livens bucklingsbenägenhet,
- att böjstyvheten, nollinjeavståndet och undre flänsens medverkande bredd är affina med böjningsmomentet i bärverkets längdriktning
- att underflänsens uppböjningskraft följer en sinushalvvåg i bärverkets tvärriktning samt
- att tvärsnitten vid upplagen ($x = 0$ och $x = L$) förblir odeformerade efter pålastningen.

Jämförelsen mellan resultat av den analytiska behandlingen och de experimentella undersökningarna visar en tillfredsställande överensstämmelse i fråga om påkänningsfördelning och formändringar.

Beräkningsmodellen svarar bäst mot erhållna provningsresultat inom belastningsområdet, där formändringarna i plywoodskiktet är av sådan storleksordning att de inte påverkar påkänningsfördelningen över tvärsnittet i någon större grad. Detta belastningsområde svarar approximativt mot för bärverket aktuell brukslast.

Inom belastningsområdet, där på grund av deformationer i plywood-

skiktet påkänningsfördelningen över tvärsnittet förändras, avtar beräkningsmodellens skärpa. Detta beror på att plastiska formändringar i randpartier av plywoodskiktet, orsakade av spänningskoncentrationer, medför en reduktion av bärverkets böjstyvhet. Därigenom erhålls en ökning av nedböjningen samt en ökad uppböjning av underflänsen, innebärande en större ojämnhet i påkänningsfördelningen. Detta fenomen har ingen täckning i den valda beräkningsmodellen på grund av att plywoodskiktet har förutsatts vara böjstyvt i bärverkets tvärriktning.

En annan styvhetspåverkande effekt, som inte beaktats i beräkningsmodellen, är närvaron av egenspanningar i plåtmaterialen, som resulterar i ett nedböjningstillskott.

Sammanfattningsvis kan konstateras att beräkningsmodellen väl återspeglar bärverkets beteende i bruksstadiet.

Beroende på den i försöken valda tvärsnittsutformningen och därav resulterande avvikelser från ideella antaganden avtar beräkningsmodellens skärpa inom området för större belastningar. Ett med hänsyn till nämnda hållfasthetspåverkande faktorer utformat tvärsnitt kan förväntas ge en bättre anpassning till beräkningsmodellen och således en ökad lastupptagningsförmåga.

Framtida forskningsuppgifter:

Med hänsyn till ovan angiven avgränsning av problemkomplexet samt resultaten från de experimentella undersökningarna bör den fortsatta forskningen inom området inriktas på följande problemområden:

Den grundläggande böjningsteorin grundar sig delvis på ideella förutsättningar. Teorin tar ej hänsyn till initialpåkänningar i plåtmaterialen uppkomna i samband med valsningen. Dessa påkänningar framkallar bucklor i det obelastade bärverkets mittersta underflänsparti. I första belastningsskedet har denna del av flänsen begränsad lastupptagningsförmåga och bärverkets böjstyvhet är motsvarande mindre. Bärverket och underflänsens randpartier erhåller ett nedböjnings- resp. påkänningstillskott som överskrider de enligt böjningsteorin beräknade värdena.

Initialpåkänningarnas effekt får större aktualitet vid relativt stora plana ytor. Det vore därför önskvärt att finna en tillverkningsmetod som begränsar initialpåkänningarna i plåten.

Vidare förutsätter teorin ett böjningsstyvt skikt i bärverkets tvärriktning och en konstant påkänningsfördelning längs tvärsnittet. I realiteten koncentreras tvärsnittspåkänningarna till skiktets randpartier. Påkänningskoncentrationen accentueras med ökande belastning. Orsaken därtill är främst det tryckta skiktets utbuckling. En utformning av bärverket med målsättningen att minska skiktets utbuckling och påkänningskoncentration kan öka lastupptagningen avsevärt. Problemet kartläggs lämpligen med hjälp av praktiska försök och är en viktig uppgift vid den fortsatta forskningen.

Försöksresultaten konstaterar att bärverkets lastupptagningsförmåga är väsentligt större än den som motsvarar livplåtbucklingen

enligt den klassiska elasticitetsteorin. Även stabilitetsproblem på grund av livplåt buckling utgör en viktig frågeställning för aktuella bärverk och är en uppgift som i fortsättningen bör prioriteras.

Slutligen återstår frågeställningar som motiverar ett närmare studium - nämligen böjningsteorins giltighet vid olika lastkombinationer, bärverkets beteende vid långtidsbelastning och klimatändringarnas inverkan på lastupptagningsförmågan.

LITTERATUR

Jens-Fredrik Larssen, Lättbärverk med samverkande blandkomponenter (Statens råd för byggnadsforskning). Rapport 75:73.

Paul Kuhn, Stresses in aircraft and shell structures.
Mc Graw Hill - 1956.

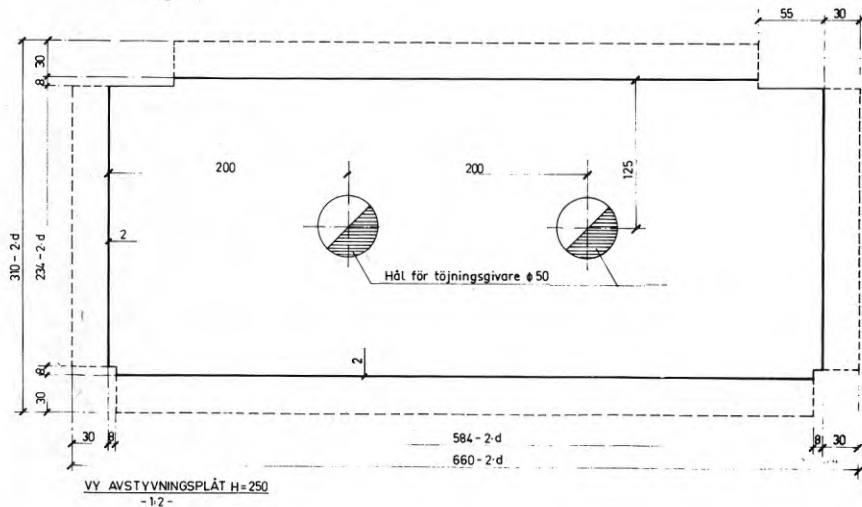
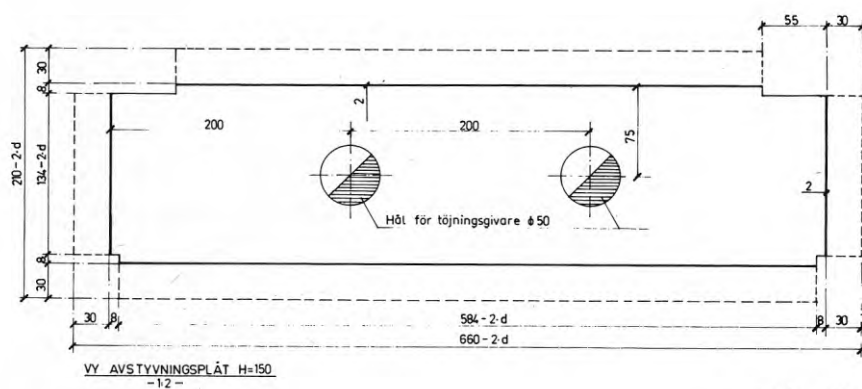
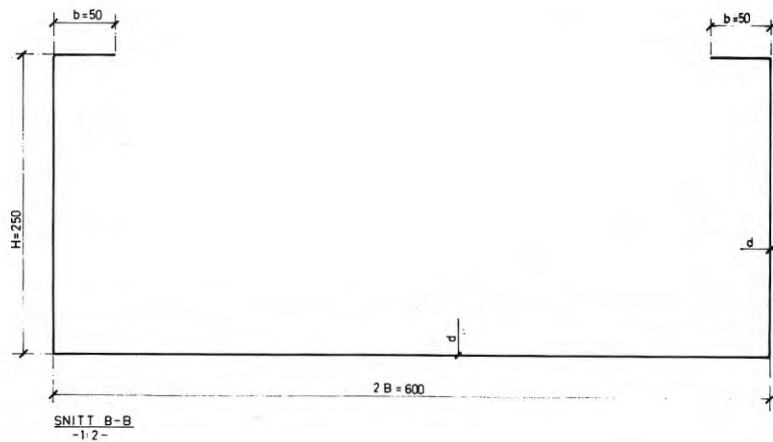
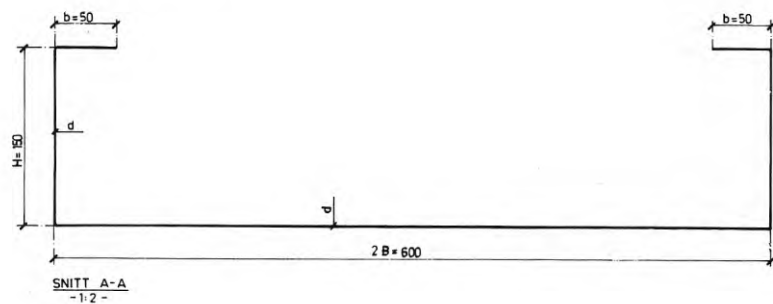
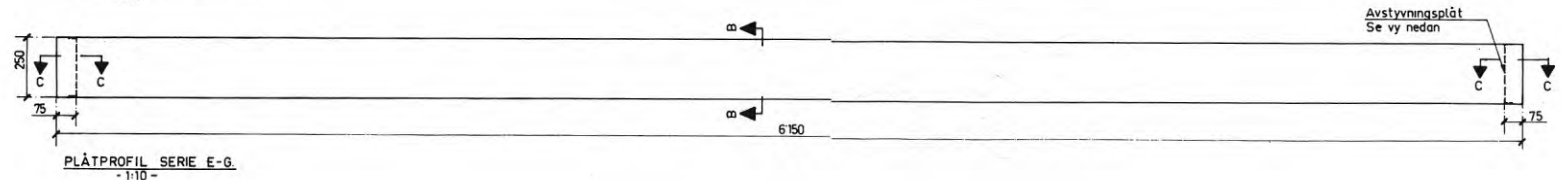
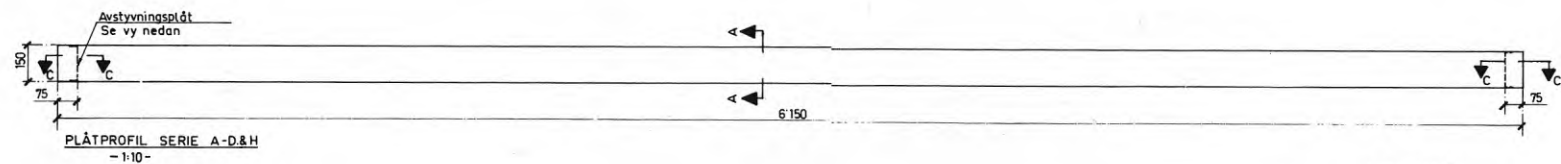
Göran Larsson och Georg Wästlund, Plywood som konstruktionsmaterial (Statens kommitté för byggnadsforskning). Meddelande nr 21, 1953

Heikki Rautakorpi, An analysis of constructional plywood (Statens Tekniska Forskningsanstalt). Helsingfors, 1971.

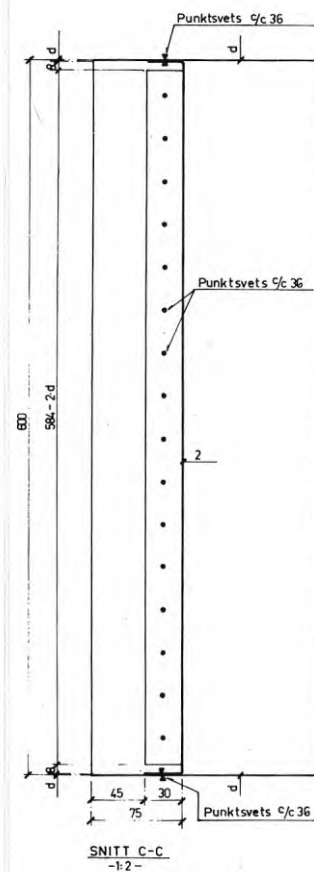
B-O Ivansson, Limning av stål mot trä (Institutionen för Byggnadsteknik, KTH).

Jens-Fredrik Larssen, Beräkningsmetod för spikade balk- och lådkonstruktioner (Väg- och Vattenbyggaren 1-2/74).

APPENDIX 1. Ritn. 1-3.
(Obs! Skalngivelse stämmer ej.)



Serie	Antal kassetter	Plåtprof höjd=H	Plåtprof tjockl=d	Plywood tjockl=t	Antal plåtprof
A & H	2x3=6	150	2,0	19 alt 10	
B	3	150	1,25	16	
C	3	150	1,0	19	
D	3	150	0,8	17,5	3x5=15
E	3	250	1,25	16	
F	3	250	1,0	16	
G	2	250	0,8	17,5	8



ANMÄRKNING

RITNINGREFERENSER

- BYTN. NR. BEMÄRKNING
- 2 Plywood
 - 3 Lastuppställning, Töjningsgivare

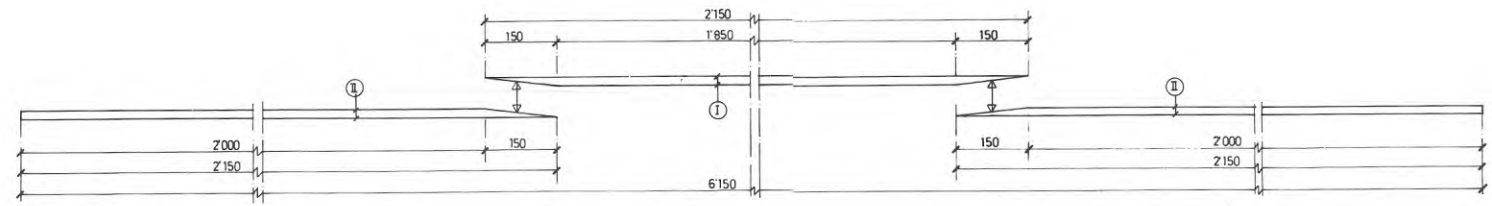
REV. AVSEENDE. SIGN.

CIVILINGENÖR
J.-FR. LARSSEN
KONSULTERANDE INGENJÖRSBYRÅ AB
BIRGER JARLSGATAN 62 114 28 STOCKHOLM
TELEFON 11 20 24

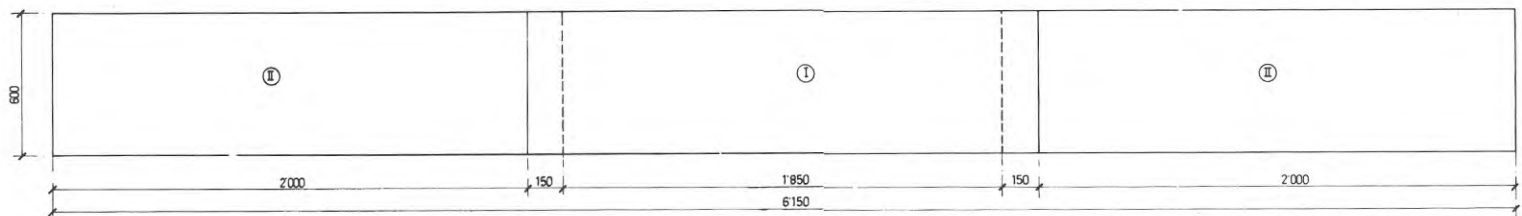
BYT. LÖ KONSTR. L SKALA: 1:10, 1:2
STYCKEN DEN 1973.12.20

Försöksserie till:
LÄTTBÄRVERK MED SAMVER-
KANDE BLANDKOMponenter.
Plåtprofiler.

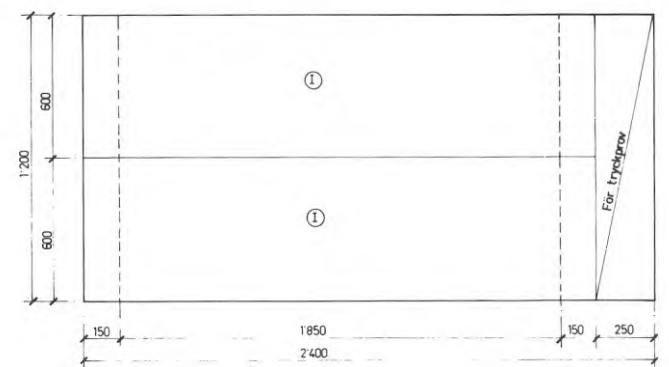
PROJ. NR.: 7303
BYTN. NR.: 1.



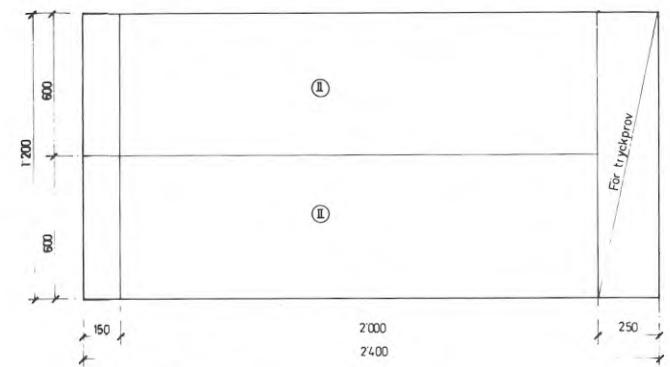
LÄNGDSEKTION
-1-5-



PLAN AV YTSKIKT
-1-10-



PLYWOODSKIVA I
-1-10-



PLYWOODSKIVA II
-1-10-

Serie	Antal kassetter	Plåtprof höjd h	Plåtprof tjockl.	Plywood tjockl. nom.	Antal skivor 1200x2400	Summa antal skivor			
						10ply	16ply	17,5ply	19ply
A	3	150	2,0	17,5	3x15		4,5		
B	3	150	1,25	16	3x15		4,5		
C	3	150	1,0	19	3x15				4,5
D	3	150	0,8	17,5	3x15			4,5	
E	3	250	1,25	16	3x15				
F	3	250	1,0	16	3x15		9		
G	2	250	0,8	17,5 resp 16	2x15		1,5	1,5	
H	3	150	2,0	10	3x15	4,5			
Totalt ant.						5	15	11	5

ANMÄRKNING

För erhållande av bästa möjliga jämförelseresultat vid försöken bör följande iakttagas:
Plywoodskivorna skall noggrant utväljas med avseende på god och jämn kvalitet utan defekter.
Varje plywoodskiva numereras (Varje delskiva samt bit för tryckprov skall ha samma nummer.)
Delskivorna (I) skall uttagas från samma plywoodskiva.
Det hoplimmade ytskiktet skall vara helt rakt.
Skarvning av delskivorna utföres med skärfåg genom presslimning.
Lim: Cascofen 1701 med hårdare 2580-
Se även Cascos anvisningar.

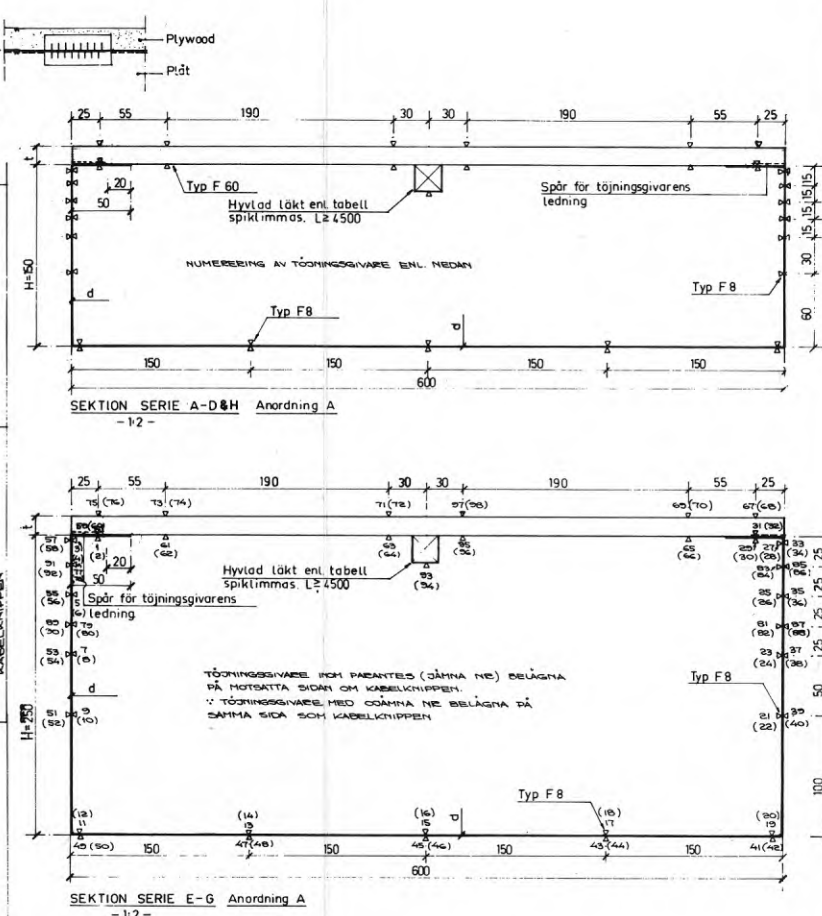
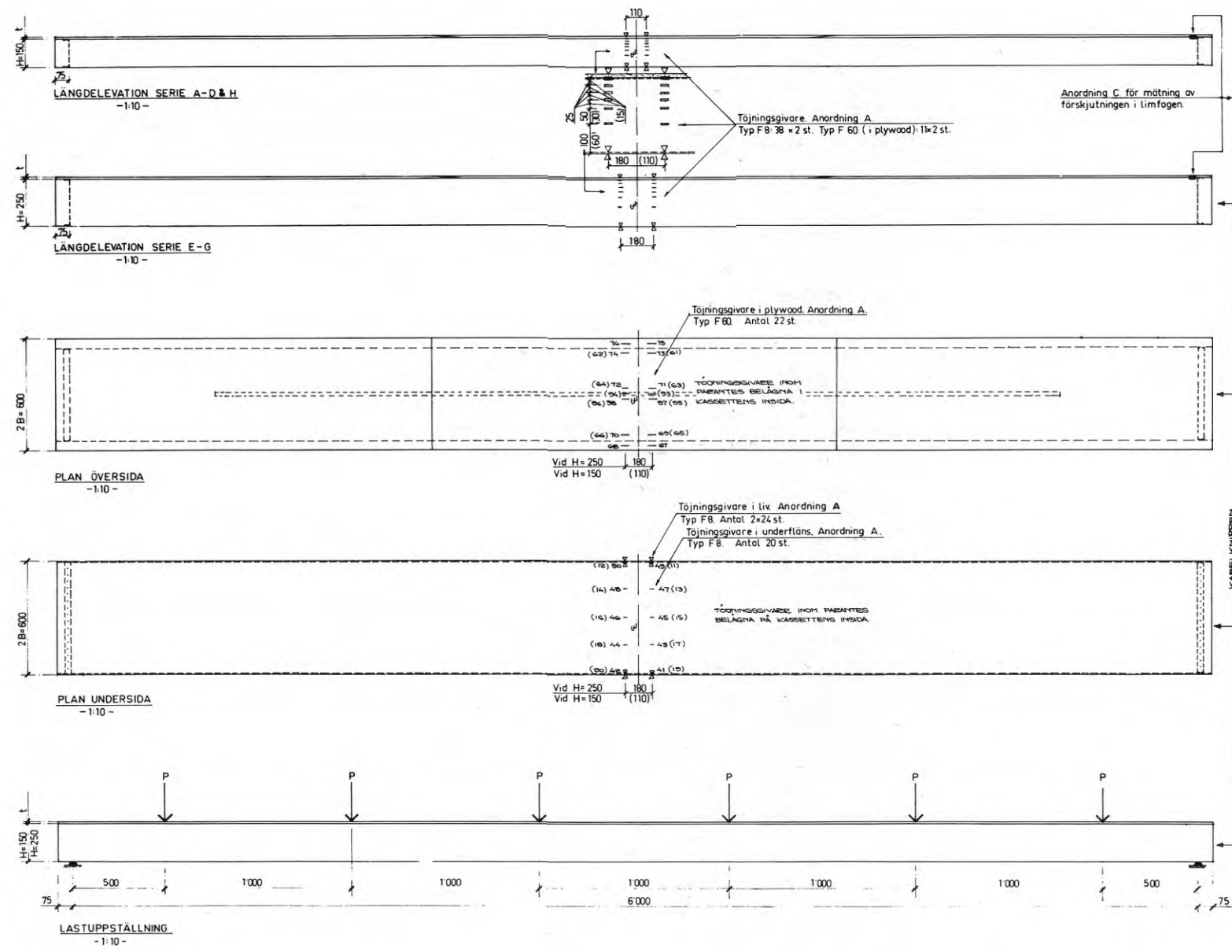
RITNINGSREFERENSER

1. Plåtprofiler.
3. Lastuppställning, Töjningsgivare.

CIVILINGENIÖR
J.-FR. LARSSEN
KONSULTERANDE INGENJÖRSBYRÅ AB
BIRGER JARLSGATAN 62 114 29 STOCKHOLM
TELEFON 11 2024

BY: LD KONSTR: L SKALA: 1:10
STYLM DEN 1973.12.20
Försöksserie till:
LÄTTBÄRVERK MED SAMVER-
KANDE BLANDKOMPONENTER
Plywood

PROD. NR: 1303
RIT. NR: 2



TABELL

Serie	Antal kassetter	Plåtprofil höjd = H	Plåtprofil tjockl = d	Plywood tjockl = t	Läkt b x h
A	3	150	2,0	17,5	36 x 23
B	3	150	1,25	16	23 x 23
C *)	3	150	1,0	19	21 x 31
D	3	150	0,8	17,5	23 x 23
E *)	3	250	1,25	16	23 x 23
F *)	3	250	1,0	16	24 x 36 enb. F3
G *)	2	250	0,8	17,5 resp 16	21 x 31
H	3	150	2,0	10	24 x 36 alt 2 st.

ANMÄRKNING

Töjningsgivare och mätansordningar:
Töjningsgivare av typ "Shawa"

Anordning A.
Töjningsgivare vid fältmitt: 76 st. typ F 8 samt 22 st. typ F 60.

Anordning C.
Gradering för mätning av förskjutningen i limfoget vid båda upplagen. Antal 4 st.

Anordning D.
Lod för mätning av livens snedställning och eller kassetterns horisontella sidautböjning. Placeras på båda sidor i närheten av fältmitt.

Anordning E.
Mätlockar för belastning-deformation. 2 st. vid båda upplagen, 2 st. i fältmitt, 2 st. i 4-de-delspunkterna. Totalt 10 st.

Anordning F.
Lackbehandling av plåt för bättre iakttagande av uppträdande deformationer.

Beteckning i enl. tabell
*) En k. sett förses med töjningsgivare enl. anordning A.

RITNINGREFERENSER

RITN. NR.	BENÄMNING
1	Plåtprofiler
2	Plywood
	Beskrivning

2.02.12 Allmänt L.O.

CIVILINGENIÖR
J.-FR. LARSSEN
KONSULTERANDE INGENJÖRSBYRÅ AB
BIRGER JARLSGATAN 62 114 28 STOCKHOLM
TELEFON 11 20 24

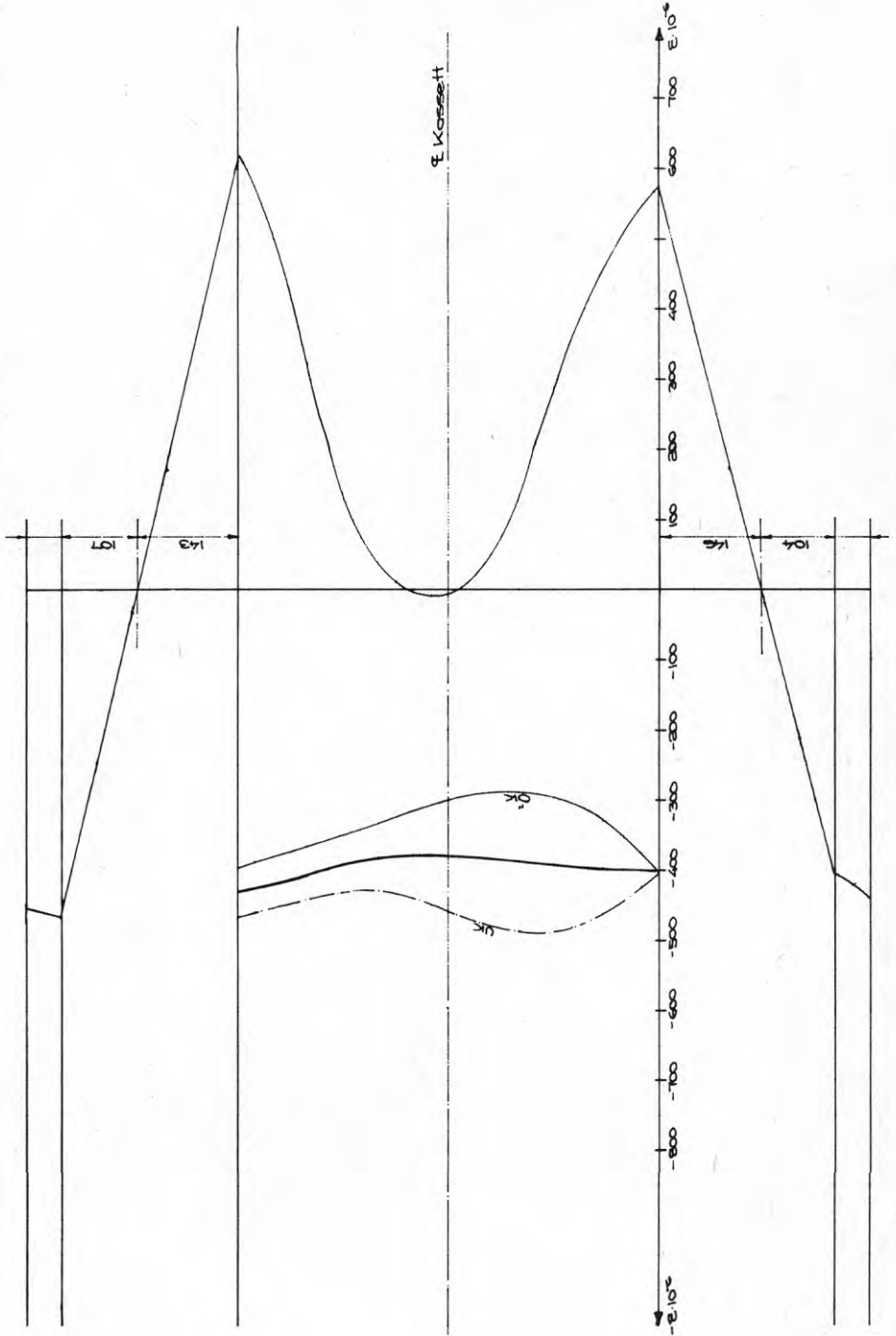
RIT. L.O. KONSTR. L. SKALA: 1/10; 1/2

STAV. 1973.12.20

Försöksserie till:	PROJ. NR.
LÄTTBÄRVERK MED SAMVER-	7303
KANDE BLANDKOMPONENTER.	RITN. NR.
Lastuppställning Töjningsgivare.	3

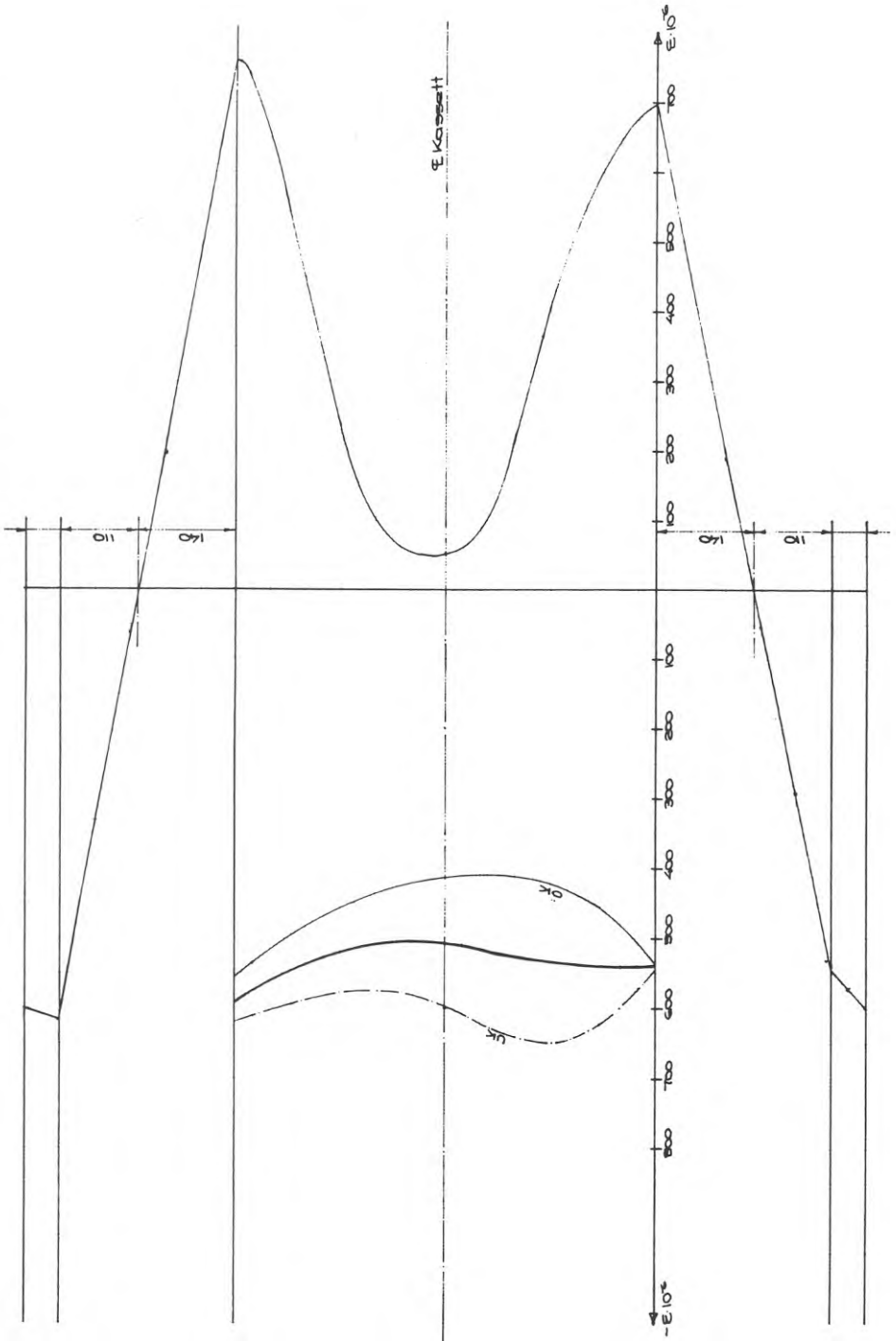
TÖJNINGSS- STUKNINGSDIAGRAM
 VID $P_4 = 223$ KP ($P_{\text{max}} = 650$)

F 1



TOJNINGS-STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_c = 304$ KP ($P_{\text{max}} = 650$)

F 1



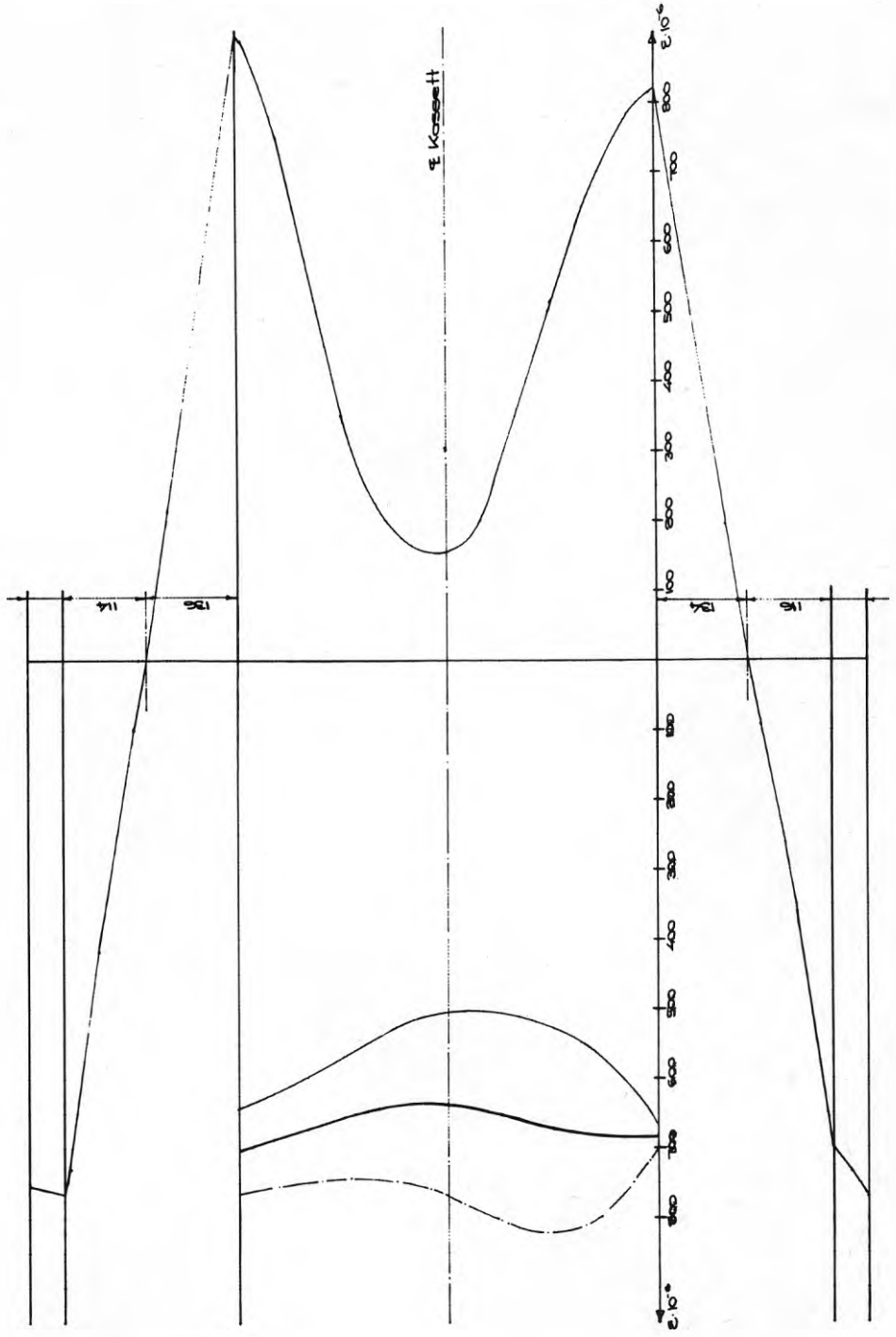
$E \cdot 10^4$

$E \cdot 10^4$

$-E \cdot 10^4$

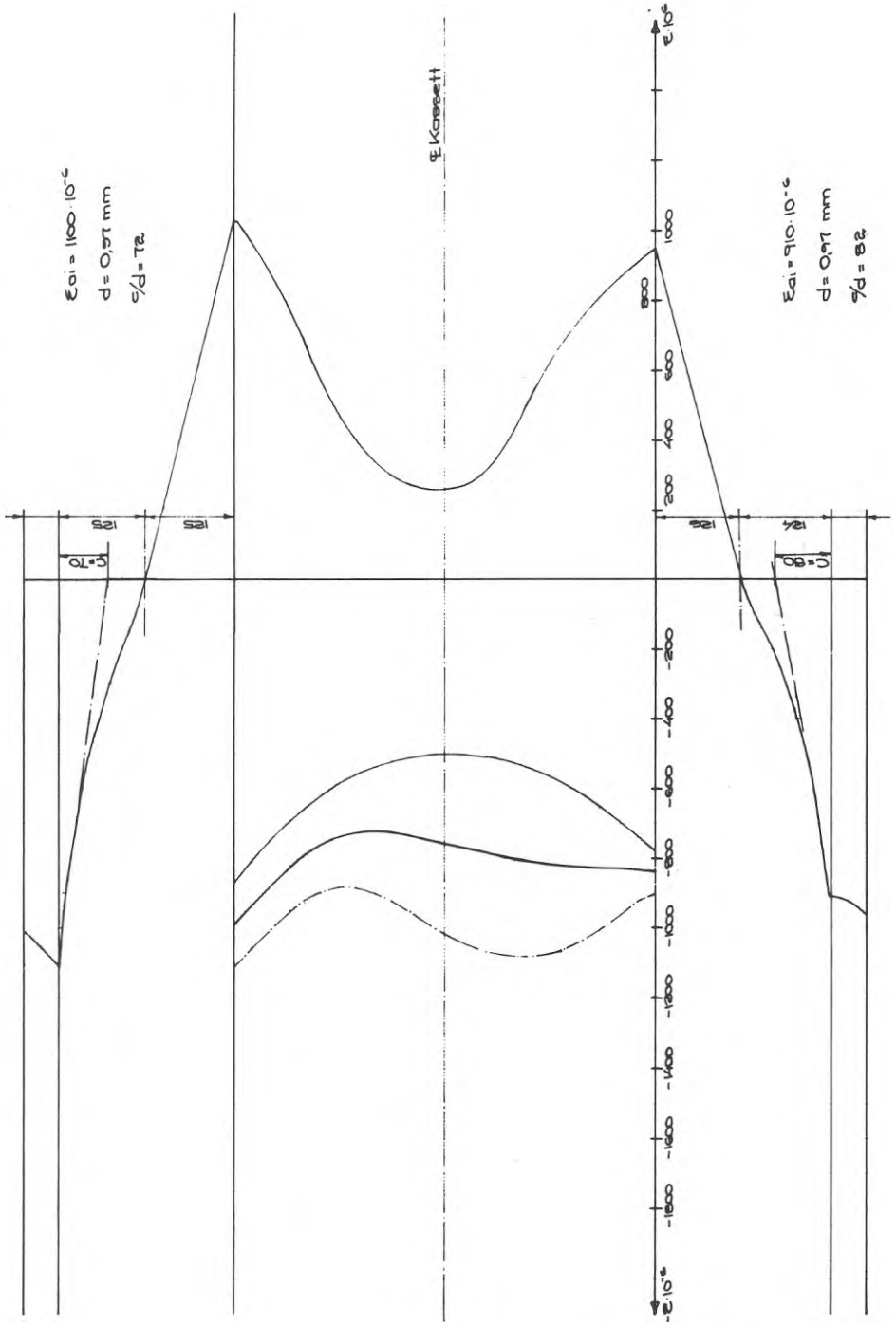
F 1
TÖRNINGS - STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_0 = 306$ KP ($P_{\text{max}} = 650$)

FIG. 70



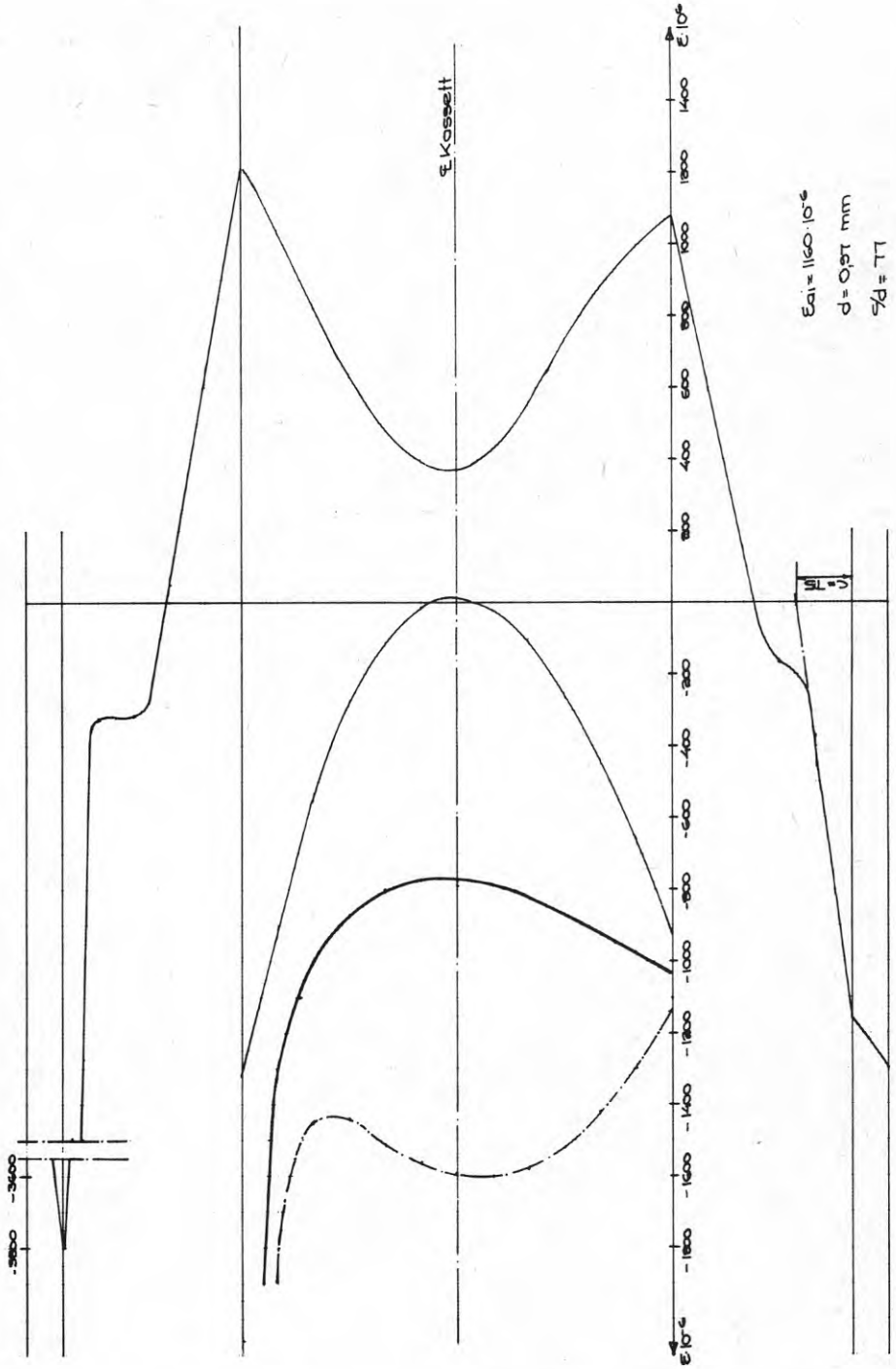
TOJNINGS - STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_{10} = 46T$ ($P_{\text{BERT}} = 650$) FIG. 71

F 1



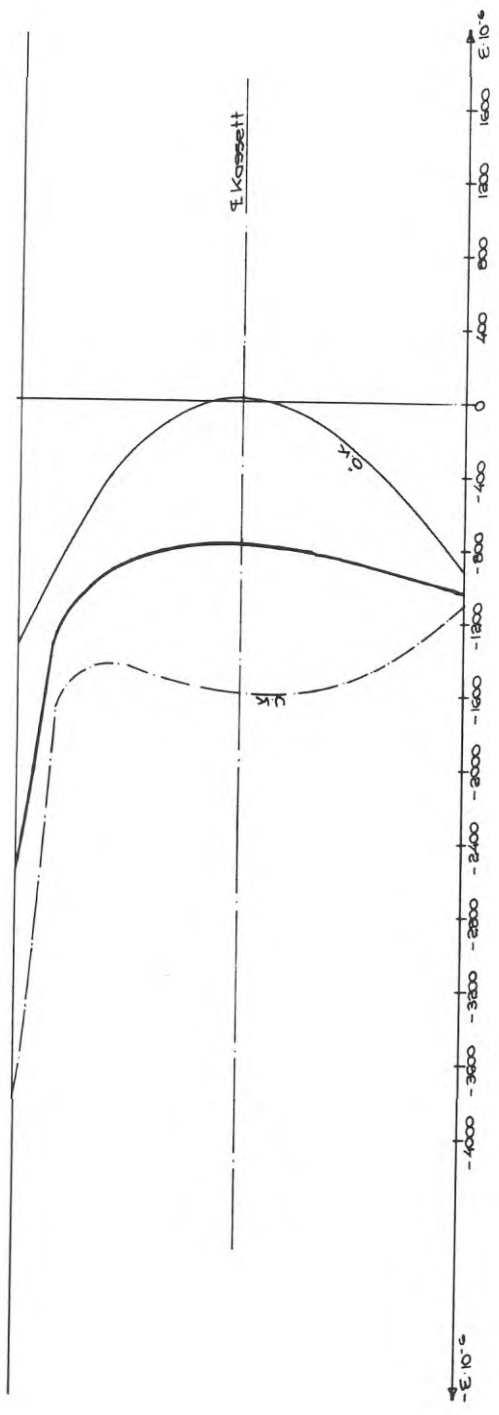
TÖJNING - STUKNINGSDIAGRAM FIG. T2
 VID $P_{12} = 548 \text{ kP}$ ($P_{\text{best}} = 650$)

F 1



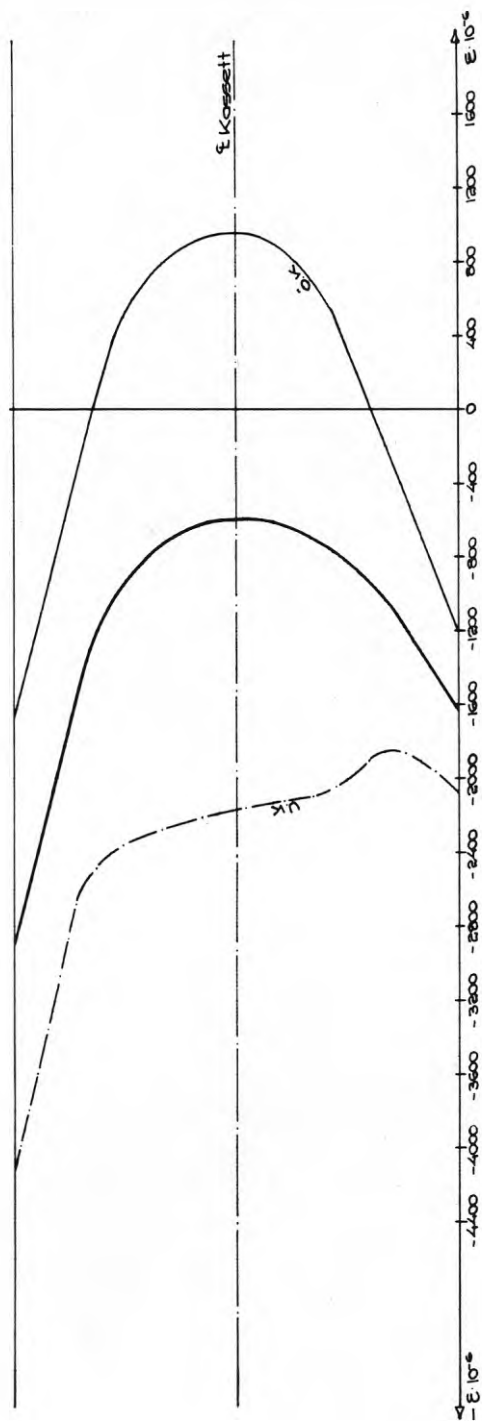
$E_{a1} = 1160 \cdot 10^5$
 $d = 0,97 \text{ mm}$
 $P_1 = 77$

F 1
STUKNINGSDIAGRAM FÖR
YTTSKIKT VID P = 348 kP
(P_{BERÖM} = 650 kP)

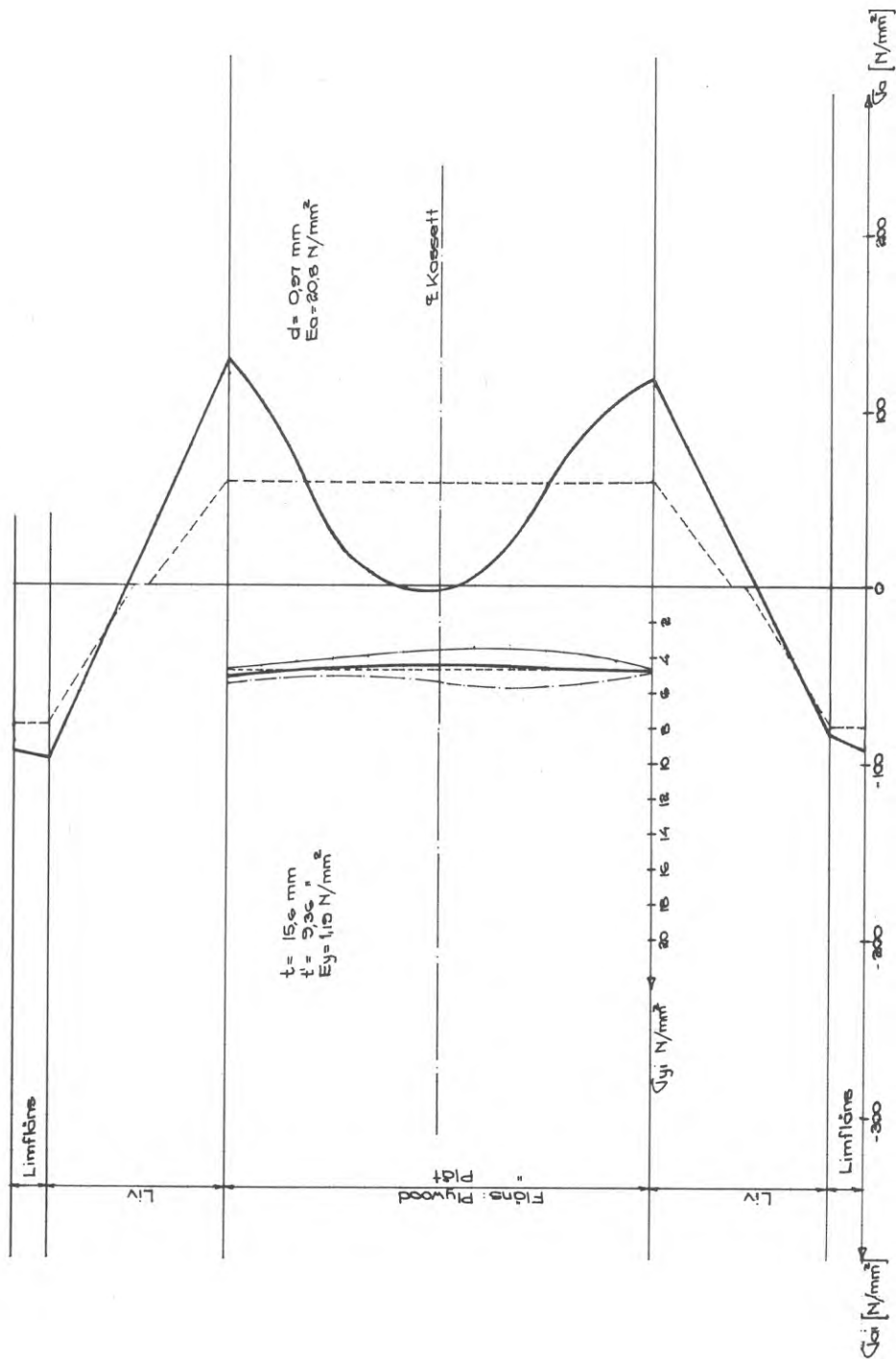


F 1
STUKNINGSDIAGRAM FÖR
YTTSKIKT VID P = 348 kP
(P_{BERÖM} = 650 kP)

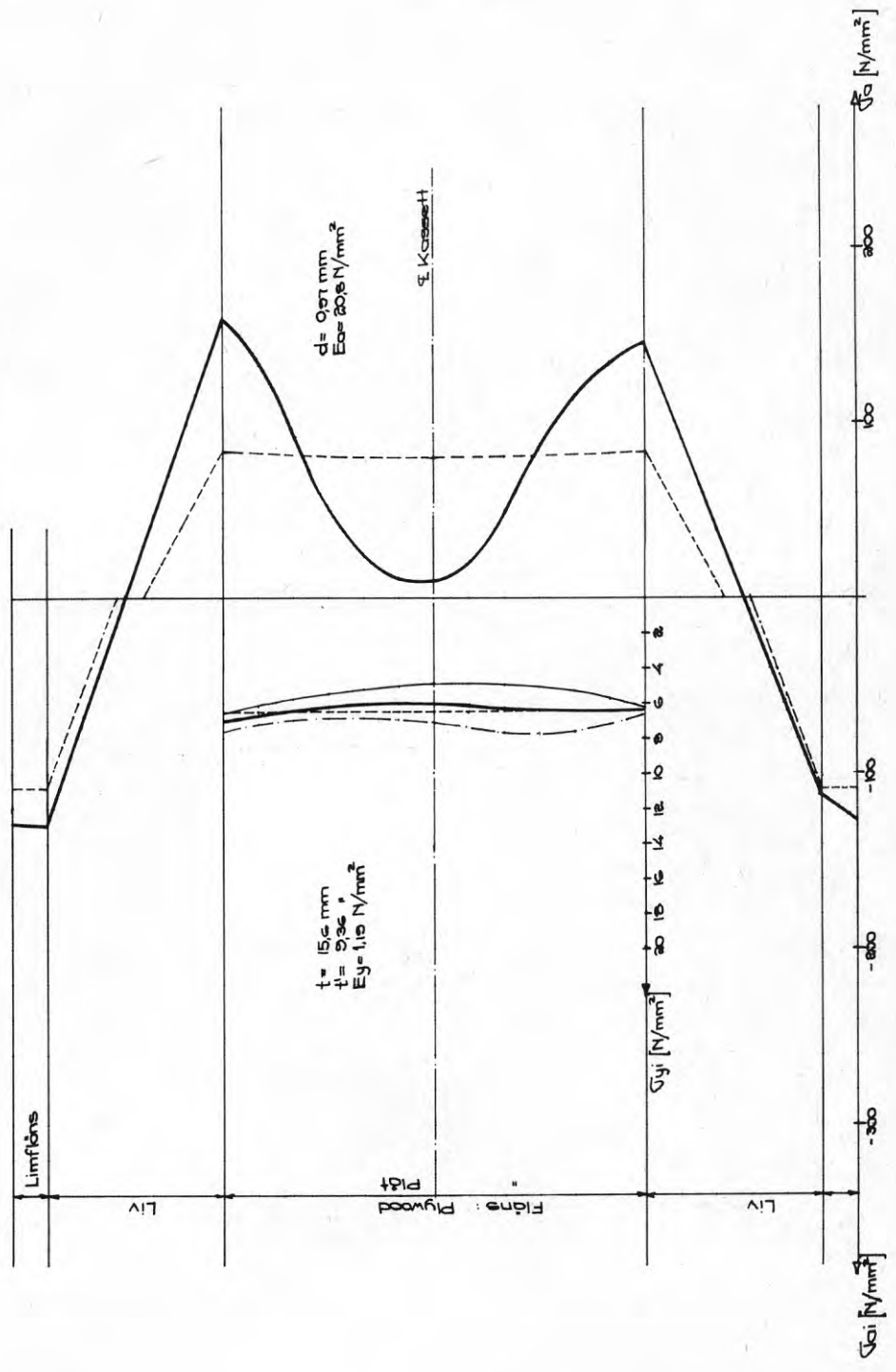
F 1. STUKNINGSDIAGRAM FÖR
YTSKIKT VID $P = P_{\text{ber}} = 650 \text{ kP}$ FK 74



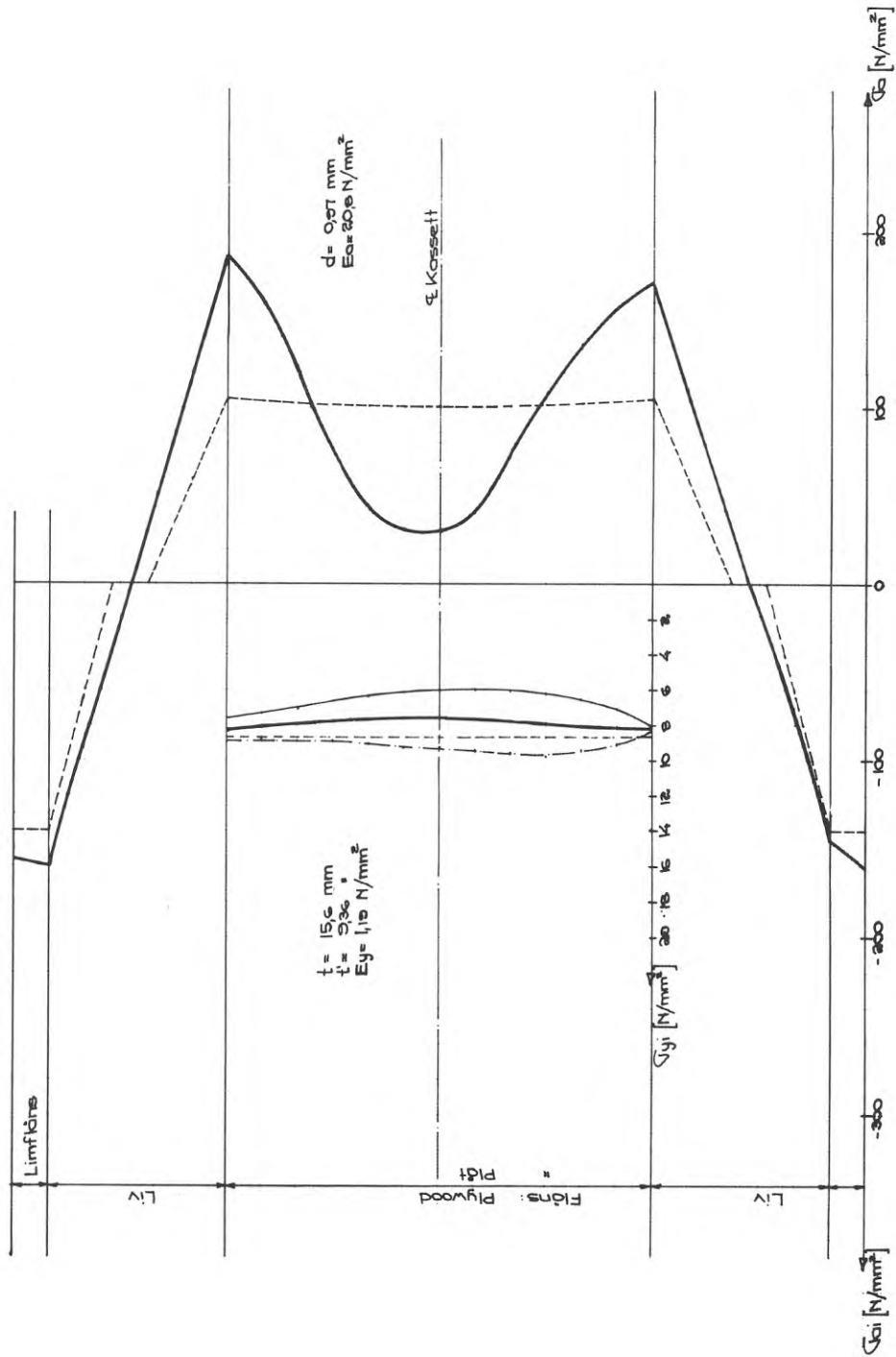
F 1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 75
 $P_1 = 223 \text{ KP}$



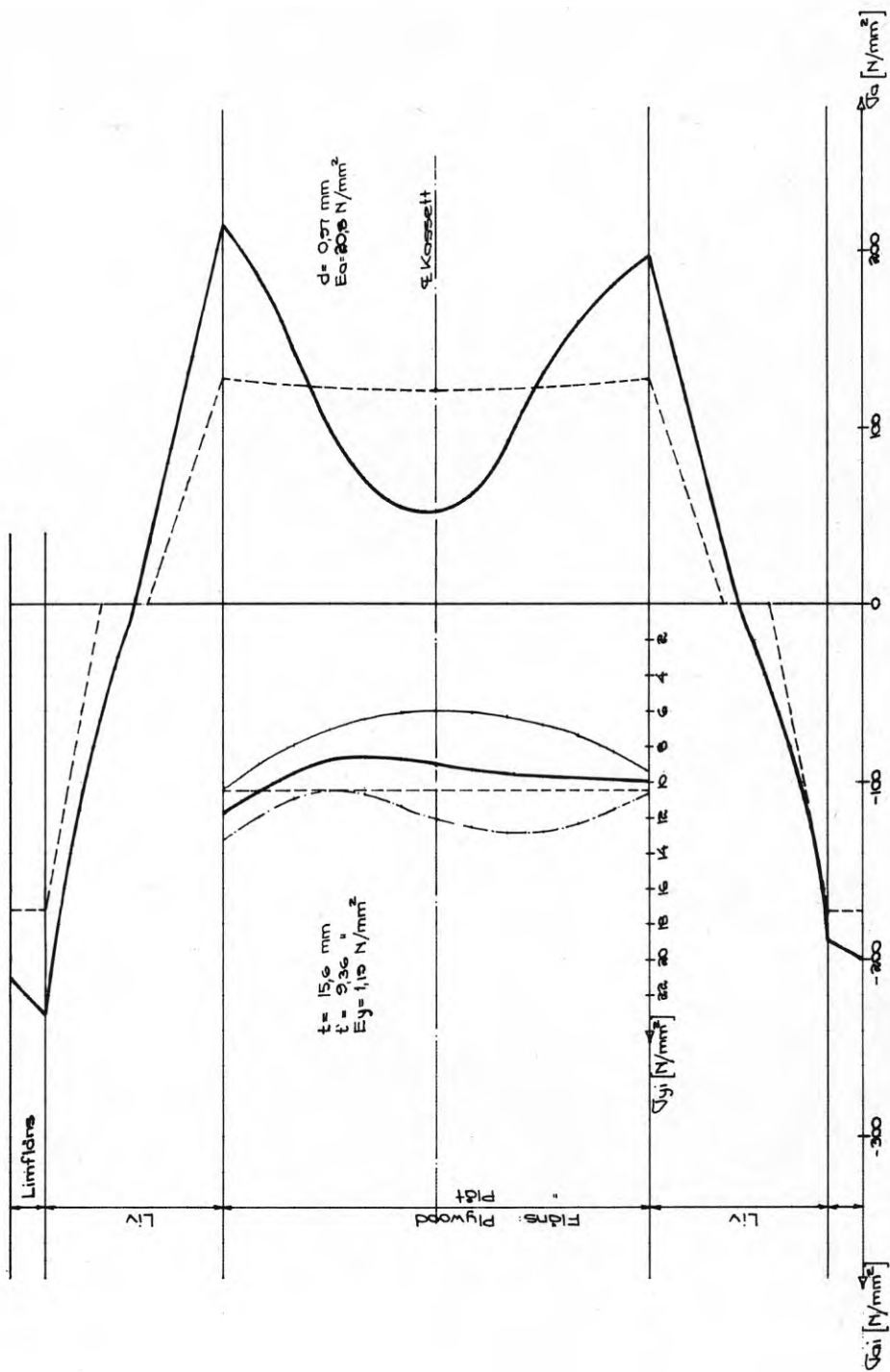
F1 PAKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 76
 $P_0 = 304 \text{ kP}$



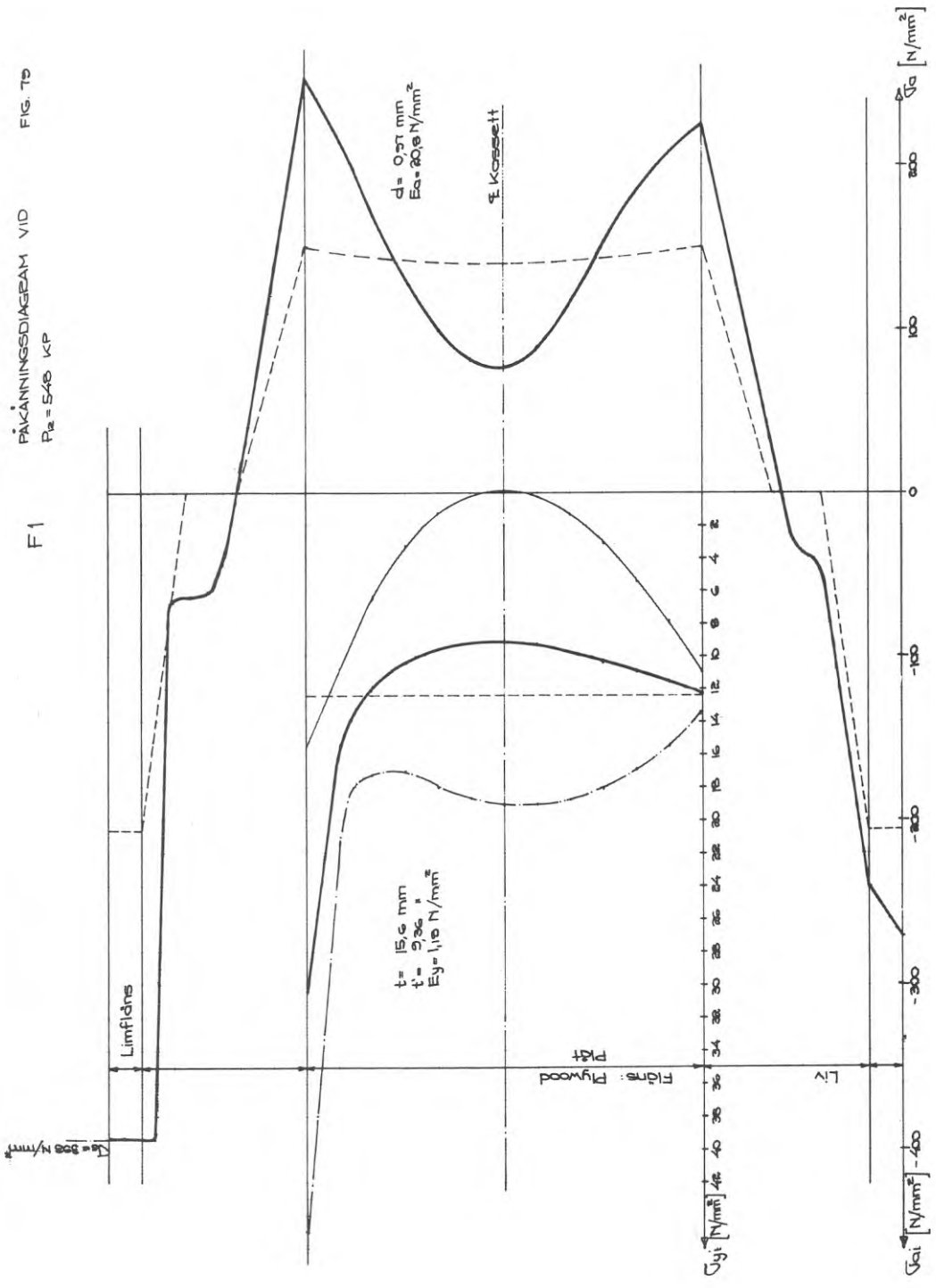
F1 PÅVÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. T1
 $P_0 = 306 \text{ kP}$



F1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID $P_{10} = 467 \text{ kP}$ FIG. 76

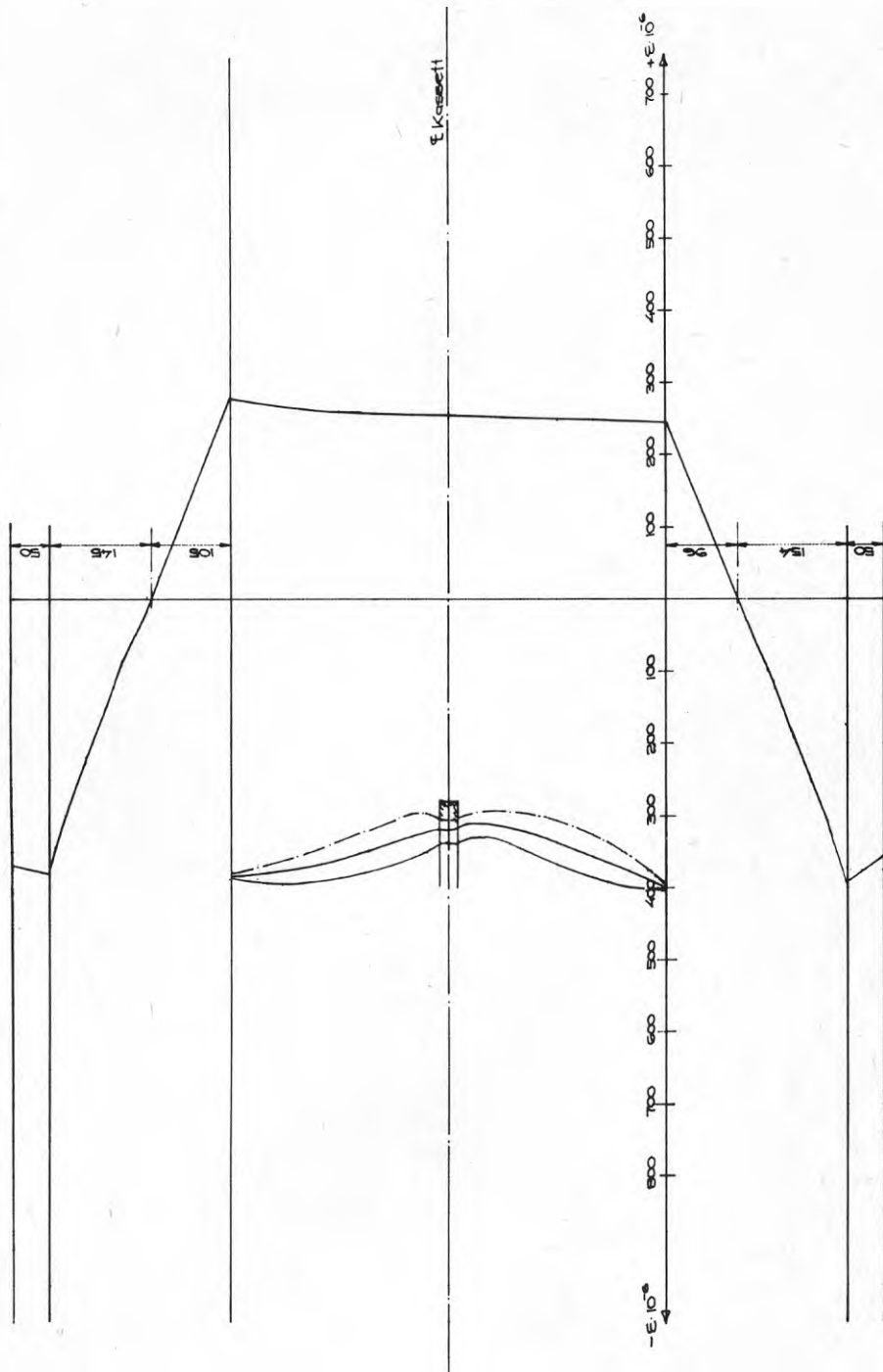


F1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID
 $P_{12} = 548 \text{ kP}$ FIG. 79



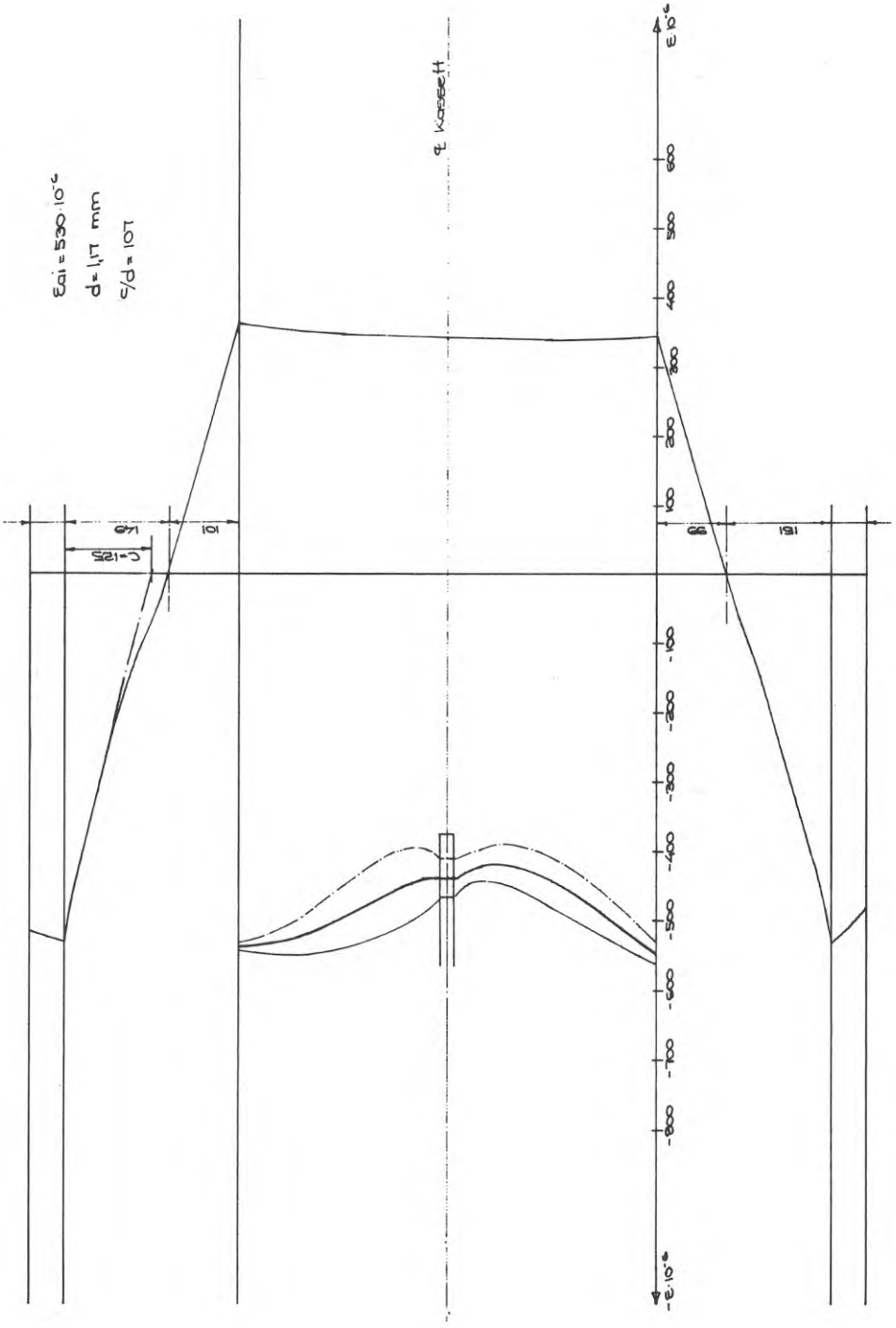
TÖJNINGSDIAGRAM
 VID $P_A = 225 \text{ KP}$ ($F_{\text{max}} = 937$)

E 1



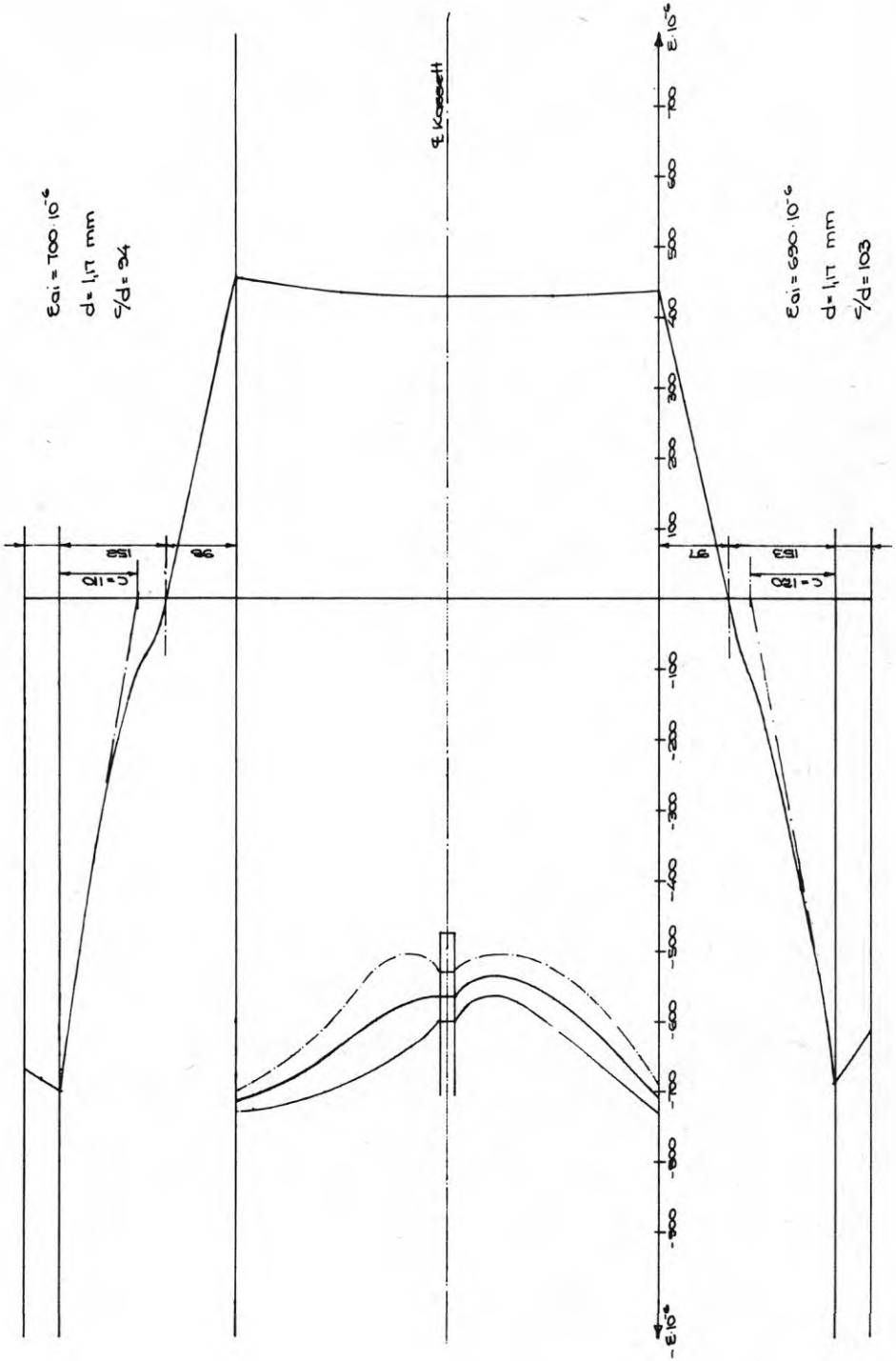
TÖJNING - STUKNINGSDIAGRAM
 VID $R_e = 30T$ KP ($R_{berst} = 93T$) FIG. 81

E 1



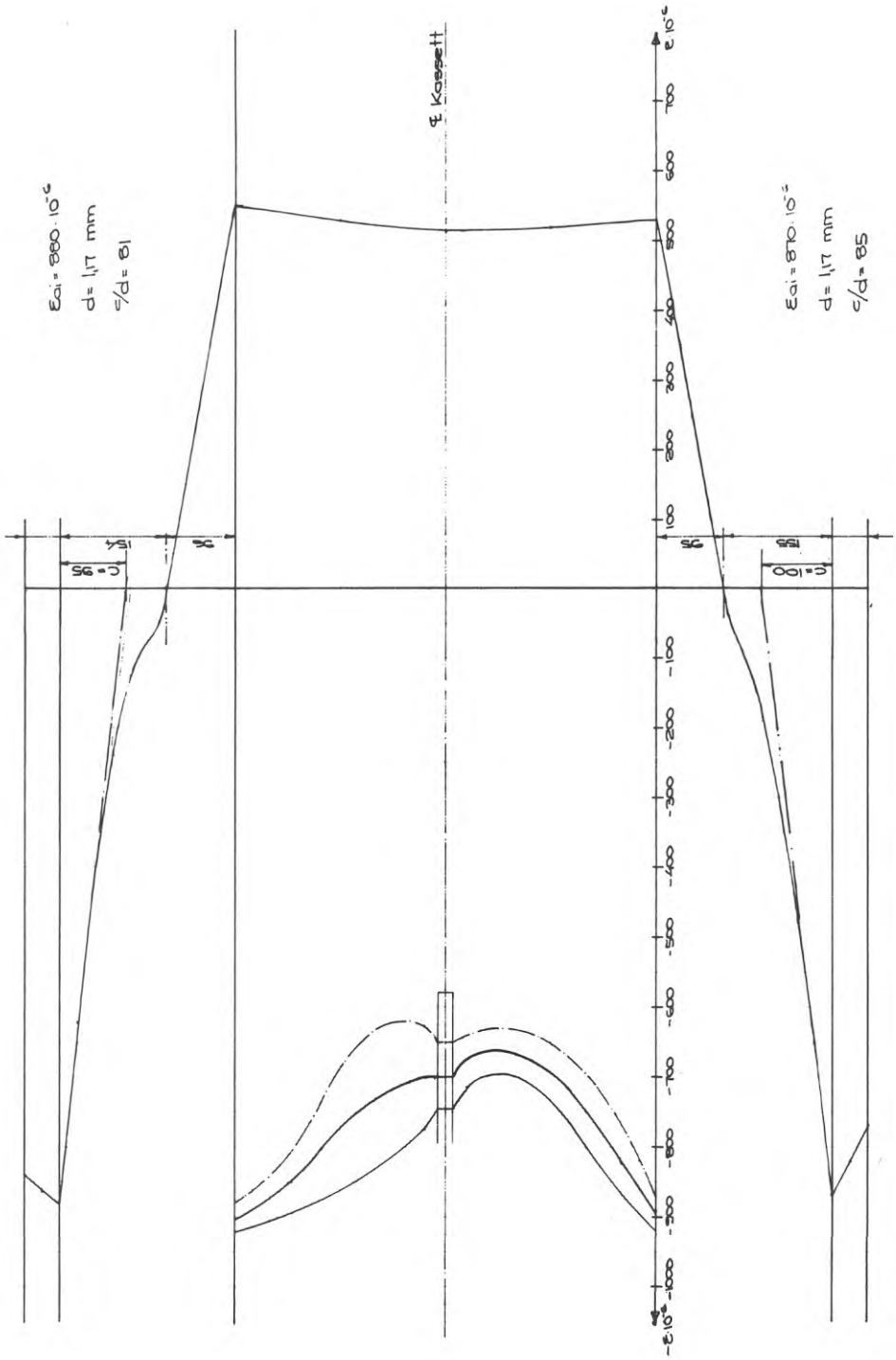
TÖJNING- STUKINGSDIAGRAM
 VID $P_R = 300 \text{ KP}$ ($P_{\text{BOTT}} = 937$)

E 1



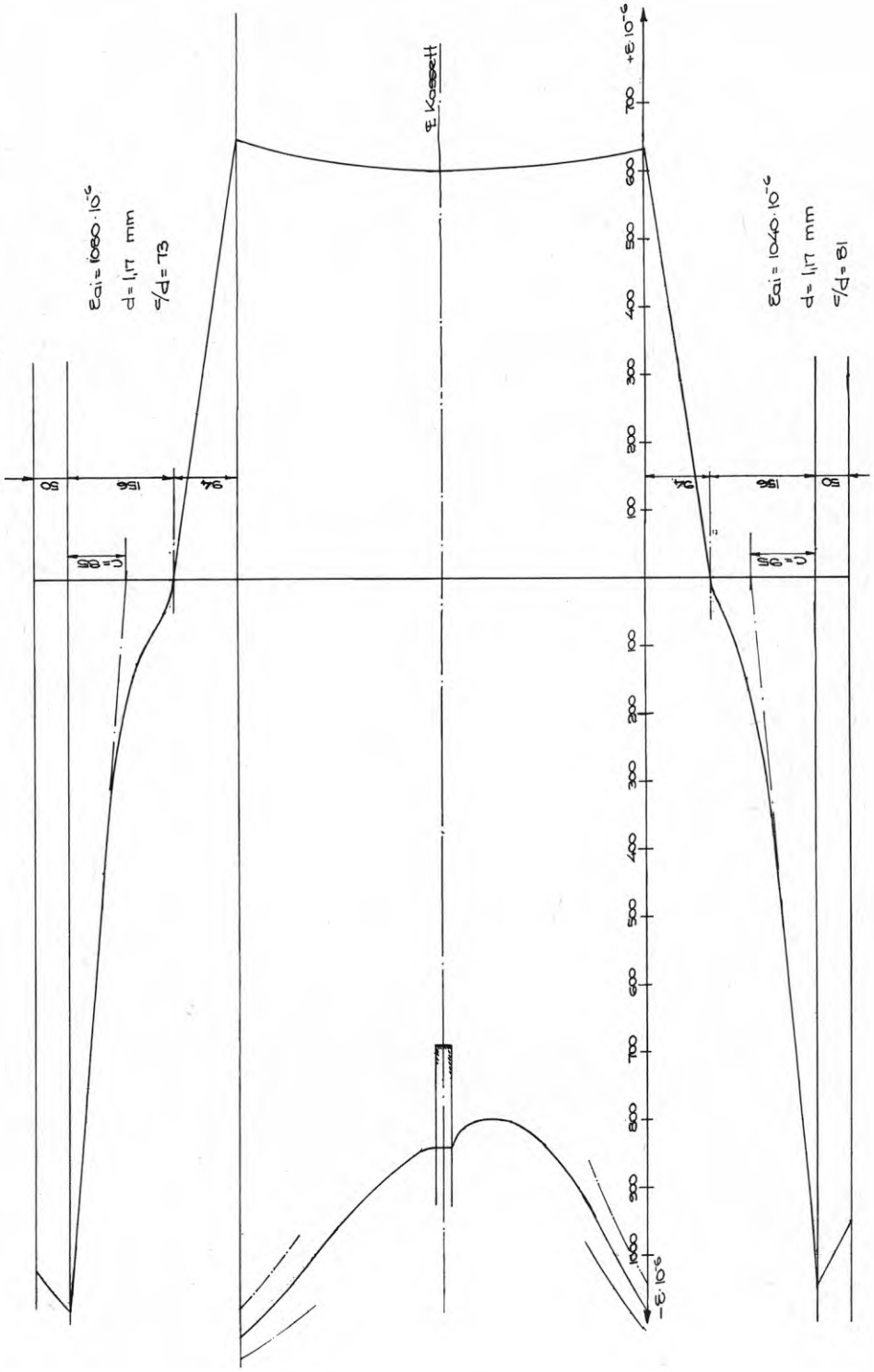
TÖNNINGS- STUKNINGSDIAGRAM
 VID $P_0 = 460 \text{ KP}$ ($P_{\text{max}} = 937$) FIG. 63

E 1



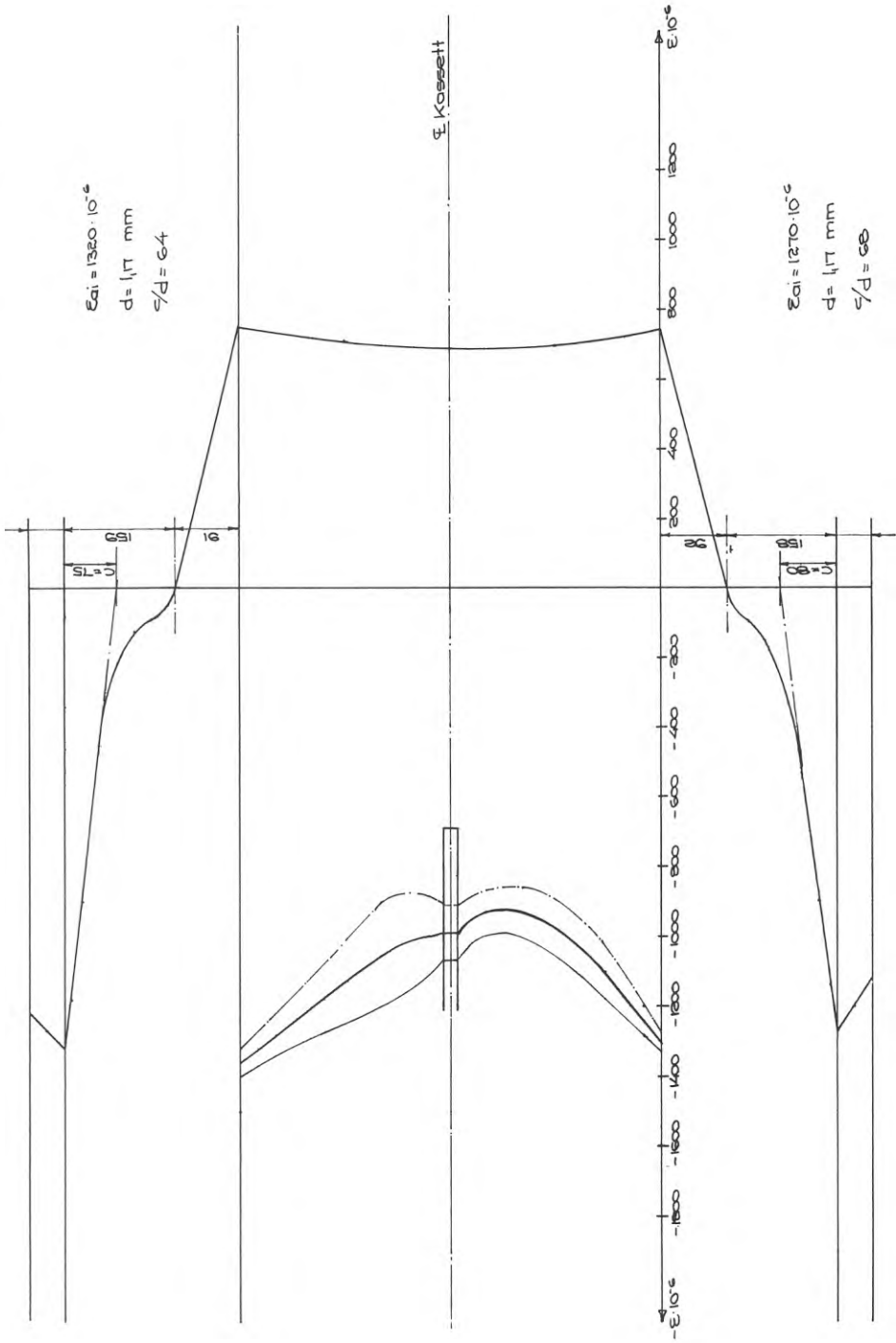
δ Kaasett

E 1.
TÖNNINGS- STUKINGSDIAGRAM
VID $P_{ig} = 551$ KP ($P_{berst} = 931$ KP) FIG. B4



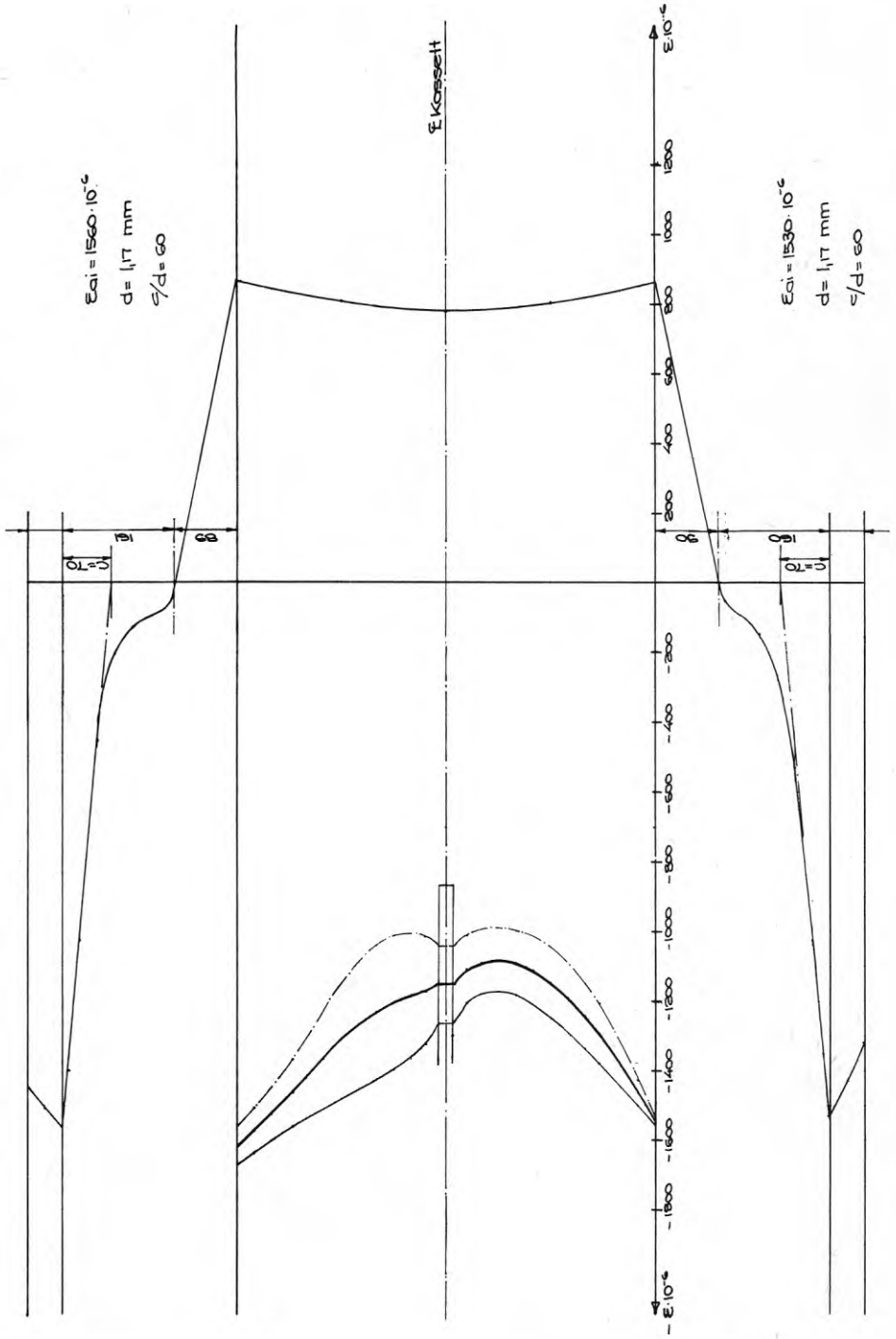
TÖJNINGS- STUKNINGSDIAGRAM
 VID P14 = 632 KP ($\bar{R}_{Bett} = 937$) FIG. 85

E 1

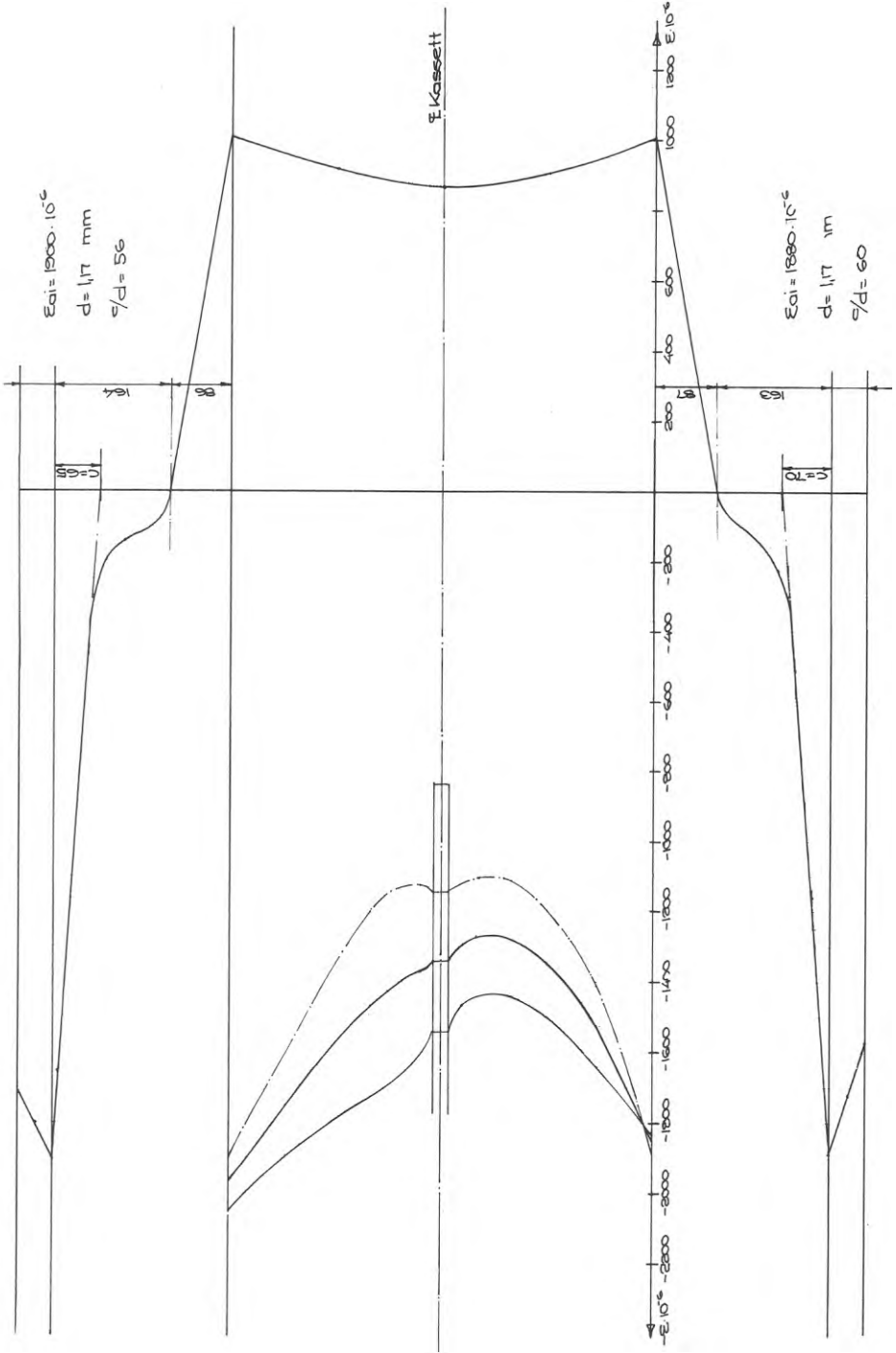


TÖNNINGS- STUKKINGSDIAGRAM
 VID $P_{ik} = 113 \text{ KP}$ ($P_{\text{BAST}} = 237$)

E 1

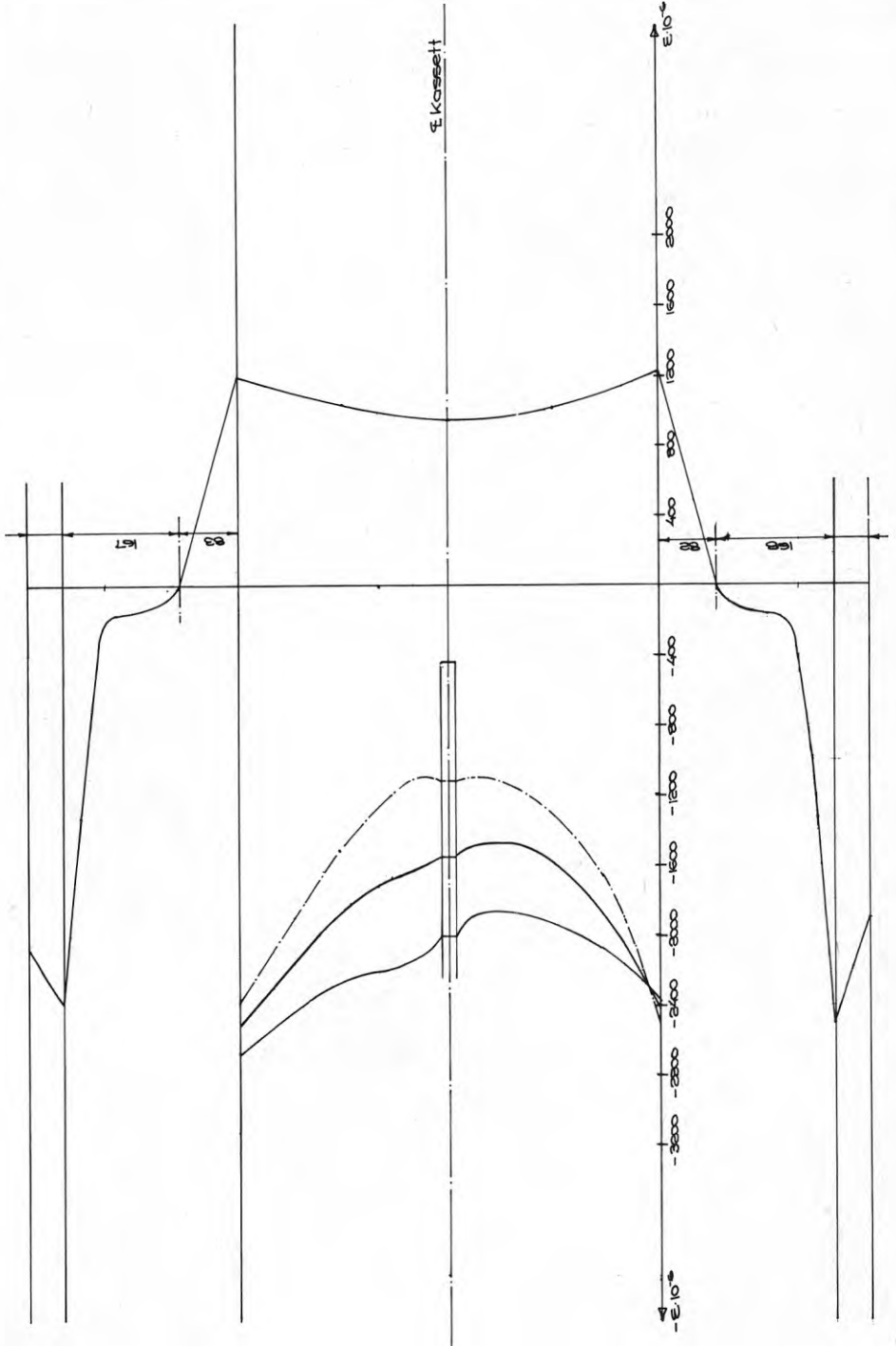


E 1
 TÖJNINGS - STUKNINGSDIAGRAM
 VID $R_{02} = 705 \text{ KP}$ ($R_{\text{max}} = 93T$) FIG. 57

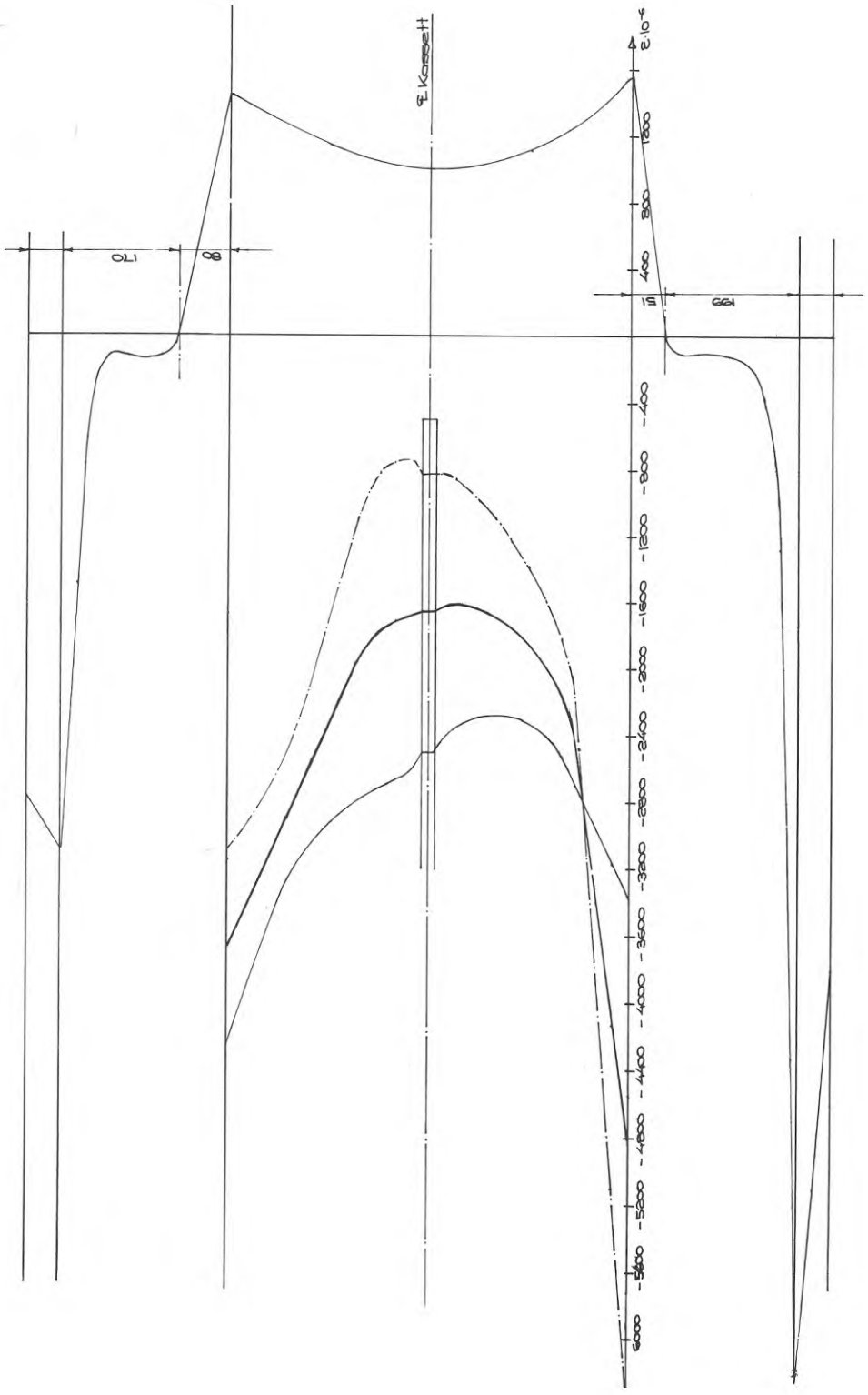


TÖJNINGSDIAGRAM
VID $P_{23} = 876 \text{ kP}$ ($P_{\text{berett}} = 937$)

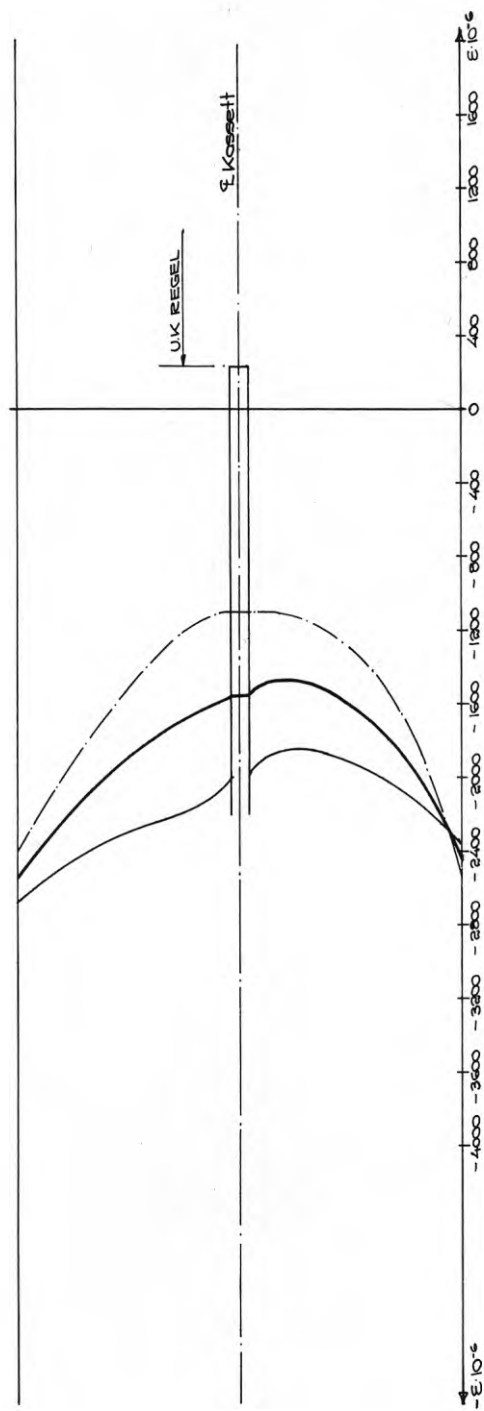
E 1



E 1
TÖNNINGS - STUKNINGSDIAGRAM
FIS. 89
VID $P_{50} = P_{\text{REKT}} = 937 \text{ KP}$

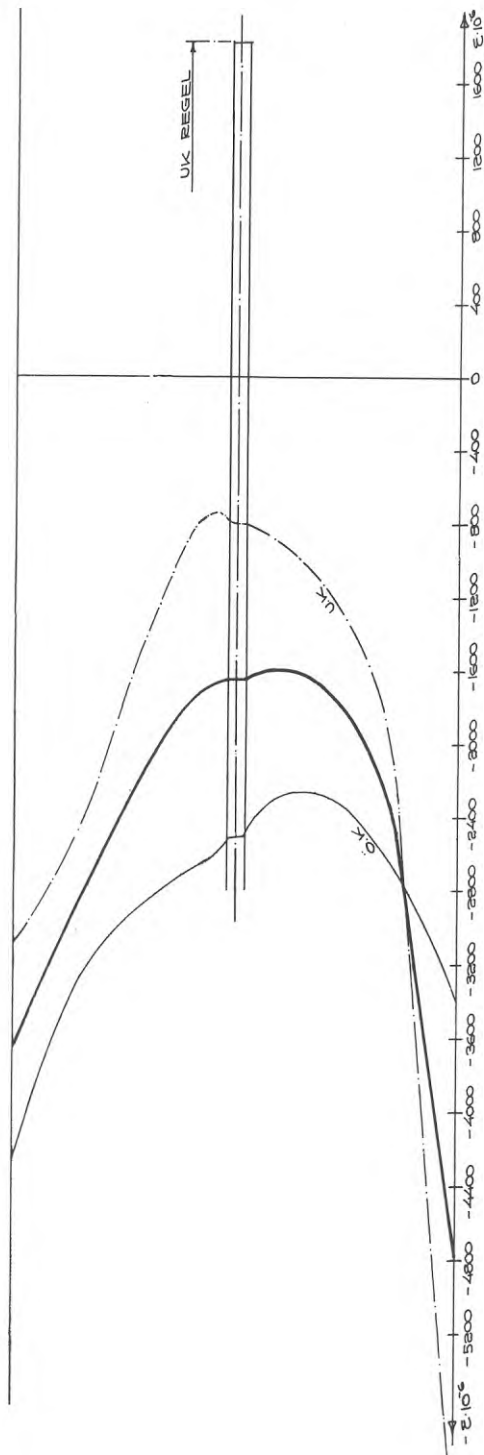


E 1.
 STUKNINGSDIAGRAM FÖR
 YTTSKIKT VID P = 5TG KP
 (P_{BERST} = 937 KP)

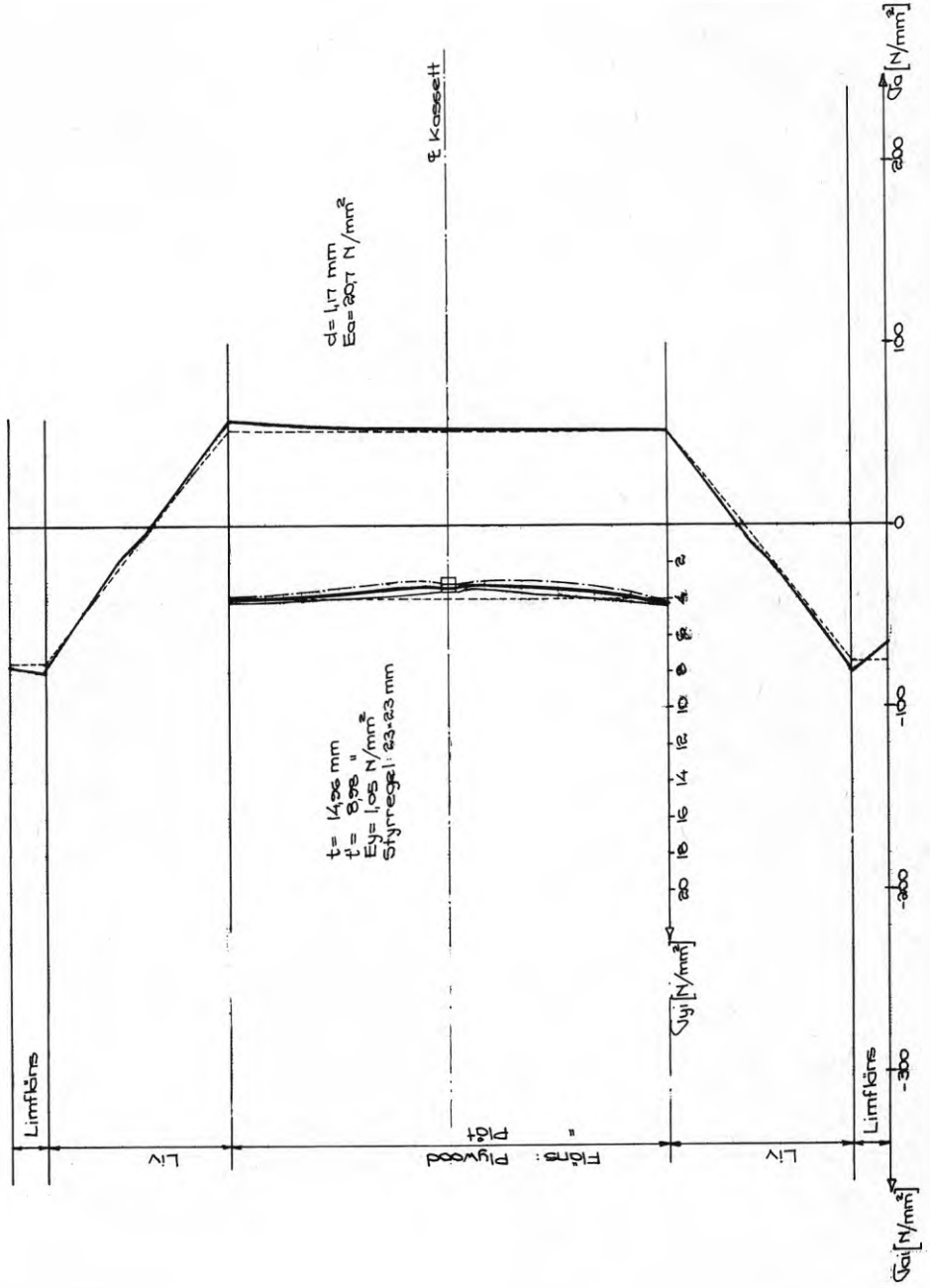


E.1 STUKNINGSDIAGRAM FÖR
YTTSKIKT VID $P = P_{\text{BERÖRT}} = 937 \text{ kP}$ FIG. 91

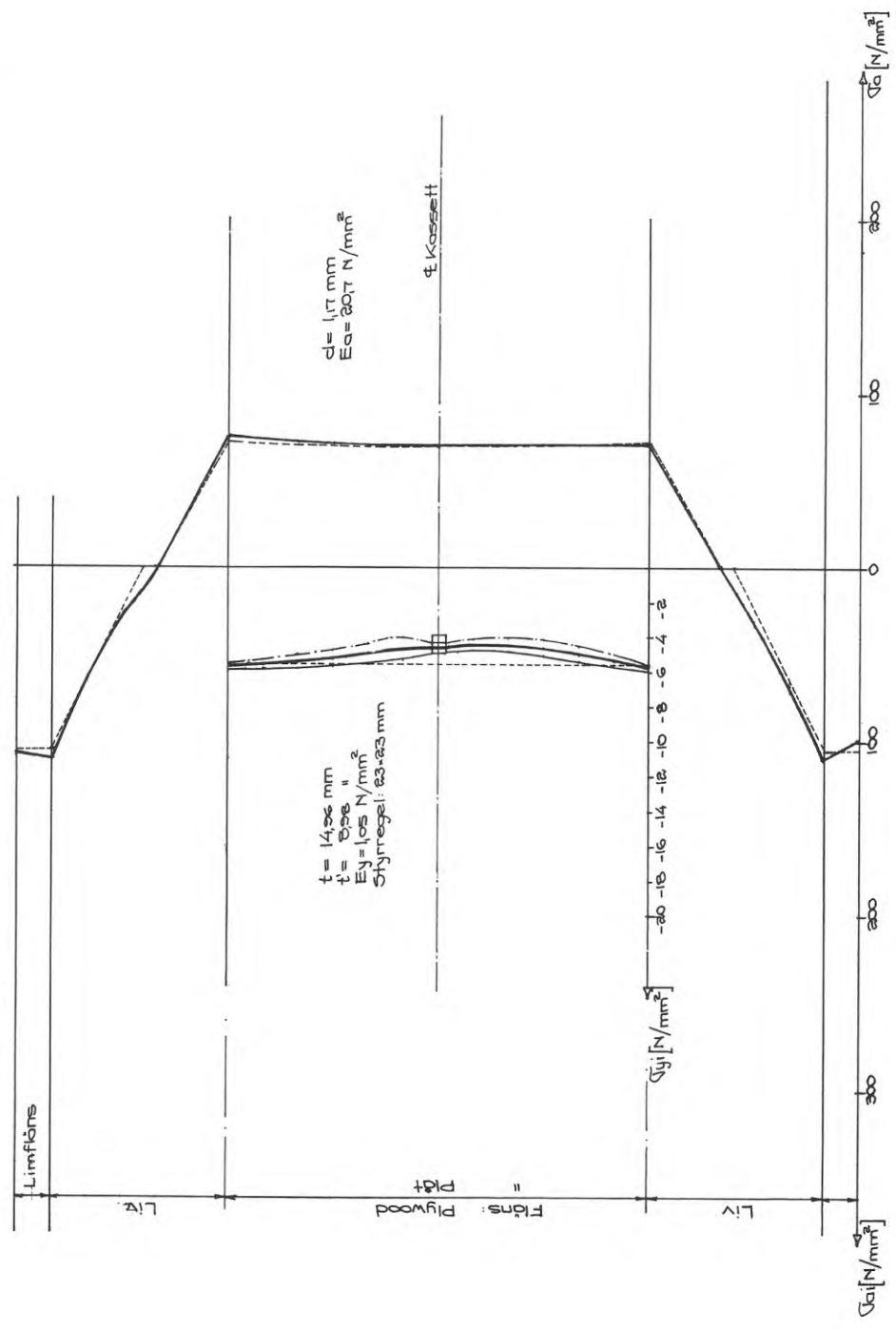
E.1



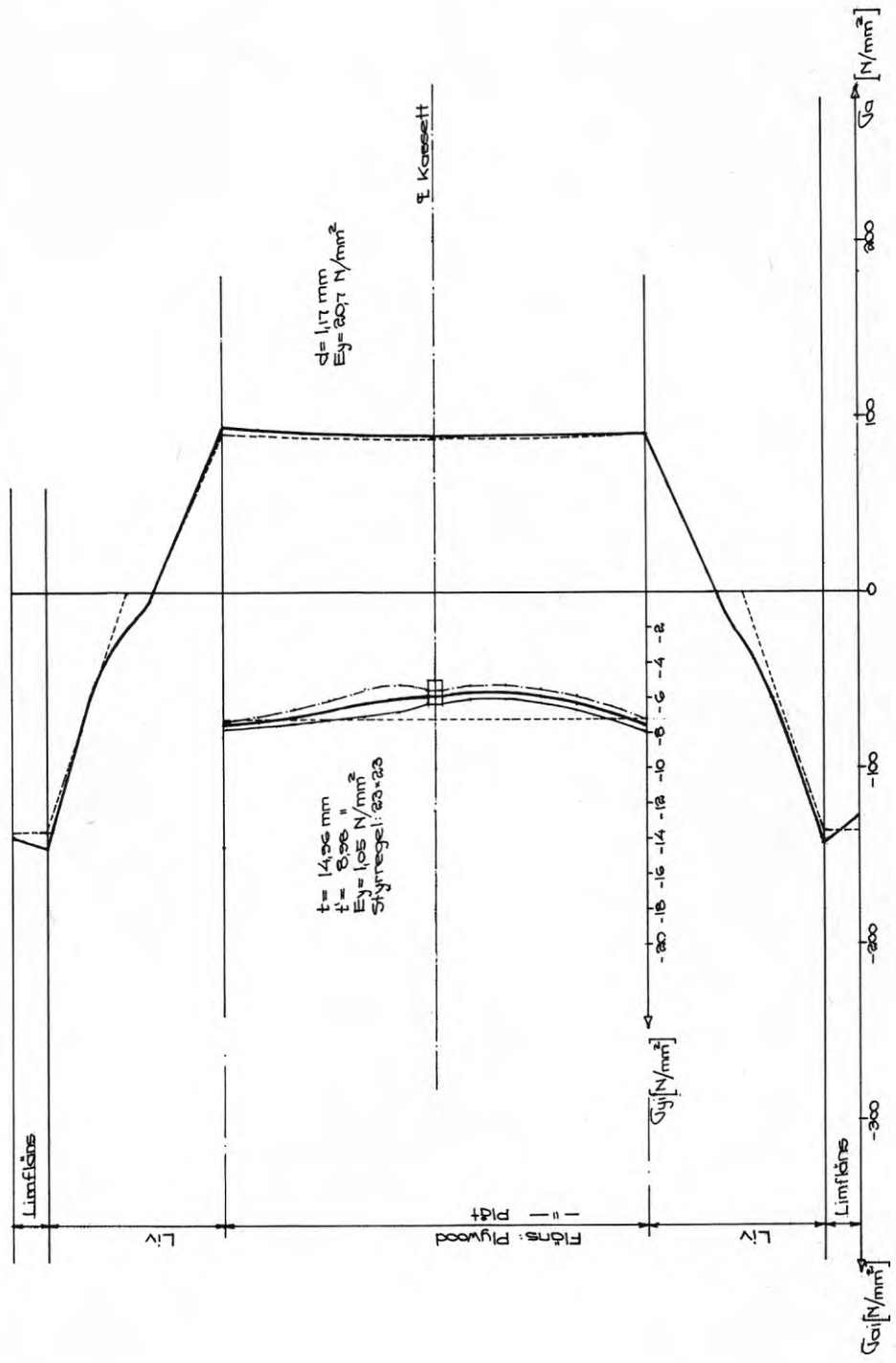
E 1
PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 92
P₄ = 225 kP

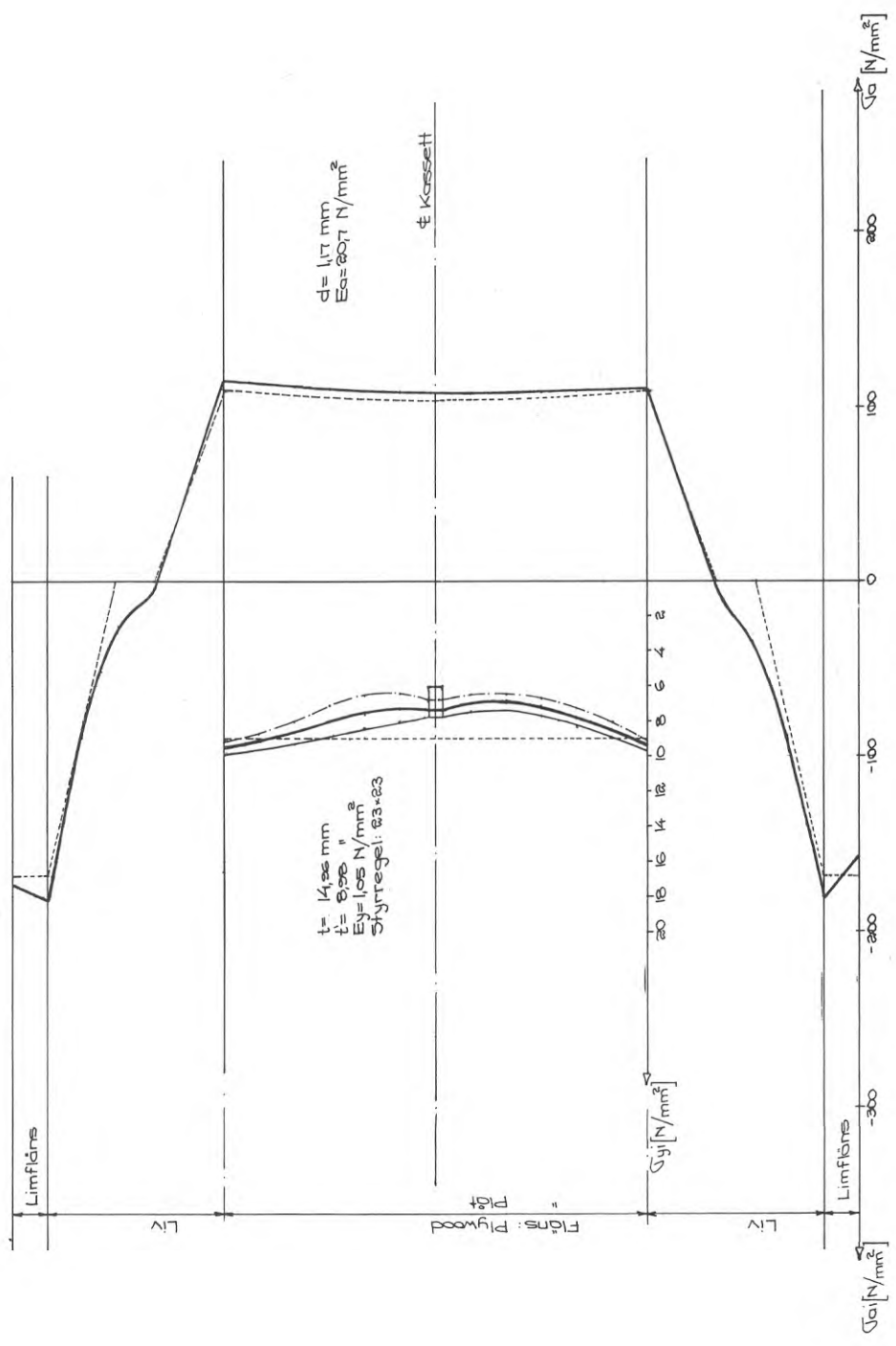


E 1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID $P_k = 30T$ KP
 FIG. 93



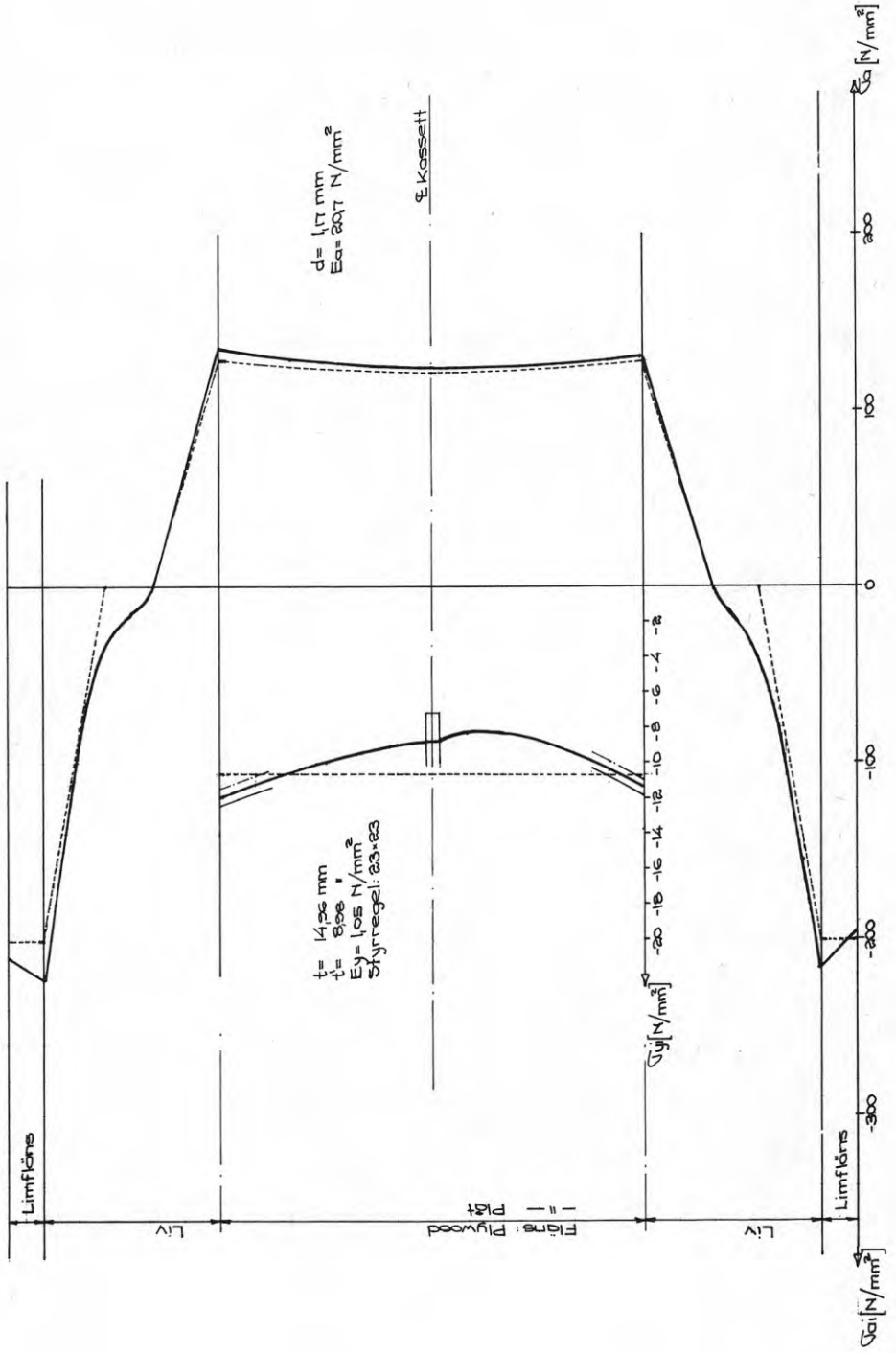
E 1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG 24
 $P_0 = 300 \text{ kP}$





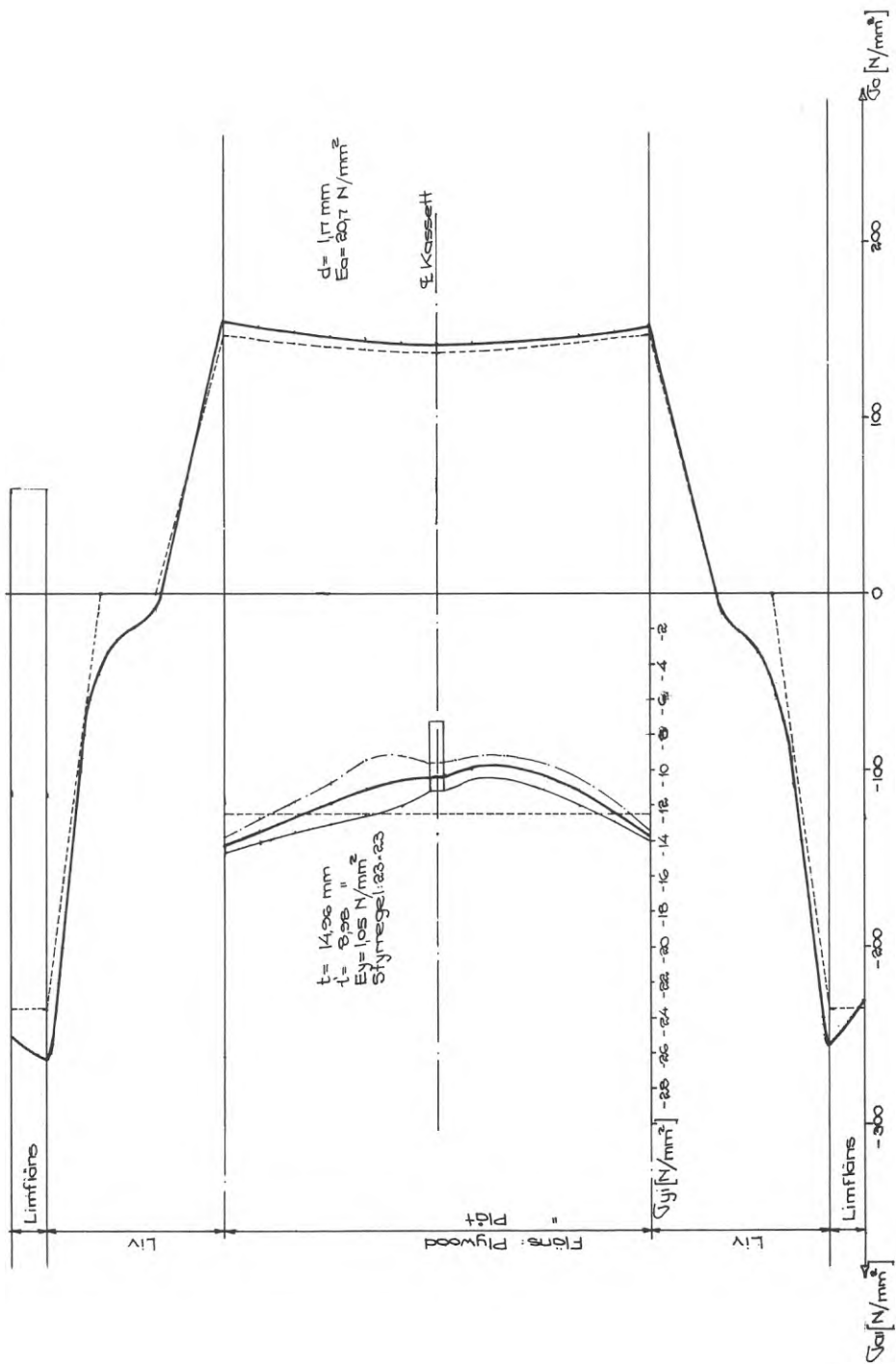
PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 96
 $R_{12} = 551 \text{ kP}$

E1

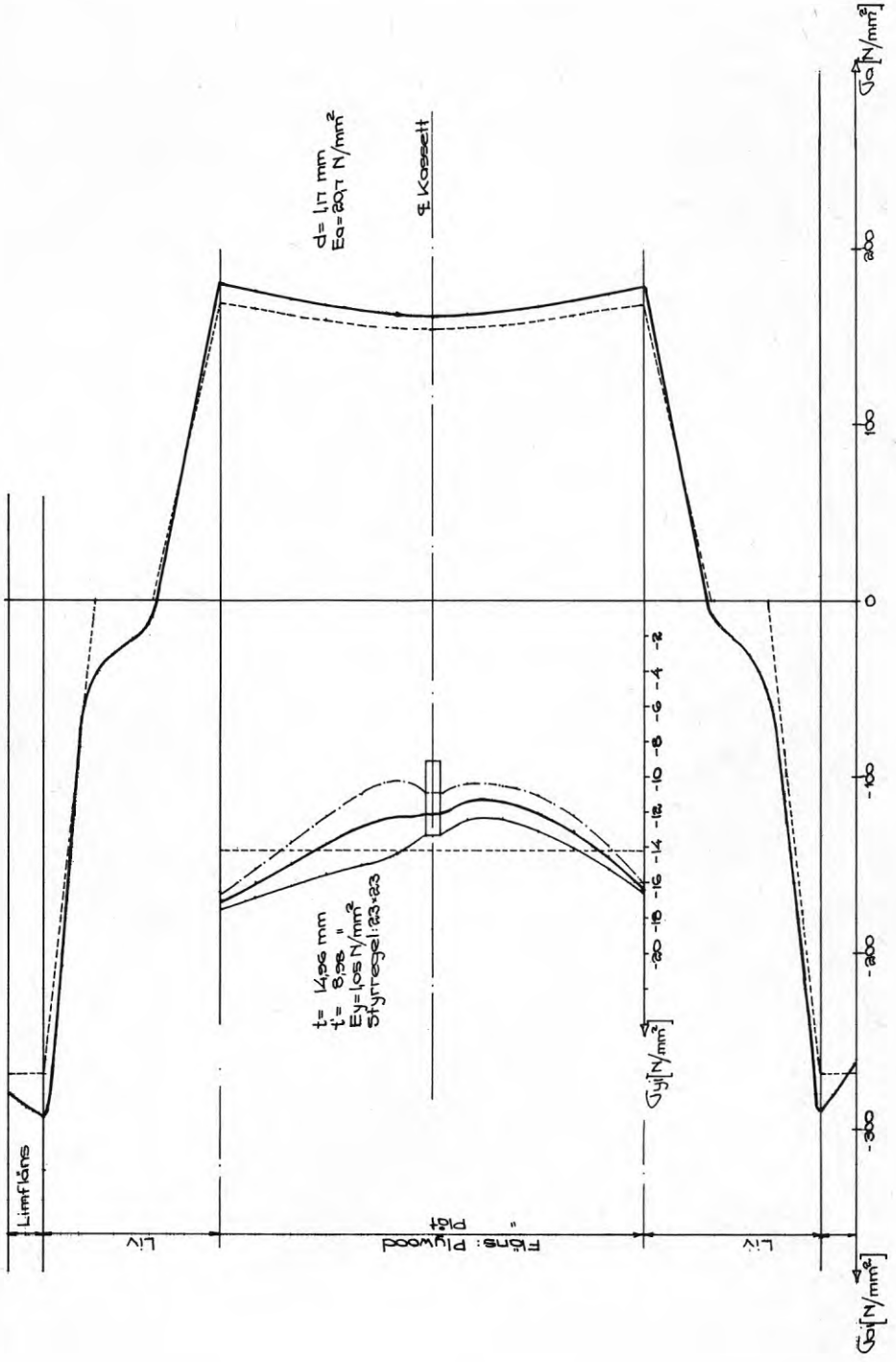


PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 97
 $P/4 = 632 \text{ kP}$

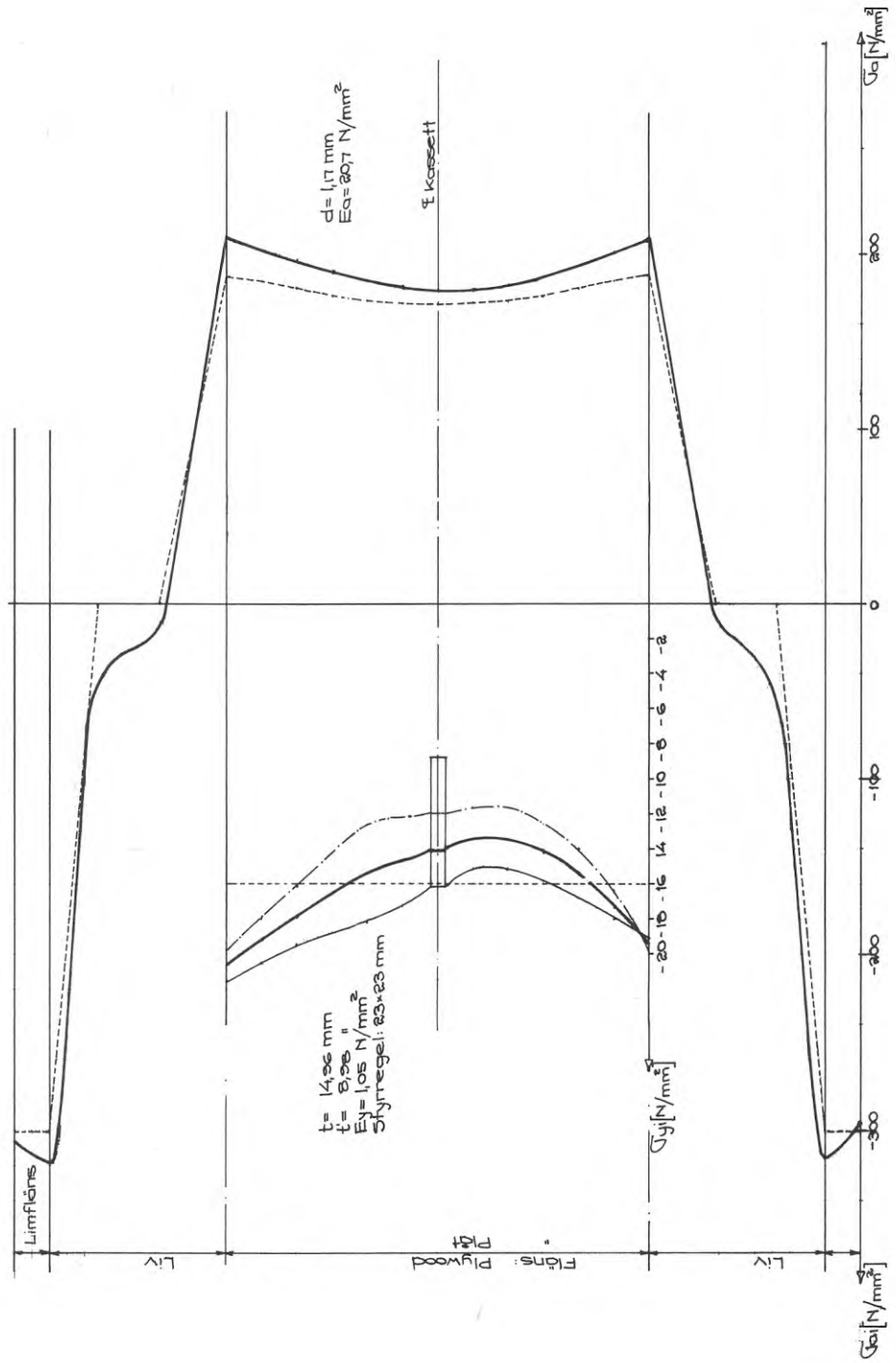
E 1



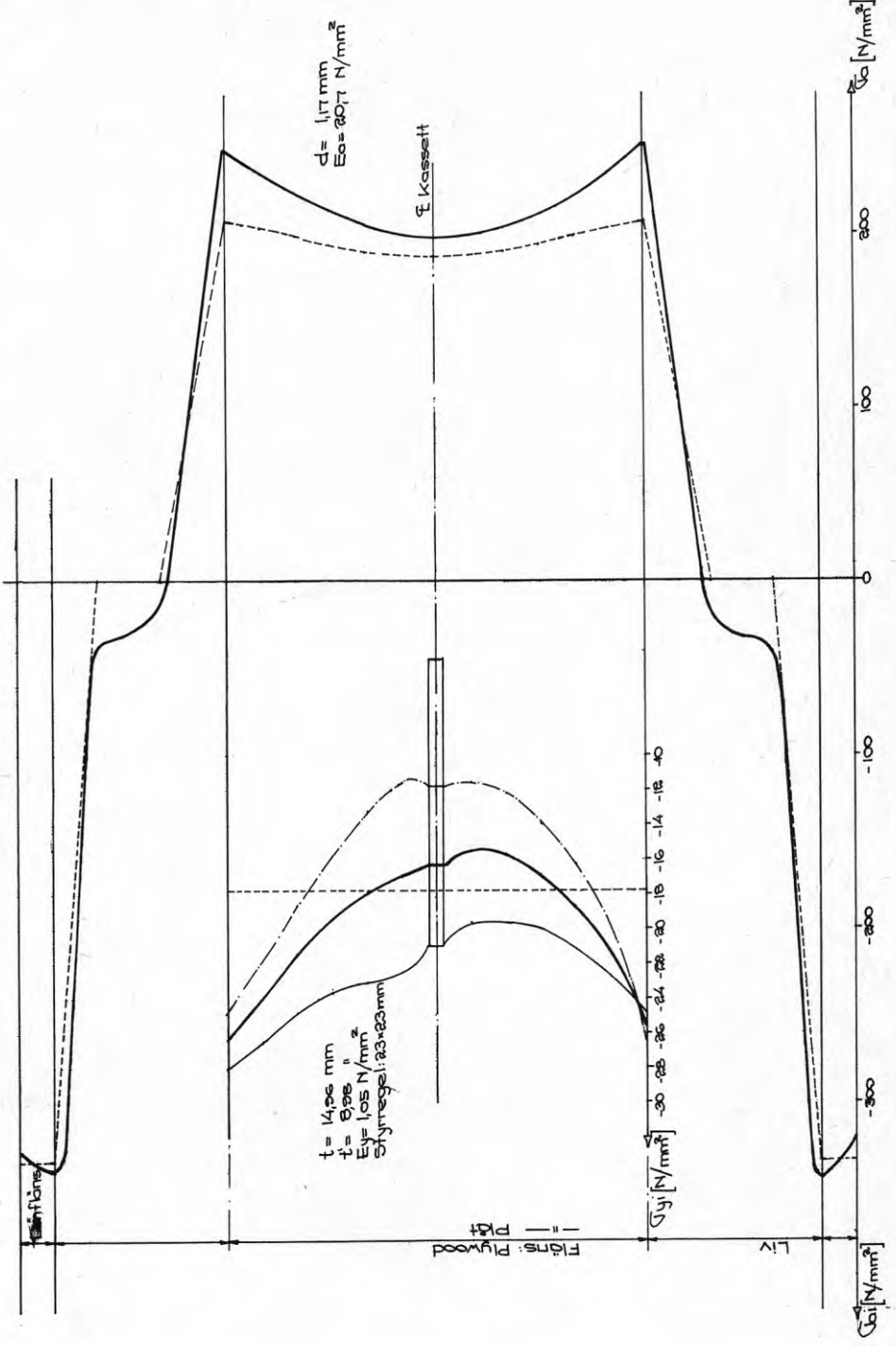
E 1

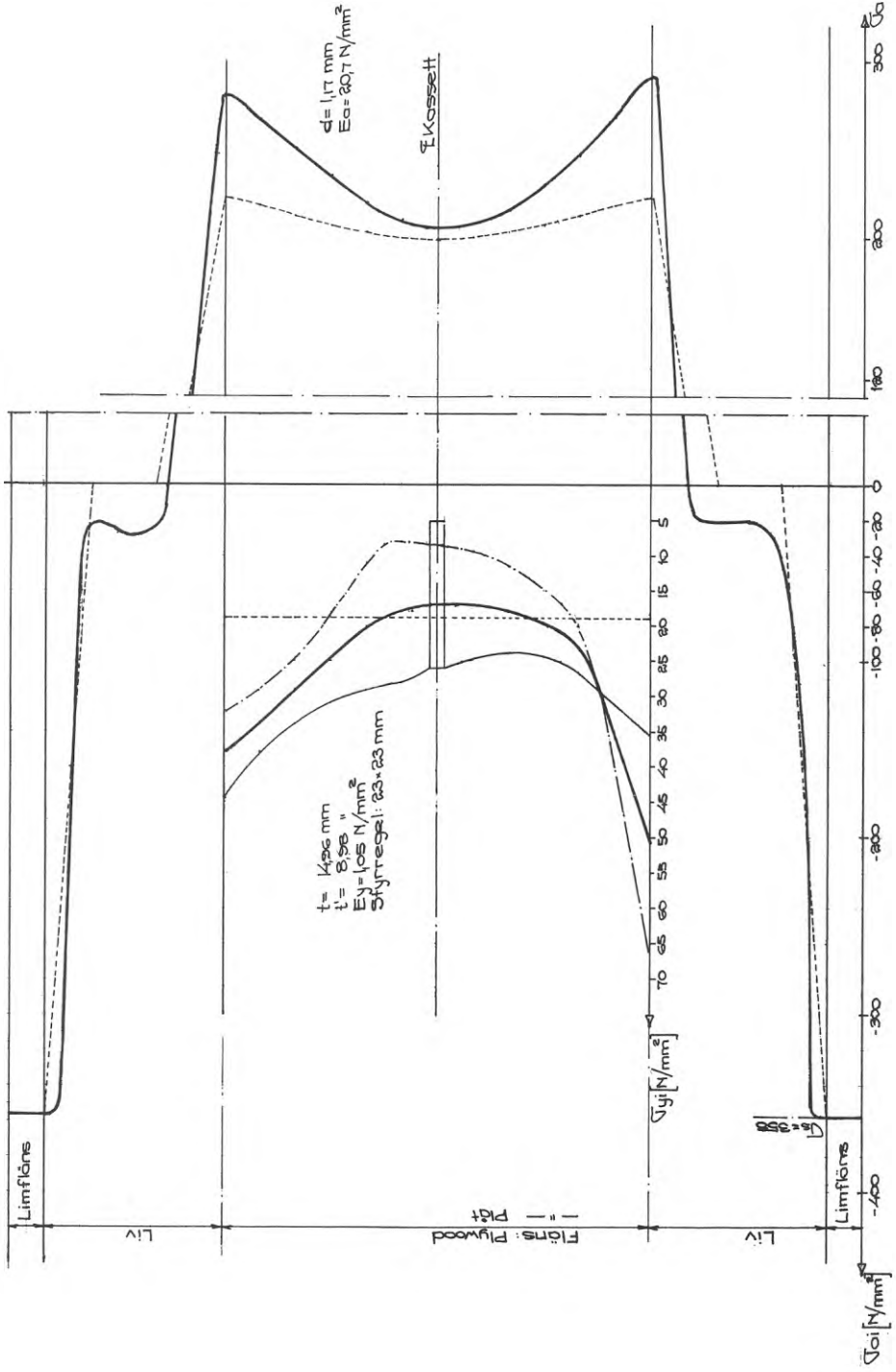


E 1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 99 P₁₉ = 195 kP



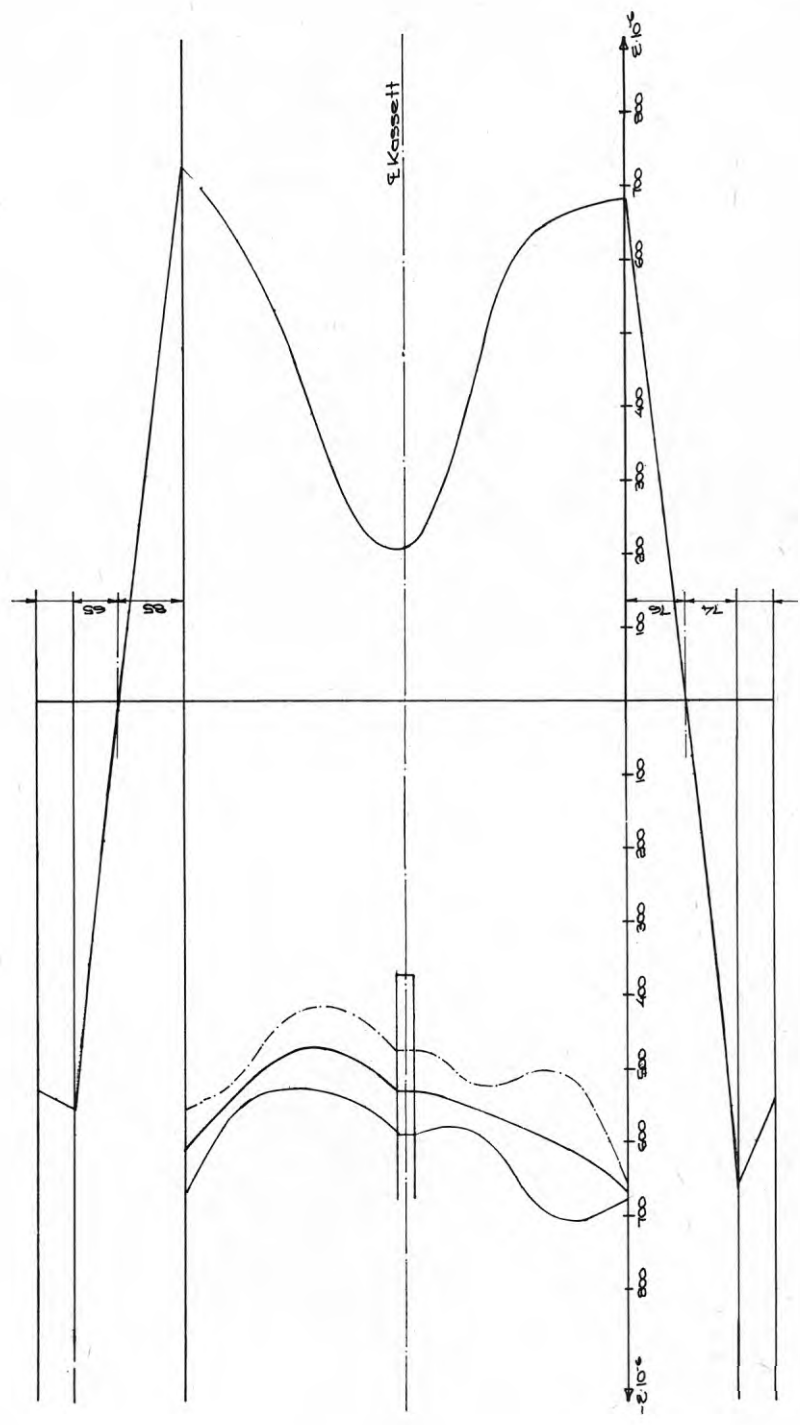
E1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 100
 $P_{93} = 616 \text{ kP}$





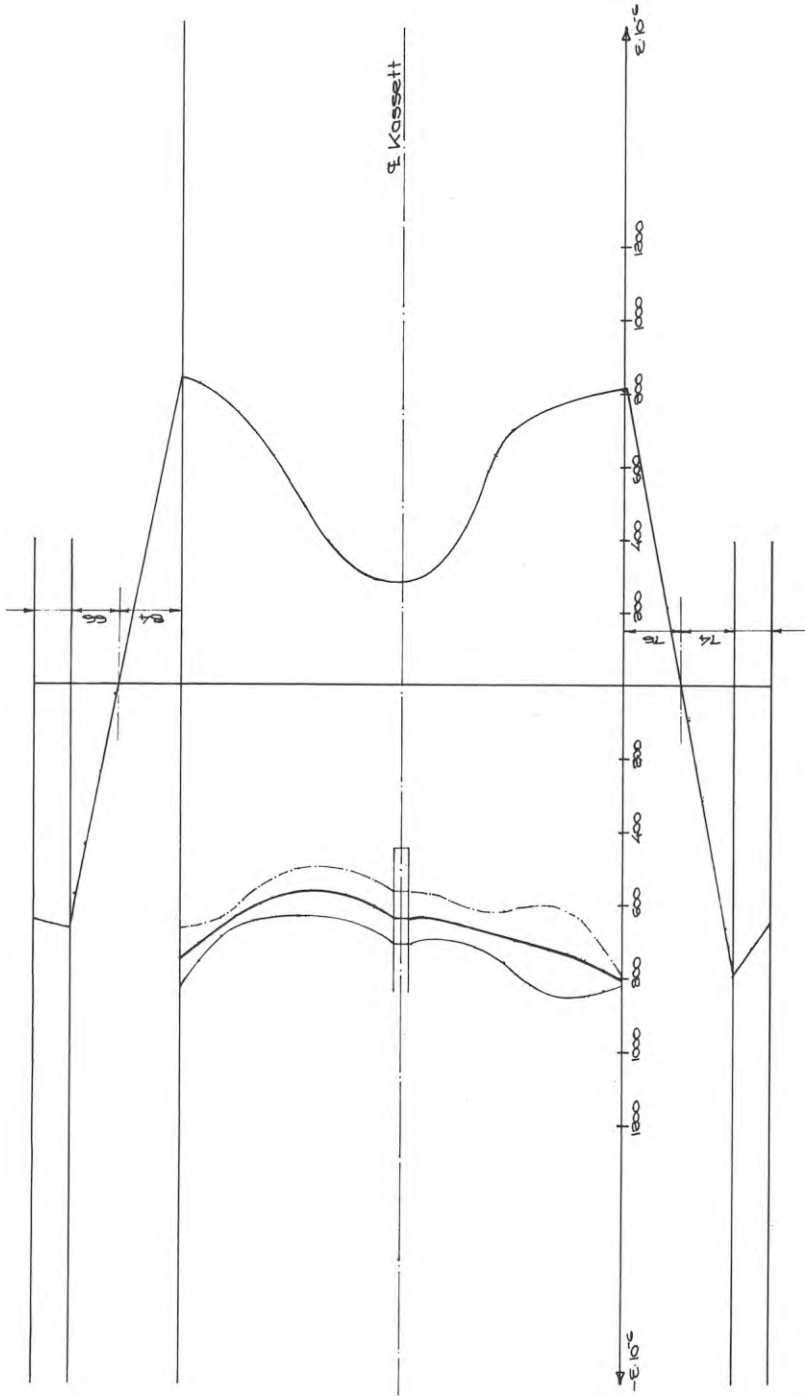
TOONINGS - STUKNINGSDIAGRAM
VID P₄ = 282 KP (P_{adm} = 520 KP)

C.1



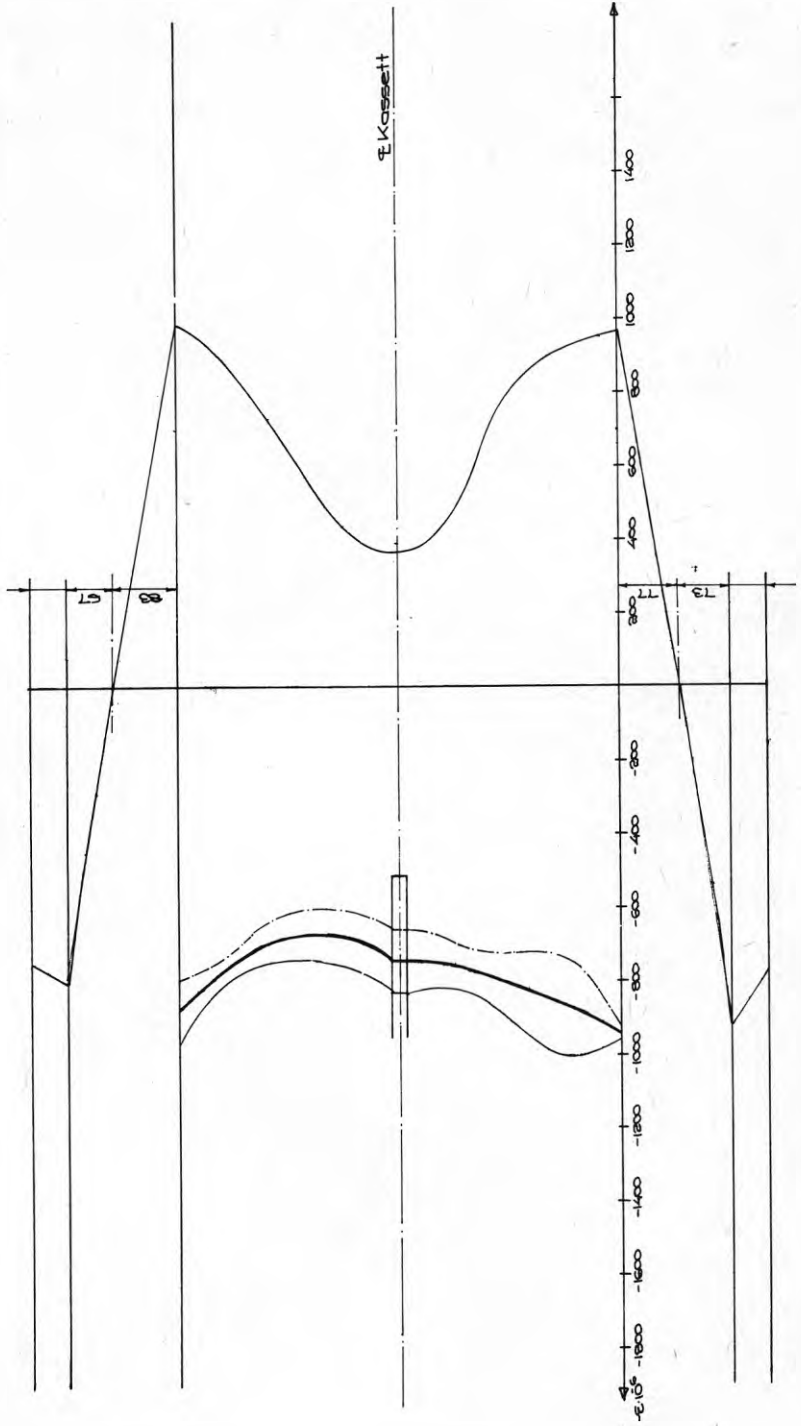
TÖJNING- STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_2 = 263$ ($P_{\text{BEMT}} = 520 \text{ kP}$)

C.1



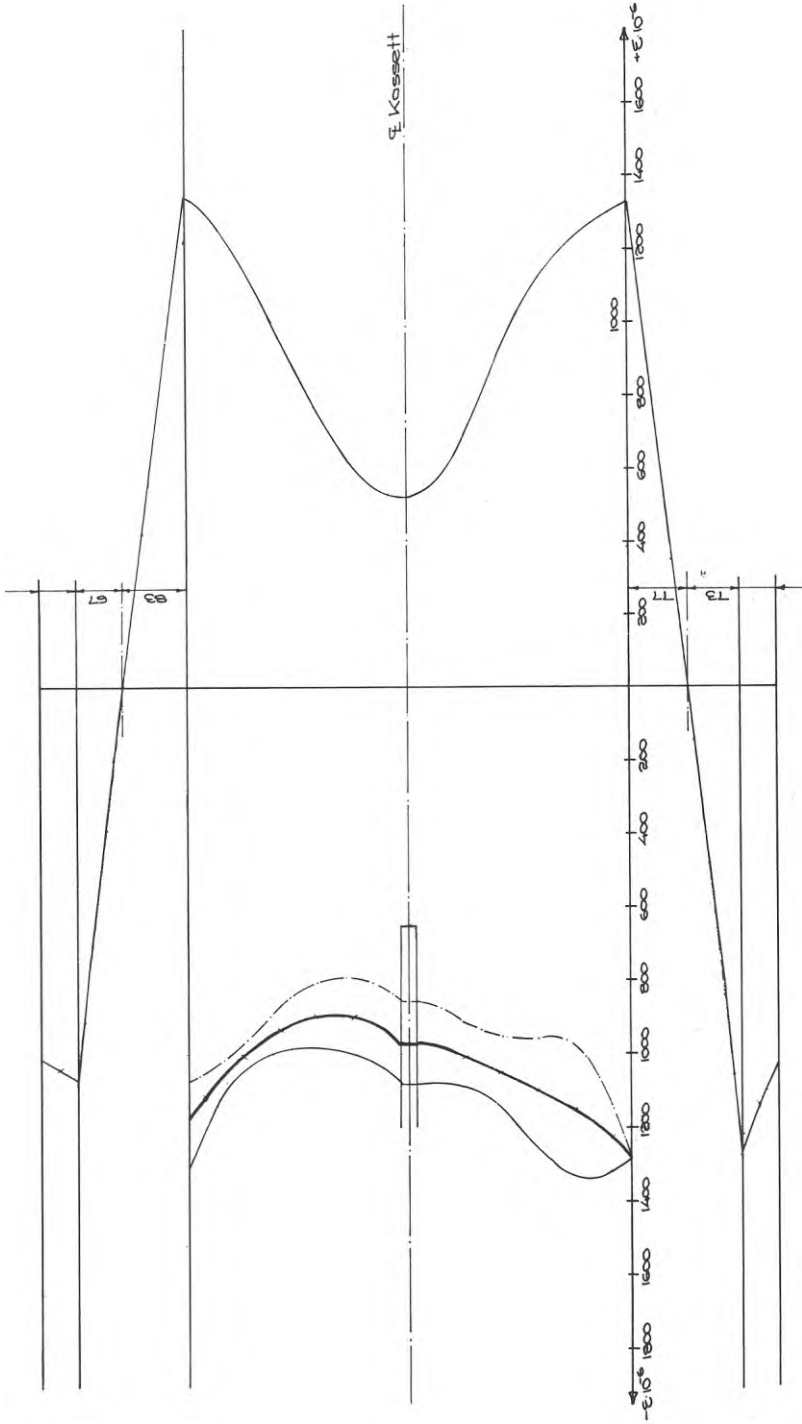
TÖJNING- STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_k = 303 \text{ KP}$ ($P_{\text{eff}} = 520 \text{ KP}$) FIG. 104

C.1



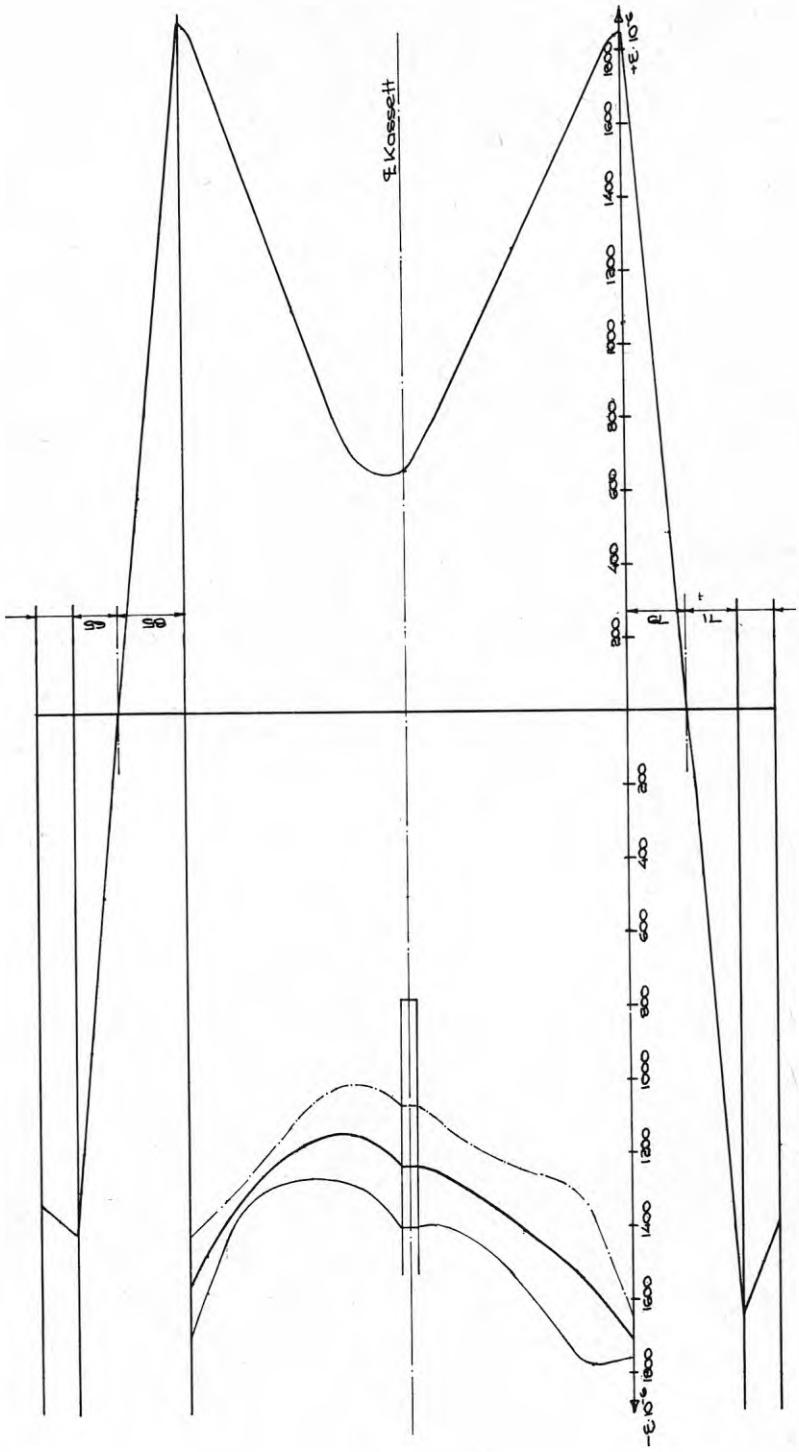
TÖJNING - STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_0 = 365 \text{ kP}$ ($F_{\text{max}} = 523 \text{ kP}$) FIG. 105

C1



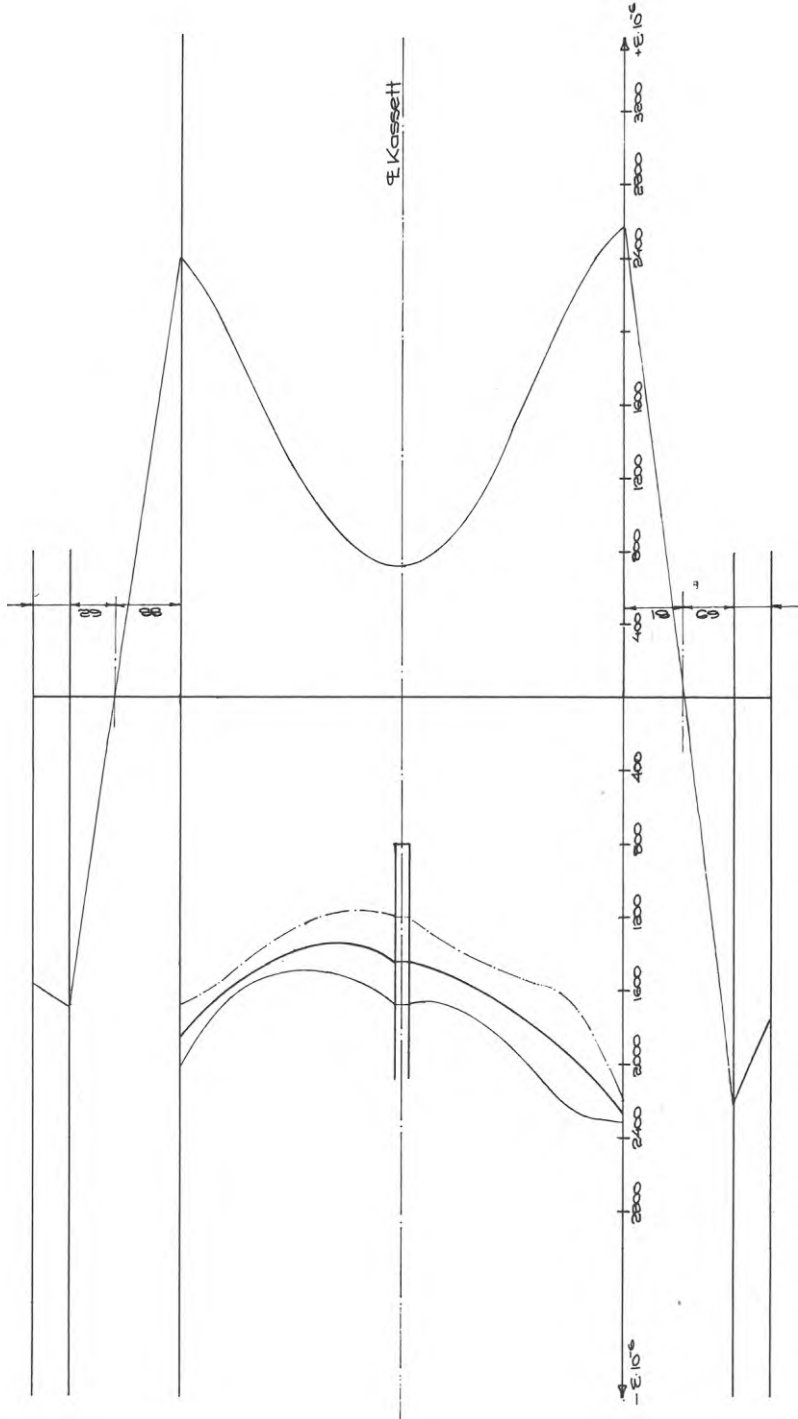
TÖNNINGS - STUKNINGSDIAGRAM
VID $P_0 = 466 \text{ KP}$ ($P_{\text{berett}} = 529 \text{ KP}$) FIG. 106

C.1.

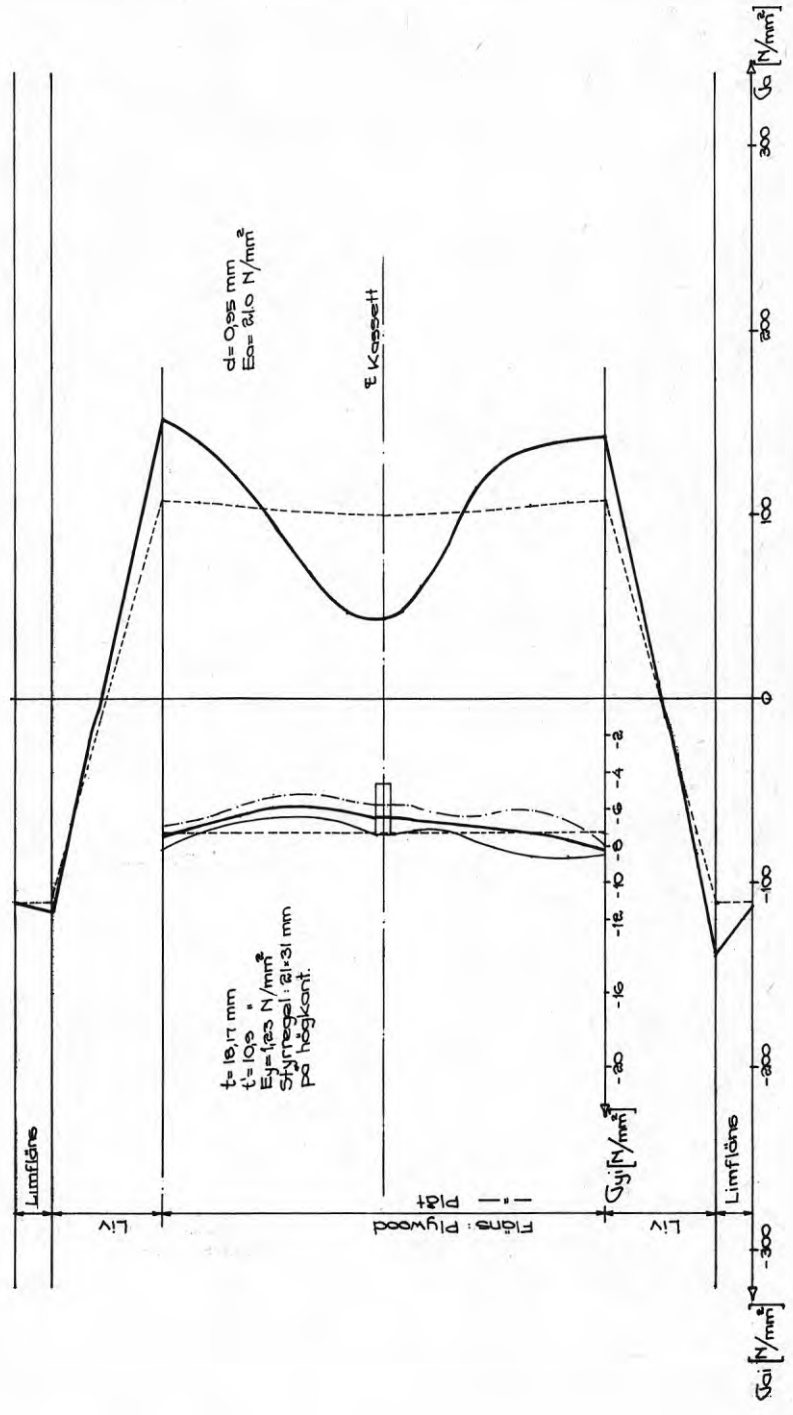


TÖJNINGS- STUKNINGSDIAGRAM
VID $R_{12} = 50\text{T KP}$ ($P_{\text{best}} = 529\text{ KP}$) FIG. 107

C 1



C.1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID $P_4 = 222 \text{ kP}$ FIG. 108



PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 109
 $P_3 = 263 \text{ kP}$

C1

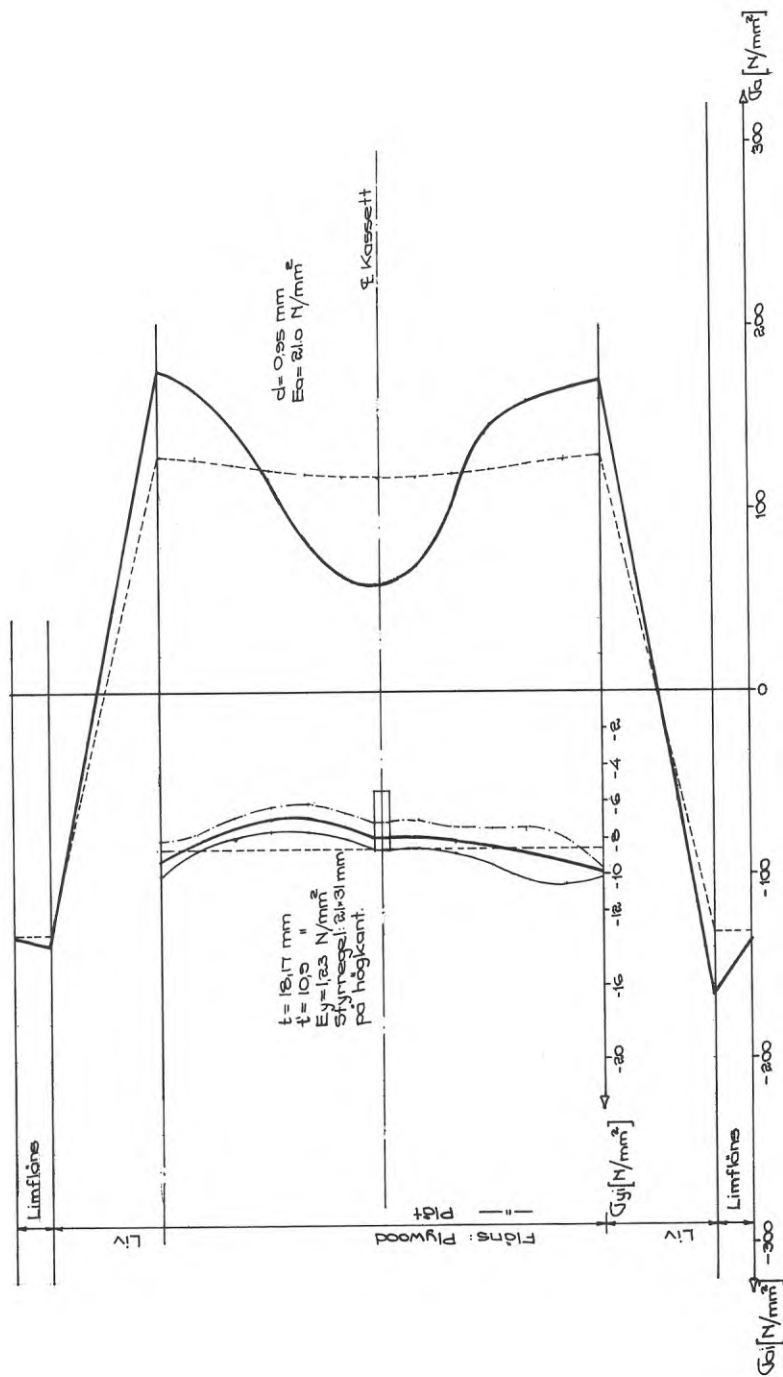
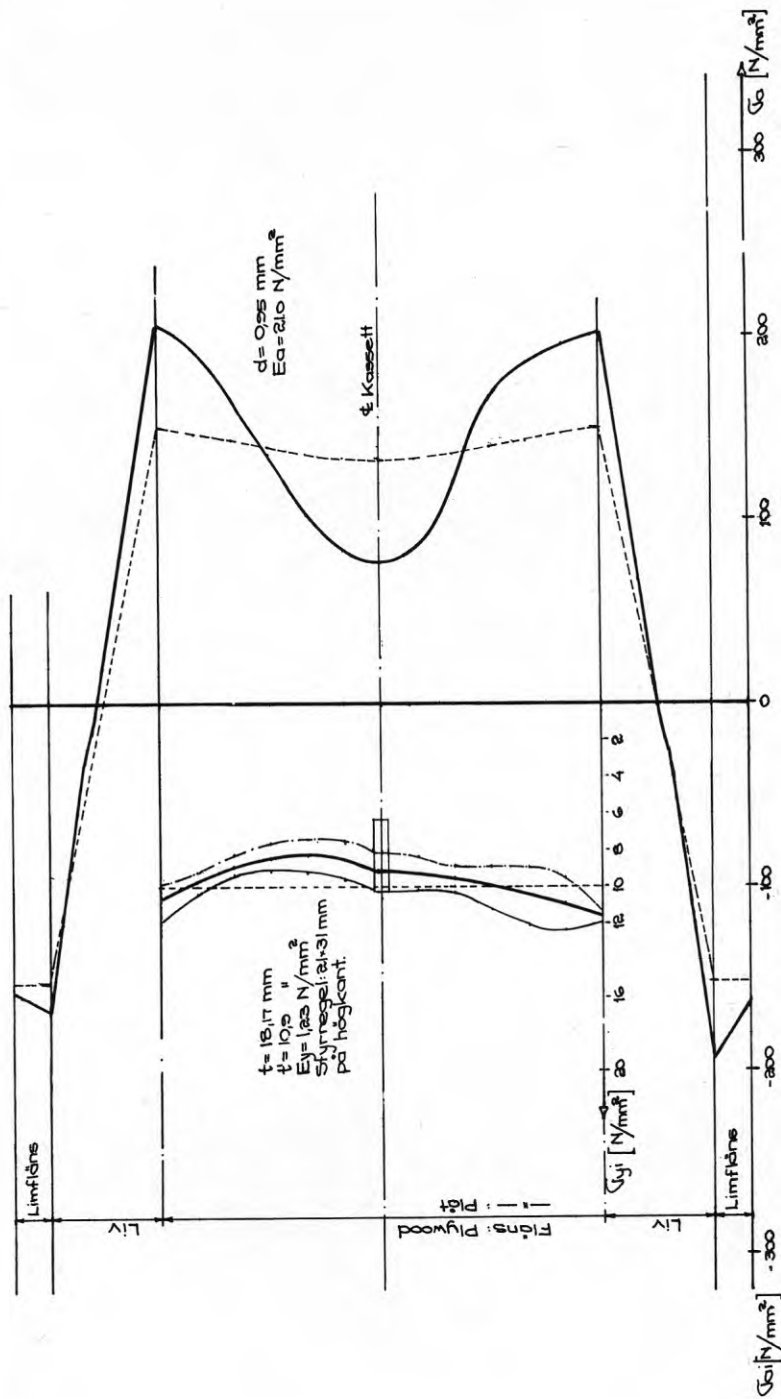


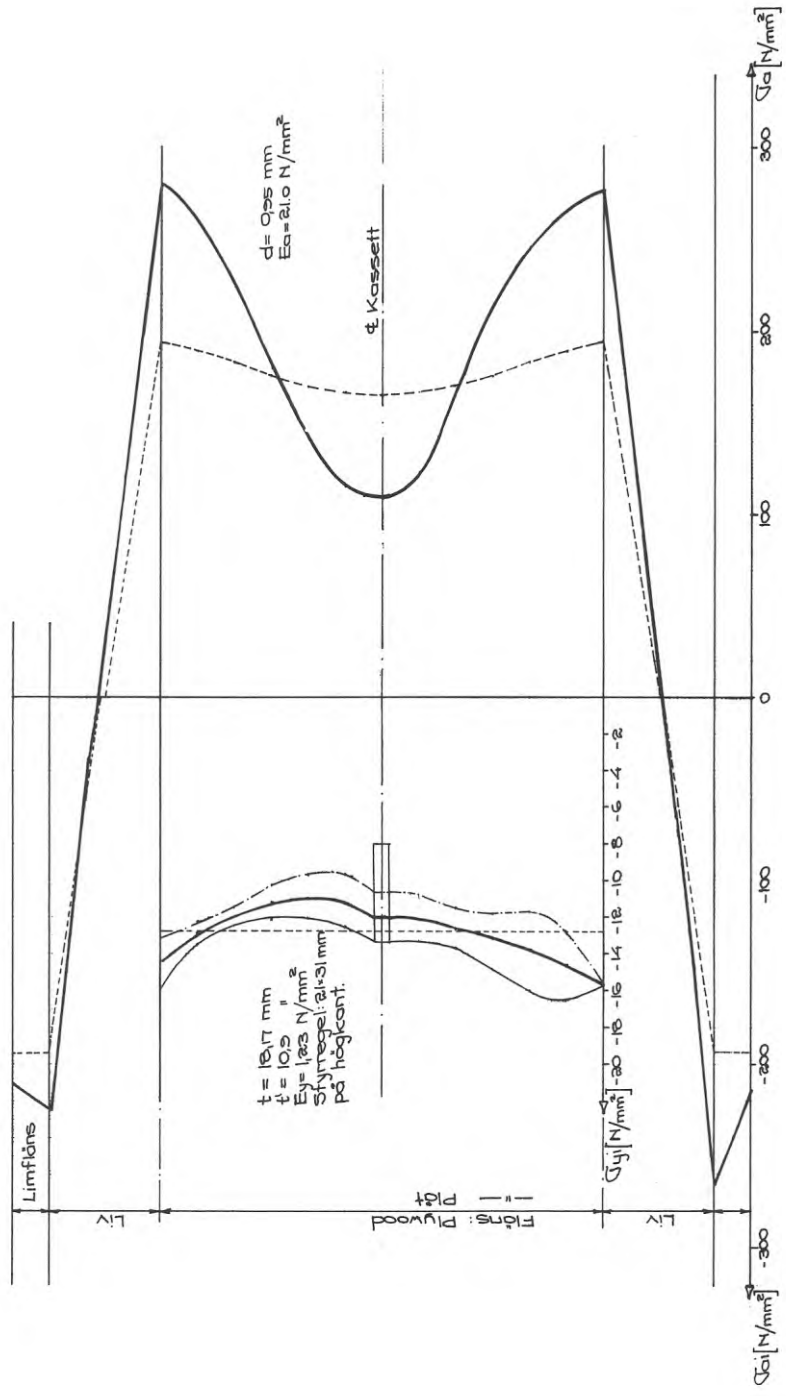
FIG. 10
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID
 $P_0 = 303 \text{ kP}$

C-1

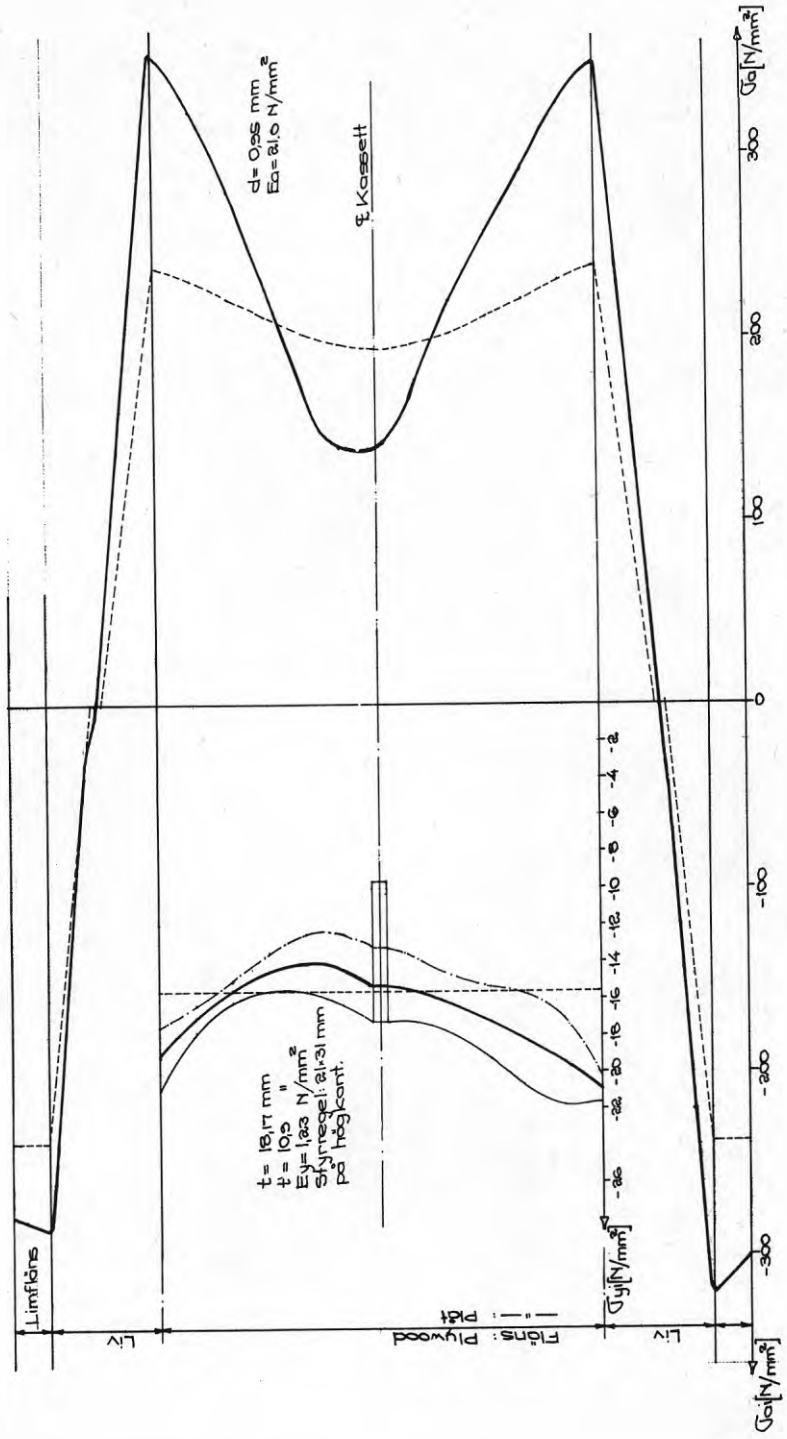


PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 111
 $P_0 = 365 \text{ kP}$

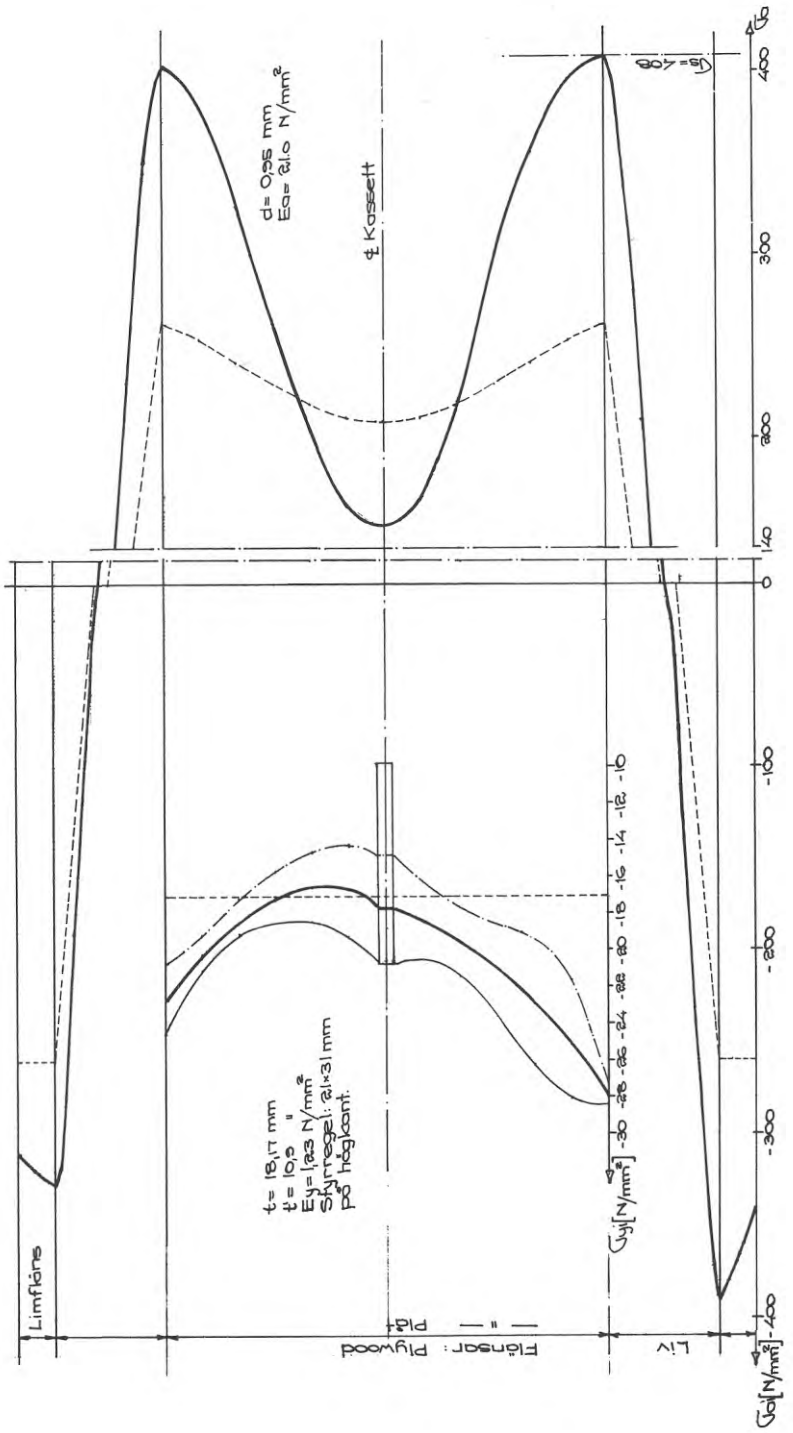
C1



C1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 112
 $R_0 = 466 \text{ kP}$

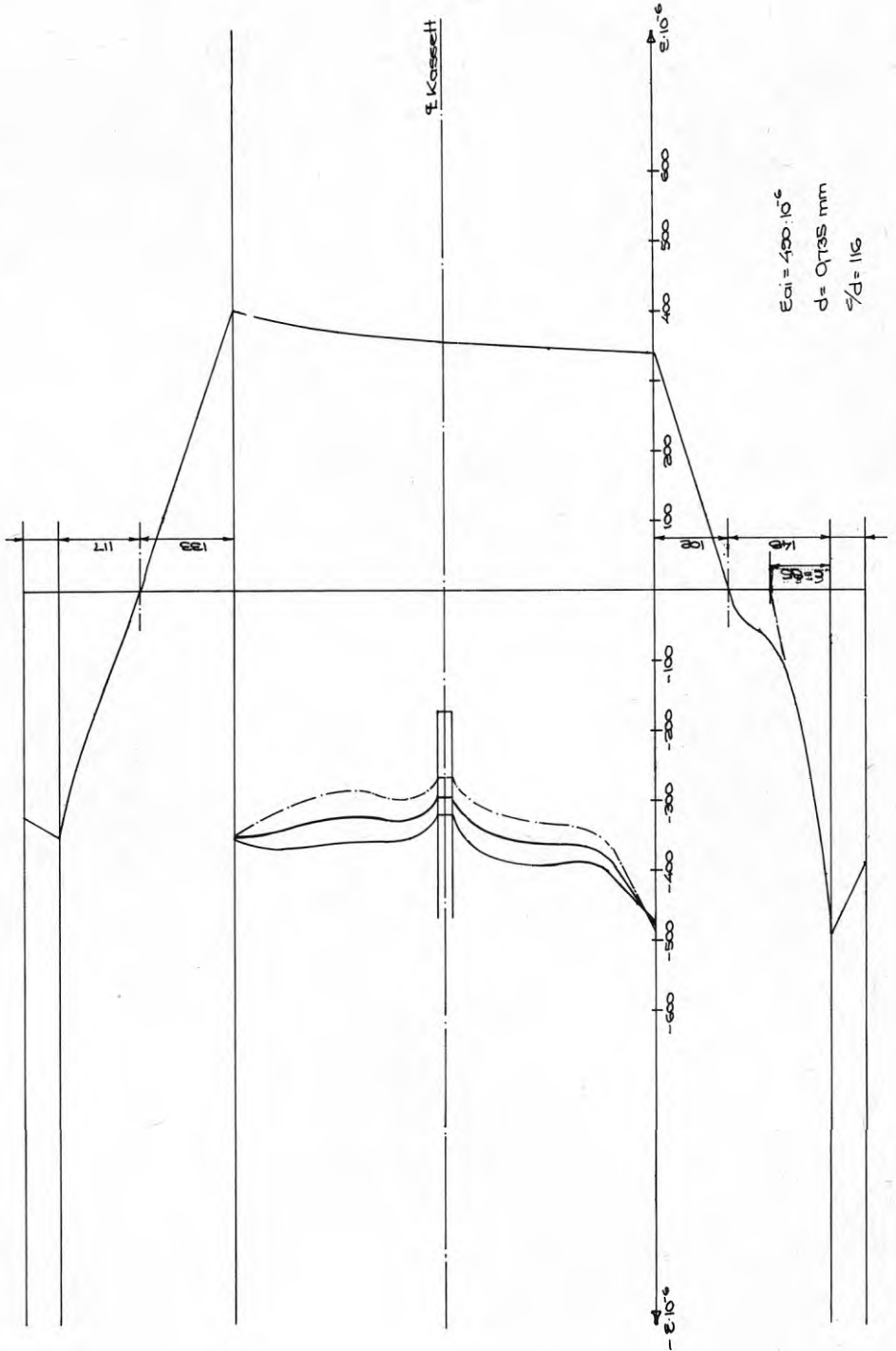


C1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 113
 $P_{12} = 507 \text{ kP}$



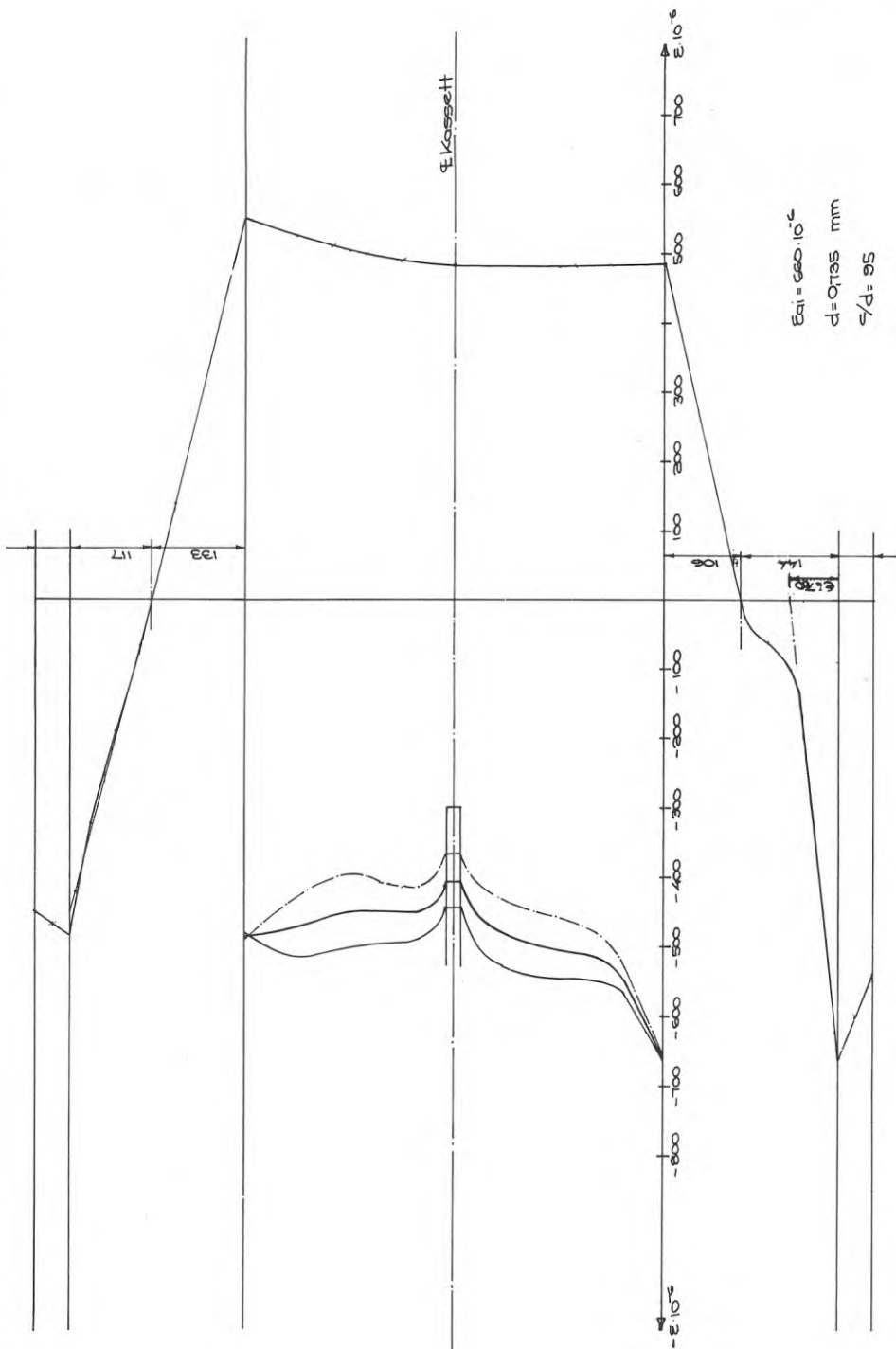
TÖNNINGS- STUKNINGSDIAGRAM FIG. 114
VID $P_1 = 221$ KP ($P_{\text{max}} = 668$)

G 1



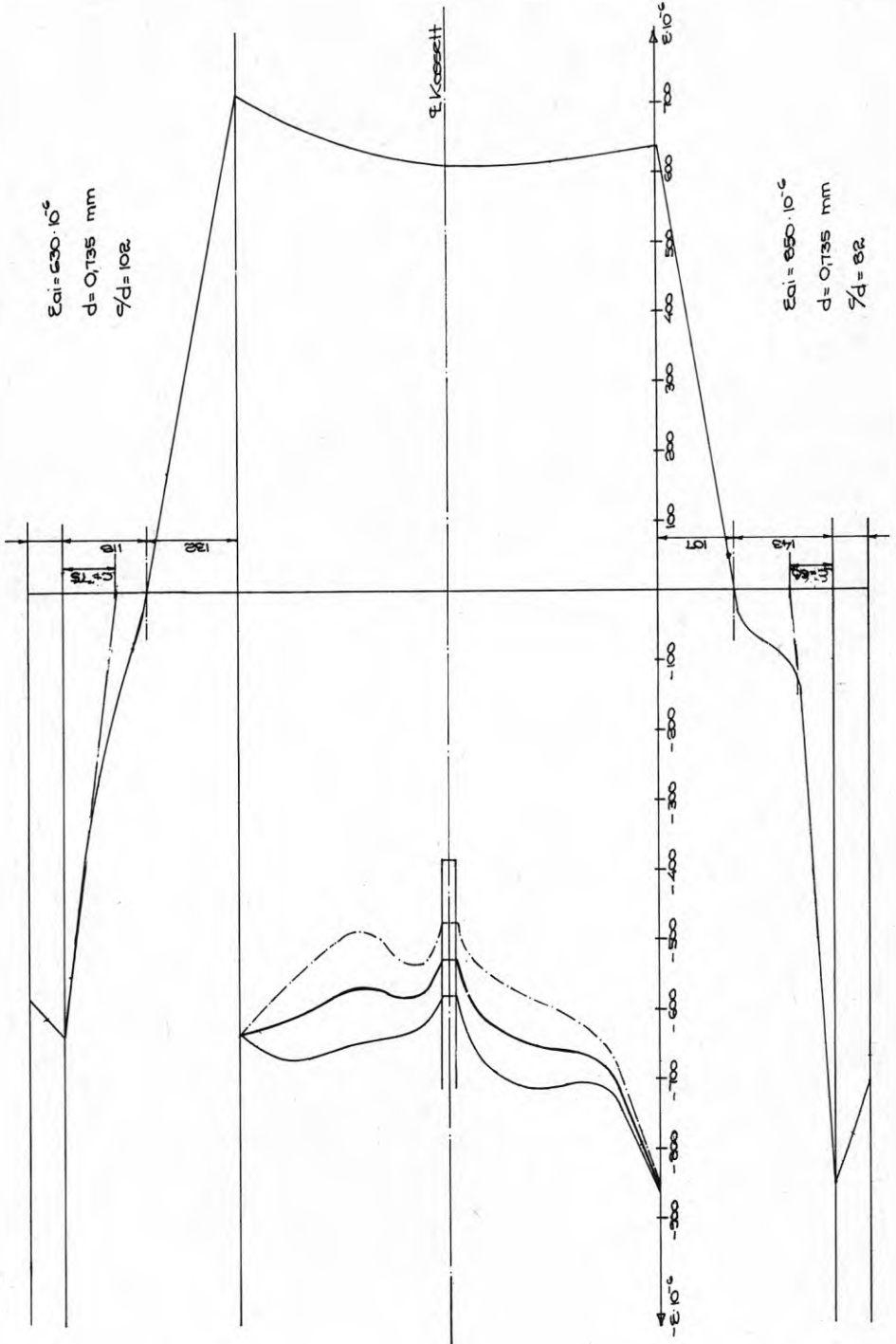
TÖJNING- STUKNINGSDIAGRAM FIG. 115
 VID $P_2 = 303$ KP ($P_{\text{max}} = 668$)

G 1



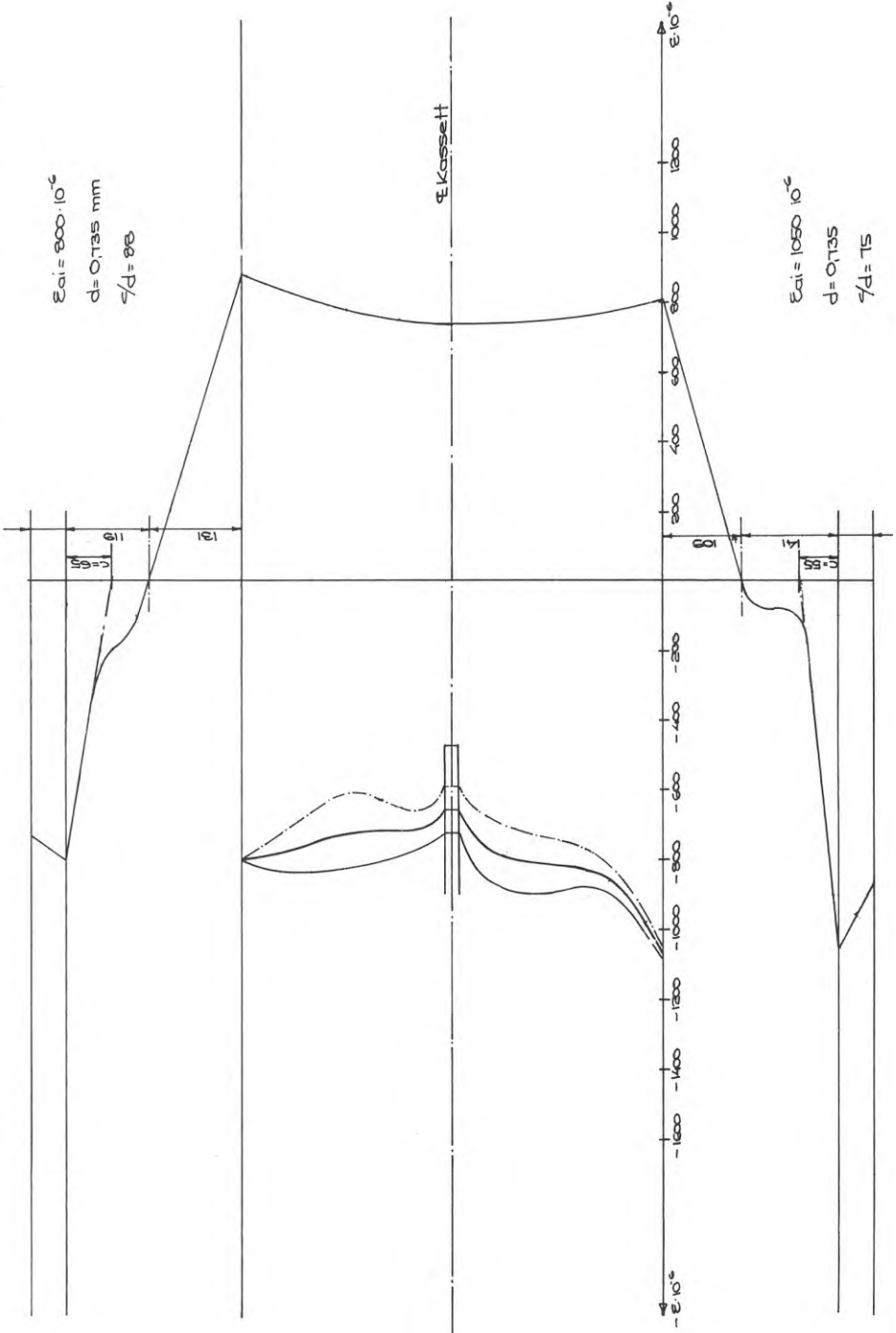
TÖNNINGS-STUKNINGSDIAGRAM FIG. 116
 VID $P_B = 364$ KP ($P_{Bkrit} = 668$)

G 1



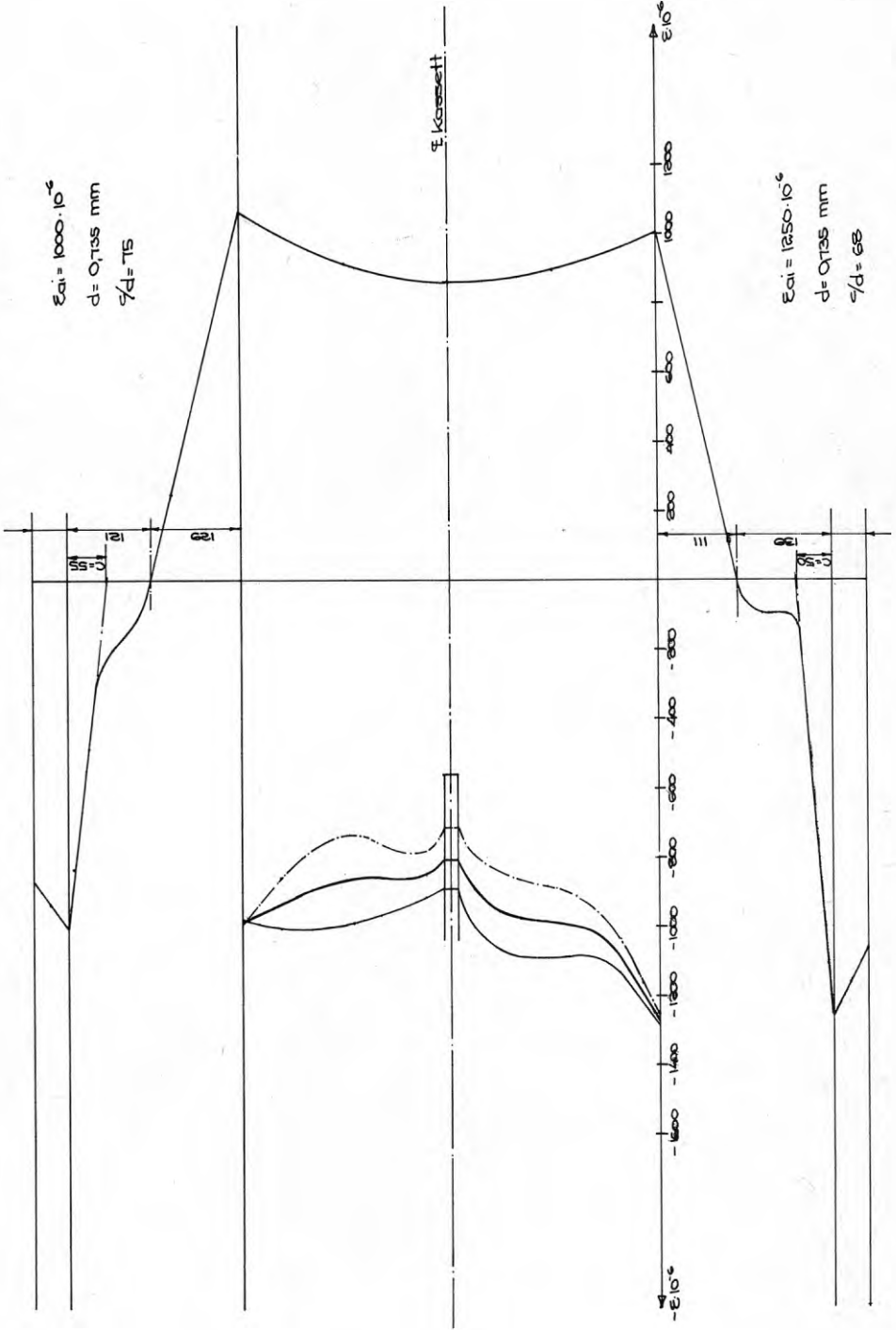
TÖJNING- STUKNINGSDIAGRAM FIG. 117
 VID $P_{10} = 465$ KP ($P_{BERTT} = 668$)

G 1



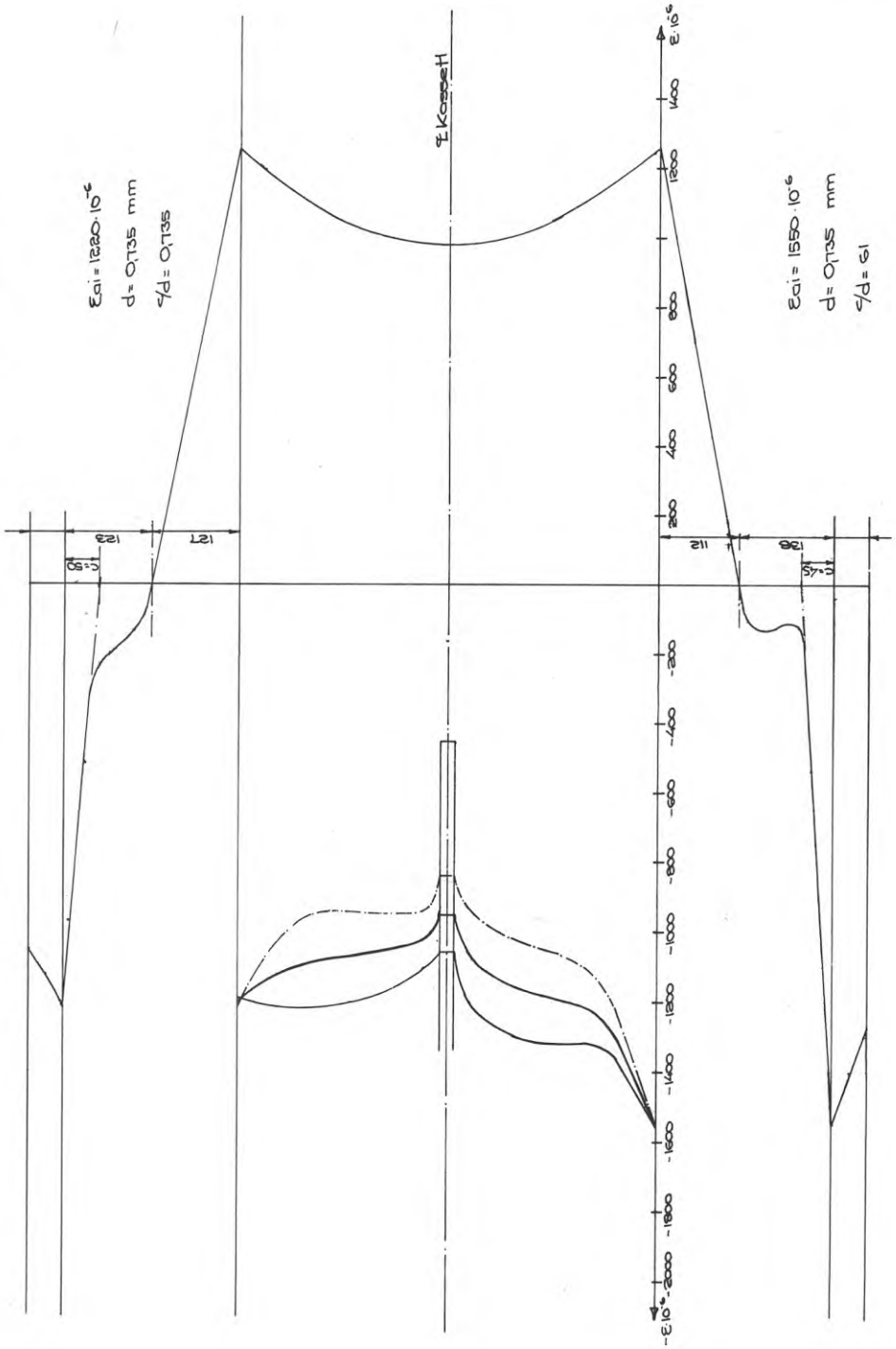
TÖRNINGS - STUKNINGSDIAGRAM FIG. 118
 VID $R_p = 54\% \text{ KP} (R_{\text{max}} = 668)$

G 1

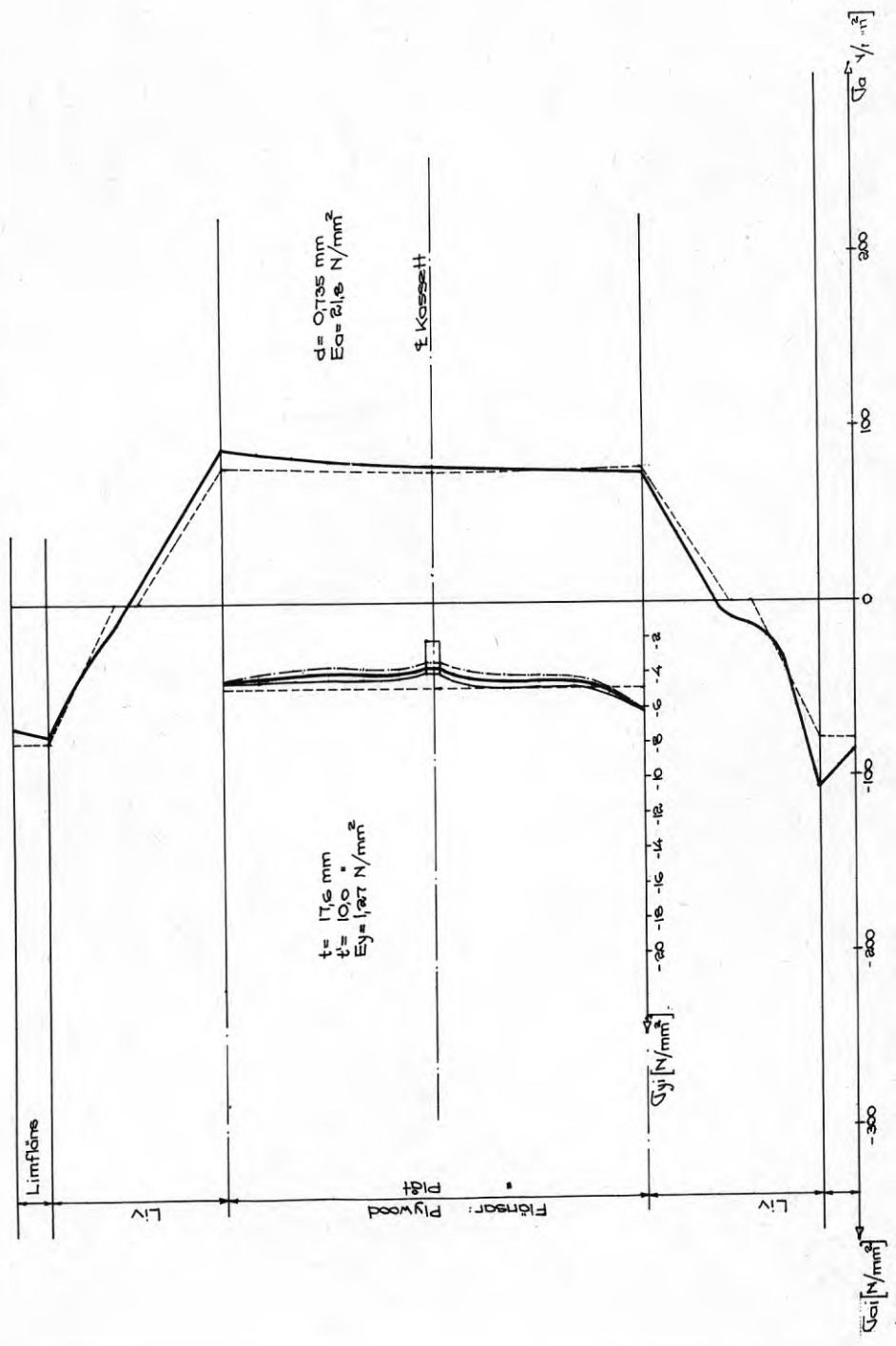


TÖNNINGS- STUKNINGSDIAGRAM FIG. 119
 VID $P_{14} = 668$ KP ($P_{\text{max}} = 668$)

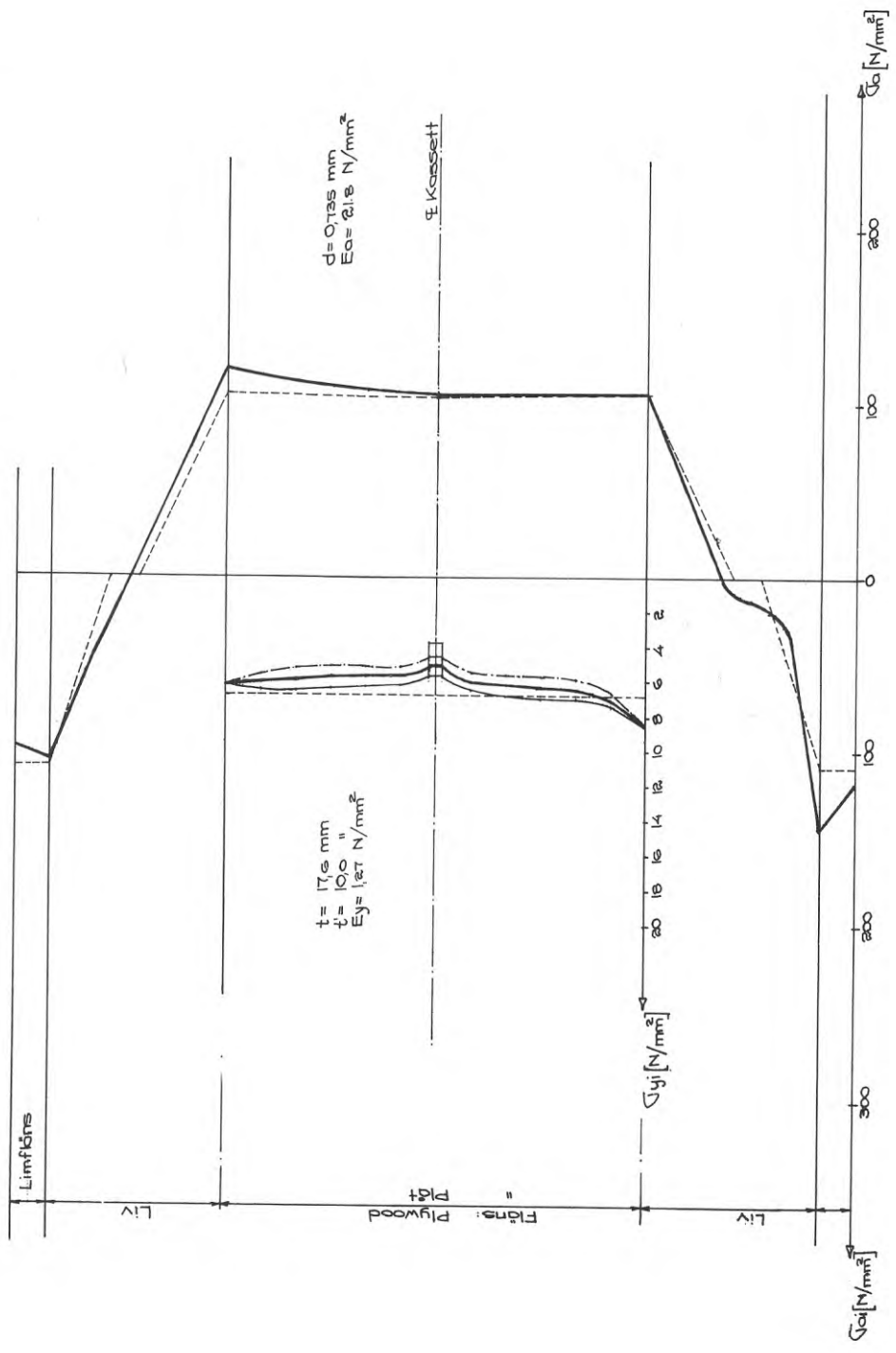
G 1



G 1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 120
 $P_1 = 221 \text{ kP}$

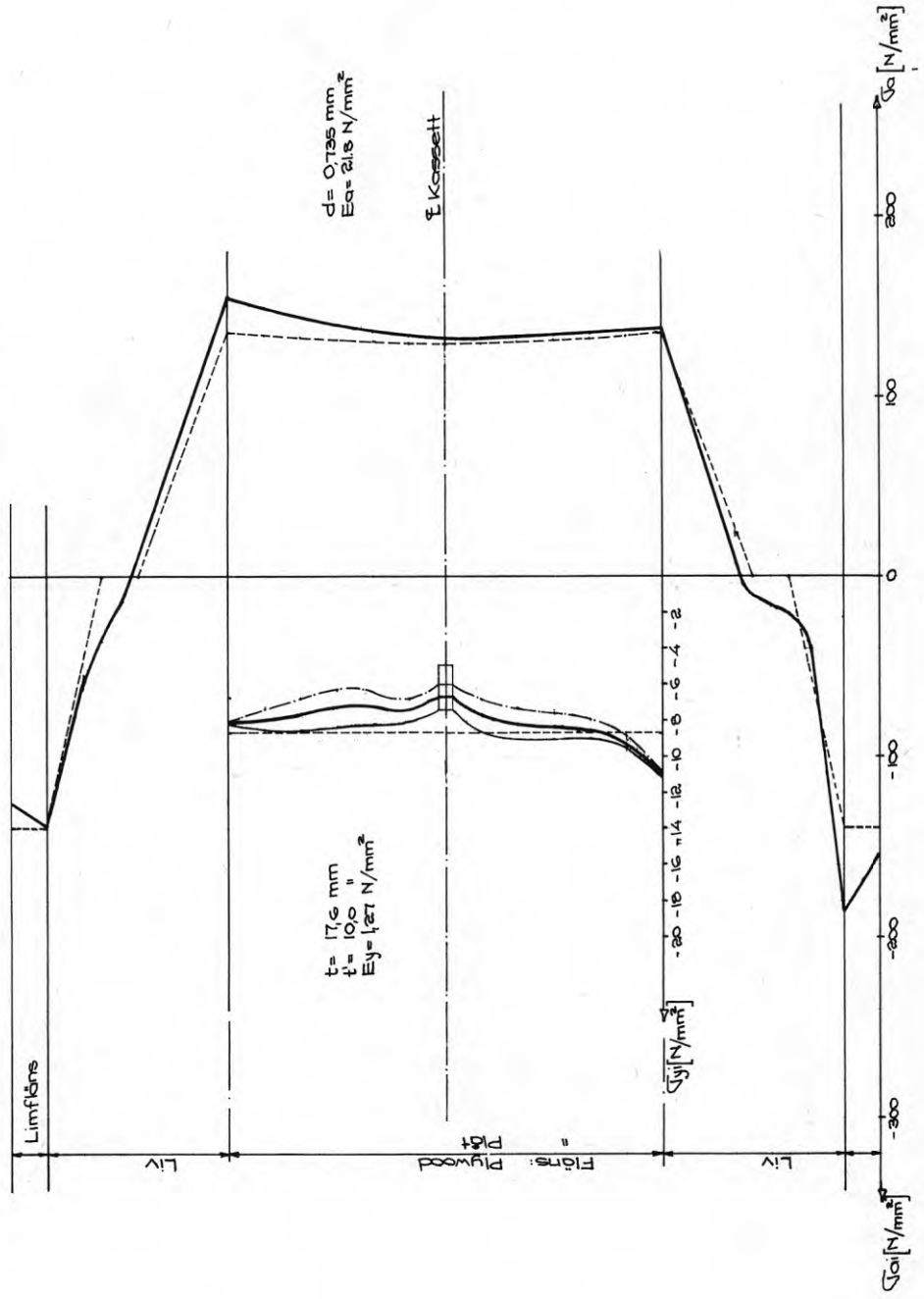


G1
 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID $P_c = 303 \text{ kP}$ FIG. 121



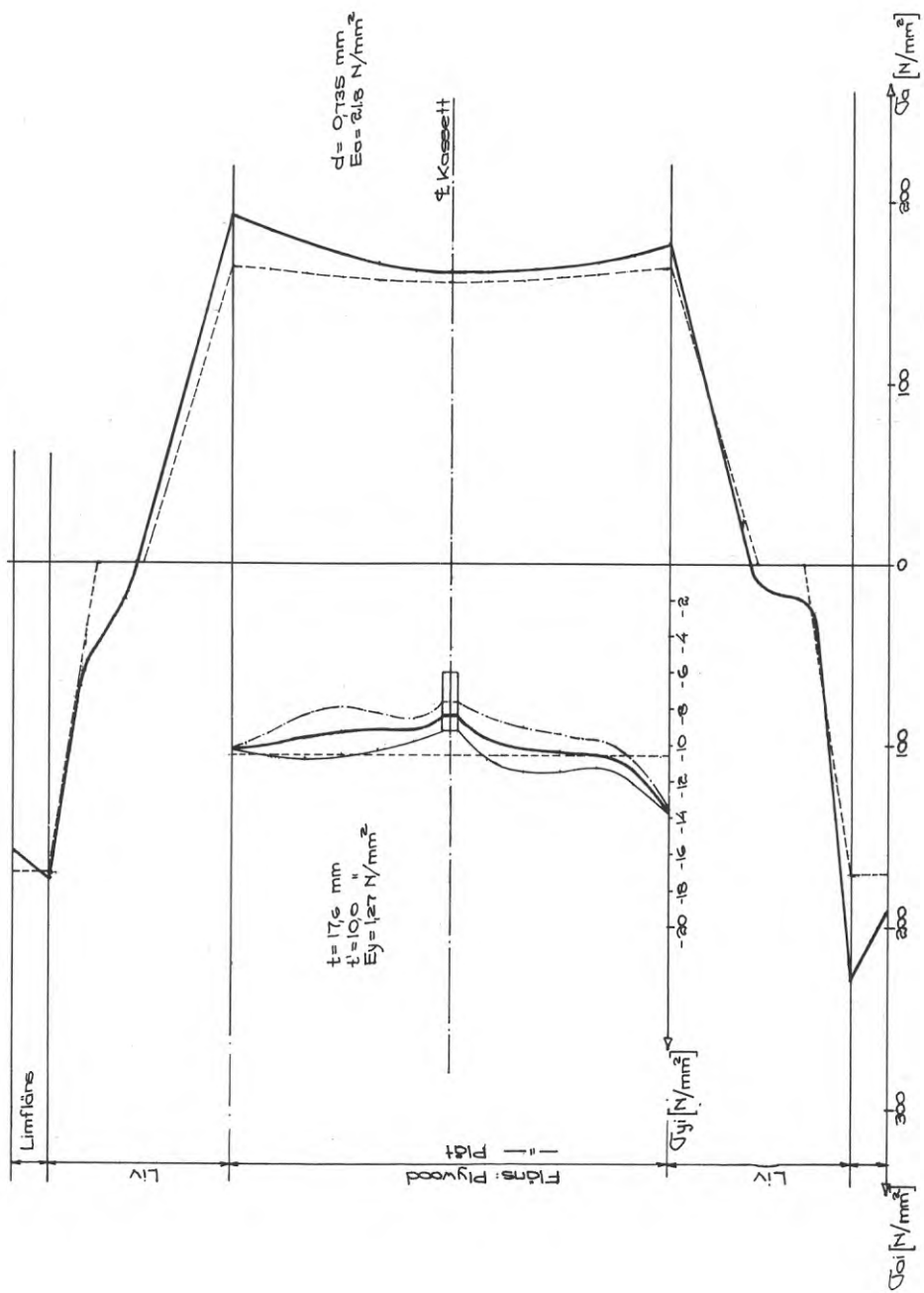
PAKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 122
 P₀ = 304 KP

G 1

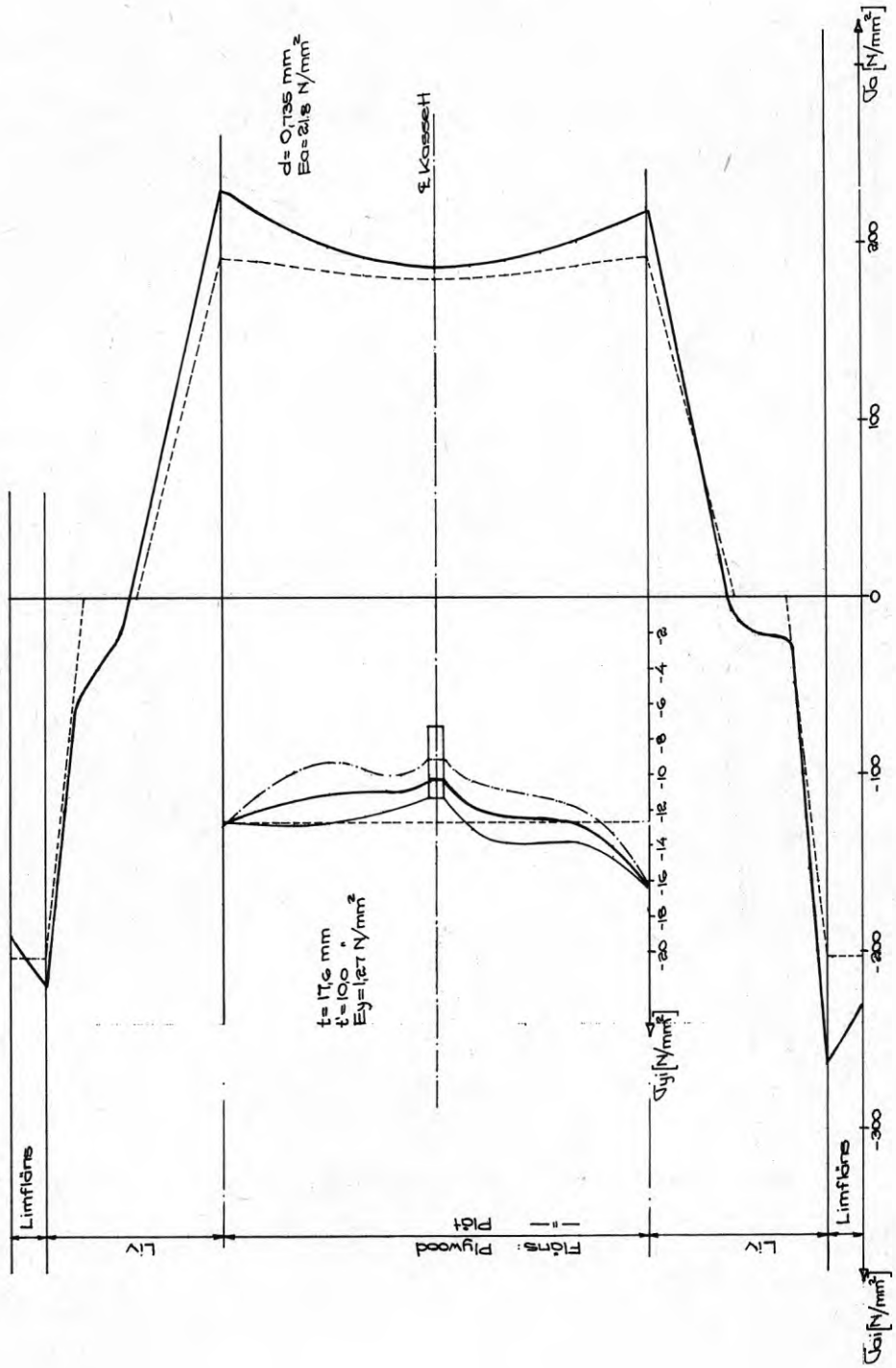


PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID $P_0 = 465 \text{ kP}$ FIG. 123

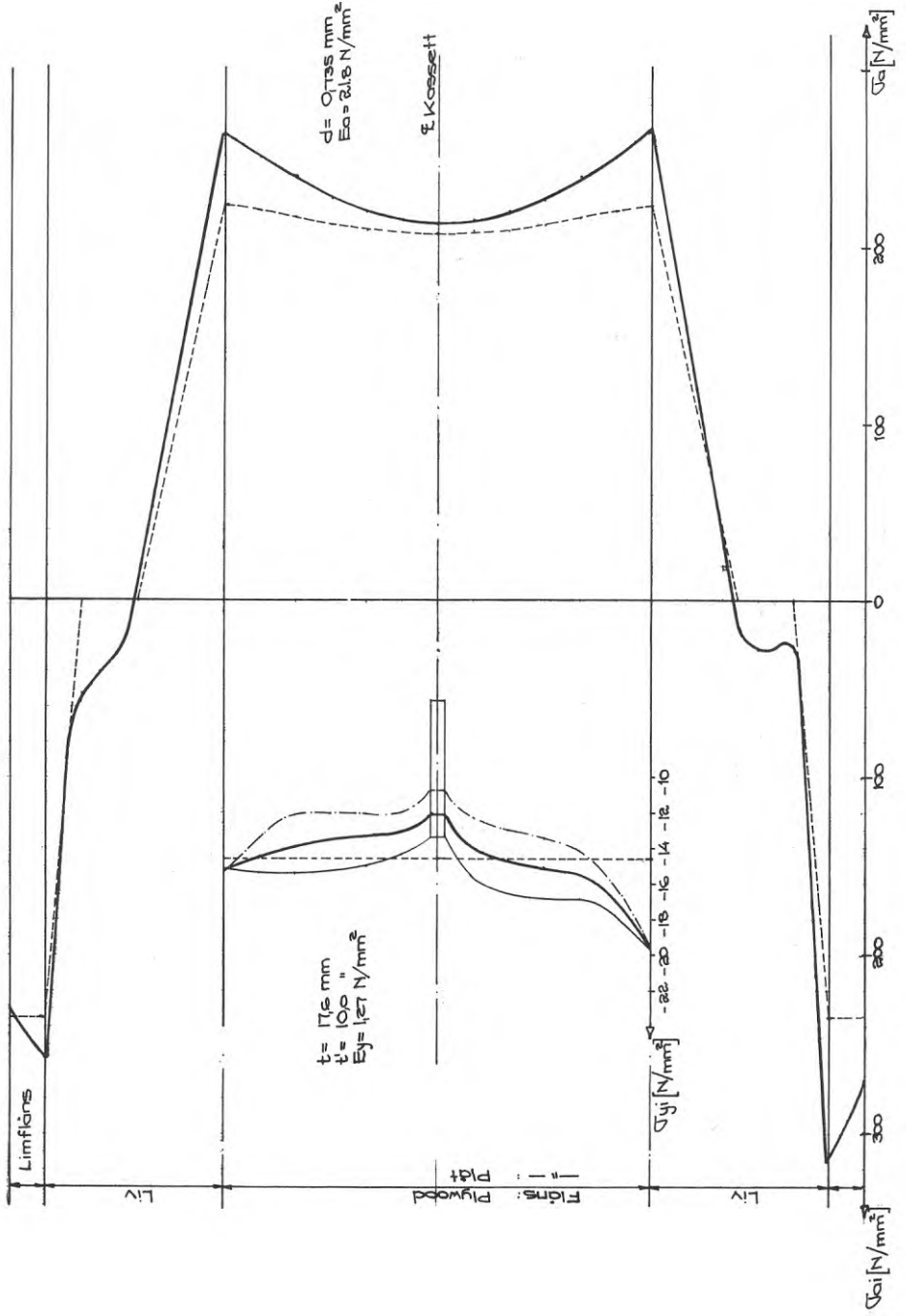
G 1



G 1 PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID FIG. 124
 $P_{12} = 546 \text{ kP}$



G 1
PÅKÄNNINGSDIAGRAM VID
P₁₄ = 628 KP (P_{BERÖRT} = 668 KP) FIG. 125



R56: 1975

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag C 913 från
Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen för
Stålbyggnad, KTH, Stockholm.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Grupp: konstruktion**

Pris: 33 kronor + moms