

BYGGFORSK

Særtrykk 58

Laminerte trekonstruksjoners stivhet og styrke

Av dr. techn. Johannes Moe

M. N. I. F.



OSLO 1961

97 yj 03321

ex 2

De undersøkelser som blir beskrevet her, ble utført som en samarbeidsoppgave mellom Norges byggforskningsinstitutt og Norsk Treteknisk Institutt, og med finansiell støtte fra Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd.

En engelsk utgave av denne artikkelen foreligger som NBI Særtrykk nr 58, «Strength and stiffness of glued laminated timber beams».

Laminerte trekonstruksjoners stivhet og styrke

Dr. techn. Johannes Moe, M. N. I. F.

DK 624.011.1

Artikkelen gir en oversikt over relativt omfattende eksperimentelle undersøkelser av laminerte bjelkers stivhet og styrke som nylig er blitt utført ved Norsk Treteknisk Institutt. I alt ble over førti bjelker belastet til brudd. Virkeskvaliteter og lameltykkelser ble variert systematisk. Forsøkene viste at de tillatte spenninger som er foreskrevet i NS 446 er rimelige, mens elastisitetmodulen for laminert virke bør kunne settes ca 20 % høyere enn NS 446 forutsetter. (Summary in English at end of the article.)

1. Innledning.

Trevirket byr som konstruksjonsmateriale på mange fordeler i sammenligning med de fleste andre materialer. Det er lett å bearbeide, det har liten vekt, stor styrke og gode varmeisolerende egenskaper. Trevirket har da også fra gamle dager av hatt en solid posisjon som byggemateriale for småhus i Norge. I dag ser vi begynnelsen til en utvikling mot utstrakt bruk av trevirke også i store frittstående konstruksjoner, som tidligere nesten utelukkende har vært forbeholdt materialer som stål og betong. Det tenkes i denne forbindelse spesielt på de moderne laminerte trekonstruksjoner. Disse brukes allerede en god del til kirker, sportshaller, utstillingslokaler og lignende bygg-

Utdrag av foredrag holdt i Dansk Ingeniørforenings bygningsingeniørgruppe den 2. mai 1961 med tittel *Laminering og spikerliming*. Møtet var arrangert av Statens Byggeforskningsinstitutt, København.

verk hvor deres meget tiltalende utseende kommer til sin fulle rett. Fig. 1 viser en messehall som nylig er oppført i Stavanger. Ved industribygg er det en betydelig fordel at disse konstruksjonene er meget raske å montere og eventuelt å forandre.

Ved Norsk Treteknisk Institutt er det i løpet av de siste par årene blitt utført endel eksperimentelle undersøkelser som tar sikte på å fremme den utvikling som er beskrevet ovenfor. De undersøkelser som blir beskrevet her, ble utført som en samarbeidsoppgave mellom Norges byggforskningsinstitutt og Norsk Treteknisk Institutt og med finansiell støtte fra Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd.

Detaljerte rapporter om den utførte undersøkelse og de oppnådde resultater er under trykning. [1,2]. I det efterfølgende skal gis en noe forkortet beskrivelse av disse forsøkene.

2. Bakgrunn.

Laminerte trekonstruksjoner dimensjoneres i Norge efter de regler som er gitt i Norsk Standard 446, og trevirket sorteres med hensyn til

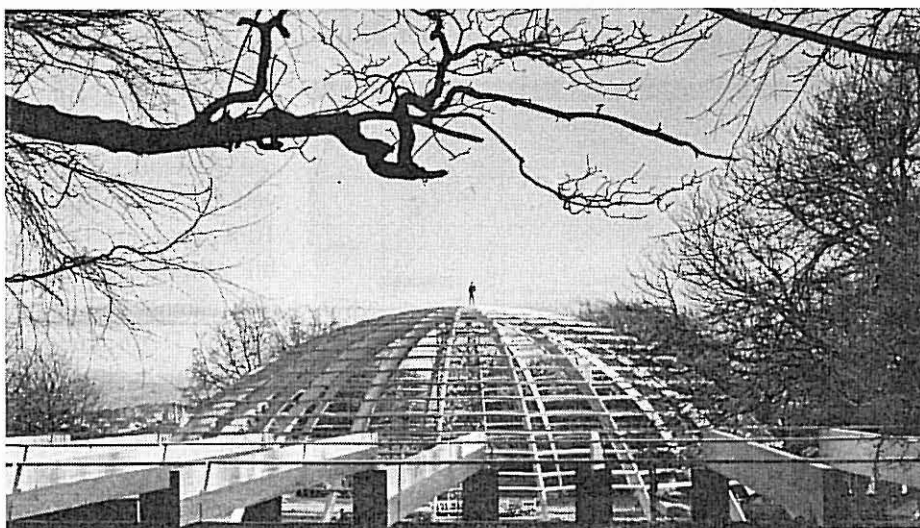


Fig. 1. Kuppel i laminert tre oppført i Stavanger.

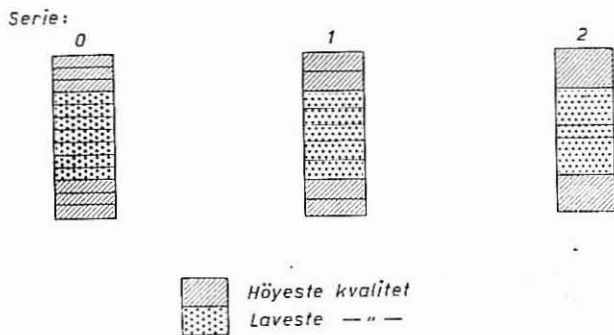


Fig. 2. Forsøksbjelkenes tverrsnitt.

styrke etter reglene i Norsk Standard 447. Begge disse standarder, som ble vedtatt i 1957, er relativt moderne, og inneholder spesielle regler om laminerte konstruksjoner. En svakhet ved NS 446 og NS 447 er det at de nesten utelukkende er basert på utenlandske forsøksresultater for såvidt angår tillatte spenninger og deres relasjon til de innførte sorteringsregler.

For å rette endel på dette forhold, ble det planlagt og utført en større eksperimentell undersøkelse av laminerte trebjelkers styrke og stivhet.

3. Prøveserier og prøvningsmetodikk.

I alt ble vel førti bjelker belastet til brudd. Bjelkene hadde alle et tverrsnitt på 7×20 cm og en lengde lik 4,5 m. De ble inndelt i tre serier med

Tabell 1. Antall prøvede laminerte bjelker.

Virkeskombinasjoner:	T390/ T300	T390/ VRAK	T300/ T210	T210/ VRAK
Serie 0	6			5
Serie 1	6	5	5	5
Serie 2			5	5

forskjellige lamelltykkelser slik som vist i fig. 2. Lamelltykkelsene var henholdsvis 16, 22 og 45 mm for seriene 0, 1 og 2. I hver bjelke ble det benyt-

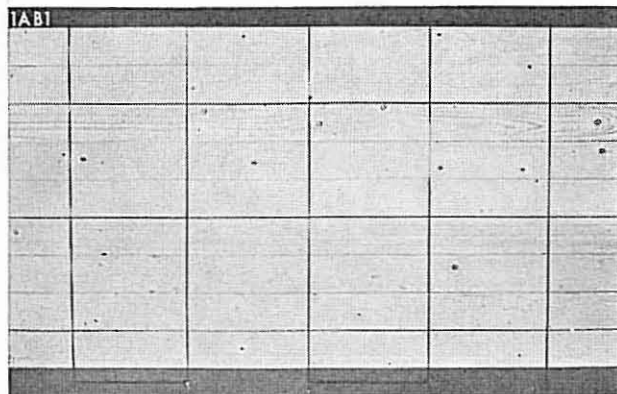


Fig. 3. Lameller til en bjelke med virkes-kombinasjonen T 390/T 300.

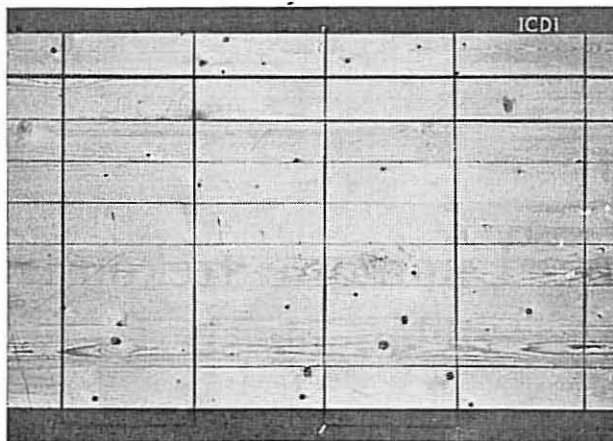


Fig. 4. Lameller til en bjelke med virkes-kombinasjonen T 210/vrak.

tet en kombinasjon av to virkesklasser slik at det beste virke ble plassert i de ytre 20 % av lamellene på hver side av bjelken. NS 446 tillater nemlig bruk av de tillatte spenninger som tilsvarer virket i de ytre 20 % av tverrsnitt, selv om virket i de indre deler er av den nest lavere kvalitet.

Ifølge NS 447 inndeles konstruksjonsvirket i tre forskjellige klasser som betegnes henholdsvis T 390, T 300 og T 210. T 390 representerer høyeste kvalitet. I tabell I er gitt en oversikt over antall bjelker som ble prøvet med de forskjellige kombinasjoner av virkeskvaliteter. Alle bjelkene ble fremstillet av norsk gran som ble innkjøpt fra et sagbruk i Kirkenær i Solør. Materialene ble kunstig tørket til 12 % fuktighet og vel kondisjonert før produksjonen av bjelkene. Materialene ble sortert etter høvling, og alle lameller ble fotografert i en ramme slik som vist i figurene 3 og 4. Lamellene ligger her i samme rekkefølge og i samme relative posisjon som i bjelkene. Trådene som er spent på tvers av lamellene tjener til lokalisering av kvister og andre virkesfeil. Fig. 3 viser lamellene til en bjelke med kombinasjon av virkesklassene T 390 og T 300. Fig. 4 viser tilsvarende lameller av kombinasjonen T 210 og vrak.

Alle bjelkene ble limt med et kaseinlim og det ble brukt 300—350 g lim pr m^2 limfuge. Limet ble påstrøket begge lamellene. Limet ble herdet ved en temperatur på $20^\circ C$ og et trykk på 8—10 kg pr cm^2 limfuge i minst to timer. Prøving ble alltid foretatt minst en uke etter limingen.

Bjelkene ble belastet til brudd slik som vist i fig. 5. Deformasjonen over partiet mellom de to lastpunktene ble målt ved hjelp av et måleutrustning. En god del av bjelkene ble også forsynt med strekk-lapper for å muliggjøre et nøyere studium av deformasjonene i bjelkene på de forskjellige belastningstrinn [2]. Dessuten ble det etterat bjelkene

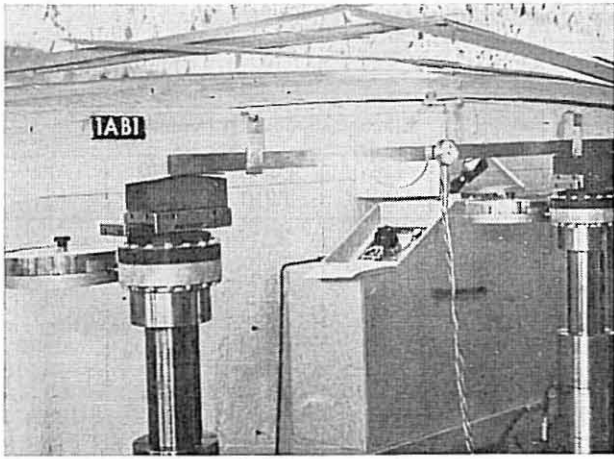


Fig. 5. Bjelke i prøvemaskinen.

var belastet til brudd, tatt ut småprøver til bestemmelse av virkets strekk- og trykkfasthet, fuktighet og romvekt, samt fugenes skjærstyrke.

4. Resultater.

Alle bjelker med unntagelse av to brøt sammen ved at strekksonen ble slitt i stykker slik som fig. 5 viser. De to bjelkene knekket ut sideveis, på grunn av en noe ustabil prøveoppstilling. Ved en last som varierte mellom 75 og 100 % av bruddlasten, dannet det seg folder i trykksonen fordi trevirkets trykkstyrke da ble overskredet. Disse folder spiller en betydelig rolle for spenningsbildet nær bruddstadiet [2].

Ved de fleste av bjelkene registrertes et splintingsbrudd slik som vist i fig. 5. Ved noen få bjelker fikk man typiske tverrbrudd slik som fig 6 viser. Fig. 7 gir frekvensdiagram over de oppnådde bruddspenninger for de forskjellige sorteringsklasser. Diagrammet for T 390 omfatter bjelker med virkeskombinasjonen T 390/T 300 såvel som kombinasjonen T 390/vrak, idet forsøkene ikke ga noen signifikant forskjell mellom disse to kom-

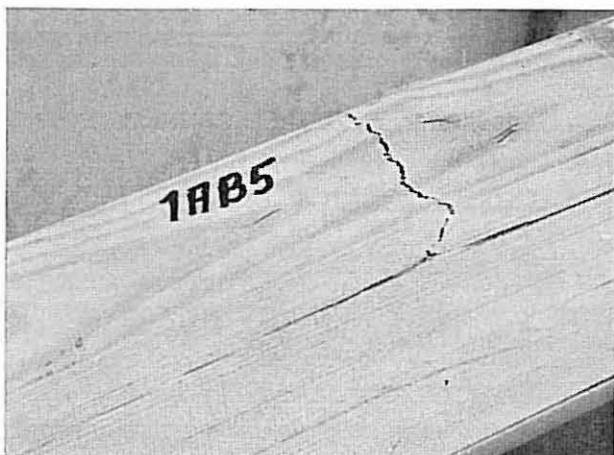


Fig. 6. Tverrbrudd på strekksiden.

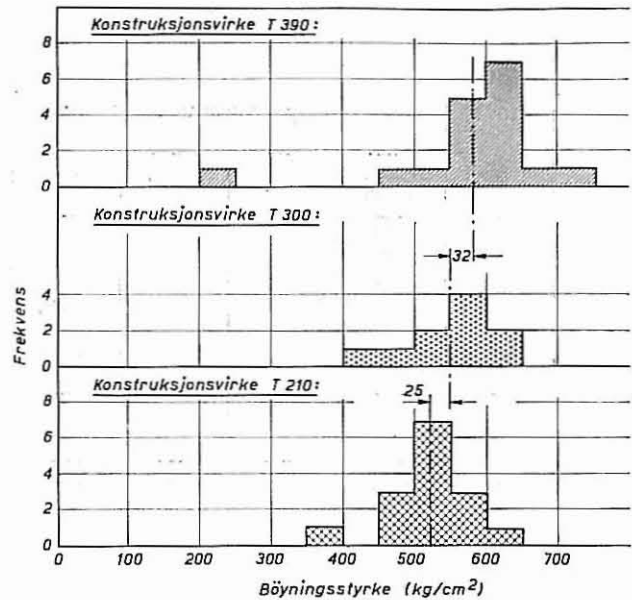


Fig. 7. Frekvensdiagram for bjelkenes bøyingsstyrke.

binasjonene. Fig. 8 gir tilsvarende frekvensdiagram for elastisitetsmodulen. Et sammendrag over de oppnådde resultater er også gitt i tabell 2 som dessuten angir beregnede middelværdier og spredningstall for de forskjellige bjelketyper samt for hele seriene.

Resultatene er meget tillitvekkende når man ser bort fra den ene bjelken i serie 1, med virkeskombinasjonen T 390/T 300, som brøt sammen ved at ytre lamell på strekksiden ble slitt av allerede ved en bøyningsspenning på 242 kg/cm². Det gjennomsnittlige tall for denne kombinasjon av virkeskvaliteter var ca 600 kg/cm². Det er grunn til å anta at den svakeste bjelken ville ha tålt en videre pålastning efterat ytre lamell på strekksiden ble

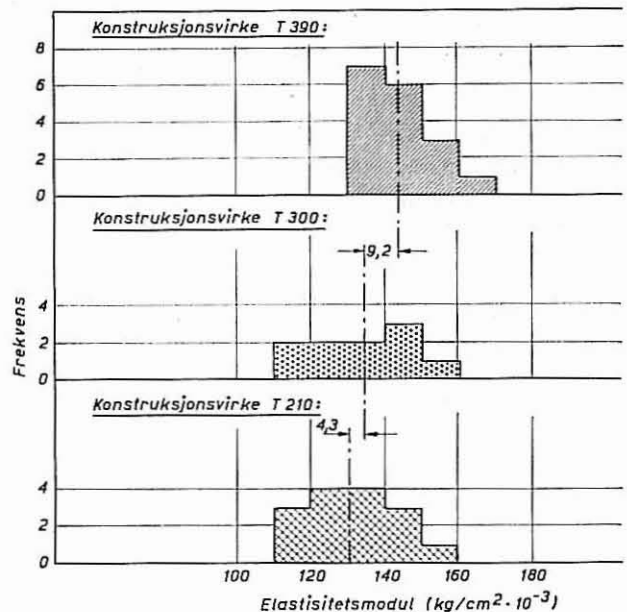


Fig. 8. Frekvensdiagram for bjelkenes elastisitetsmodul.

Tabell 2. Resultatsammendrag av lamineringsforsøk.

Serie nr.	Prøve- nr.	Virkeskombinasjon									
		Bøyingsstyrke i kg/cm ²					Elastisitetsmodul i kg/cm ² · 10 ⁻³				
		T390/ T300	T390/ Vrak	T300/ T210	T210/ Vrak	Alle	T390/ T300	T390/ Vrak	T300/ T210	T210/ Vrak	Alle
0	1	628			532		147,2			140,8	
	2	648**			517		155,2			117,8	
	3	608**			531		146,5			155,0	
	4	554			492		146,2			135,7	
	5	562			392		130,5			120,0	
	6	568					132,3				
	Gj.sn. st.avvik.	593 36			493 57	548 70	143,0 9,6			133,9 15,4	138,8 12,8
1	1	725	592	633	598		155,5	134,6	141,5	131,0	
	2	508	598	646	501		161,3	135,6	141,5	118,2	
	3	625	691	550	483		146,8	155,5	132,8	115,3	
	4	472*	600	404	641		136,0*	144,0	119,2	140,0	
	5	242*	631	595	524		149,0*	131,2	153,5	130,5	
	6	624					137,8				
	Gj.sn. st.avvik.	621 84	622 40	566 99	549 70	588 64	150,3 10,3	140,2 9,8	137,7 12,7	126,9 10,4	139,3 12,4
2	1			551	472				127,8	120,3	
	2			487	515				116,0	123,2	
	3			562	563				127,0	141,2	
	4			537	534				148,3	129,2	
	5			513	555				138,0	136,5	
	Gj.sn. st.avvik.			530 30	528 36	529 31			131,4 12,2	130,1 8,8	130,8 10,1
Alle	Gj.sn. st.avvik.	604 57	622 40	548 71	523 58	562 70	145,9 10,0	140,2 9,8	134,6 12,2	130,3 11,3	136,5 12,4

* Ikke medtatt i statistisk analyse.

** Sideveis knekning.

slitt av. Om man antar at de to ytre lamellene ble ødelagt i første omgang (se fig. 6), så er det sannsynlig at de øvrige 7 lameller ville bære omtrent 50 % mer enn den her registrerte bruddlasten. Uheldigvis ble forsøket avsluttet uten denne siste pålastning, og den registrerte bruddspenning er derfor trolig ca $\frac{2}{3}$ av den virkelige.

Det har ikke vært mulig å påvise med sikkerhet årsaken til den lave styrken av denne ene bjelken, men det er ikke usannsynlig at virket til vedkommende lamell kan ha blitt skadet under felling eller under transport i skogen. Da det er lite sannsynlig at denne lave styrke oftere vil opptre ved høye virkeskvaliteter enn ved lave, har man ekskludert ovennevnte prøveresultat fra den statistiske sammenligning mellom de forskjellige virkeskvaliteter. Det samme gjelder for en annen bjelke (se tabell 2) hvor feilsortering forårsaket svakt resultat [1].

Forskjellen i styrke og stivhet mellom høyeste og laveste virkesklasse er signifikant. En statistisk analyse viste imidlertid ingen signifikant forskjell mellom de forskjellige lamelltykkelsene. Det gjen-

nomsnittlige styrketall for bjelker med 2" lameller (serie 2) er likevel noe lavere enn for de øvrige. Et større antall forsøk ville kanhende vist at denne reduksjon ikke er noen tilfeldighet.

Forsøkene syntes også å tyde på at kvister i kanten av lamellene er farligere enn kvister som ligger nærmere midten. Dette gjelder spesielt når sagsnittet går gjennom fiberforstyrrelsene rundt kvisten, se fig. 9.

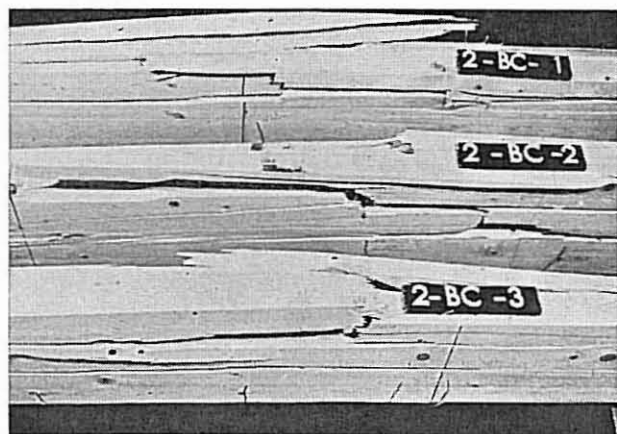


Fig. 9. Brudd gjennom kantkvister.

Tabell 3. Sammenligning mellom forsøksresultater og NS 446. Bøyningsspenninger kg/cm².

Virkes-klasse	NS 446 tillater			Fra forsøk			Forslag	
	Massive bjelker σ_{NS}	Laminerte bjelker σ'_{NS}	Forhold σ'_{NS}/σ_{NS}	Gj.sn.lig bøyen. styrke σ_m	Standard avvik S_σ	Beregn. tillatt spenning σ_a^*	Tillatt spenning σ_B	Forhold σ_B/σ_{NS}
T 390	130	156	1,20	604	57	157	156	1,20
T 300	100	130	1,30	548	71	130	130	1,30
T 210	70	98	1,40	523	58	130	105	1,50

$$* \sigma_a = 0,32(\sigma_m - 2S_\sigma)$$

5. Vurdering av resultatene.

Det ville nå vært av stor interesse om man kunne sammenligne de oppnådde resultater med tilsvarende verdier for massivt virke av de samme kvalitetene. Dessverre har man ikke på det nåværende tidspunkt slike verdier. Thunell [3] har imidlertid prøvet et stort antall bjelker av svensk furu som var av tilsvarende dimensjoner og virkesklasser. En sammenligning med Thunells resultater synes å indikere at såvel bøyingsstyrken som elastisitetsmodulen var ca 25 % høyere for de laminerte bjelkene enn for de massive svenske furubjelkene. Variasjonskoeffisientene var også, som ventet, lavest for de laminerte bjelkene [1]. En slik sammenligning kan være av noe tvilsom verdi, og man skal være oppmerksom på at Thunell's tall representerer trevirke fra alle kanter av Sverige mens de laminerte bjelkene kun representerer virke fra ett distrikt i Norge.

Hvordan ligger så de oppnådde resultater an i forhold til de tillatte spenninger i NS 446? Før dette spørsmål kan besvares må man stille seg opp regler for hvilke relasjoner som skal benyttes mellom resultater fra korttids laboratorieforsøk og de tillatte verdier. Forfatteren kjenner ikke til hvordan denne omregning ble foretatt ved bestemmelsen av de tillatte spenninger i NS 446.

Dersom de observerte fasthetstallene ved et stort antall prøver kan antas å følge en Gaussisk normalfordeling, så vil bare 2,5 % av alle prøve-resultater oppvise en fasthet som er lavere enn $(\sigma_m - 2s_\sigma)$, hvor σ_m er middelveien og s_σ er standard avvikelse. Vi vil derfor ta $(\sigma_m - 2s_\sigma)$ som ut-

gangsverdi ved utledning av forslag til tillatte spenninger.

Nå vet man at trevirket er langt sterkere under korttidslast enn ved langvarig belastning. De her omtalte forsøk varte vanligvis omlag en halv time før brudd inntrådte. Amerikanske undersøkelser tyder på at langtidsstyrken ligger på ca 60 % av tilsvarende verdier for en halv times belastningstid.

En rekke forsøk har dessuten vist at den beregnede bøyingsstyrken varierer noe med høyden, slik at høye bjelker oppviser lavere beregningsmessig bøyingsstyrke enn de lave [2]. En empirisk formel for denne høydefaktoren som er oppgitt i Wood Handbook¹ angir eksempelvis at en 75 cm høy bjelke tåler kun 80 % av de bøyingspenninger som forårsaker brudd i en 20 cm høy bjelke. Denne høydefaktoren burde vel helst holdes utenfor de tillatte spenninger, men dette er forløpig ikke gjort. Det tør være på den sikre side for de fleste tilfelle om man reduserer forsøksresultatene som ble oppnådd ved 20 m høye bjelker med 20 %.

Til slutt må vi ha med en sikkerhetsfaktor. Ved den beregningsmåte som her er antydnet, tør en sikkerhetsfaktor på 1,5 være tilstrekkelig. Man får da:

$$\sigma_{till} = \frac{1}{1,5} \cdot 0,8 \cdot 0,6 (\sigma_m - 2s_\sigma) = 0,32 (\sigma_m - 2s_\sigma)$$

Tabell 3 viser en sammenligning mellom de idag tillatte og de således beregnede bøyings-

¹ Agricultural Handbook nr 72, U. S. Department of Agriculture, Wash. D. C. 1955.

Tabell 4. Sammenligning mellom forsøksresultater og NS 446. Elastisitetsmodul kg/cm².

Virkes-klasse	NS 446 tillater			Fra forsøk			Forslag	
	Massive bjelker E_{NS}	Laminerte bjelker E'_{NS}	Forhold E'_{NS}/E_{NS}	Gj.sn.lig elast. modul E_m	Standard avvik S_E	Beregn. tillatt elast. modul E_a^*	Tillatt elast. modul E_B	Forhold E_B/E_{NS}
T 390	100 000	100 000	1,0	146 000	10 000	126 000	120 000	1,20
T 300	90 000	90 000	1,0	134 000	12 000	110 000	110 000	1,22
T 210	70 000	70 000	1,0	130 000	11 000	108 000	90 000	1,28

$$* E_a = E_m - 2S_E$$

