



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Konstruktion af 18m fritbærende trævinge til Mølle B I Nibe

Nielsen, Peter C.

Publication date:
1982

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Nielsen, P. C. (1982). *Konstruktion af 18m fritbærende trævinge til Mølle B I Nibe*. Aalborg Universitetscenter. Institutet for Bygningsteknik. Report Nr. 8203

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

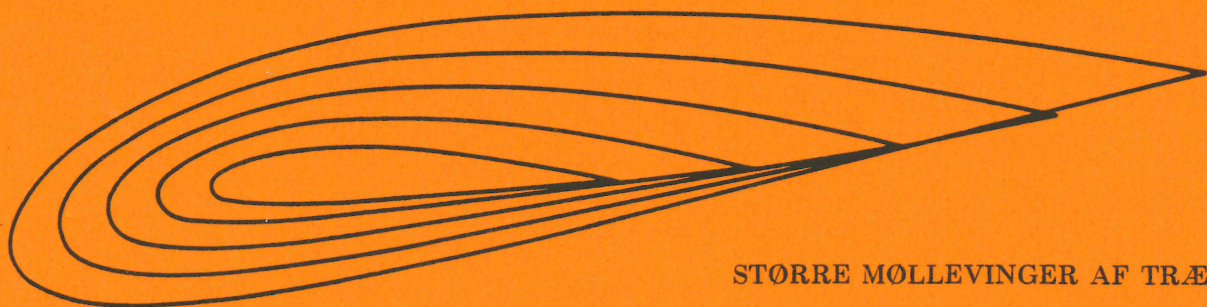
Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK



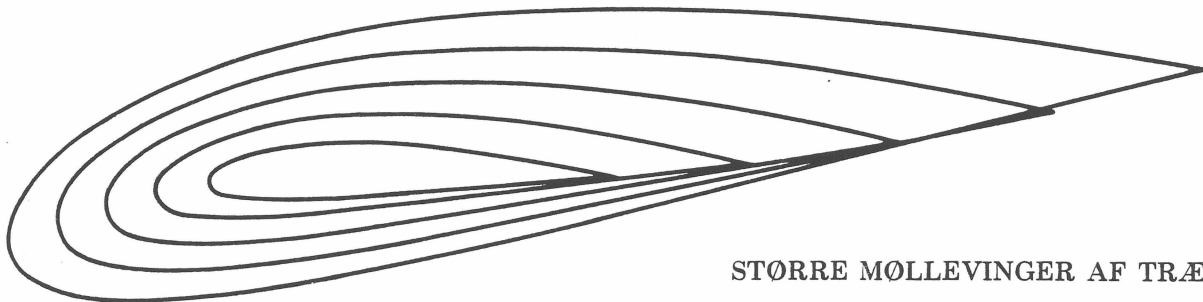
STØRRE MØLLEVINGER AF TRÆ

PETER C. NIELSEN

KONSTRUKTION AF 18M FRITBÆRENDE TRÆVINGE TIL MØLLE B I NIBE

MARTS 1982

ISSN 0105-7421 RAPPORT NR. 8203



STØRRE MØLLEVINGER AF TRÆ

PETER C. NIELSEN

KONSTRUKTION AF 18M FRITBÆRENDE TRÆVINGE TIL MØLLE B I NIBE

MARTS 1982

ISSN 0105-7421 RAPPORT NR. 8203

INDHOLDSFORTEGNELSE

RESUMÉ	3
SUMMARY IN ENGLISH	3
1. INDLEDNING	4
2. KONKLUSION	4
3. FORUDSÆTNINGER	4
4. LITTERATUROVERSIGT	6
5. KONSTRUKTION AF VINGE	7
5.1 Materialeovervejelser	7
5.2 Fremstillingsovervejelser	7
5.3 Samlingsdetaljer	9
6. BEREGNINGER FOR VINGE	10
6.1 Beregningsforudsætninger	10
6.2 Spændingsanalyse, foreløbig beregning	11
6.3 Spændingsanalyse, dynamisk beregning	15
6.4 Svingningsanalyse	16
7. UDFORMNING AF INDFÆSTNINGSDETALJE	17
8. LITTERATURLISTE	18
ANNEKSER	
A. SAMLINGSDETALJER I VINGE	A1
B. EDB-PROGRAMLISTE	B1
C. BEREGNINGSRISULTATER	C1
D. EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER	D1

RESUME

Nærværende rapport omhandler en undersøgelse af muligheden for at fremstille en vindmøllevinge af limtræ og krydsfiner. Undersøgelsens mål har været at udforme en vinge til en af de vindmøller, som Energiministeriet og elværkerne har bygget ved Nibe.

En opbygning af vingen er foreslået, hvor den forreste del af vingen består af massivt limtræ, medens bagparten formes af krydsfinerpaneler. Disse paneler bæres på et system af krydsfinerspanter.

Bladroden foreslås udformet med en krans af koniske indlimningsbolte, som fastgøres i den massive del af vingen, så belastningerne kan overføres til vingenavet.

De udførte beregninger viser, at den foreslåede vinge tilfredsstillende betingelserne til både styrke- og svingningsforhold. Den færdige trævinge vejer mindre end den eksisterende vingetype af stål og glasfiberarmeret polyester.

SUMMARY

This report describes an investigation into the possibilities of designing a wind turbine blade of laminated timber - glulam - and plywood. The aim has been to develop a rotor that can be fitted for one of the wind turbines built in Nibe by the Danish Ministry of Energy and the Association of Electric Utility Companies in Denmark.

A blade structure is suggested with the nose part made of solid glulam and tail panels made of plywood. These panels are carried on a system of plywood ribs.

The root of the rotor blade is fitted with a circle of tapered steel studs glued into the solid part of the blade to transfer loads to the rotor hub.

The calculations carried out show favourable static and dynamic behaviour. A complete wooden blade is lighter than the existing rotor blade made of steel and glass-fibre reinforced polyester.

1. INDLEDNING

Denne rapport omhandler undersøgelser af muligheden for at konstruere en vinge af træmaterialer til større vindmøller med horisontal akse. Undersøgelsen er udført for og finansieret af Energiministeriet og elværkernes vindkraftprogram.

2. KONKLUSION

De gennemførte undersøgelser viser, at:

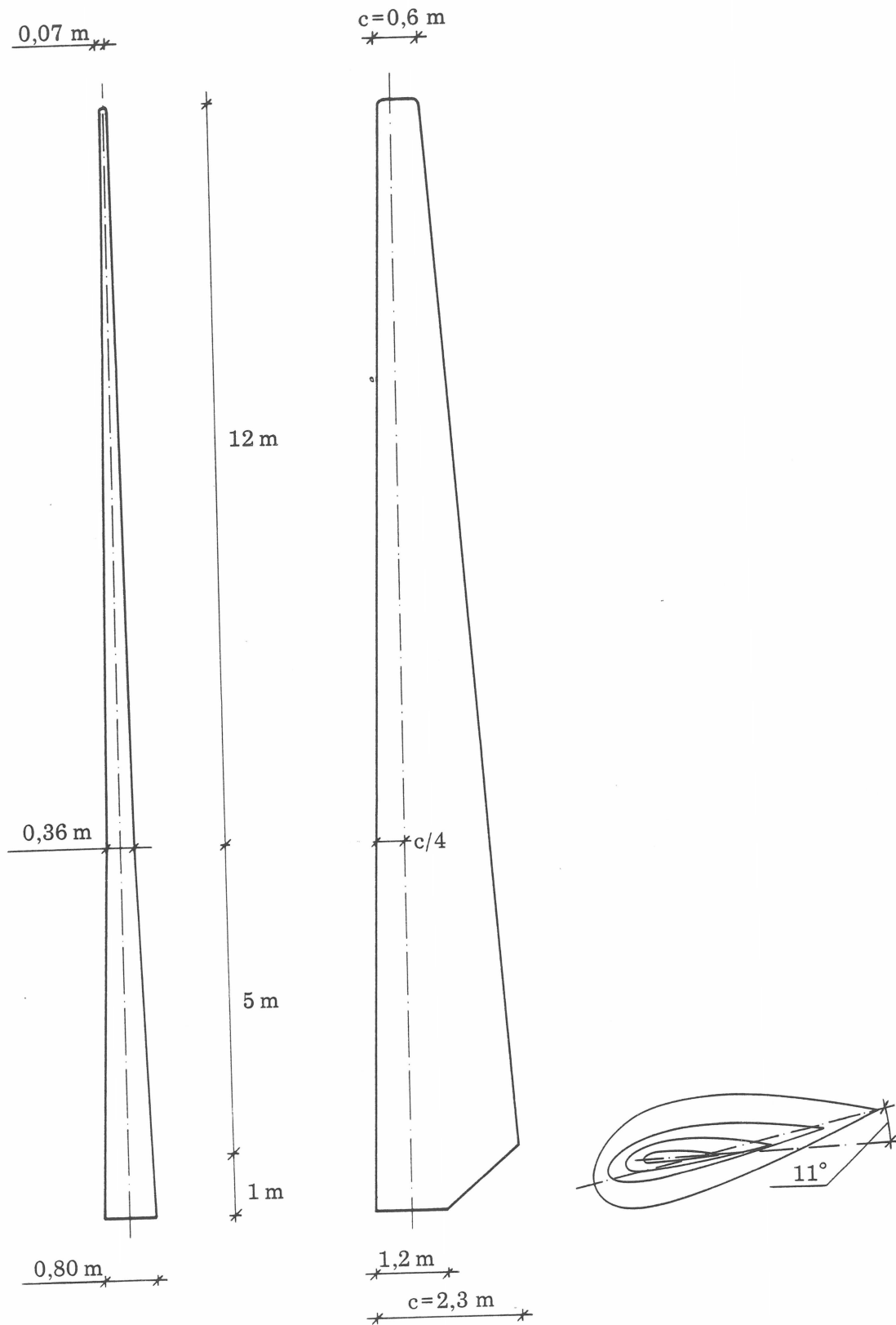
- det er muligt at konstruere en trævinge af limtræ og krydsfiner, som overholder de stillede krav til vægt, styrke og egensvingningsforhold,
- indfæstningsdetaljen, samlingen mellem vinge og møllenav, udføres mest hensigtsmæssigt med en krans af indlimningsbolte,
- fremstillingen af vingerne stiller store krav til materialeudvælgelse og limningsoperationer,
- eksperimentelle undersøgelser bør gennemføres, før den endelige vingeopbygning fastlægges.

3. FORUDSÆTNINGER

Udgangspunktet for arbejdet med udvikling af trævinger til store vindmøller har været at udforme et sæt prøvevinger til Energiministeriets og elværkernes mølle B i Nibe. Vingerne skal have samme geometri som de eksisterende glasfiber-/stålvinger, idet dog tykkelsesfordelingen ved roden kan ændres. Hensigten har været at konstruere en vinge med længde 18 m, tværsnitsprofil NACA44xx og kordedrejning fra tip til rod på 11° , se figur 1.

Trævingen må inklusive indfæstningsbeslag ikke veje mere end 3000 kg.

Hensynet til tyngdepunktets placering i profilets forreste del bevirker, at den oprindelige ide med en massiv trævinge, jf. [10], må opgives til fordel for en hul konstruktion opbygget af limtræ og krydsfiner.



Figur 1. Vingegeometri. Profilkontur er vist ved rød, i tip samt i tredjedelspunkterne. c er kordelængde.

4. LITTERATUROVERSIGT

Der findes en del litteratur om anvendelse af træ til mindre vindmøller med såvel horisontal som vertikal akse. Se fx [4], [8] og [12].

Den eneste litteratur, det har været muligt at fremdrage om større vindmøllevinger af træ, omhandler et sæt vinger, som blev udviklet under USA's vindkraftprogram til mølletypen MOD-0A. Disse vinger, som er 18 m lange, er opbygget af finer sammenlimet med en epoxy-lim.

Derudover findes der en artikel om fremstillingen af turbineblade af træ til en vind-tunnel.

De enkelte referencer gennemgås kort i det følgende:

Gougeon og Zutech [7] beskriver udviklingen af den 18 m lange MOD-0A trævinge, hvis grundide er et profil opbygget af tynde finerlag, som er limet sammen med epoxy under meget moderat presstryk. Metodens fortrin synes at være, at der opnås stor fugtstabilitet, idet hele tværsnittet er imprægneret af epoxyen, som hæmmer væske- og damptransport. Indfæstningsdetaljen er udført med en krans af indlimede bolte.

Gougeon og Thomas [6] har i denne foreløbige rapport om MOD-0A vingerne givet en detaljeret beskrivelse af den udviklede fremstillingsmetode, som i korthed går ud på at opbygge de to vingehalvdele, overside og underside, i hver sin matrice. Presse-tryk er etableret ved hjælp af en vakuumpose. Efter renskæring sammenlimes de to vingehalvdele fastholdt i hver sin matrice. Rapporten redegør også for det beregningsgrundlag, som blev anvendt ved projekteringen.

Faddoul [5] har skrevet en rapport, som indeholder en gennemgang af de statiske og dynamiske forsøg, der blev udført på MOD-0A trævingen efter fremstillingen. Forsøgsserier med indlimede bolte, som førte til den endelige udformning af indfæstningsdetaljen, er beskrevet. Også fuldskalaforsøg med en 6 m rodende, der blev fremstillet for at undersøge indfæstningsløsningen, er rapporteret.

Endelig skal nævnes en artikel [1], som beskriver fremstilling af en vindtunnelventilator med 6 blade af canadisk gran (spruce) limet med resorcinol-lim. Dette rotorblad har en længde på 3,8 m og en korde, der varierer fra 1 m til 1,22 m. Indfæstningen er udført med bolte mellem 2 stållaskeplader. Vingen, der er massiv, blev limet i to omgange. Først blev mindre blokke med 11 stk. 19 mm lameller fremstillet. Fiberretningen i de enkelte lameller dannede en vinkel på 11° med centerlinien skiftevis til hver side. De enkelte lameller blev vejjet, så alle rotorblade fik samme massefordeling. Kun træ uden eller med meget små knaster blev benyttet.

Til et rotorblad medgik fire af de limede blokke. Disse blev limet sammen, hvorefter tildannelse til endelig form fandt sted.

5. KONSTRUKTION AF VINGE

Fra starten af konstruktionsfasen lå det klart, at trævingen skulle udformes som en hul konstruktion med en limtræbjælke i næsen af vingetværsnittet. Denne bjælke vil således få et tilnærmet D-formet tværsnit. Den ønskede vingegeometri fremkommer ved på bagkanten af limtræbjælken at lime krydsfinerplader, som støttes af en række spanter formet som vingeprofilets haledel. Af hensyn til konstruktionens vridningsstivhed samt de overvejende dynamiske påvirkninger, vingen udsættes for, må den udformes så limtræ og finerdele samvirker. Herved opnår man, at vingen opfører sig som en monolitisk konstruktion. Tværsnitsopbygningen fremgår af figur 2.

5.1 Materialeovervejelser

Limtrædelen tænkes udført af tynde nåletræslameller med høj kvalitet, fx jysk rødgran, jf. [13]. Af hensyn til masse- og stivhedsfordelingen i vingerne, vil det være nødvendigt på forhånd at bestemme masse og stivhed af de enkelte brædder og sortere dem i forskellige kategorier på basis heraf. Stivhedsbestemmelsen kan eventuelt udføres på et maskinsorteringsanlæg. Materialet til de enkelte vinger udtages derpå efter et fastlagt mønster fra de forskellige brædde-kategorier.

Den benyttede finer kan være sædvanlig konstruktionskrydsfiner, men det vil være fordelagtigt at benytte en specialfiner af fx birk. Specialfiner vil desuden kunne fås med større pladelængder, hvorved antallet af skarringer mellem finerpladen i de færdige over- og undersidepaneler kan reduceres.

Til limning af den massive bærebjælke benyttes vand- og kogefast resorcinol-lim. Alle øvrige samlinger i vingen udføres med epoxy-lim med filler.

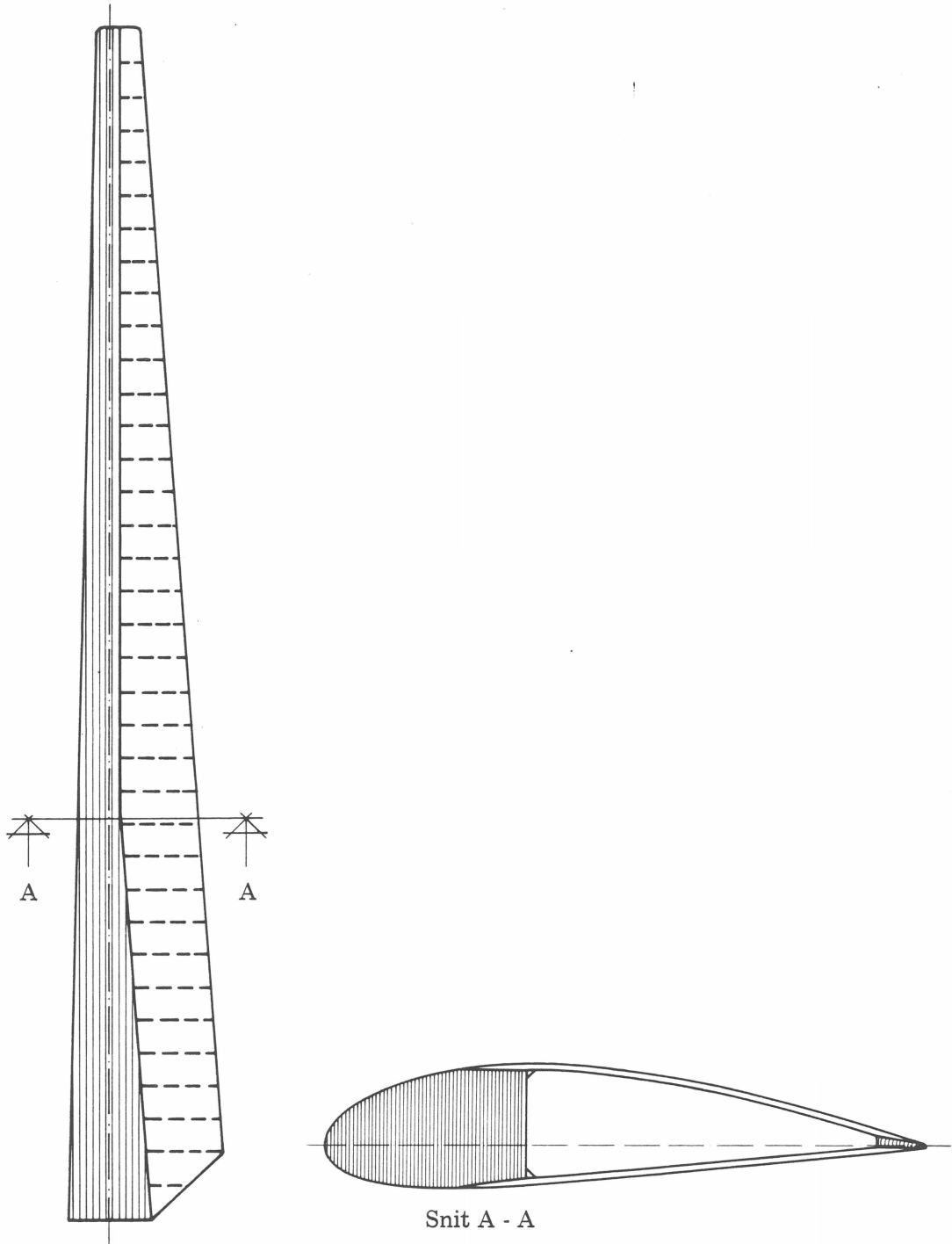
Overfladebehandling af den færdige vinge udføres med pigmenteret akrylforstærket polyurethan. Alternativt kan man, som beskrevet i [6], behandle overfladen med et epoxy-materiale. Der skal ofres særlig omhu med overfladebehandling, hvor endetræ er blottet.

5.2 Fremstillingsovervejelser

Den bærende limtræbjælke fremstilles af kantlimede kileformede lameller, som alle har parallelt fiberforløb. Alternativt kan man opnå kileformen ved krydsskæring og endevending af lameller med konstant bredde. Fibrene i en lamel vil herved danne en vinkel med fibrene i sine nabolameller. Beslutning om eventuel anvendelse af krydsskæring bør afvente resultatet af eksperimentelle undersøgelser, jf. annek D.

Afsmalning af bjælken vinkelret på vingeprofilets korde foretages ved hjælp af den omtalte kileskæring af lamellerne. Afsmalningen parallelt med korden sker ved aftrapning af bjælken, hvilket betyder, at lamellernes længde er forskellig. Ved limningen påføres bjælken en drejning om sin længdeakse svarende til vinklen mellem tip- og rodkorde i den færdige vinge. De enkelte lameller kan med fordel samles med skråningskarringer, som har bedre udmattelsesegenskaber end fingerskarringer.

Fremstillingen af den massive limtrædel kan også ske efter de principper, som er udviklet af LNJ Spændtræ. D-bjælken sammenlimes af to halvdele langs en flade, som er parallel med vingeprofilets korde og bjælakens længdeakse. Hver bjælkehalvdel oplyses af enkeltlameller i en bedding, hvori presstryk kan etableres. Denne bedding er udformet, så træspildet ved den endelige tildannelse af D-bjælken bliver mindst muligt. Metoden er beskrevet af Jepsen [15].



Figur 2. Vingekonstruktion af limtræ og krydsfiner.

Ved fremstillingen af det første sæt vinger må tildannelsen af limtræet til den ønskede D-form foregå ved håndbearbejdning efter skabeloner, der udskæres ved hjælp af edb-udtegnede profilkonturer. Der bør senere udvikles udstyr, så bearbejdningen kan foregå maskinelt.

Efter limtræbjælken er tildannet til sin endelige form, pålimes de udskårne krydsfinerspanter, som skal bære finerpanelerne. Denne arbejdsproces og den efterfølgende påsætning af finerpaneler på over- og underside af vingen kan formodentlig med fordel udføres i en fast arbejdsopstilling.

De to finerpaneler, der sammen danner vingeprofilets hale, tildannes før påsætning på limtrædelen, idet de enkelte pladedele samles med skråskarringer. Panelerne udskæres herefter til færdig form. Efter hærkning og påsætning af træliste langs bagkanten pålimes oversidepanelet. Der fremstilles specielt spændeudstyr til pålimningen af de to paneler.

Efter montering af indfæstningsbeslag og endeplader, der lukker hulrummet i vingen, foretages afpudsning og overfladebehandling.

Endelig fastlæggelse af fremstillingsmetoderne må før eventuel produktion ske i samråd med teknikere fra de implicerede limtræfabrikker.

5.3 Samlingsdetaljer

Der skal redegøres for den påtænkte udformning af samlingsdetaljerne i den beskrevne vingekonstruktion.

Samlingen mellem limtræ og finer udføres med en skråskarring, hvor det skrå snit i fineren vender ind mod limtræet. De to finerpaneler samles langs bagkanten af vingen ved limning mod en træliste.

Ved roden og i tippen lukkes vingehulrummet ved hjælp af finerplader med fals. I tippen forsynes limtrædelen eventuelt med huller, hvori afbalanceringsvægte kan placeres før endepladen påsættes.

Spanterne, hvorover finerpanelerne lægges, fastgøres til limtrædelen ved limning mellem to trekantlister.

Skitser af de enkelte detailløsninger er vist i anneks A.

6. BEREGNINGER FOR VINGE

I forbindelse med konstruktionsfastlæggelsen er der foretaget en foreløbig spændingsanalyse, som er gengivet i afsnit 6.2. En senere analyse baseret på dynamiske beregninger af vingens tvungne respons er medtaget i afsnit 6.3. Der er udført en svingningsanalyse, som er gengivet i afsnit 6.4.

6.1 Beregningsforudsætninger

Det er forudsat, at vingen kan opfattes som en fast indspændt udkraget bjælke.

Tværsnitskonstanterne ændres fra snit til snit i vingen. For at forenkle beregningerne opdeles vingen i sektioner på 1 m med konstant tværsnit. Belastninger på vingen påføres som enkeltkræfter i knuderne mellem de enkelte vingesektioner. Denne fremgangsmåde er tidligere benyttet af Petersen [11].

Alle beregninger sker i et koordinatsystem med x-akse parallelt med vingeprofilets korde, y-akse vinkelret på korden og z-akse sammenfaldende med vingens systemlinje, se figur 6.

Til beregning af tværsnitskonstanterne blev der udarbejdet et edb-program, som kan foretage en numerisk bestemmelse af disse i et vilkårligt snit i vingen.

Den rutine, som beregner koordinater til profilkonturen, er lånt fra PROP [3].

Programmet inddeler tværsnittet i små rektangulære arealelementer. Arealer, statiske momenter og inertimomenter fremkommer ved at summere bidragene fra de enkelte elementer. Forskellen i E-modul mellem træ og finer medtages ved at regne med transformeret tværsnit. En liste af programmet ses i annek B.

Et skøn over vridningsinertimomentets størrelse, som anses at være af sekundær betydning, er fundet ved at udregne dette moment for både et massivt og et lukket tyndfliget tværsnit med form som vingeprofilet. Gennemsnittet af disse to værdier er benyttet.

Ved beregningerne er benyttet følgende materialeparametre for limtræ:

Densitet	$\rho = 450 \text{ kg/m}^3$
Elasticitetsmodul	$E = 13,5 \text{ GPa}$
Forskydningsmodul	$G = 1,0 \text{ GPa}$
Karakteristisk bøjningsstyrke	$f_k = 50 \text{ MPa}$

Værdierne er fastlagt under hensyntagen til en omhyggelig materialeudvælgelse.

Forholdet mellem masse af finer og limtræ er sat til 1,2, medens det tilsvarende forhold mellem E-moduler er sat til 0,8. Der er yderligere forudsat, at der ikke må være væsentlig forskel på styrken af finer og limtræ.

Teorien om homogene isotrope og lineærelastiske materialer er lagt til grund for beregningerne.

De følgende beregninger er udført på et vingeprofil, hvis forreste tredjedel består af massivt limtræ, og hvis hale dannes af to 12 mm finerplader. Tværsnitsdata for denne vinge er beregnet ved hjælp af det beskrevne edb-program og er medtaget i annek C.

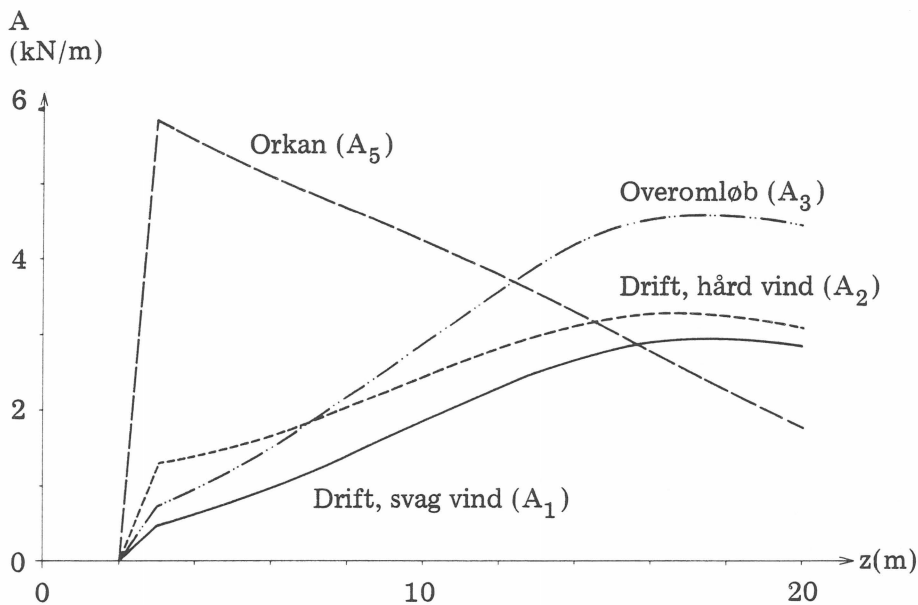
6.2 Spændingsanalyse, foreløbig beregning

En foreløbig beregning til fastlæggelse af vingens principielle udformning er foretaget på basis af maksimalt mulige aerodynamiske belastninger på vingen.

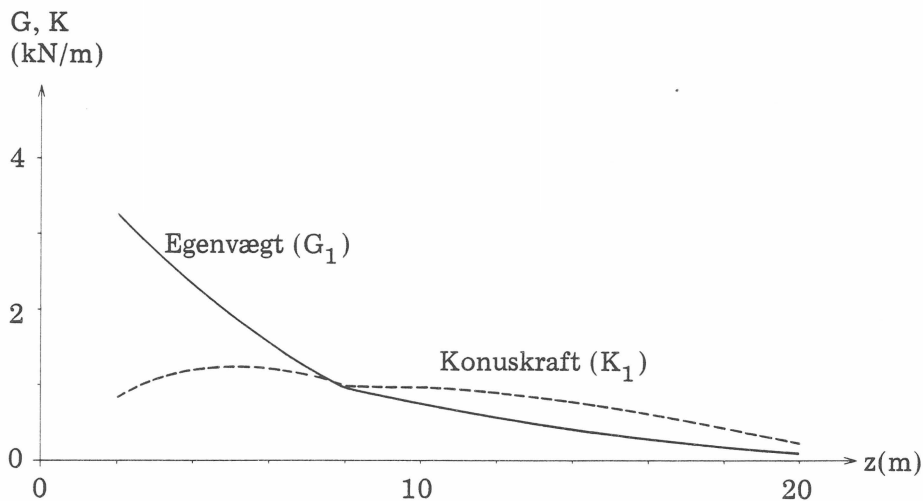
Ekstremlaste i en række lasttilfælde er lagt til grund for spændingsanalysen af vinge-konstruktionen. De undersøgte lasttilfælde blev fastlagt efter konsultation med Afde-ling for Fluid Mekanik (AFM), DtH.

Vingerne påvirkes af aerodynamiske belastninger, egenvægt og centrifugalkræfter. Sidstnævnte har en komponent, konuskraften, vinkelret på vingeaksen, da akse-ner en vinkel på 6° med rotorplanet.

AFM har beregnet de aerodynamiske belastninger på vingen i 4 situationer, som ligger til grund for de lasttilfælde, der skal undersøges. Belastningerne er optegnet i figur 3.



Figur 3. Linielast vinkelret på vingeakse fra vindpåvirkning.



Figur 4. Linielast vinkelret på vingeakse fra egenvægt og konus.

Konuskraft og trænormalkraft er for den valgte udformning af vingen udregnet ved driftsomløbstallet 3,5 rad/s. Egenvægt og konuskraft er optegnet i figur 4. Trænormalkraftens variation gennem vingen er optegnet i figur 5.

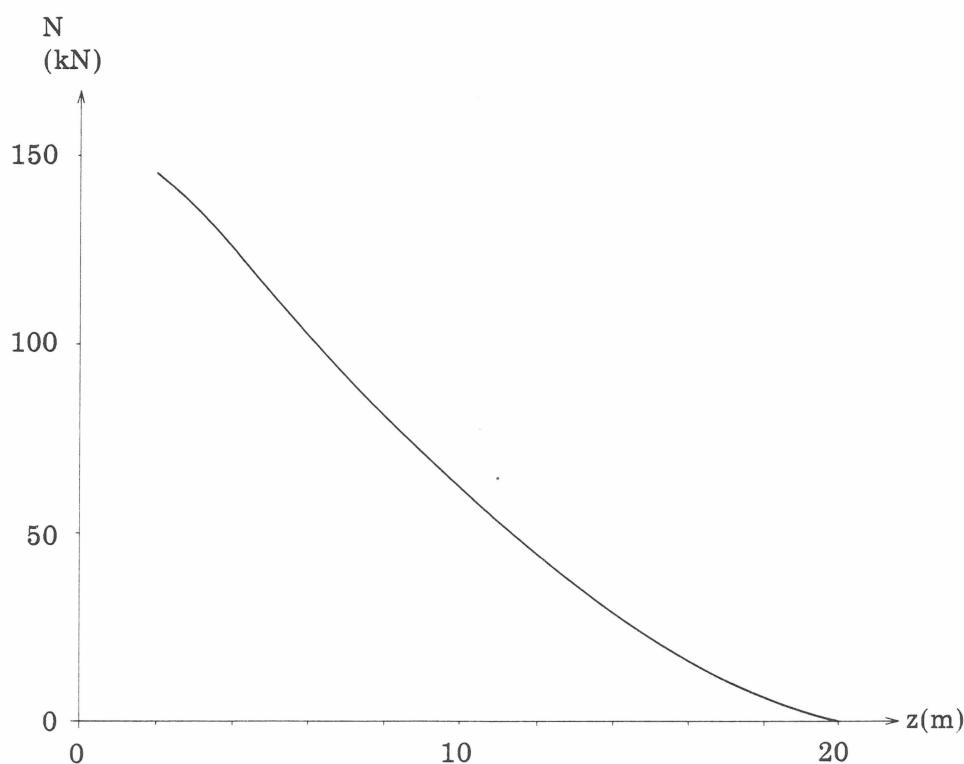
De undersøgte belastningstilfælde er:

1. Drift i svag vind
2. Drift i hård vind
3. 25% overomløb
4. Opbremssning fra overomløb
5. Orkan, stilstand

En oversigt over de enkelte belastningsbidrag og deres angrebsretninger fremgår af tabel 1 og figur 6.

Resultierende forskydningskræfter og momenter blev i de 5 lasttilfælde udregnet i tværsnit med indbyrdes afstand på 1 m i hele vingens længde. Momenter om vingetværsnittets svage akse, som har helt dominerende betydning for størrelsen af de optrædende spændinger, er vist i figur 7. Snitkræfter ved vingeroden er gengivet i aneks C.

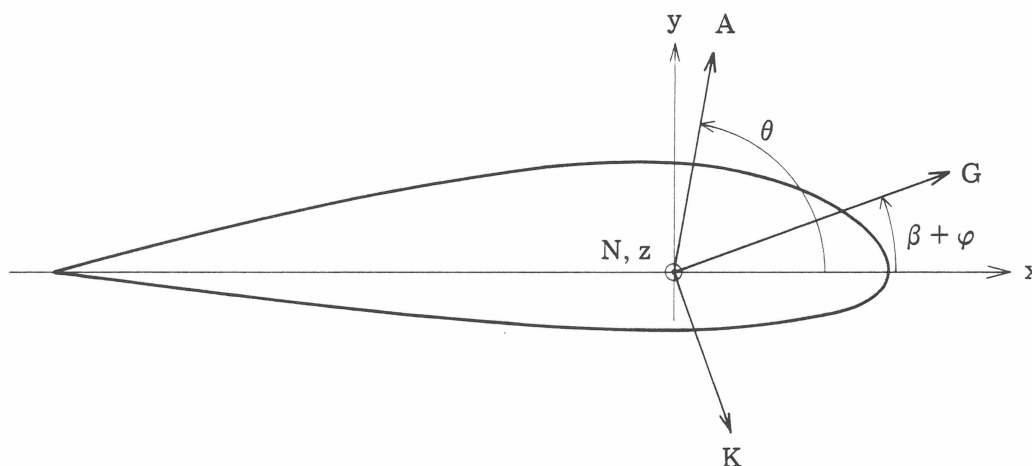
Maksimal spændinger blev beregnet ved benyttelse af de fundne tværsnitsdata, idet Bernoullis forudsætning om, at plane tværsnit forbliver plane, er benyttet. Spændingsbidraget fra normalkraften, som er adderet til bøjningsspændingerne, udgør højst 2% af de udregnede maksimalspændinger. Beregningen af resulterende momenter og maksimale spændinger er foretaget ved udbygning af det udviklede edb-program til beregning af tværsnitskonstanter.



Figur 5. Normalkraft i vinge fra centrifugalpåvirkning ved driftsomløbstal 3,5 rad/s.

Lasttilfælde	Pitchvinkel	θ	Aerodynamisk last A	Egenvægt G	Konuskraft K	Normalkraft N
	φ					
1	0	80°	A_1	G_1	K_1	N
2	20°	80°	A_2	G_1	K_1	N
3	0	80°	A_3	G_1	$1,56 \cdot K_1$	$1,56 \cdot N$
4	20°	100°	$-0,5 \cdot A_3$	0	$1,56 \cdot K_1$	$1,56 \cdot N$
5	90°	80°	A_5	0	0	0

Tabel 1. Angrebsretning og størrelse af kræfter i de 5 lasttilfælde. Betegnelserne henviser til figur 6. De enkelte lastbidrag er vist på figur 3 - 5.



Figur 6. Vingeprofil med indlagt koordinatsystem. Angrebsretning for belastningsbidragene er vist. Vinklen β er profilcordens vinkel med tipkorden, øvrige symboler fremgår af tabel 1.

Variationen af spændingerne er vist i figur 8 for de fem lasttilfælde.

De optrædende maksimalspændinger i vingen, som er gengivet i tabel 2, skal sammenlignes med en regningsmæssig bøjningsstyrke. Denne fremkommer ved at reducere den karakteristiske styrke med hensyntagen til fugtforhold, lastvarighed og -hyppighed samt vinkel mellem fiberretning og overflade, jf. [9] og [13].

I lasttilfælde 1 - 2 ansættes den regningsmæssige skønsmæssigt til

$$f_d = 0,4 f_k.$$

I lasttilfælde 3 - 5, som er karakteriseret ved lille hyppighed og kort lastvarighed, haves tilsvarende:

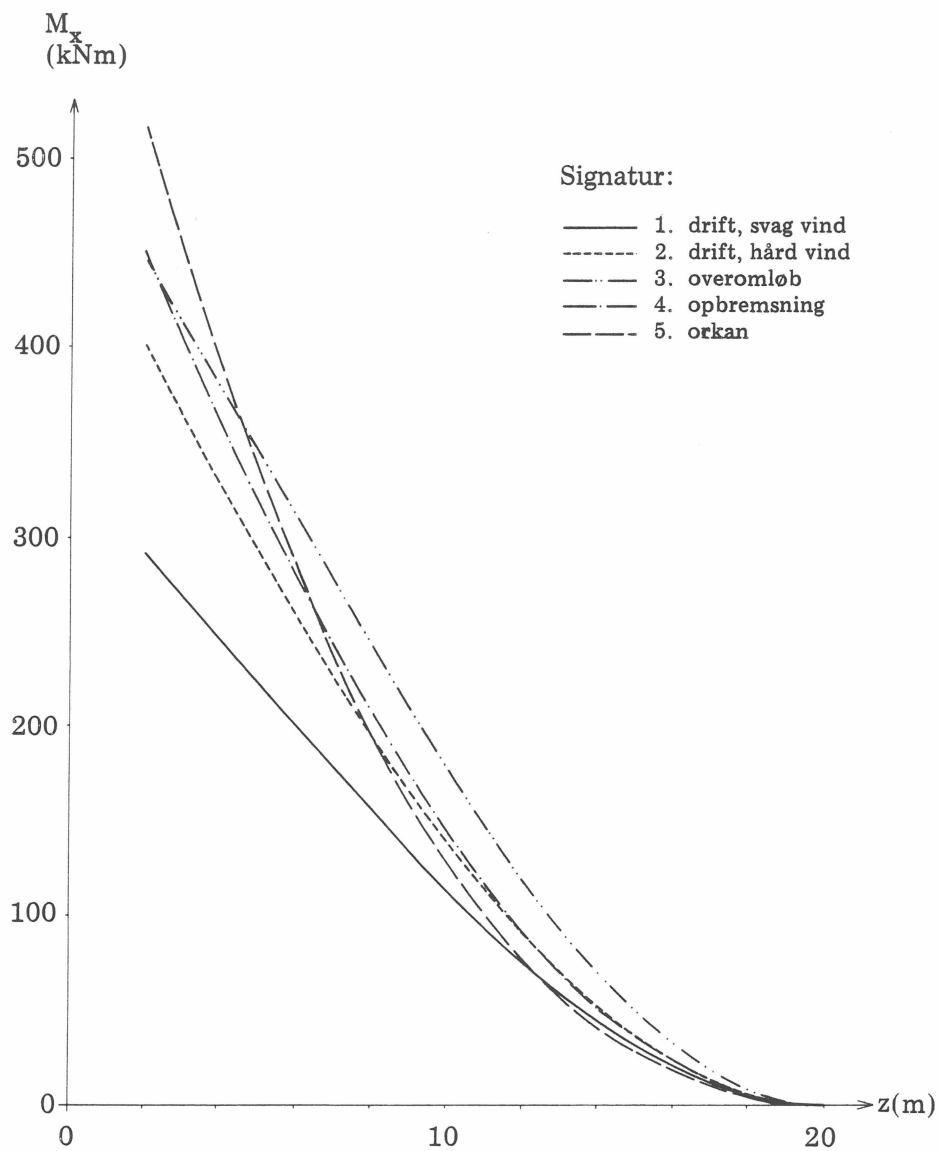
$$f_d = 1,4 \cdot 0,4 f_k$$

Til sammenligning er f_d medtaget i tabel 2. Det ses, at de optrædende spændinger i alle tilfælde er acceptable.

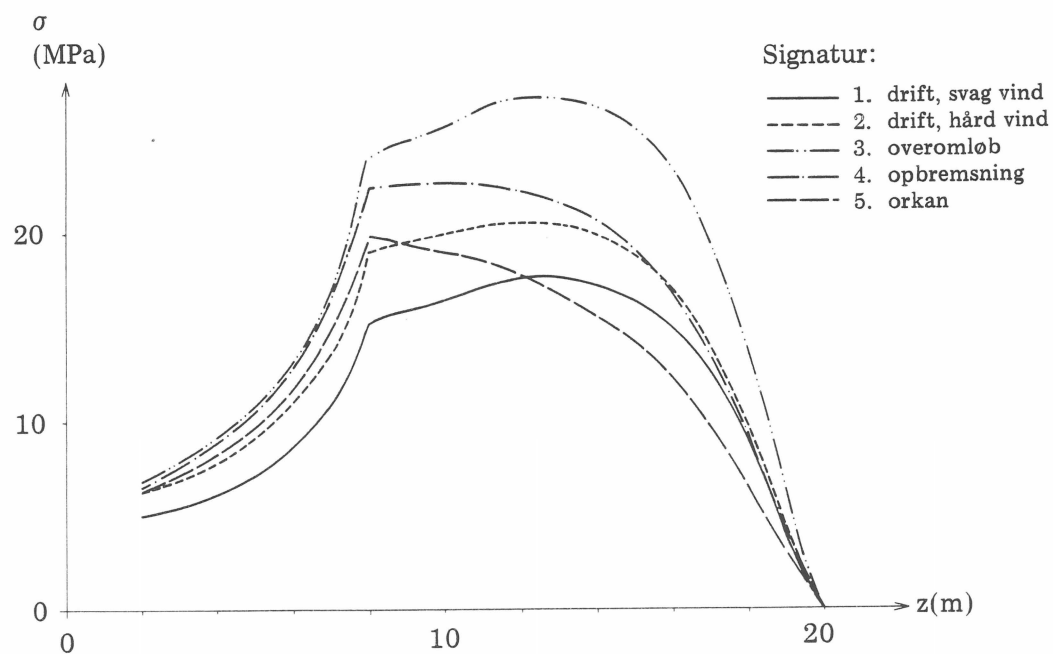
Ved hjælp af programkomplekset SAP IV [2] blev vingespidsens udbøjninger udregnet parallelt med og vinkelret på tipkorden i lasttilfælde 3:

$$u_x = 0,14 \text{ m}$$

$$u_y = 1,20 \text{ m.}$$



Figur 7. Momenter om profilkorden, flapvis, i de fem undersøgte lasttilfælde.



Figur 8. Maksimalspændingens variation langs vingen i fem lasttilfælde.

Lasttilfælde	Maksimal spænding	Regningsmæssig styrke
	σ (MPa)	f_d (MPa)
1	17,1	20
2	20,1	20
3	26,5	28
4	22,6	28
5	19,6	28

Tabel 2. Maksimalspændingen, jf. figur 8, sammenlignet med regningsmæssige styrker i de undersøgte lasttilfælde.

I forbindelse med beregningen af egenvægtsbelastningerne på den undersøgte vinge, blev der foretaget et skøn over massen af den færdige vinge. Ved at medtage masse af spanter, lim, beslag samt overfladebehandling anslås det, at vingens samlede masse med overgangsstykke af stål bliver:

$$m = 2700 \text{ kg}$$

Beregningen er gengivet i anneks C.

6.3 Spændingsanalyse, dynamisk beregning

På grundlag af de fundne tværsnitsdata har AFM foretaget en dynamisk analyse af den udviklede vinge, se [18]. Ved hjælp af et simuleringsprogram er vingens tvungne respons beregnet og maksimale bøjningsmomenter fundet i en række tilfælde:

- normal drift
- start/stop ved svag vind
- start/stop ved hård vind
- 25% overomløb
- orkan.

Tilfælde a undersøges ved vindhastighed 13 m/s, hvor de største momenter optræder.

I tabel 3 er vist en sammenligning af momenterne, som ligger til grund for den foreløbige dimensionering, og de mere realistiske lastkombinationer udregnet af AFM. Sammenstillingen er sket i tre tilfælde.

Position z (m)	DRIFT				OVEROMLØB				ORKAN			
	AUC, tilfælde 1		AFM, tilfælde a		AUC, tilfælde 3		AFM, tilfælde d		AUC, tilfælde 5		AFM, tilfælde e	
	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
2	-291	-171	-229	-106	-445	-221	-487	-145	-516	-91,0	-515	100
6	-200	-88,1	-145	-54,0	-309	-118	-320	-115	-283	-49,8	-287	~0
10	-113	-39,9	-77,5	-23,5	-177	-55,2	-165	-48,0	-128	-22,6	-130	~0
14	-44,2	-12,7	-27,0	-7,0	-69,1	-18,1	-57,0	-14,0	-39,9	-7,0	-41,0	~0

Tabel 3. Resulterende momenter i kNm benyttet ved foreløbig dimensionering (AUC) og udregnet ved simulering af vingens tvungne respons (AFM).

Lasttilfælde	Maksimal spænding			
	$z = 2\text{m}$	$z = 6\text{m}$	$z = 10\text{m}$	$z = 14\text{m}$
a	3,5	6,2	11,0	10,1
b	1,9	3,2	4,2	2,7
c	4,2	9,1	14,9	12,7
d	6,6	13,4	23,6	21,6
e	6,7	12,2	19,4	16,1

Tabel 4. Maksimale spændinger i MPa udregnet for belastninger fundet ved simulering af vingens tvungne respons, se [18].

Medens tilfældene overomløb og orkan viser temmelig nøje overensstemmelse mellem de to belastningssæt, er drifttilstanden skønnet en del på den sikre side ved de foreløbige beregninger.

Maksimale spændinger er udregnet og fremgår af tabel 4. I alle tilfælde er spændingerne acceptable, jf. Hoffmeyer [13], når der tages hensyn til, at tilfældene d. overomløb og e. orkan er ekstraordinære lasttilfælde, som medfører et begrænset antal påvirkninger i vingens levetid.

6.4 Svingningsanalyse

I forbindelse med udformningen af vingeprofilet blev SAP IV brugt til beregning af vingens egenfrekvenser og egensvingningsformer. Den benyttede beregningsmodel, som opererer med en fast indspændt vinge opbygget af bjælkeelementer og koncentrerede masser, er nærmere beskrevet i [10].

På grundlag af tværsnitsdata for trævingen med den foreslåede udformning har AFM udført en egensvingningsanalyse, jf. Øye [18], svarende til normalt driftsomløbstal. De udregnede egenfrekvenser er gengivet i tabel 5. Som det fremgår af beregningerne, ligger de tre laveste egenfrekvenser uden for resonans med omløbstallet.

Hvis det skulle blive aktuelt, kan vingens egenfrekvenser ændres ved at forandre massefordelingen. Specielt i vingespidsen, de yderste 3 - 4 m, kan massen reduceres, da de optrædende spændinger er små.

Egenfrekvens	ω	ω/Ω
	(rad/s)	
1	15,4	4,4
2	37,2	10,6
3	43,5	12,4

Tabel 5. Laveste egenfrekvenser, ω , ved driftsomløbstal $\Omega = 3,5 \text{ rad/s}$ (fra [18]).

7. UDFORMNING AF INDFÆSTNINGSDETALJE

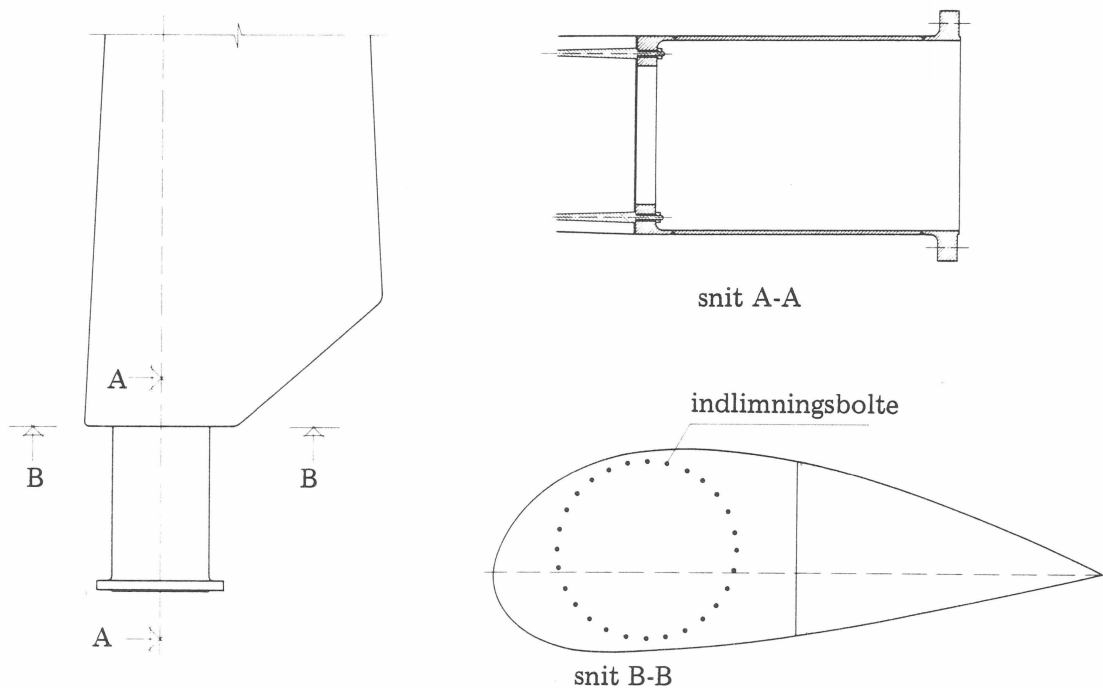
Samlingen mellem vinge og møllenav er blevet undersøgt med henblik på at finde en løsning med de bedste styrkeegenskaber. Primær interesse har en samling, hvor snitkræfterne overføres gennem en krans af indlimede bolte som i de amerikanske trævinger, jf. [5]. En vurdering af denne samlingsmetode er foretaget af Riberholt [16]. En skitse af samlingen er vist i figur 9.

En samlingsmetode, hvor vingens bærebjælke afsluttes i en cirkulærcylindrisk tap, har været overvejet. Denne limtrætap kunne så kiles fast i et konisk stålør, hvorved de optrædende snitkræfter kunne overføres ved kontaktryk.

Endelig kunne samlingen udføres med et opslidset stålør, som passer omkring den cirkulærcylindrisk tildannede afslutning af den massive del af trævingen. Stål og træ kunne så bringes til at samvirke ved hjælp af et stort antal kamsøm.

Ud fra hensyntagen til fremstillingsprocessen og den klart definerede statiske virkemåde må samlingen med indlimede bolte anbefales. En foreløbig bæreevneberegning viser, at denne samling kan overføre de optrædende snitkræfter. Af hensyn til udmattelsesstyrken af indlimningsboltene må disse forspændes. Beregningen er medtaget i annek C. Dynamisk beregning af samlingen er foretaget af Riberholt [17]. Beregning af stålovergangsstykker er udført af Jensen [14].

Det skønnes påkrævet, at der gennem forsøg skabes yderligere klarhed over den valgte indfæstningsdetaljes styrke, jf. annek D.



Figur 9. Indfæstningsdetalje med indlimningsbolte og overgangsstykke af stål.

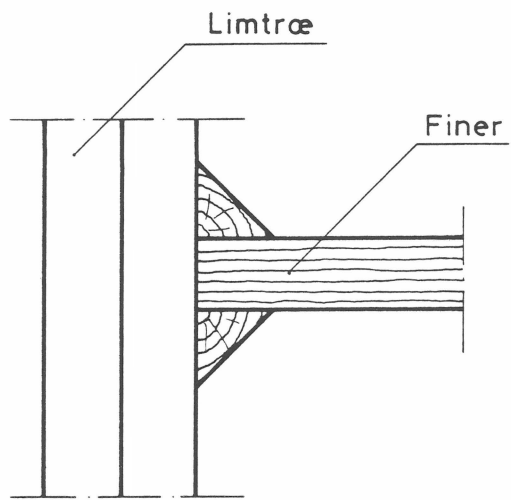
8. LITTERATURLISTE

- [1] *Aerodux bonds giant fan*. Ciba-Geigy Technical Notes no. 5, p. 2 - 4, 1978.
- [2] Bathe, K. J., E. L. Wilson, and F. E. Peterson, *SAP IV - A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems*. Report EERC 73-11, College of Engineering, University of California, Berkeley, June 1973, revised April 1974.
- [3] *Brugervejledning og beskrivelse af profilplotteprogram PROP*. Notat VK-33-780905, Afdeling for Fluid Mekanik, Danmarks tekniske Højskole, September 1978.
- [4] Butler, B. L. and B. F. Blackwell, *The Application of Laminated Wooden Blades to a Two-meter Darrieus Type Vertical Axis Wind Turbine*. Sampe Quarterly, vol. 8, no. 2, p. 1 - 6, January 1977.
- [5] Faddoul, James R., *Test Evaluation of a Laminated Wood Wind Turbine Blade Concept*. DOE/NASA/20320-30, NASA TM-81719, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, May 1981.
- [6] Gougeon, M. and G. Thomas, *Design and Proposed Fabrication for Low Cost Wood Composite Wind Turbine Blades*. Draft report. Gougeon Brothers Inc., Bay City, Michigan, July 1980.
- [7] Gougeon, M. and M. Zutech, *The Use of Wood for Wind Turbine Construction*. NASA-CP-2106, CONF 7904111, p. 293 - 308, 1979.
- [8] *Information om Nybo Jensen Møllen*. Nybo Jensen Konfektion, Viborg, April 1981.
- [9] Lewis, Wayne C., *Fatigue Resistance of Quarter-Scale Bridge Stringers in Flexure and Shear*. Report no. 2236, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, September 1962.
- [10] Nielsen, Peter C., Lars Pilegaard Hansen og H. J. Larsen: *Større møllevinger af træ. Indledende undersøgelser*. Rapport nr. 8103, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter, marts 1981.
- [11] Petersen, Helge: *Rotorkonstruktionen for de to Nibe Vindmøller opført af elværkerne*. Risø-M-2195, oktober 1979.
- [12] Walters, S., *Power from Wind*. Mechanical Engineering, vol. 96, no. 4, p. 55, April 1974.

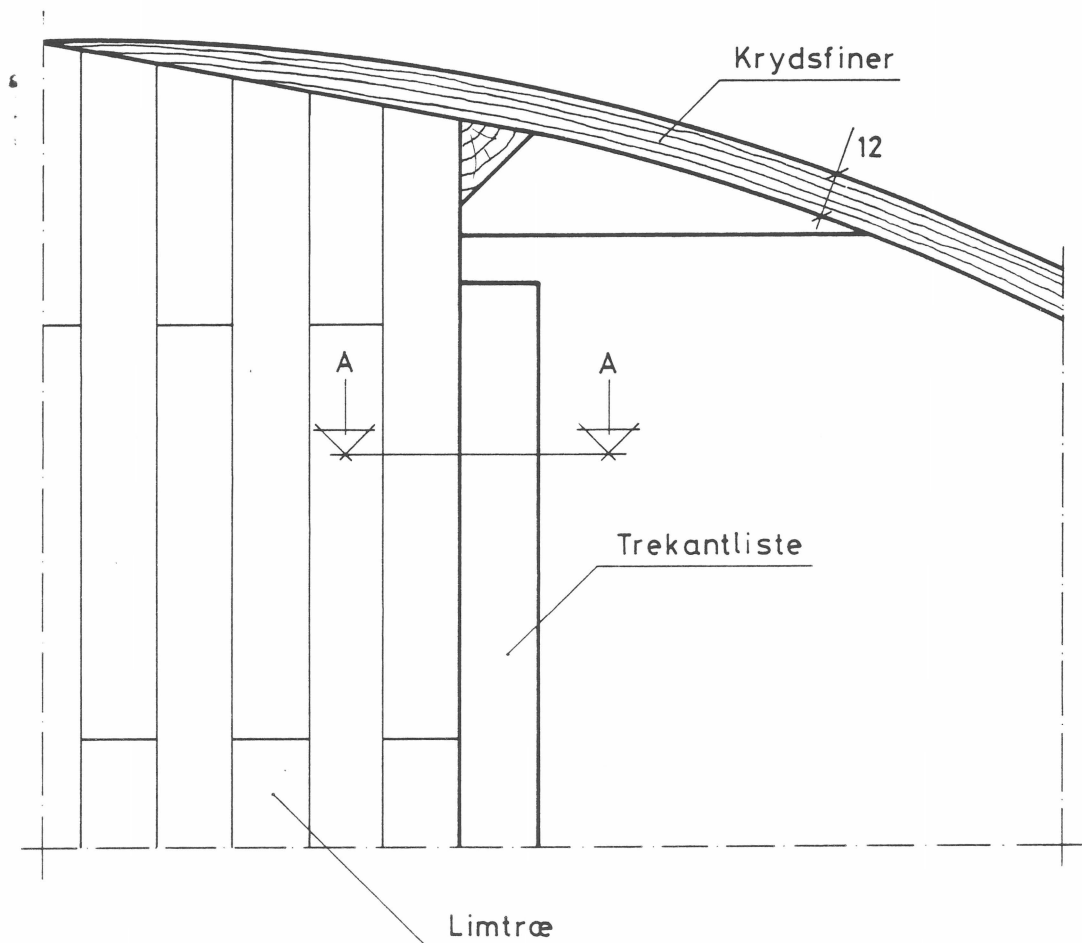
Tilknyttede rapporter:

- [13] Hoffmeyer, Preben: *Fremstilling af trævinger til Nibe mølle B. Materialevalg.* Afdelingen for Træteknik, Teknologisk Institut, Tåstrup, januar 1982.
- [14] Jensen, Ejgil: *Beregning af stålrør til vingebefæstigelse på nye trævinger.* Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling, Lyngby, marts 1982.
- [15] Jepsen, Dan: *Vingskaller af krydslimede trælameller.* LNJ Spændtræ a's, Bredebro, februar 1982.
- [16] Riberholt, H.: *Indlimede bolteforbindelser til indfæstning af vindmøllevinger af træ.* Notat, Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole, november 1981.
- [17] Riberholt, H.: *Forslag til indfæstning af vindmøllevinger af træ.* Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole, februar 1982.
- [18] Øye, S.: *Veksellastberegning for Nibe B trævinge.* Notat VK-79-820205, Afdeling for Fluid Mekanik, Danmarks tekniske Højskole, februar 1982.

ANNEKS A. SAMLINGSDETALJER I VINGE

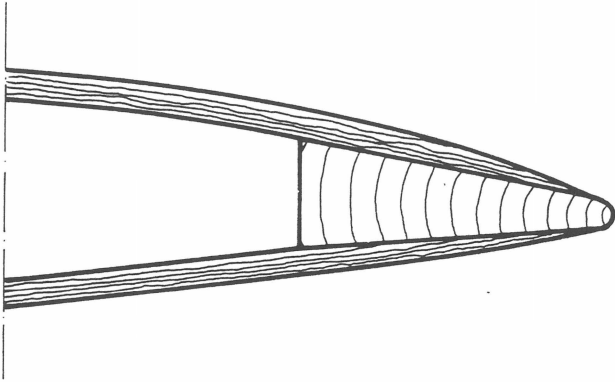


Snit A - A

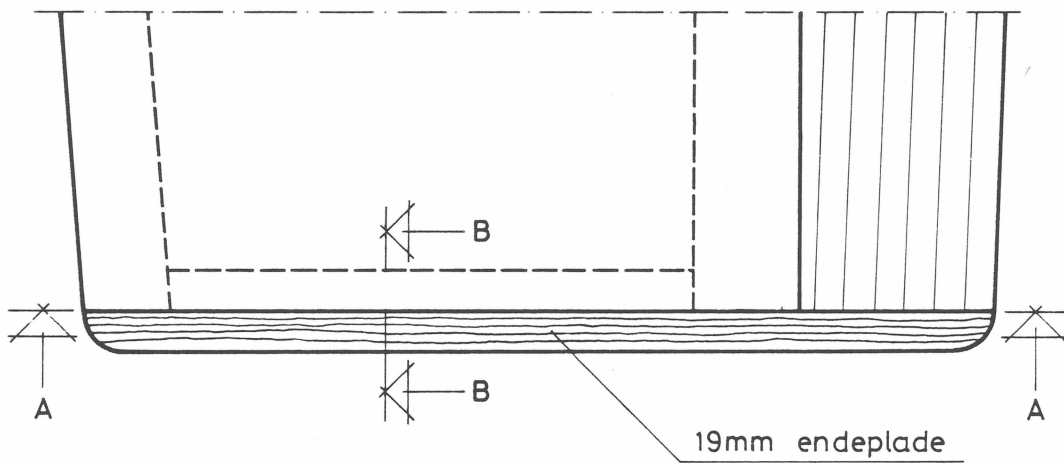


Figur A1. Samling mellem limtræ og krydsfiner.

A2

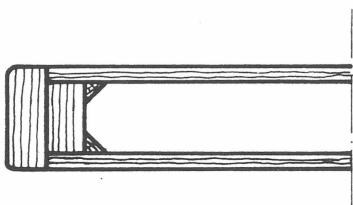


Figur A2. Samling mellem finerpaneler langs vingens bagkant.



Afbalanceringshuller

Snit A - A



Snit B - B

Figur A3. Vingespidsens udformning. Detalje og snit. Det viste princip med fals i endeplade benyttes også ved vingeroden.

ANNEKS B. EDB-PROGRAMLISTE

```

PROGRAM VIP(INPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
C ***
C * "VIP" UDREGNER TVAERSNITSKONSTANTER FOR NACA 4 CIFFER PROFILER
C * MFD MASSIV D-FORMET FORSIDE OG BAGSIDE AF LUKKET TYNDFLIGET
C * TVAERSNIT OPBYGGET I HENHOLDSVIS LIMTRAE OG KRYDSFINER.
C * DESUDEN BEREGNES MAKSIMALE SPAENDINGER I OP TIL 6 LASTKOM-
C * BINATIONER MED NAVIER'S FORMEL.
C ***
DIMENSION Z(50),CL(50),BEG(50),T(50),XFC(50),YEC(50),ALG(50),
+XP(401),YP(401),YQ(401),XPT(401),YPT(401),MBE(50),FI(6),TH(6),
+BV(6),BG(6),BK(6),BN(6),XU(50,6),YU(50,6),SIG(50,6),BX(50,6),
+BY(50,6)
COMMON/A/PI,RM,RP,TP,NP,FE,FM,RUV,XM,XS1,XS2
DATA Z1,Z2,Z3,CL1,CL3,T1,T2,T3/2.,8.,20.,2.4,.6,.80,.36,.07/
DATA RM,RP,TH1,FE,FM,RUV/0.04,0.4,11.,0.8,1.2,450./
DATA PI,FI,TH/3.1415926535898,0.,20.,2*0.,20.,90.,4*10.,-10.,10./
READ(5,101)N,NP
IF(N.GT.50.OR.NP.GT.200)GOTO 71
READ(5,102)TP,XM1,XM2,XM3,XS11,XS12,ZS1,XS21,XS22,ZS2
WRITE(6,200)
WRITE(6,209)IFIX(100*XM3/CL3+.5),IFIX(1000*TP+.5)
WRITE(6,205)
WRITE(6,201)
WRITE(6,203)
WRITE(6,204)
WRITE(6,205)
DO 10 I=1,N
READ(5,103)ZT,HIV,MBE(I)
IF(MBE(I).EQ.0)GOTO 91
READ(5,104)(BV(J),BG(J),BK(J),BN(J),J=1,6)
BV(3)=0.25*BV(1)
BV(5)=-BV(4)/2.
DO 50 J=2,5
BG(J)=BG(1)
BK(J)=BK(1)
BN(J)=BN(1)
IF(J.LE.3)GOTO 50
BK(J)=1.563*BK(J)
BN(J)=1.563*BN(J)
50 CONTINUE
BG(5)=0.
91 N2=2*NP+1
POM=0.
Z(I)=ZT
CL(I)=CL1+(CL3-CL1)*(ZT-Z1)/(Z3-Z1)
T(I)=PI*P(PT,T1,T2,T3,Z1,Z2,Z3)
BEG(I)=TH1*(Z3-ZT)/(Z3-Z1)
XM=PI*P(XM1,XM2,XM3,Z1,Z2,Z3)
XS1=XS11+(XS12-XS11)*(ZT-Z1)/(ZS1-Z1)
IF(ZT.GE.ZS1)XS1=0.
XS2=XS21+(XS22-XS21)*(ZT-Z1)/(ZS2-Z1)
IF(ZT.GE.ZS2)XS2=0.
CALL PROKO(XP,YP,YQ,CL(I),T(I))
CALL TKON(XP,YP,YQ,AE,XEC(I),YEC(I),XMC,YMC,ALG(I),HIX,HIY,ZMA)
CALL KOTRA(XP,YP,YQ,XPT,YPT,XEC(I),YEC(I),ALG(I))
DO 60 K=2,N2
60 POM=POM*SQRT((XP(K)-XP(K-1))**2+(YP(K)-YP(K-1))**2)
IPO=IFIX(1000*POM)
NAC=IFIX(RM*1.E+05+RP*1.E+03+100*T(I)/CL(I))
WRITE(6,202)ZT,CL(I),T(I),BEG(I),XEC(I),YEC(I),ALG(I),AE,HIX,
+HIY,HIV,XMC,YMC,ZMA,NAC
IF(MBE(I).EQ.0)GOTO 10
DO 20 J=1,6
CALL MOB(FI(J),TH(J),BV(J),BG(J),BK(J),HMX,HMY,BEG(I),ALG(I),
+Bx(I,J),BY(I,J))
SIM=0.
DO 30 K=1,N2
SP=ABS(BN(J)/AE+HMX*YPT(K)/HIX-HMY*XPT(K)/HIY)
IF(SP.LT.SIM)GOTO 30
SIM=SP
MP=K
30 CONTINUE
SIG(I,J)=1.E-06*SIM
XU(I,J)=XP(MP)
YU(I,J)=YP(MP)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
IF(MBE(1).EQ.0)GOTO 81
WRITE(6,200)
WRITE(6,212)
WRITE(6,205)
WRITE(6,211)(J-1,J=1,6)
WRITE(6,205)
DO 70 I=1,N
WRITE(6,210)Z(I),(1.E-3*Bx(I,J),1.E-3*BY(I,J),J=1,6)
70 CONTINUE
WRITE(6,200)
WRITE(6,206)
WRITE(6,205)
WRITE(6,211)(J-1,J=1,6)
WRITE(6,205)

```



```

DO 40 I=1,N
WRITE (6,207) Z(I), (XU(I,J), YU(I,J), SIG(I,J), J=1,6)
40 CONTINUE
GOTO 81
71 WRITE (6,208) N,NP
81 CONTINUE
101 FORMAT (2I5)
102 FORMAT (6F10.3, F8.1, 2F8.3, F8.1)
103 FORMAT (F10.3, E10.2, I5)
104 FORMAT (4E10.2)
200 FORMAT (*I*)
201 FORMAT (* Z C T BETA E.-CENTER ALFA AREAL*,
+* HOVEDINERTIMOMENTER V.-STIVHED M.-CENTER*,
+* MASSE PRO-*)
202 FORMAT (*0*, F5.2, F7.3, F6.3, F5.1, 2F6.3, F5.1, 4E11.4, 2F6.3, F7.1, I6)
203 FORMAT (* *, 27X, *X Y*, 12X, *A*, 10X, *I2 *, 8X, *I1 *, 5X,
+* J X Y*, 10X, *FIL*)
204 FORMAT (* M M M DEG. M M DEG. M2*,
+9X, *M4*, 9X, *M4*, 7X, * M4 M M KG/M*)
205 FORMAT (* =====,
+=====,
+=====,/)
206 FORMAT (* MAKSIMAL SPAENDING, STED (M) OG VAERDI (MPA):*,/)
207 FORMAT (*0*, F5.2, 1X, 6(F8.3, F6.3, F5.1))
208 FORMAT (*1 ### FEJL: N=*, I5, * ELLER NP=*, I5, * ER FOR STOR*)
209 FORMAT (* TVAERSNITSDATA (MASSIV LIMTRAEDEL *, I3, * PCT. AF KORDE*,
+* OG FINERTYKKELSE *, I3, * MM)*,/)
210 FORMAT (*0*, F5.2, 1X, 6(2F9.3, 1X))
211 FORMAT (* Z*, 5X, 6(*LASTILFAELDE*, I3, 3X),/)
212 FORMAT (* MAKSIMALMOMENTER MX OG MY (KNM)*,/)
STOP
END
REAL FUNCTION PIP(Z, Y1, Y2, Y3, Z1, Z2, Z3)
C ***
C * PIP INTERPOLERER LINEAERT I FUNKTION MED ET KNAEK
C ***
IF (Z.GE.Z1.AND.Z.LT.Z2) GOTO 51
IF (Z.GE.Z2.AND.Z.LE.Z3) GOTO 52
PIP=0.
RETURN
51 DZ=Z2-Z1
DY=Y2-Y1
PIP=Y1+DY*(Z-Z1)/DZ
RETURN
52 DZ=Z3-Z2
DY=Y3-Y2
PIP=Y2+DY*(Z-Z2)/DZ
RETURN
END
SUBROUTINE PRCKO(XP, YP, YQ, CL, T)
C ***
C * PROKO UDREGNER KOORDINATER TIL VINGEPROFILETS
C * UDVENDIGE OG INDVENDIGE KONTURER
C ***
DIMENSION XP(401), YP(401), YQ(401), YC(401), YY(401), XX(401), VIN(401),
COMMON A/PI, RM, RP, TP, NP, FE, FM, RUV, XM
N2=2*NP+1
PYK=T/CL
DO 10 J=1, NP
XX(J)=1.-(J-1.)/NP
X=XX(J)
YY(J)=PYK*5*(.2969*X**5-.126*X-.3516*X**2+.2843*X**3-.1015*X**4)
10 CONTINUE
YY(1)=0.
XX(NP+1)=0.
YY(NP+1)=0.
DO 20 J=1, NP
IF (XX(J)-RP) 61, 62, 63
61 YC(J)=RM*(2*RP*XX(J)-XX(J)**2)/RP**2
GOTO 64
62 YC(J)=RM
GOTO 64
63 YC(J)=RM*(1-2*RP+2*RP*XX(J)-XX(J)**2)/(1-RP)**2
64 CONTINUE
20 CONTINUE
YC(NP+1)=0.
DO 30 J=2, NP
30 VIN(J)=ATAN((YC(J+1)-YC(J-1))/(XX(J+1)-XX(J-1)))
VIN(1)=ATAN((YC(2)-YC(1))/(XX(2)-XX(1)))
DO 40 J=1, NP
XP(J)=CL*(XX(J)-YY(J)*SIN(VIN(J)))
YP(J)=CL*(YC(J)+YY(J)*COS(VIN(J)))
J2=2*NP+2-J
XP(J2)=CL*(XX(J)+YY(J)*SIN(VIN(J)))
YP(J2)=CL*(YC(J)-YY(J)*COS(VIN(J)))
40 CONTINUE
XP(NP+1)=0.
YP(NP+1)=0.
DO 50 J=2, NP
J2=2*NP+2-J
AL0=ATAN((YP(J+1)-YP(J-1))/(XP(J+1)-XP(J-1)))
ALU=ATAN((YP(J2+1)-YP(J2-1))/(XP(J2+1)-XP(J2-1)))
YQ(J)=YP(J)-TP/COS(AL0)
IF (XP(J).LE.XM.OR.YQ(J).LT.0.) YQ(J)=0.
YQ(J2)=YP(J2)+TP/COS(ALU)
IF (XP(J2).LE.XM.OR.YQ(J2).GT.0.) YQ(J2)=0.

```

```

50 CONTINUE
   YQ(1)=0.
   YQ(NP+1)=0.
   YQ(2*NP+1)=0.
   RETURN
   END
   SUBROUTINE TKON(XP,YP,YQ,AE,XEC,YEC,XMC,YMC,ALG,HIX,HIY,ZMA)
C ****
C *   TKON BEREGNER TVAERSNITSKONSTANTER OG
C *   TYNGDEPUNKTSKOORDINATER FOR PROFIL
C ****
   REAL IX,IY,XP(401),YP(401),YQ(401)
   COMMON/A,PI,RM,RP,TP,NP,FE,FM,RUV,XM,XS1,XS2
   XN=(XP(NP)+XP(NP+2))/4
   YN=(YP(NP)-YP(NP+2))/4
   XT=(2*XP(1)-XP(2)-XP(2*NP))/4
   YT=(YP(2)-YP(2*NP))/4
   AE=FE*XT*YT+XN*YN
   AM=FM*XT*YT+XN*YN
   SEX=0.
   SEY=FE*XT*YT*(XP(1)-XT/2)+YN*XN**2/2
   SMX=0.
   SMY=FM*XT*YT*(XP(1)-XT/2)+YN*XN**2/2
   IX=FE*XT*YT**3/12+XN*YN**3/12
   IY=FE*XT*YT*(XP(1)-XT/2)**2+FE*YT*XT**3/12+YN*XN**3/3
   CXY=0.
   DO 10 J=2,NP
     J2=2*NP+2-J
     DX=(XP(J-1)-XP(J+1))/2
     IF(XP(J+1).LE.XM.AND.XP(J).GT.XM)DX=(XP(J-1)+XP(J))/2-XM
     IF(XP(J-1).GT.XM.AND.XP(J).LE.XM)DX=XM-(XP(J)+XP(J+1))/2
     DY=YP(J)-YQ(J)
     X=XP(J)
     Y=(YP(J)+YQ(J))/2
     K=1
72   FEX=FE*DX*DY
     FMX=FM*DX*DY
     IF(X.GE.XM)GOTO 71
     FEX=DX*DY
     FMX=FEX
71   AE=AE+FEX
     AM=AM+FMX
     SEX=SEX+FEX*Y
     SEY=SEY+FEX*X
     SMX=SMX+FMX*Y
     SMY=SMY+FMX*X
     IX=IX+FEX*Y**2+FEX*DY**2/12
     IY=IY+FEX*X**2+FEX*DX**2/12
     CXY=CXY+FEX*X*Y
     IF(K.EQ.2)GOTO 10
     K=2
     DX=(XP(J2+1)-XP(J2-1))/2
     IF(XP(J2-1).LE.XM.AND.XP(J2).GT.XM)DX=(XP(J2+1)+XP(J2))/2-XM
     IF(XP(J2+1).GT.XM.AND.XP(J2).LE.XM)DX=XM-(XP(J2-1)+XP(J2))/2
     DY=YQ(J2)-YP(J2)
     X=XP(J2)
     Y=(YP(J2)+YQ(J2))/2
     GOTO 72
10  CONTINUE
     K=1
     IF(XS1.LT.1.E-10)GOTO 81
     XS=XS1
85  J=0
82  J=J+1
     IF((XP(J)-XS)*(XP(J+1)-XS).GT.0.)GOTO 82
     YS0=YQ(J)+(YQ(J+1)-YQ(J))*(XP(J)-XS)/(XP(J)-XP(J+1))
     J=NP+1
83  J=J+1
     IF((XP(J)-XS)*(XP(J+1)-XS).GT.0.)GOTO 83
     YSU=YQ(J)+(YQ(J+1)-YQ(J))*(XS-XP(J))/(XP(J+1)-XP(J))
     ARS=TP*(YS0-YSU)
     YS=(YS0+YSU)/2
     AE=AE+FE*ARS
     AM=AM+FM*ARS
     SEX=SEX+FE*ARS*YS
     SEY=SEY+FE*ARS*XS
     SMX=SMX+FM*ARS*YS
     SMY=SMY+FM*ARS*XS
     IX=IX+FE*(ARS*YS**2+(YS0-YSU)**3*TP/12)
     IY=IY+FE*(ARS*XS**2+(YS0-YSU)*TP**3/12)
     CXY=CXY+FE*ARS*XS*YS
81  CONTINUE
     IF(K.EQ.2)GOTO 84
     IF(XS2.LT.1.E-10)GOTO 84
     K=2
     XS=XS2
     GOTO 85
84  CONTINUE
     YEC=SEX/AE
     XEC=SEY/AE
     YMC=SMX/AM
     XMC=SMY/AM
     ZMA=AM*RUV
     CIX=IX-AE*YEC**2
     CIY=IY-AE*XEC**2
     CCXY=CXY-AE*XEC*YEC

```

```

ALG=90.*ATAN(-2*CCXY/((CIX-CIY))/PI
HIY=(CIX+CIY)/2-SQRT(((CIX-CIY)**2/4+CCXY**2)
HIY=(CIX+CIY)/2+SQRT(((CIX-CIY)**2/4+CCXY**2)
RETURN
END
SUBROUTINE KOTRA(XP,YP,YQ,XPT,YPT,XEC,YEC,ALG)
C ****
C * KOTRA TRANSFORMERER KOORDINATER TIL PROFILKONTUR
C * TIL SYSTEM I TYNGDEPKT. I HOVEDAKSERETNINGERNE
C ****
    DIMENSION XP(401),YP(401),XPT(401),YPT(401),YQ(401)
    COMMON/A/PI,RM,RP,TP,NP
    AC=COS(ALG*PI/180.)
    AS=SIN(ALG*PI/180.)
    N2=2*NP+1
    DO 10 I=1,N2
    XPT(I)=(XP(I)-XEC)*AC+(YP(I)-YEC)*AS
    YPT(I)=- (XP(I)-XEC)*AS+(YP(I)-YEC)*AC
10 CONTINUE
    RETURN
    END
SUBROUTINE MOB(FI,TH,BV,BG,BK,HMX,HMY,BEG,ALG,BX,BY)
C ****
C * MOB UDREGNER MOMENTER OM DE TO HOVEDAKSER
C ****
    COMMON/A/PI
    CT=COS(TH*PI/180.)
    ST=SIN(TH*PI/180.)
    CF=COS(PI*(FI+BEG)/180.)
    SF=SIN(PI*(FI+BEG)/180.)
    CA=COS(ALG*PI/180.)
    SA=SIN(ALG*PI/180.)
    BX=BK*CF-BG*SF-BV*CT
    BY=-BK*SF-BG*CF-BV*ST
    HMX=BX*CA-BY*SA
    HMY=BX*SA+BY*CA
    RETURN
    END

```

ANNEKS C. BEREGNINGSRESULTATER
Tværsnitsdata

De benyttede tværsnitskonstanter er gengivet i tabel C1. Konstanterne er beregnet ved hjælp af det udarbejdede edb-program, som er gengivet i anneks B. Vridningsnertmomentet er dog kun beregnet overslagsmæssigt som gennemsnit af værdierne for et massivt og et hult tyndfliget vingeprofil. De benyttede formler er:

$$J = \frac{4A^2 \cdot t}{s} \quad (\text{hult profil})$$

$$J = \frac{4I_x}{1 + 16 \frac{I_x}{A \cdot c^2}} \quad (\text{massivt profil})$$

hvor

- A er areal
- c er profilets kordelængde
- I_x er bøjningsinertmoment om korde
- s er kurvelængde langs midterlinie i tyndfliget profil
- t er fligtykkelse

TVÆRSNITSDATA (MASSIV LIMTRÆDEL 33 PCT. AF KURDE OG FINERTYKKELSE 12 MM)

Z	C	T	BETA ¹⁾	E _x -CENTER ²⁾	ALFA ³⁾	AREAL	HOVEDINERTIMOMENTER			V.I.MOMENT	M _x -CENTER ²⁾		MASSE
M	M	M	DEG.	X	Y	M ²	I ₁	I ₂	I ₄	M _x	M _y	KG/M	
2.00	2.400	.800	11.0	.597	.080	1.8	.7164E+00	.3254E-01	.8924E-01	.1000E+00	.619	.079	328.6
3.00	2.300	.727	10.4	.566	.075	1.7	.6090E+00	.2287E-01	.7187E-01	.7330E-01	.589	.075	280.1
4.00	2.200	.653	9.8	.536	.070	1.5	.5102E+00	.1552E-01	.5749E-01	.5220E-01	.561	.070	235.5
5.00	2.100	.580	9.2	.507	.066	1.4	.4202E+00	.1011E-01	.4572E-01	.3580E-01	.535	.065	194.8
6.00	2.000	.507	8.6	.480	.061	1.2	.3388E+00	.6251E-02	.3617E-01	.2340E-01	.511	.061	158.0
7.00	1.900	.433	7.9	.456	.056	1.0	.2663E+00	.3621E-02	.2843E-01	.1440E-01	.491	.056	125.2
8.00	1.800	.360	7.3	.435	.051	.8	.2025E+00	.1925E-02	.2212E-01	.8430E-02	.476	.051	96.3
9.00	1.700	.336	6.7	.416	.049	.8	.1798E+00	.1494E-02	.1819E-01	.6570E-02	.457	.049	85.8
10.00	1.600	.312	6.1	.398	.046	.7	.1584E+00	.1139E-02	.1478E-01	.5030E-02	.437	.046	75.9
11.00	1.500	.288	5.5	.379	.043	.7	.1384E+00	.8510E-03	.1183E-01	.3770E-02	.418	.043	66.5
12.00	1.400	.263	4.9	.360	.040	.6	.1197E+00	.6210E-03	.9315E-02	.2770E-02	.399	.040	57.8
13.00	1.300	.239	4.3	.341	.037	.6	.1024E+00	.4407E-03	.7184E-02	.1980E-02	.379	.037	49.7
14.00	1.200	.215	3.7	.322	.034	.5	.8634E-01	.3025E-03	.5413E-02	.1360E-02	.359	.034	42.2
15.00	1.100	.191	3.1	.303	.031	.5	.7164E-01	.1994E-03	.3962E-02	.9020E-03	.339	.031	35.3
16.00	1.000	.167	2.4	.283	.028	.5	.5824E-01	.1248E-03	.2792E-02	.5720E-03	.318	.029	28.9
17.00	.900	.143	1.8	.263	.026	.5	.4613E-01	.7303E-04	.1875E-02	.3380E-03	.296	.026	23.1
18.00	.800	.118	1.2	.242	.023	.6	.3527E-01	.3899E-04	.1176E-02	.1830E-03	.272	.023	17.9
19.00	.700	.094	.6	.219	.021	.8	.2558E-01	.1817E-04	.6695E-03	.8750E-04	.246	.021	13.2
20.00	.600	.070	0.0	.192	.019	1.2	.1681E-01	.8694E-05	.3330E-03	.3570E-04	.216	.019	8.7

- 1) Kordens vinkel med tipkorden.
- 2) Elastisk center, tyngdepunkt og massecenter. Afstand fra profilnæse - x - og korde - y er angivet.
- 3) Vinkel mellem 2. hovedakse og profilkorde.

Tabel C1. Benyttede tværsnitsdata.

Masseberegning

I forbindelse med udregningen af tværsnitsdata blev masse pr. længdeenhed udregnet i tværsnit med indbyrdes afstand 1 m i hele vingens længde, se tabel C1. På basis heraf kan vingens vægt anslås

Masse af trævinge	1750 kg
Masse af spanter	50 kg
Masse af lim og trælister	170 kg
Masse af overfladebehandling	130 kg
Masse af beslag (søm eller bolte)	100 kg
Masse af stålror ved indfæstning	<u>500 kg</u>
I alt	2700 kg

Alle masser er angivet som cirkaværdier.

Foreløbig beregning af indfæstningsdetalje

De største snitkræfter mellem vinge og nav i afstanden 2 m fra vingens omdrejningsakse er gengivet for de undersøgte lastkombinationer ved maksimalt mulige vindbelastninger i tabel C2.

Farligste belastning på samlingen forekommer i lasttilfælde 3.

Samlingen består af en krans af koniske 24 mm indlimningsbolte, se figur 9. Vingen tilsluttes eksisterende navflange ved hjælp af overgangsstykke bestående af stålror med flanger i begge ender. Ved at benytte højstyrke stål med pårullet gevind og en indlimningslængde på $30 \cdot d$, skønnes det muligt at opnå regningsmæssige styrker for boltene på 120 kN aksialt og 15 kN tværbelastet.

Udformes en boltekrans med diameteren $d = 680$ mm bestående af 28 stk. bolte, bliver bolteafstanden:

$$a = \frac{\pi \cdot 680}{28} = 76 \text{ mm}$$

Maksimal boltebelastning fra normalkraft og moment:

$$P_0 = \frac{2 \cdot 497}{28 \cdot 0,340} + \frac{227}{28} = 113 \text{ kN}$$

Last-tilfælde	Normal-kraft (kN)	Forskydningskræfter (kN)			Momenter (kNm)		
		Q_x	Q_y	$ Q_{res} $	M_x	M_y	$ M_{res} $
1	145	25,8	22,0	33,9	-291	171	338
2	145	30,3	39,2	49,5	-403	209	454
3	227	30,7	32,6	44,8	-445	221	497
4	227	16,9	-46,7	50,0	452	144	474
5	-16,4	11,8	67,2	68,2	-516	91	524

Tabel C2. Snitkræfter ved vingeroden med maksimalt mulige vindbelastninger. x-aksen er parallel med vingeprofilets korde.

og fra forskydningskraft:

$$P_{90} = \frac{45}{28} = 1,6 \text{ kN}$$

Da

$$\left(\frac{113}{120}\right)^2 + \left(\frac{1,6}{15}\right)^2 = 0,90 < 1$$

kan samlingen overføre de optrædende påvirkninger.

ANNEKS D EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER

En forudsætning for en helhedsvurdering af trævingeprojektet og en endelig fastlæggelse af vingens udformning vil være, at visse af de gjorte antagelser verificeres gennem eksperimentelle undersøgelser. Man bør i den forbindelse skelne mellem undersøgelser, der er en forudsætning for fremstilling af et sæt prototypevinger, og mere omfattende og generelle undersøgelser, som er nødvendige, før seriefremstilling af trævinger kan igangsættes.

I det følgende er medtaget en kort beskrivelse af de forsøg, der må gennemføres, før produktion af et sæt prøvevinger kan igangsættes.

Forsøg med koniske indlimningsbolte

Til undersøgelse af indlimningsbolte foretages statiske og dynamiske forsøg som foreslået af Riberholt, jf. bilag C.

Der udføres udtrækningsforsøg med to indlimningslængder til fastlæggelse af korttidsstyrken. Efter valg af indlimningslængde udføres udmattelsesforsøg med tre serier, hvor lasten veksler mellem 0 og henholdsvis 40, 50 og 60% af korttidsstyrken.

Forsøg med indfæstningsdetalje

Der fremstilles en rodsektion komplet med indfæstningsdetalje udført med en krans af indlimningsbolte. Samlingen belastes, og boltespændinger måles. Indfæstningens korttidsstyrke bestemmes.

Materialeforsøg med limtræ

Til undersøgelse af bøjningsstyrke og -stivhed af den foreslåede opbygning af limtræbærebjælken udføres forsøg med såvel krydslimet som konventionelt limtræ. Der lægges speciel vægt på at fastslå effekten af, at fibre i træet danner en vinkel med begrænsningsfladerne.

Der bør gennemføres mindst tre forsøgsserier med bjælker, som har konstant tværsnit. I første serie har alle lameller fibre parallelle med bjælkesiderne, medens fibre i anden serie danner en vinkel på 4° med bjælkeoversiden svarende til summen af skrå afskæring i vinge og maksimal tilladelig fiberhældning i lamellerne. Tredje forsøgsserie består af krydslimede bjælker. Hveranden lamels fibre danner en vinkel på 8° med bjælkeoversiden. De øvrige lamellers fibre er parallelle med samme over-side.

Alle lameller i prøvebjælkerne kantlimes. Før limning måles enkeltlamellernes stivhed for sammenligning med de færdige bjælkers stivhed.

Fra første forsøgsserie udtages bjælker til indledningsvise svingningsforsøg. Både frie og tvungne svingninger benyttes til fastlæggelse af bjælkerens egenfrekvenser og modaldæmpningsforhold. Fugtindholdets og svingningsniveauets indflydelse søges klarlagt.

Ligeledes fra første forsøgsserie udtages nogle få bjælker, som udsættes for udmattelsespåvirkning i bøjning.

Forsøg med vingesektion

Der opbygges et vingestykke med kordelængde 1,4 m og tykkelse 260 mm svarende til geometrien på det sted i vingen, hvor de største spændinger optræder. Vingesekti-

onen udsættes for frie og tvungne svingninger til bestemmelse af egenfrekvenser og dæmpning. Vingesektionen udsættes derefter for en bøjningspåvirkning således, at de styrke- og stivhedstal, der kan opnås i praksis, kan vurderes. Fremstillingen af et sådant prøvelegeme vil give producenten mulighed for at afprøve fremstillingsteknikken både hvad angår limningsoperationer og tildannelse af NACA-profilet.

Instrumentering af prøvevinger

Efter prøvevingerne er fremstillet, kan de opnåede egenfrekvenser bestemmes. Vingene instrumenteres så rodmoment, bøjningsspændinger i hårdest påvirkede snit samt træfugtighed kan måles i driftstilstanden.

