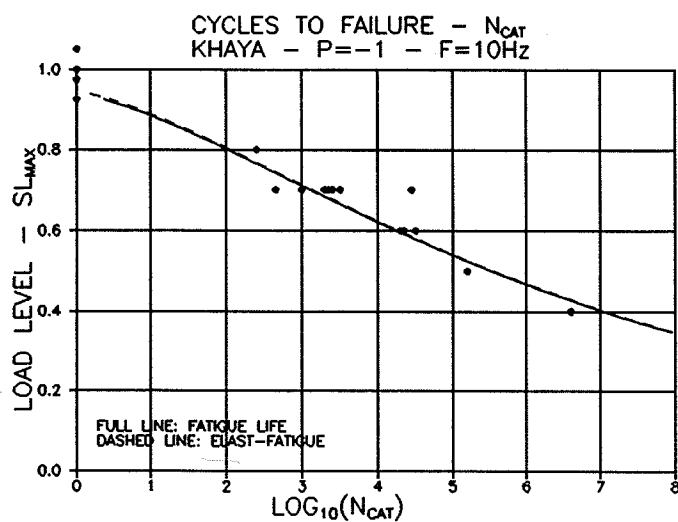


Beskrivelse af engelske fatigue-resultater

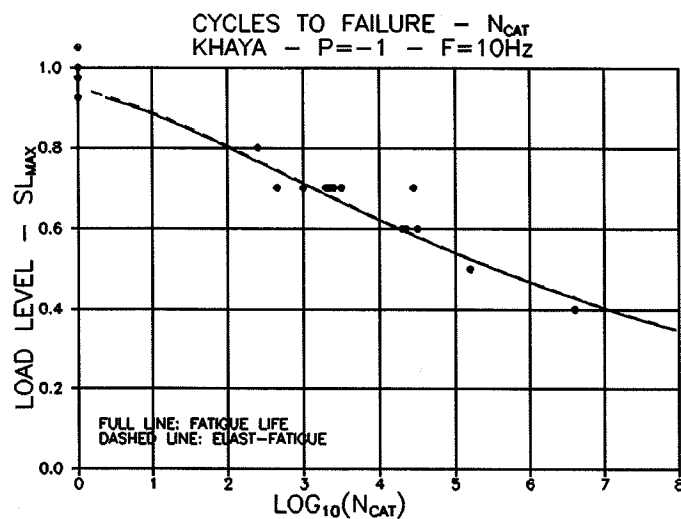
fra forsøg med Khaya 4-lags laminat

Lauge Fuglsang Nielsen



Beskrivelse af engelske fatigue-resultater *fra forsøg med Khaya 4-lags laminat*

Lauge Fuglsang Nielsen



Forord

Den efterfølgende rapport er i 1991 udfærdiget for Energiministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram som en præliminær undersøgelse af, hvorvidt en række levetids resultaterne fra nogle engelske svingningsforsøg på 4-lags laminater af Kayha træ kan beskrives gennem DVM-teorien (Damaged Viscoelastisk Material) udviklet af forfatteren til bestemmelse af viskoelastiske materialers levetid under statisk eller svingende belastning.

Rapporten er med den foreliggende LBM-rapport "genoptrykt" til brug i forfatterens DTU-kursus 6110: Materialemekanik. Den nævnte DVM-teori er siden 1991 med held blevet afprøvet i forskningsprojekter (MUP-1 blandt andre) angående limtræs udmattelsesstyrke. Projekterne er slutrapporterede af forfatteren i forskningspublikationen *"Træs udmattelse - prediktion af træbjælkers levetid og reststyrke"*, Teknisk rapport 294(1993), Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks tekniske Universitet. Publikation kan i alt væsentligt erstatte den efterfølgende rapports litteraturreference 1.

DVM-teorien er i forskningspublikationen nyttiggjort i en effektiv algoritme til computerprediktion af materialers udmattelse under såvel statisk last som svingende last. Diagrammer for levetid og reststyrker er angivet for hurtige overslag.

Beskrivelse af engelske fatigue-resultater fra forsøg med Khaya 4-lags laminat

Lauge Fuglsang Nielsen

Den foreliggende rapport er udfærdiget for Energiministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram som en *preliminær* undersøgelse af, hvorvidt levetids resultaterne fra nogle engelske svingningsforsøg på 4-lags laminater af Kayha træ kan beskrives gennem en teori (*DVM-teorien*), som rapportens forfatter har udviklet i litteraturlistens nummer (1) til bestemmelse af viskoelastiske materials levetid under statisk eller svingende belastning. De engelske forsøgsresultater er publicerede i (2,3,4,5), hvorfra (2,3) er udvalgt som typiske i nærværende sammenhæng.

Det påregnes, at rapportens læser er orienteret i DVM-teorien som den er udviklet i (1) til numeriske anvendelser - og herunder er bekendt med betydningen af de indgående symboler, der i fuldt omfang er gengivet i rapportens første afsnit. Det antages yderligere, at læseren har de engelske referencer "ved hånden", idet der vil blive henvist direkte til disses figurer.

Det påpeges i et følgende afsnit, at træs levetid afhænger af dets viskoelastiske egenskaber - og dermed principielt er afhængig af belastningsfrekvens. Da de engelske forsøg ikke er bilagt oplysninger angående de anvendte materials krybningsegenskaber har det været nødvendigt at skønne disse. Det er herefter fundet, at en sammenligning mellem eksperimentelle resultater og DVM-teorien i første omgang bør ske på det mest enkle grundlag, hvilket vil sige på grundlag af de engelske "*normal klima*"-resultater i (2) med $u = 10 \%$ og $T = 20^\circ\text{C}$, fra 4-punkts bøjningsforsøg med konstant frekvens.

I (3) er der publiceret resultater fra forsøg, hvor fugtindholdet er forskelligt fra normalklimaets 10%. Ligeledes rapporteres der her resultater fra forsøg med et større spektrum af lastudsving end i (2). Forsøgene i (3) er imidlertid udført med belastningsafhængig frekvens ($\approx 5 - 20 \text{ Hz}$), hvorfor en sammenligning mellem resultaterne herfra og de tilsvarende fra DVM-teorien må afvente en mere detaljeret analyse, der fremlægges i en efterfølgende rapport. Det er dog muligt, som det gøres i rapporten, allerede nu at foretage en kvalitativ vurdering med hensyn til levetiden i relation til fugtindhold og lastudsving.

1. Generelt

DVM-teorien omhandler som nævnt viskoelastiske materialer. Den forudsætter altså i nærværende sammenhæng kendskab til træets krybningsegenskaber, der som vist i (1) kan have en væsentlig indflydelse på træets udmattelsesstyrke således at antal svingninger til brud bliver frekvensafhængig. For "hurtige" svingninger, hvor svingningstiden er ringe i forhold til træets relaxationstid, er denne afhængighed ikke særlig stor således, at antal svingninger til brud kan bestemmes gennem en traditionel elasticitetsteoretisk fatigue-analyse. For "langsomme" svingninger kan afhængigheden være af afgørende betydning således, at levetiden uafhængig af frekvens bliver lig dødlastlevetiden - dvs. levetiden ved en forsvindende lav belastningsfrekvens. Nogle af disse forhold er illustreret i Figurerne 1 og 2, hvor DVM-teoriens resultater er sammenlignet med forsøg af Bach (6).

Træs krybning er i meget høj grad afhængig af fugtindhold (u) og temperatur (T). Dvs. at træthedsegenskaber, der i normal-klima, kan forekomme at være frekvensuafhængige, meget vel kan vise sig stærkt frekvensafhængige under andre klimatiske forhold (større u og T).

DVM-teorien er med held afprøvet i (1) på en række træbaserede materialer under fatiguepåvirkning. I de efterfølgende afsnit sammenlignes teoriens resultater med experimentelle data fra de førnævnte træthedsforsøg i (2,3) på Khaya 4-lags laminat i 4-punkts bøjning.

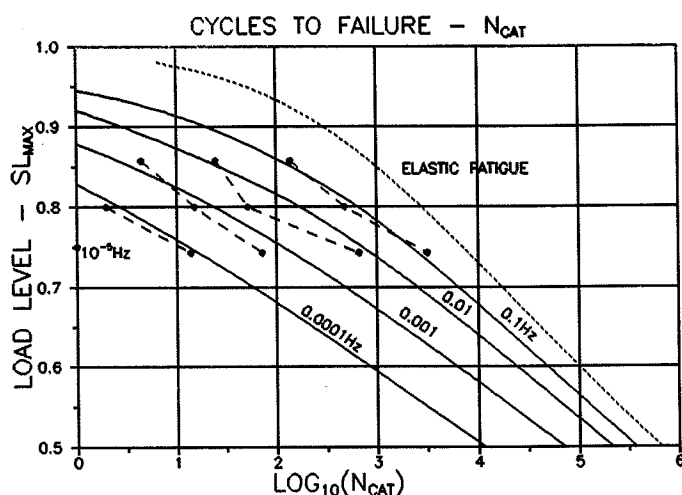


Figure 1. Number of cycles to failure of spruce compressed parallel to grain. Load ratio, $P = 0$. Exp. data by Bach (6). Theory: $(C, M, p_{CR}, W, D_{TH}) = (3, 9, -0.5, 0, 0)$. $(FL, b, \tau) = (0.4, 0.25, 1 \text{ day})$.

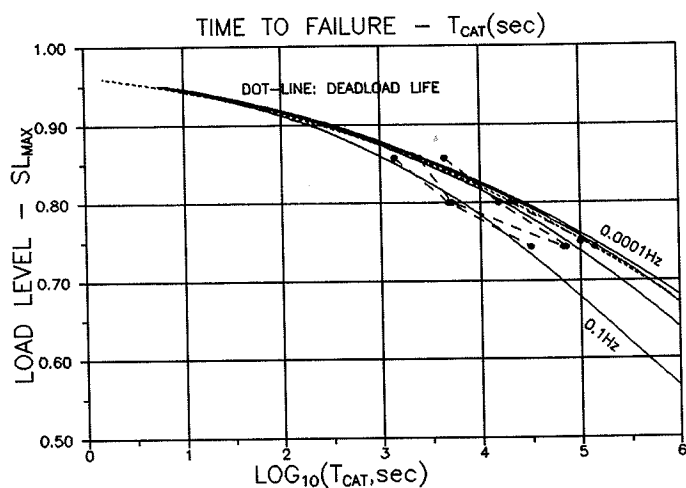


Figure 2. Fatigue lifetime of spruce compressed parallel to grain. Same experiments as in Fig. 1.

Symbolliste

Strength and load

Strength:	σ_{CR}
Theoretical (inherent) strength:	σ_L
Load in general:	σ
Strength level:	$FL = \sigma_{CR}/\sigma_L$
Load level:	$SL = \sigma/\sigma_{CR}$
Minimum load:	σ_{min}
Minimum load level:	$SL_{min} = \sigma_{min}/\sigma_{CR}$
Maximum load:	σ_{max}
Maximum load level:	$SL_{max} = \sigma_{max}/\sigma_{CR}$
Load ratio:	$p = \sigma_{min}/\sigma_{max} = SL_{min}/SL_{max}$
Load range:	$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = (1-p)\sigma_{max}$
Load level range:	$\Delta SL = SL_{max} - SL_{min} = (1-p)SL_{max}$

Time and creep

Time:	t
Cycling time:	T
Frequency:	$f = 1/T$
Number of load cycles:	$N = t/T = f \cdot t$
Fractional time under σ_{max} :	β
Relaxation time (creep):	τ
Non-dimensional time:	$\langle t \rangle = t/\tau$
Non-dimensional frequency:	$\langle f \rangle = \tau \cdot f = \tau/T$

Climate

Temperature:	$T (^{\circ}C)$
Moisture content:	$u (\%)$

Fatigue parameters	
Damage rate power:	M
Damage rate constant:	C
δ -range creep factor:	W
Critical load ratio:	p_{CR}
Crack closure threshold:	D_{TH}

2. Parameterbestemmelse

Styrkeniveau: Styrkeniveauet kan efter (1) skønnes ved hjælp af følgende (simplificerede) udtryk

$$FL \approx [1 - \exp(-d/R)]^{1/2} \quad (\approx [d/R]^{1/2} \text{ at } R/d > 10) \quad [1]$$

hvor R og $d \approx 0.3$ mm er defekt radius (e.g. revne, knast, krydssavning) henholdsvis *defekt nukleus* diameter. Sidstnævnte størrelse refererer til "virgin clear wood" hvor ingen reel defekt endnu er opstået. Den teoretiske styrke, σ_L , er styrken af virgin clear wood substans mellem defekt nuklei. Konstruktionstræ og knastfrit træ har styrkeniveauer $FL < 0.2 - 0.3$ henholdsvis $FL > 0.2 - 0.3$.

Krybning: Ifølge (1) kan krybningen for træ beskrives ved følgende udtryk, hvor tiden er symboliseret ved t,

$$c(t) \approx 1 + (t/\tau)^b \quad [b \approx 0.25] \quad [2]$$

Krybningsexponenten er b, mens τ er den såkaldte relaxationstid ved revnespidserne, der ifølge (1) kan skønnes ved hjælp af

$$\text{LOG}_{10}(\tau, \text{days}) \approx 1 \pm 1 + d \quad [3]$$

hvor fugtfaktoren, d, er givet ved følgende udtryk (modificeret under hensyn til nyere eksperimentelle resultater i (7))

$$d \approx (10 - u\%)/5 \quad [d \equiv -4 \text{ for } u > 30\%] \quad [4]$$

Damage rate power: Denne parameter kan efter (1) bestemmes som følger udfra en $\log_{10}(N_{cat}) - SL_{max}$ afbildning af resultater fra forsøg ved forholdsvis høje frekvenser, (hvor krybningens indflydelse er relativt ringe)

$$M \approx -14[1 + 1.9\log_{10}(-dSL_{MAX}/d\log_{10}N_{CAT})] \text{ ved } SL_{MAX} \approx 0.6 \quad [5]$$

Forsøgene i (1)

Som tidligere nævnt er DVM-teorien tidligere med held blevet testet i (1) mod en række træbaserede materialer. Følgende styrke-, krybnings- og fatigue-parametre blev anvendt,

$$(FL, b, \tau) = (0.4, 0.25, 1 \text{ døgn}) \quad [6]$$

$$(C, M, p_{CR}, W, D_{TH}) = (3, 9, -0.5, 0, 0) \quad [7]$$

De engelske forsøg i (2)

Materialeegenskaber i disse forsøg er utilstrækkeligt oplyst. Følgende skøn gøres, idet det anvendte træ regnes at være af "knastfri" karakter og at limningen af lameller (med epoxy) har en krybningsforsinkende effekt,

$$(FL, b, \tau) = (0.4, 0.25, 10 \text{ døgn}) \quad [8]$$

Fatigueparametrene C , W , D_{TH} fastholdes i størrelsesorden som anført i Ligning 7, mens damage rate power, M , bestemmes fra de eksperimentelle resultater som angivet i Ligning 5. Også den kritiske load ratio, p_{CR} , er deduceret fra forsøgsresultaterne, hvorefter

$$(C, M, p_{CR}, W, D_{TH}) = (3, 15, -0.75, 0, 0) \quad [9]$$

DVM-teoriens resultater er med disse parametre vist i de følgende afsnit til sammenligning med de eksperimentelt målte værdier. Den anvendte computer-algoritme er beskrevet i (1).

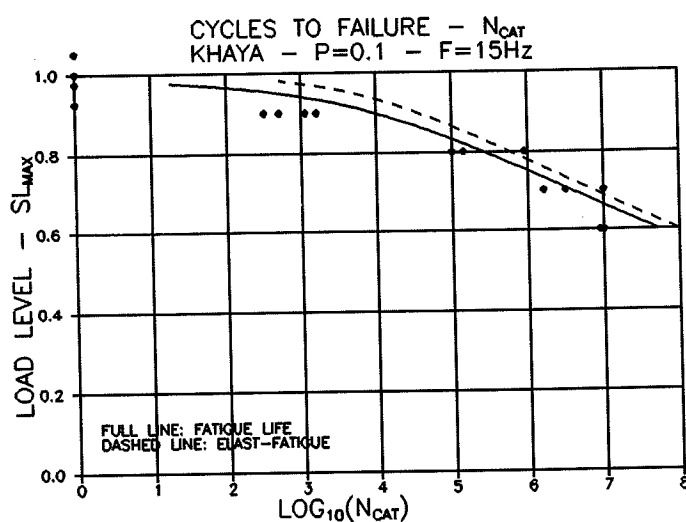


Figure 3. Number of cycles to fail of Khaya 4-ply unidirectional laminate at 15 Hz in repeated four-point bending (load ratio $P = 0.1$). Experimental results from (2). Dashed line is lifetime (N) at higher frequencies (or if no creep is present).

3. Normal-klima

I dette afsnit betragtes Khaya træet under det faktiske forsøgmæssige normal-klima ($u \approx 10\%$, $T \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) i (2).

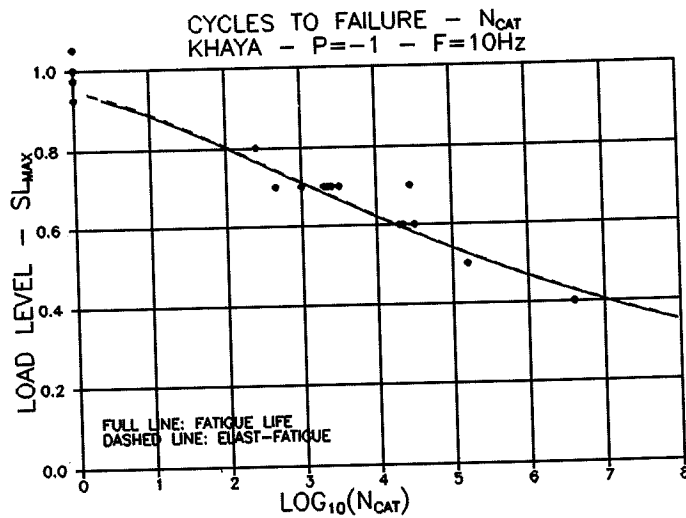


Figure 4. Number of cycles to failure of Khaya 4-ply unidirectional laminate at 10 Hz in reversed four-point bending (load ratio $P = -1$). Experimental results from (2).

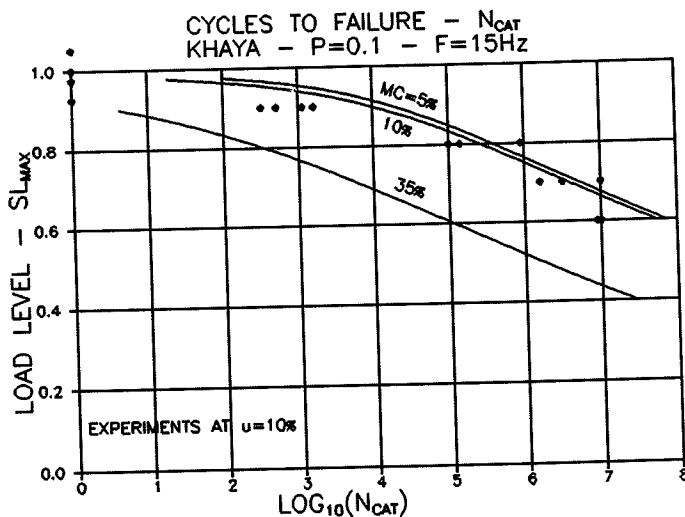


Figure 5. Influence of moisture content on lifetime. Same material and tests as in Figure 3.

4. Ændret fugtindhold

I dette afsnit foretages en analyse af, hvordan et andet fugtindhold end det normale ($u = 10\%$) vil influere på levetiden af det i (2) testede træ. Følgende fugtindhold er antaget: $u = 35\%$ og $u = 5\%$. Træets relaxationstid ændres i henhold til Ligningerne 2 og 3.

Det bemærkes, at den beregnede indflydelse på levetiden af fugtindholdet er af samme størrelsesorden som eksperimentelt vist i (3, Figur 4). Det noteres, at levetiderne i denne reference er baseret på lastfrekvenser, der afhænger af lastniveauet. Afhængigheden kan udtrykkes som vist i Figur 8.

5. Ændret load ratio

I dette afsnit undersøges det, hvordan load ratio vil influere på levetiden af det i (2) testede træ. Det bemærkes, at den beregnede indflydelse på levetiden er af samme størrelsesorden som eksperimentelt vist i referencen (3, Figur 5). Som i afsnit 4 noteres det, at der i (3) er anvendt lastafhængige frekvenser, se Figur 8.

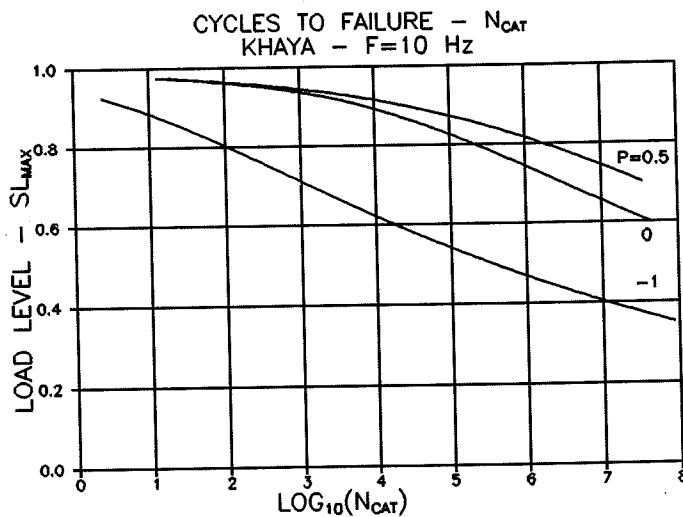


Figure 6. Influence of load ratio on number of cycles to failure. Khaya in bending with material properties as given in Equations 8 and 9.

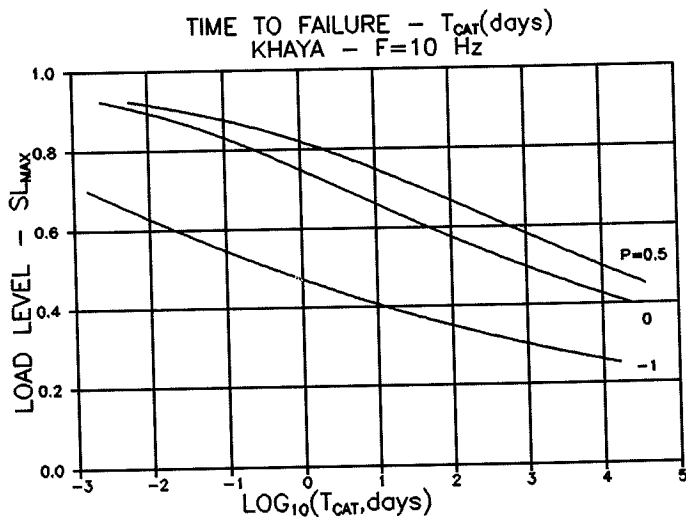


Figure 7. Influence of load ratio on time to failure. Khaya in bending with material properties as given in Equations 8 and 9

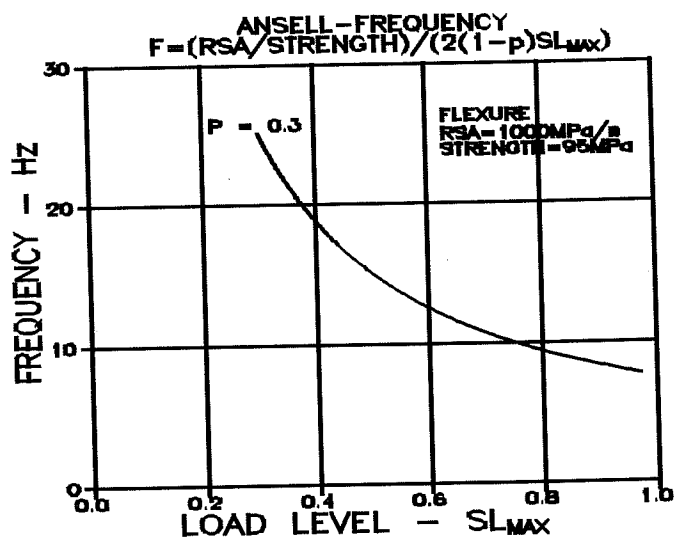


Figure 8. Load level dependent frequency used in (3).

5. Konklusion og slutbemærkninger

Det kan konkluderes, at de engelske forsøgsresultater i (2) lader sig forklare og beskrive ved DVM-teorien. ■ Alle anvendte materiale-parametre, undtagen damage rate power, M , er af samme størrelseorden som, jfr (1), gælder for en række andre træbaserede materialer (og glasfiber-armeret epoxy). ■ En damage

rate power på $M \approx 15$ er bestemt ud fra forsøgsresultaterne ved hjælp af Ligning 5. ■ Levetidens følsomhed overfor fugt og lastudsving beskrives kvalitativt korrekt gennem DVM-teoriens grundlæggende opfattelse af træ som et defekt viskoelastisk materiale. En række spørgsmål rejser der sig dog, når de engelske Khaya resultater i detaljer sammenlignes med resultaterne i (1). For eksempel,

- Hvorfor har Khaya laminatet en damage rate power, $M \approx 15$, der er betydeligt større end den værdi ($M \approx 9$) der er fundet i (1) for andre træbaserede materialer - og som alternativt er bestemt eksperimentelt gennem revnehastighedsmålinger på Douglas-fir i (8). (Stål og polymerer har $M \approx 4$ henholdsvis $M \approx 5$). Har forskellige forsøgssopstillinger en hidtil upåagtet effekt, der tilslører karakteren af M som en ægte materialkonstant ?
- De engelske forsøg er foretaget på lamineret Khaya. Vi kender ikke i tilstrækkelig grad dette materiales styrke- og krybningsegenskaber (herunder fugtafhængighed). Hvilke egenskabsmodifikationer i forhold til det rene Khayat træ fremkaldes for eksempel på grund af selve lamineringen (inklusive epoxy-limen).
- En del af de engelske fatigueresultater (3) er opnået med frekvenser, der afhænger af lastniveauet. Hvor praktisk relevante er sådanne forsøg, når der er tale om fugtpåvirket træ ?. Det er vist i rapporten, at fugt reducerer relaxationstiden betydeligt, hvilket medfører et færre antal svingninger til brud. De i Figurerne 1 og 2 viste resultater af Bach (6) illustrerer tydeligt fænomenet, at lavere frekvenser ved lave relaxationstider reducerer levetiden målt i antal svingninger.
- De engelske resultater i (3) er opnået ved belastning med "savtak-svingninger". Forsøgene i (2) er udført med sinus-svingninger, mens DVM-teorien i den her anvendte version forudsætter "blok-svingninger". Har svingningsformen indflydelse på levetiden ?. I sammenhæng med den foregående paragrafs udsagn er det tænkeligt at svaret er bekræftende ved lavfrekvent påvirket fugtigt træ (lav relaxationstid).

De omhandlede engelske forsøgsresultater er frugtbare at studere i det danske "fatigue-miljø". De giver anledning til adskillige ideer til nytte for både den praktisk-empiriske forskning og den mere teoretisk, mekanisme-orienterede forskning på området. Her tænkes specielt på igangværende projekter vedrørende bl.a. bjælker og vinger af træ (9,10,11,12,13) henholdsvis fremtidige grundforskningsprojekter som for eksempel de, der er skitserede af forfatteren i (1,13,14).

Litteratur

1. Nielsen, L. Fuglsang: Lifetime and fatigue of wood and other building materials - subjected to static and repeated loads". IUFRO Timber Engineering Group Conference, Saint John, New Brunswick, July 30 - Aug. 3, 1990, Fredericton, N.B., Canada. Proc. Build. Mat. Lab., Tech. Univ. Denmark, in press.
2. Ansell, M.P. and Tsai, K.T.: "Fatigue testing of wood composites for aerogenerator rotor blades". 6th BWEA conf. 1984
3. Ansell, M.P., Bonfield, P.W. and Tsai, K.T.: "Fatigue testing of laminated wood for generator blades". BWEA conf. 1988.
4. Tsai, K.T. and Ansell, M.P.: "Fatigue testing of wood composites for aerogenerator rotor blades - Part II, Effect of moisture and R-ratio". 7th BWEA conf. 1985.
5. Ansell, M.P.: "Characterising the fatigue properties of wood for engineering design". Proc. from a workshop on Materials in the design of WTGs held at Harwell, June 1984.
6. Bach, L.: "Frequency dependent fracture under pulsating loading". Build. Mat. Lab., Tech. Univ. Denmark, tech. rep. TR-68(1979). Presented at Forest Prod. Res. Soc. Annual Meeting 1975, Portland, Oregon, U.S.A.
7. Hoffmeyer, P.: "Failure of wood as influenced by moisture and duration of load". Thesis, Dept. Environmental Science and Forestry, State Univ. New York, Syracuse, N.Y. 1990.
8. Wendy, Lee: "Crack growth studies on wood". Dept. Metallurgy, Univ. Brit. Columbia, Vancouver, B.C., Canada, Tech. report, spring 1983.
9. "Fatigue of wood perpendicular to grain" (*variable mean load level, variable fraction of time under max load*). ■ Build. Mat. Lab., Tech. Univ. Denmark. ■ Timber Eng. Sect., Civ. Eng. Dept., Univ. Brit. Columbia, Canada
- 10.. "Fatigue of gluelam" (*slope of grain, high stress*) ■ Dansk Vindmølle Industri ■ Build. Mat. Lab, Tech. Univ. Denmark ■ Struct. Dept., Ålborg Univ. ■ Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi
- 11.. "Fatigue of gluelam wood" (*High and low frequency, moisture content*). ■ Build. Mat. Lab., Tech. Univ. Denmark ■ Struct. Dept., Ålborg Univ.
- 12.. "Fatigue of fingerjoints" ■ Struct. Dept., Tech. Univ. Denmark
13. "Fatigue of building materials" (*Theoretical research*) ■ Build. Mat. Lab., Tech. Univ. Denmark.
- 14.. Nielsen, L. Fuglsang: "Lifetime, residual strength, and quality of wood - and other viscoelastic building materials". Holz als Roh- und Werkstoff, 1991, in press.