

Alpo Ranta-Maunus
Markku Korttesmaa

Artikkelissa esitetään helppokäyttöisiä laskentamenetelmiä kosteusvaihtelun aiheuttaman, ns. mekanosorptisen puun virumisen huomioon ottamiseksi. Menetelmiä sovelletaan puun kuivumisjännitysten sekä palkin ja sauvan viruman analysointiin. Tulokseksi saadaan puun kuivauksessa syntyvän maksimi jännityksen riippuvuus kuivaus- ja materiaaliparametreista, joka esitetään käyrästön avulla. Puurakenteiden virumiskerrointen ja pitkäaikaislujuuden määrittämisen perustaksi lasketaan esimerkkejä ja hahmotellaan likimääräis- menetelmää.

JOHDANTO

Puun viruminen riippuu ensisijaisesti kosteuden vaihtelusta ja vain heikosti kuormitusajasta. Kosteuden vaihtelun vaikutus puuhun on tunnettu noin vuodesta 1960 /1/ ja ilmiötä on sittemmin ruvettu nimittämään mekanosorptiseksi virumiseksi. Varsin yleinen käsitys on, että mekanosorptinen viruma riippuu lähes lineaarisesti jännityksestä ja kosteusmuutoksen suuruudesta. Asiaa mutkistaa, että perättäisten kosteusvaihteluiden aiheuttamalla virumalla näyttää olevan yläraja /2/ ja muodonmuutos saadaan palautumaan, jos puu kostutetaan kuormittamattomana.

Tuoreen puun kuivuessa syntyvät syysuuntaa vastaan kottisuurat jännitykset aiheuttavat puun halkeilun. Jännitystilän laskemiseksi on perinteisesti käytetty kimmo- tai plastisuusteoriaa /3/. Myös eräitä viskoelastisia analyysejä on tehty. Mikään näistä ei kuvaa puun käyttäytymistä todenmukaisesti ja saatavat numeroarvot eivät anna kvantitatiivista mittaa halkeilun arvioimisen pohjaksi.

Mekanosorptisen viruman huomioon ottamiseksi rakenteissa tai kuivumisjännitysten relaxoitumisessa ei ole kuitenkaan esitetty laskentamenetelmiä. Tässä artikkelissa esitetään yksinkertaisia puun virumisen analysointiin soveltuvia me-

netelmiä. Lähtökohtana on, että puun virumisessa ajan vaikutus on toisarvoinen ja ns. tavallinen vakio kosteudessa tapahtuva viruminen voidaan jättää huomioon ottamatta. Elementtimenetelmän käyttöä puun virumisen mallintamisessa käsitellään muualla /3/.

KONSTITUTIIVINEN YHTÄLÖ

Anisotrooppisen mekanosorptisesti viruvan aineen tilamuutustujen välinen yhteys voidaan kirjoittaa yleisessä muodossa seuraavasti /4/, kun mekanosorptisen viruman palautumista ei käsitellä:

$$\epsilon_{ij} = \int_0^t J_{ijkl}(u_0, T, t-\tau) d\sigma_{kl}(\tau) + \int_0^t [\alpha_{ij} + m_{ijkl} \sigma_{kl}(\tau)] du(\tau) \quad (1)$$

missä $J_{ijkl}(u_0, T, t-\tau)$ on lineaarisen viskoelastisuusteorian tarkoittama virumisfunktio vakiokosteudessa ja -lämpötilassa, α_{ij} on vapaasta kosteuspiteneemisestä johtuva kerroin, m_{ijkl} on mekanosorptista virumista kuvaava tekijä, joka oletetaan vakioksi kuivumisen aikana ja niinkään vakioksi kostumisen aikana, mutta näillä vakioilla on eri arvo. u on kosteus ja T lämpötila.

Mekanosorptisen viruvan aineen konstitutiivinen yhtälö (1) voidaan kirjoittaa myös differentiaaliyhtälön muotoon. Jos samalla jätetään vakio-olosuhteissa tapahtuva viruminen huomioon ottamatta ja tyydytään aksiaaliseen esitysmuotoon, saadaan

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + (\alpha + (m-E'/E^2)\sigma)\dot{u} \quad (2)$$

Käytännössä termin E'/E^2 merkitys, joka ottaa huomioon kimmokertoimen muuttumisen kosteuden mukana, jää aina alle viiden prosentin eikä se ole mukana seuraavissa tarkaste-

luissa. Yhtälöitä (1) ja (2) voidaan tulkita myös siten, että kosteusmuodonmuutos riippuu jännitystilasta.

PUUN KUIVUMISJÄNNITYKSET

Kuivumisjännitysten laskentamenetelmän kehittäminen aloitetaan luopumalla ajasta konstitutiivisen yhtälön muuttujana. Koska puun kuivuessa sen kosteuden keskiarvo w on monotonisesti aleneva ajan funktio, yhtälössä (2) voidaan muuttuja t korvata muuttujalla w ilman, että riippuvuuden yksikäsitteisyys menetetään. Tarkastellaan paikan suhteen yksiulotteista tapausta, kun $x = 0$ kappaleen keskellä ja $x = \pm l$ pinnoilla. Merkitään

$$u(x, w) = w + \Delta(x, w) \quad (3)$$

missä $\int_{-1}^1 \Delta(x, w) dx = 0$ kaikilla w :n arvoilla.

Tuoreen puun kuivumisen tarkastelussa muuttujilla u ja w tarkoitetaan niiden tehollisia arvoja kutistumisen suhteen eli eroa puusyiden kyllästymispisteeseen. Kun derivaattaa w :n suhteen merkitään (*)-llä ja u :n lauseke (3) sijoitetaan yhtälöön (2), saadaan E :n ollessa vakio:

$$\sigma + E_m(1 + \Delta)\sigma = E [\epsilon - \alpha(1 + \Delta)] \quad (4)$$

Kun ulkoista kuormitusta ei ole, jännitysresultantit häviävät, ja muodonmuutoksen ratkaisemiseksi saadaan integroimalla lauseke (4)

$$\int_{-1}^1 [\epsilon - \alpha(1 + \Delta) - E_m\Delta\sigma] dx = 0$$

Käytännön tehtävien ratkaisemiseksi oletetaan tasojen pysyvän tasoina eli kosteusjakauman ollessa symmetrinen

$$\epsilon(x, w) = \epsilon(w)$$

Analyyttinen ratkaisu

Tarkastellaan kuivumista alkutilanteesta $\{\epsilon_0, \sigma_0(x), \Delta_0(x), w = 0\}$ pinnan ja keskikosteuden eron muuttuessa lineaarisesti

$$\Delta(x, w) = \Delta_0(x) + c(x) \cdot w \quad (5)$$

Tällöin (4) saa muodon

$$\sigma + Em(1 + c)\sigma = E[\epsilon - \alpha(1 + c)] \quad (6)$$

missä σ ja c ovat paikan funktioita ja σ ja ϵ w:n

funktioita. Kun oletetaan $\epsilon = \alpha$, saadaan vakiokertoiminen differentiaaliyhtälö

$$\sigma(x, w) + Em(1 + c(x))\sigma = -E\alpha c(x)$$

jonka ratkaisu on

$$\sigma(x, w) = \sigma(x, 0) e^{-\mu w} + \frac{\alpha c(x)}{m(1 + c(x))} [e^{-\mu w} - 1] \quad (7)$$

missä $\mu = Em(1 + c(x))$.

Tulosta voidaan käyttää hyväksi myös yleisemmässä tapauksessa, kun Δ on paloittain lineaarinen w:n suhteen. Tällöin saadaan rekursiokaavaksi

$$\sigma_{i+1} - \sigma_i = \left[\sigma_i + \frac{\alpha c_i}{m(1 + c_i)} \right] [e^{-\mu_i \Delta w_i} - 1] \quad (8)$$

Derivaatasta johdettuna tai raja-arvotarkastelulla vastavaksi kaavaksi saadaan

$$\sigma_{i+1} - \sigma_i = E\alpha \Delta w_i \quad (9)$$

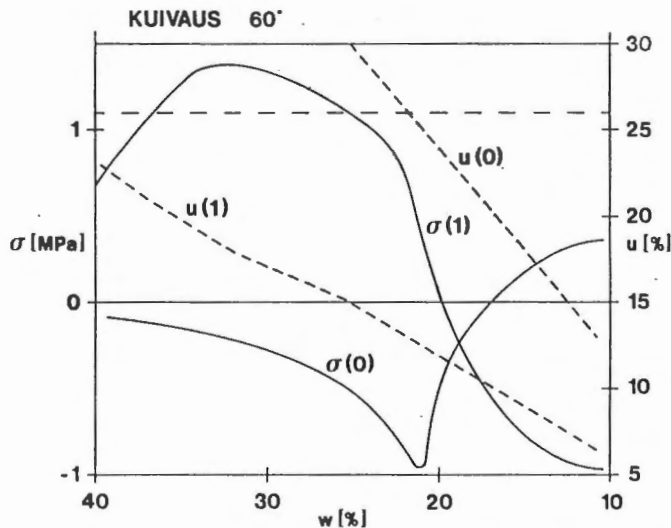
kun $c_i = -1$. Edelleen havaitaan, että jännitystila säilyy muuttumattomana, jos kosteutta muutetaan siten, että

$$c(x) = - \frac{m\sigma(x)}{\alpha + m\sigma(x)}$$

Kun kosteuserot säilyvät vakiona puun kuivussa ($c=0$), havaitaan jännitysten relaksoituvan nopeasti:

$$\sigma(x, w) = \sigma(x, 0) e^{-\mu w}$$

Sahatavaran kuivausta esittävä numeerinen esimerkki on esitetty kuvassa 1. Sen mukaan pinnassa vaikuttavan vetojännityksen maksimi saavutetaan kuivauksen alkuvaiheessa, kun vasta osa poikkileikkauksesta on kuivunut puun syiden kyllästymispisteen alapuolelle. Kuivauksen jatkuessa jännitys pienenee nopeasti ja muuttaa merkkiä, jos kuivausta jatketaan riittävän pitkälle.



Kuva 1. Sahatavaran poikittaiset kuivumisjännitykset pinnassa $\sigma(1)$ ja keskellä $\sigma(0)$, kun kosteusjakauma pinnan ja keskikohdan välillä on parabeli. Esimerkissä $m = -0.15 \text{ MPa}^{-1}$, $\alpha = 0.27$ ja kimmokerroin (E_T) on lämpötilasta ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) ja kosteudesta riippuva.

Jännityksen maksimi

Edellä esitetty laskentamenetelmä ei ole teoreettisesti tarkka kuivauksen alkuvaiheessa, kun vain osa puun poikkileikkauksesta on kuivunut puusyiden kyllästymispisteen alapuolelle. Tämän kuivauksen alkuvaiheen analysoimiseksi, jolloin jännityksen maksimi arvo saavutetaan, kehitetään seuraava lähestymistapa.

Oletetaan että kosteus riippuu paikasta parabolisesti

$$u = c x^2$$

ja puusyiden kyllästymispiste saavutetaan etäisyydellä x_0 . Kuivumisen katsotaan tapahtuvan siten, että x_0 pienenee arvosta 1. Tällöin on tehollinen, kutistumisen aiheuttava kosteusjakauma muotoa

$$u = c (x^2 - x_0^2) H(x - x_0) \quad (10)$$

missä H on Heavisiden askelfunktio ja c vakio. Kun tämä sijoitetaan yhtälöön (4) ja vaihdetaan muuttujaksi x_0 w :n sijalle, saadaan muuten edellä käytettyjä oletuksia soveltamalla differentiaaliyhtälöt

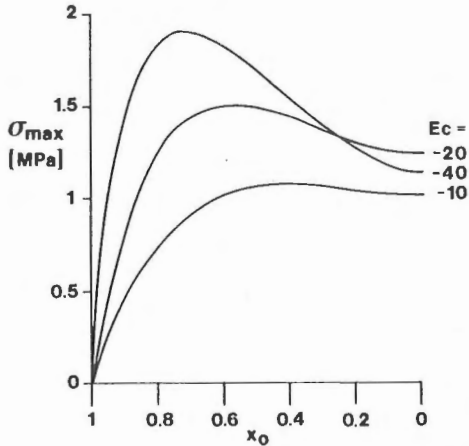
$$\begin{cases} \sigma' - 2Emcx_0\sigma = 2E\alpha cx_0^2, & \text{kun } x > x_0 \\ \sigma' = 2E\alpha cx_0(1-x_0) & \text{ } x < x_0 \end{cases} \quad (11)$$

Kun $x < x_0$ saadaan ratkaisuksi

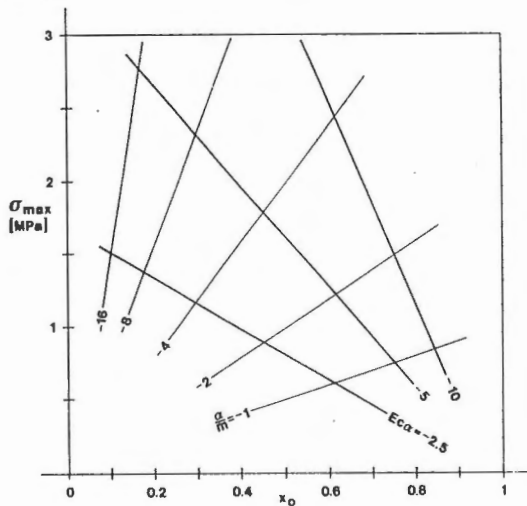
$$\sigma = 2E\alpha c \left(\frac{x_0^3}{3} - \frac{x_0^2}{2} + \frac{1}{6} \right) \quad (12)$$

Kun $x > x_0$, erityisesti arvolla $x = 1$ saavutetaan jännityksen maksimi. Suljetussa muodossa olevaa ratkaisua emme löytäneet. Numeerinen ratkaisu on yhdenmukainen kuvassa 1

esitetyn yhtälön (8) ratkaisun kanssa. Kuva 2 esittää pinnassa vaikuttavaa vetojännitystä parametrin x_0 funktiona. Kuivauksen kuluessa x_0 pienenee arvosta 1 arvoon 0. Kuvassa 3 on jännityksen maksimi arvon riippuvuus virumis- ja kuivausparametreista ja maksimin esiintymisajankohta parametrin x_0 avulla ilmaistuna.



Kuva 2. Esimerkkilaskelma sahatavaran kuivauksessa pintaan syntyvän jännityksen arvolle puunsiyiden kyllästymispisteen koordinaatin x_0 ja kuivaustapaparametrin E_c [MPa] funktiona.



Kuva 3. Puun kuivauksessa kyllästymispisteen alapuolelle syntyvän maksimi jännityksen arvo ja ajankohta likimäärin. Käyrästä sisältää yksiulotteisen analyysin (11) numeerisen tuloksen eri suunnissa, kun E [MPa], m [MPa^{-1}] ja α valitaan tarkasteltavan suunnan mukaan.

VETOSAUVAN NUMEERIN RATKAISU

Tarkastellaan samaa kosteusvaihtelua kuin edellä (5). Kun sauvaan vaikuttaa normaalivoima N , yhtälön (6) integrointi antaa

$$\epsilon^* - \alpha = \frac{N}{2E} + m \left[\frac{N}{2} + \int_0^1 c(x)\sigma(x) dx \right] \quad (13)$$

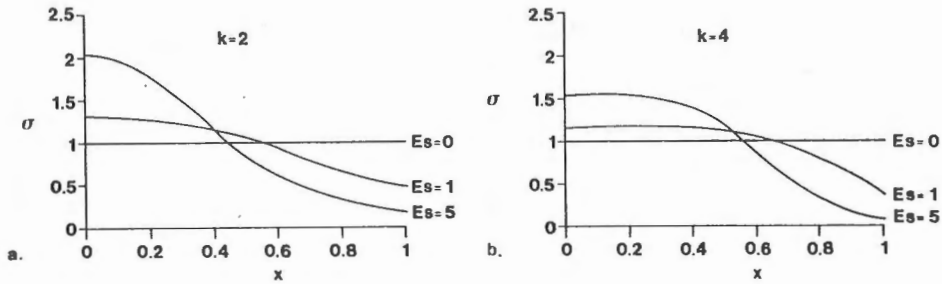
Kun kosteuden vaihtelu koostuu perättäisistä kuivumisista ja kostumisesta, joiden suuruutta keskiarvolla mitattuna merkitään Δw_i :llä saadaan jännitystilän ja venymän laskemiseksi keskikosteuden ääriarvojen hetkillä yhtälöstä (6) kun otetaan huomioon yhtälö (13)

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta w_i E \left[\epsilon_{i-1}^* - (1+c)(\alpha + m_i \sigma_{i-1}) \right] \quad (14)$$

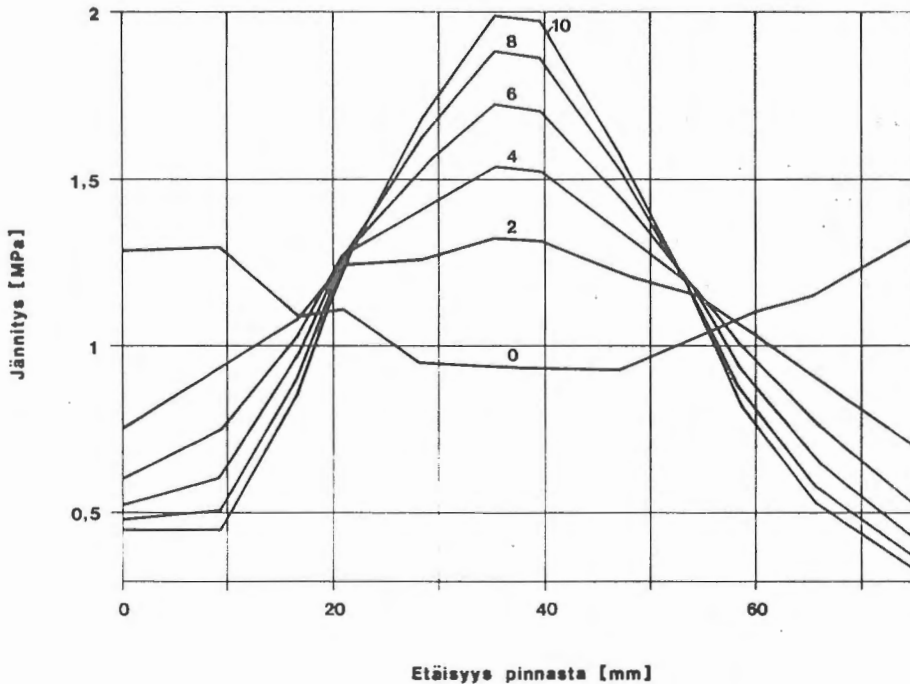
Lisäksi muodonmuutoksille pätee

$$\epsilon_i = \epsilon_{i-1} + \epsilon_{i-1}^* \Delta w_i$$

Yhtälön (14) numeerinen ratkaisu, kun vetosauva on otettu puun säteen suunnassa ja N on vakio, on esitetty kuvassa 4. Tuloksesta havaitaan jännitys jakauman muuttuvan vaihtelun seurauksena siten että puun sisäosa, jossa vaihtelu on pienintä, kantaa yhä suuremman osan kuormasta. Vertailun vuoksi kuvassa 5 esitetään 2-ulotteisella elementtimenetelmällä laskettu vastaava esimerkki /3/. Tulosten havaitaan olevan varsin samanlaisia. Kuvan 4 esittämä jännitysten uudelleen jakautuminen havaitaan myös puusyiden suuntaisessa sauvassa, mutta ilmiö on hitaampi.



Kuva 4. Säteensuuntaisen vetosauvan jännitystilän muuttuminen yhtälön (14) numeerisen ratkaisun mukaan kosteuden vaihdellessa pinnassa yhden prosentin ja kosteusjakauman ollessa verrannollinen tekijään a) x^2 ja b) x^4 . Ratkaisussa $\alpha=0.15 \text{ MPa}^{-1}$, $m^-=-0.1$, $m^+=0$ ja $E=500 \text{ MPa}$. Parametri s on määritelty yhtälössä (17).



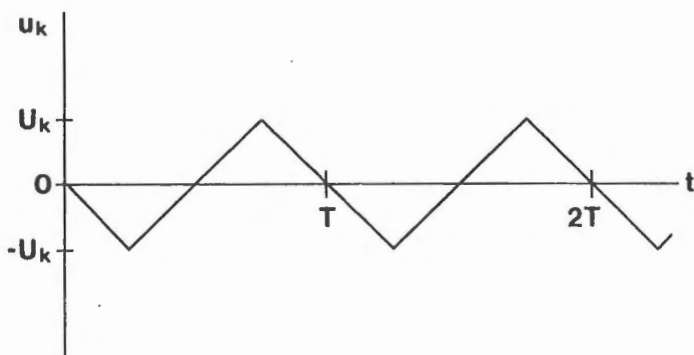
Kuva 5. FEM:llä laskettu esimerkki kosteuden vaihtelun vaikutuksesta vetosauvan jännitysjakautumaan. Numerot viittaavat kosteus syklien lukumäärään.

MEKANOSORPTINEN PALKKI

Tarkastellaan palkin virumista kosteuden vaihtelun vaikutuksesta, kun kosteusvaihtelu on muotoa

$$u = x^k u_k, \quad k = 0, 2, 4 \dots \quad (15)$$

missä u_k vaihtelee kuvan 6 mukaisesti ajan funktiona ääriarvojen $\pm U_k$ välillä.



Kuva 6. Kosteusvaihtelu.

Konstitutiivinen yhtälö kirjoitetaan nyt integroidussa muodossa ja vapaa kutistuma jätetään pois, koska tarkasteluhetkillä $t = nT$ kosteuseroja ei ole ($u = 0$):

$$\epsilon(nT) = \frac{\sigma(nT)}{E} + \int_0^{nT} m(\dot{u}) \sigma(\tau) \dot{u}(\tau) d\tau \quad (16)$$

Oletetaan että jännitystilä pysyy vakiona yhden jakson ajan ja merkitään

$$s = \int_{nT}^{(n+1)T} m(\dot{u}) \dot{u}(\tau) d\tau, \quad \text{kun } x = \pm 1 \quad (17)$$

ja

$$\sigma_n = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} \sigma(\tau) d\tau$$

Tällöin saadaan (16) muotoon

$$\epsilon_n = \frac{\sigma_n}{E} + s x^k \sum_{j=1}^n \sigma_j \quad (18)$$

Poikkileikkausten oletetaan säilyvän tasoina ja jännitys kehitetään sarjaksi:

$$\epsilon_n(x) = \epsilon_n(0) + \gamma_n x \quad (19)$$

$$\sigma_n(x) = A_{n0} + A_{n1}x + A_{n2}x^2 + \dots \quad (20)$$

Sijoittamalla (19) ja (20) yhtälöön (18) saadaan

$$\epsilon_n(0) + \gamma_n x = \frac{1}{E} \sum_{i=0}^{\infty} A_{ni} x^i + s x^k \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{\infty} A_{ji} x^i \quad (21)$$

Yksi kosteusjakso

Ensimmäisen kosteusjakson päättyessä saadaan

$$A_{10} = \frac{\epsilon_1(0)}{\frac{1}{E} + s}; \quad A_{11} = \frac{\gamma_1}{\frac{1}{E} + s} \quad (22)$$

missä s saa kaavan (17) mukaisen arvon, jos $k=0$ kaavassa (15), muuten $s=0$.

Jännityksen sarjakehitelmä suppenee muotoon

$$\sigma_1(x) = \frac{\epsilon_1(0) + \gamma_1 x}{\frac{1}{E} + s x^k} \quad (23)$$

kun $Es \leq 1$. Seuraavaksi lasketaan jännitysresultanttien ja palkin muodonmuutossuureiden riippuvuudet (kun palkin korkeus = 2 ja leveys = 1):

$$\begin{aligned}
 k = 0: \epsilon_1(o) &= 0.5N(E^{-1}+s) \\
 \gamma_1 &= 1.5M(E^{-1}+s)
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 k = 2: \epsilon_1(o) &= 0.5NE^{-1}q [\arctan q]^{-1} \\
 \gamma_1 &= 1.5ME^{-1}q^2 [1 - q^{-1} \arctan q]^{-1} / 3
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
 k = 4: \epsilon_1(o) &= 0.5NE^{-1} \cdot 4(2q)^{0.5} \{ \ln[(1+q+(2q)^{0.5}) / \\
 & (1+q-(2q)^{0.5})] + \pi + \arctan [2(2q)^{0.5}(1-q) / \\
 & (q^2-4q+1)] \}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

missä $q = (Es)^{0.5}$ on ilmstosta ja rakenteesta riippuva virumisparametri. Puusyitä vastaan kohtisuorissa suunnissa arvo $q = 1$ vastaa karkeasti yhtä kahden prosenttiyksikön suuruista kuiyumista ja kostumista. Puun syysuunnassa tarvitaan noin 50 kertainen kosteusvaihtelu arvoon $q = 1$.

Useita kosteusjaksoja

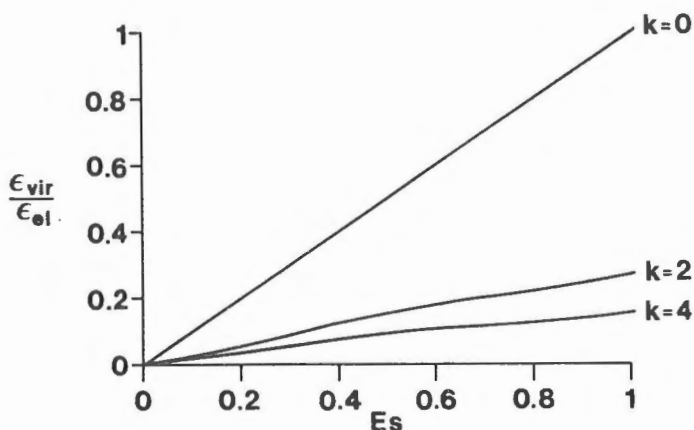
Jännityksen sarjakehitelmäratkaisuja on etsitty myös useamman jakson jälkeiselle tilanteelle, mutta toistaiseksi ei ole löydetty yhtälön (23) tyyppistä suppenevaa sarjaa. Usean kosteusvaihtelun vaikutus saadaan likimäärin antamalla mekanosorptisen virumisen tehokkuuden mitalle vastavasti suurempi arvo: s-kerroin voidaan yksinkertaisesti kertoa kosteusjaksojen lukumäärällä.

Suljettua ratkaisua ei ole myöskään onnistuttu saamaan tapaukselle, jossa kosteuden paikkariippuvuus (15) on polynomi eikä sen yksittäinen termi. Kirjoittajat kuitenkin uskovat että erillisten termien vaikutuksen superponointi antaa hyvän kokonaiskäsityksen kosteuden vaihtelun vaikutuksesta.

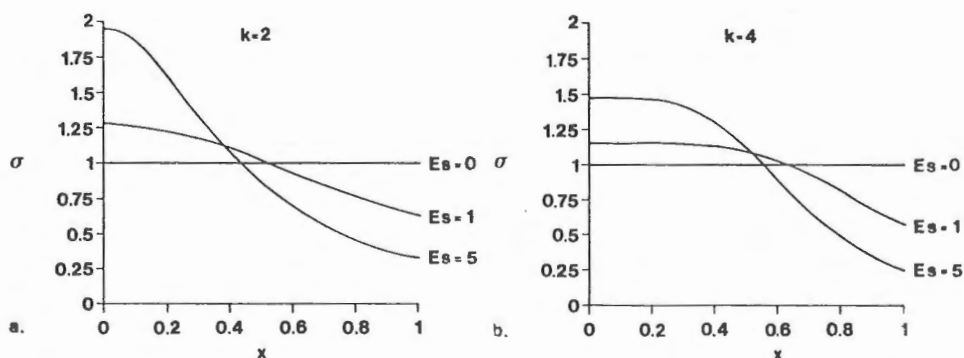
Numeerisia tuloksia

Numeerisia arvoja on laskettu tuloksista (23) - (26) sekä puun syysuuntaan vaikuttavien jännitysten alaisena, että

tangentin suuntaisella koepappaleella (kuvat 7 - 8). Tuloksia tarkastellessa on syytä huomata, että jännitykset on tulostettu aina kosteusyklin samassa vaiheessa, joten syklin aikana tapahtuvaa vaihtelua ei kuvissa näy, eikä tämä menetelmä siihen soveltuisikaan. Koska menetelmä perustuu oletukseen että, jännitys on ajan suhteen vakio, tuloksista voidaan päätellä karkeasti myös menetelmän tarkkuutta. Jos jännitystilä muuttuu huomattavasti kosteusvaihtelun vaikutuksesta, tulisi käyttää muita menetelmiä.



Kuva 7. Viruman riippuvuus parametrilla E_s yhtälöiden (24) - (26) mukaan.



Kuva 8. Vetosauvan jännitystilän muuttuminen kosteusvaihtelun seurauksena yhtälöiden (25) ja (26) mukaan.

Kuvasta 7 nähdään että viruma riippuu jokseenkin lineaarisesti parametrasta $q^2 = Es$, vaikka tätä ei yhtälöistä (25) ja (26) näekään. Edelleen viruma tuntuu riippuvan melko suoraan kosteusmuutoksen alaisena olevan pinta-alan suuruudesta. Tällä perusteella kokeillaan olisiko kosteusmuutoksen keskimääräinen arvo poikkileikkauksessa hyvä mitta virumalle. Merkitään

$$u_e = \int_0^1 u \, dx \quad (27)$$

ja lasketaan suhde

$$r = \frac{\frac{E\varepsilon_1(0)}{0.5 N} - 1}{E s u_e} \quad (28)$$

joka on tulostettu kuvassa 9. Tuloksesta nähdään että tulos u_e on käypä estimaatti virumisvasteelle, varsinkin kun viruminen ei ole kovin suuri.

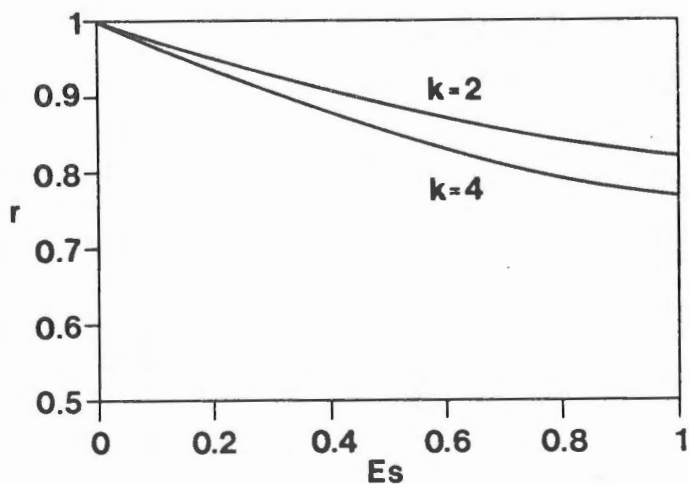
TULOSTEN TARKASTELU

Kuivumisjännityksille saatuja tuloksia tarkastellessa on huomattava kaksi rajoitusta tulosten pätevyysalueessa. Ensinnäkin käytetty yksiulotteinen analyysi antaa parhaita tuloksia, kun tarkasteltu poikkileikkaus yhtyy johonkin materiaalin pääsuuntien (T, R, L) muodostamaan tasoon ja puun ydin on kappaleen ulkopuolella. Toiseksi, tarkastelu ei päde pitkiin kuivausaikoihin, koska ajasta riippuva viskoelastinen viruminen on jätetty huomioon ottamatta. Viruminen vakio-olosuhteissa kasvaa suhteessa kimmoiseen muodonmuutokseen kosteuden kasvaessa ja se voidaan ottaa karkeasti huomioon kimmokerrointa pienentämällä.

Palkkien tuloksista huomattakoon että kaavoissa (24) - (26) käyrityksen arvot γ_1 koskevat lähinnä laattoja, joissa

kosteus ja taivutusjännitys riippuvat paksuussuuntaisesta x-koordinaatista. Palkeissa, joissa korkeus on huomattavasti leveyttä suurempi, merkittävin kosteisuuvaihtelu tapahtuu leveyssuunnassa. Sen vaikutus sekä vetosauvan venymään että palkin käyristykseen on saman luonteinen ja luettavissa $\epsilon_1(0)$:lle saaduista tuloksista.

Massiivisessa palkissa tilanne on monimutkainen, koska saman poikkileikkauksen jossakin kohdassa puu voi kuivua ja jossakin toisessa kostua samanaikaisesti. Tässä artikkelissa ei ole käsitelty näin mutkikkaita olosuhteita vaikka menetelmät siihen soveltuvatkin. Ennen yleisten johtopäätösten tekemistä on syytä analysoida myös tällaiset olosuhteet. Kirjoittajat otaksuvat, tämän artikkelin tulokset (24)-(26) ovat superponoitavissa ainakin silloin, kun yhteenlaskettavien kosteusmuutosten suunta on joka hetki sama, vaikka tästä ei vielä olekaan vertailulaskelmia.



Kuva 9. Analyttisen ratkaisun ja likiarvon suhde (28).

Artikkelissa on saatu likimääräinen arvio virumis- ja kimmoisen muodonmuutoksen suhteelle

$$\frac{\epsilon_{vir}}{\epsilon_{el}} = Esu_e \quad (29)$$

Se on riittävän yksinkertainen käytettäväksi esimerkiksi normien virumiskerrointen määrittämisen perustana. Sitä voidaan edelleen purkaa olettamalla kosteusvaihtelu palkin leveysuunnassa polynomiksi

$$u = \sum U_k x^k$$

ja laskemalla kullekin termille s_k kaavan (17) avulla. Tällöin saadaan vakio jännityksellä yhden kosteusjakson aiheuttamaksi virumaksi

$$\frac{\epsilon_{vir}}{\epsilon_{el}} = E (m^+ - m^-) \sum \frac{2}{k+1} U_k \quad (30)$$

missä m^+ ja m^- ovat materiaalivakioita ja tarkoittavat mekanosorptisia virumiskertoimia kuivuessa (-) ja kostuessa (+) ja U_k tarkoittaa kosteusvaihtelun amplitudia.

Tuloksen (30) mukaan virumisen kannalta olennaisen tärkeitä ovat alimpiin kosteuspolynomin termeihin liittyvät amplitudit. Niihin vaikuttaa ympäröivä ilmasto, rakenteen paksuus ja pintakäsittely. Tulevaisuuden puunormeissa olisikin tarpeen saada näihin seikkoihin perustuva virumiskerrointen eli kimmokerrointen aikariippuvuuden porrastus. Ilmiöihin liittyvä perustieto alkaa olla hallinnassa ja materiaaliominaisuuksista on tuoreita kotimaisia tutkimuksia /5/, /6/. Vielä tarvitaan lisää tietoa puurakenteiden kosteusolosuhteista erilaisissa käyttökohteissa, ennen kuin kattava normiehdotus voidaan tehdä.

PÄÄTELMIÄ

Artikkelissa johdetaan laskentakaavoja mekanosorptisen virumisen huomioon ottamiseksi jännitystilaa ja muodonmuutoksia laskettaessa. Yksinkertaisuuden vuoksi rajoitutaan yksiuotteiseen tapaukseen.

Mekanosorptisesta virumisesta puhuttaessa kysytään usein, onko se itsenäinen ilmiö vai olisiko sittenkin kysymys kosteusgradientin aiheuttamien jännityshuippujen vaikutuksesta virumiseen. Tässä artikkelissa päädytään päinvastaiseen syy ja seuraussuhteeseen: mekanosorptinen viruminen aiheuttaa jännitysten epätasaisen jakautumisen poikkileikkauksessa. Edelleen tämä epätasainen poikkileikkauksen kuormankantokyky selittää merkittävän osan kokeissa havaitusta ilmiöstä, jonka mukaan puun lujuus alenee kuormitusajan kasvaessa. Erityisesti laskelmat selittävät, miksi lujuuden aikariippuvuus on voimakkaampi syysuuntaa vastaan kohtisuorissa suunnissa.

Rakeneosien viruman laskemiseksi tulokset tarjoavat seuraavan lähestymistavan. Viruman voidaan katsoa muodostuvan kahdesta osasta:

- poikkileikkauksen keskikohdan virumisesta siinä esiintyvän kosteusvaihtelun vaikutuksesta, ja
- keskikohdan kimmoisen muodonmuutoksen kasvusta jännitysjakauman muuttumisen vaikutuksesta.

Kaavassa (30) termi $k=0$ edustaa edellistä ja korkeammat termit jälkimmäistä efektiä.

KIRJALLISUUTTA

- /1/ Armstrong L.D., Christensen G., Influence of moisture changes on deformation of wood under stress. Nature 191(1961)4791, p.869-870.
- /2/ Hunt D., Limited mechano-sorptive creep of beech wood. Journal of the Institute of Wood Science 9(1980)3,136-138.
- /3/ Korttesmaa M., Kosteusmuutoksista aiheutuvat puun poikkileikkauksen siirtymät ja jännitykset. VTT:n julkaisun käsikirjoitus 1989

- /4/ Ranta-Maunus A., Pitkääikaisen kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset vanerirakenteissa. Paperi ja Puu 1/1973.
- /5/ Toratti T., The mechanical and creep properties of Kerto-laminated-veneer-lumber. Helsinki University of Technology, Laboratory of structural engineering and building physics. Espoo 1988, 163 p + 23 app.
- /6/ Leivo M., The creep of wood trussed rafters. Int. Conf. on Timber Engineering, September 19-22, 1988, Seattle, Washington, USA.

Alpo Ranta-Maunus, tutk.prof., VTT, Rakennetekniikan laboratorio

Markku Korttesmaa, erikoistutkija, VTT, Rakennetekniikan laboratorio