

PUIKKOLIITOSTEN TOIMINTA PUURAKENTEISSA

Simo Koponen

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 25
No 1, 1992, ss. 53 - 67

TIIVISTELMÄ

Puikkoliitosten toimintaa lyhytaikaiskuormituksessa tarkasteltiin epälinearisella Winkler-tyyppisellä alustamalla. Mallissa puun reunapuristuksen ja puikon materiaalin epälineaarinen käyttäytyminen on otettu huomioon. Puun syynsuunnassa malli vastasi hyvin liitinten käyttäytymistä kokeissa. Epälineaarisen alustamalla todettiin soveltuvan puolijäykkien puikkoliitosten toiminnan analysointiin ja mitoitukseen lyhytaikaisessa kuormituksessa.

JOHDANTO

Puisten kehä- ja ristikkorakenteiden mitoituksessa suurin osa ajasta käytetään liitosten suunnitteluun. Puun ominaisuuksien anisotropiasta, epälinearisuudesta ja epähomogeenisuudesta sekä ajan ja kosteuden voimakkaasta vaikutuksesta johtuen puuliitosten tarkkaa mitoitusta voidaan pitää varsin vaativana tehtävänä (Kangas 1982). Nykyisin liitosten mitoitus perustuu yleensä liitoskokeissa mitattuihin lujuusarvoihin tai K.W. Johansenin 1940-luvulla johtamaan puikkoliitosteoriaan ja reunapuristuskokeella mitattuun puun reunapuristuslujuuteen. Puikkoliitosteorialla saavutetaan yleensä verrattain hyvä tarkkuus lujuuden arvioinnissa, kun liitospintojen välisen kitkan vaikutus liitoskokeiden tuloksista on poistettu. Kuitenkaan puikkoliitosteoria ei sovellu liitosten siirtymien arviointiin, koska puu ja puikko on siinä oletettu jäykkäplastiseksi. Siirtymiä voidaan arvioida kimmoisella alustalla olevan kimmoisan palkin teoriaan perustuvilla analyttisillä kaavoilla, mutta menetelmän tarkkuus on huono, koska todellisuudessa puun ja puikon käyttäytyminen on voimakkaasti epälineaarista.

Puurakenteiden normien mukaan käytettäessä eri liitintyyppisiä samassa

liitoksessa tulee liitinten jäykkyyden ja niiden vaikutus voimien jakautumiin ottaa huomioon. Puikkoliitosten mitoituksessa liitinten liukumien ja liitoksen jäykkyyden määrittäminen on kuitenkin epätarkkaa. Tästä johtuen liitoksessa kuormien jakautumista yksittäisille liittimille ei pystytä määrittämään tarkasti.

Kehärakenteissa liitosten jäykkyydellä on myös keskeinen vaikutus kehän voimajakaumiin. Puolijäykkien liitosten käyttäytymisen teoreettinen hallinta on siten edellytys itse liitoksen lisäksi myös koko rakenteen tarkemmalle mitoitukselle murto- ja käyttötilassa.

EPÄLINEAARISEN ALUSTALUKUMALLIN TEORIA

Kaksileikkeisten puikkoliitosten toimintaa tarkasteltiin alustalukumenetelmällä (Komatsu et al. 1989, 1989, Smith et al. 1988, Koponen 1990 b,c), jossa puun reunapuristuskäyttäytyminen ja puikon materiaalin käyttäytyminen on epälineaarista. Koska liitos on symmetrinen, tarkasteltiin liitoksen puolikasta, johon vaikuttaa voima $F/2$ (kuva 1.). Laskennan aikana kuormitusta lisättiin askelittain.

Mallissa puikko on jaettu sauvaelementteihin (Ahola 1977) ja symmetria-akselilla puikon kiertymä on estetty. Puikon ja puun välinen reunapaine on korvattu elementtien päihin vaikuttavilla jousivoimilla (kuva 1.). Tasapainoehdoista johtuen keski- ja reunapuun solmuvoimien summat ovat molemmat suuruudeltaan kuormituslisäyksen suuruisia. Jousivakiot on määritetty käyttäen edellisen kuormitusaskeleen solmusiirtymien perusteella laskettua reunapuristus-siirtymäkäyrän tangenttia. Puun reunapuristus-siirtymäkäyrä (kuva 2) määritetään laskentamallissa käyttäen yhtälöä:

$$\sigma = (k_3 + k_2 \Delta) \{ 1 - \exp(-k_1 \Delta / k_3) \} \quad [\text{N}/\text{mm}^2] \quad (1)$$

Asennuksen helpottamiseksi pulttiliitoksissa reiät porataan usein 0.1 - 0.5 mm pultin halkaisijaa suuremmiksi. Liitoksen liukuma saattaa siten kasvaa 0.2 - 1 mm:iin jo hyvin pienillä kuormilla. Mallissa alkusiirtymä on otettu huomioon käyttämällä pientä k_1 kerrointa sillä alueella, missä puikon siirtymä

on pienempi kuin puolet välyksestä.

Kun jossakin sauvaelementissä puikon materiaali alkaa myötää, jaetaan kyseisen sauvaelementin plastisoitunut osa alielementteihin, joiden taivutusjäykkyyttä redusoidaan alielementin keskipisteessä vallitsevan taivutusmomentin perusteella. Sauvapoikkileikkauksessa alue, jossa plastisoituminen on alkanut, jaetaan suorakaidealueiksi (kuva 1.), joita painotetaan suorakaidealueen painopisteen venymän ja teräksen jännitysvenymäkäyrän tangentin perusteella. Koko poikkileikkauksen taivutusjäykkyys lasketaan sen jälkeen Steinerin sääntöä käyttäen.

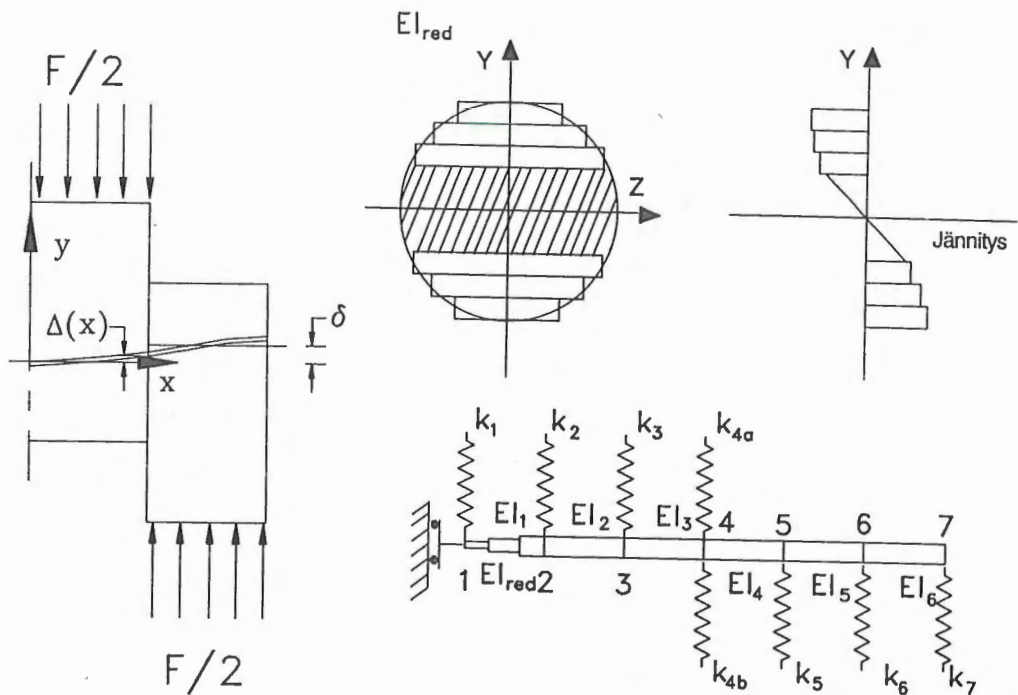
PUUN REUNAPURISTUSOMINAISUUDET

Mallissa epälineaarisen alustan ominaisuudet perustuvat kokeellisesti vedossa puun syysuunnassa määritettyihin reunapuristusominaisuuksiin (Koponen 1991 a,c). Kokeissa tutkittiin puun tiheyden, kosteuspitoisuuden, puikon halkaisijan sekä välyksen vaikutusta puun reunapuristuslujuuteen, alustalukuun ja epälineaariseen reunapuristusjännitys-siirtymäkäyrään. Kaavan 1 kertoimet k_1 , k_2 , ja k_3 määritettiin usean muuttujan regressioanalyysyä käyttäen. Kertoimille k_1 ja k_3 saatiin seuraavat yhtälöt:

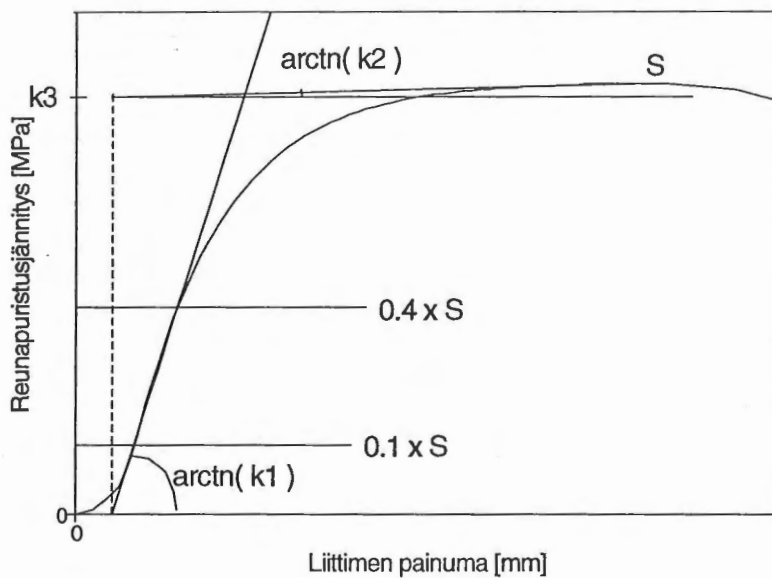
$$k_1 = \{ 0.34 - 0.0091 u - 0.0086 d - 0.082 (D-d) + 0.0042 (D-d)u \} \rho_0 ; \\ u < 19.7 \% \quad [N/mm^3] \quad (2)$$

$$k_3 = (1 - 0.029 u) 0.099 \rho_0 ; \quad u < 22.5\% [N/mm^2] \quad (3) \\ 12 \text{ mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$$

missä ρ_0 on puun uunikuiva tiheys [kg/m^3], u on puun kosteus prosentteina, d on puikon halkaisija [mm] ja D on puikon reiän halkaisija [mm]. Syysuunnassa kerroin k_2 on hyvin pieni ja laskennassa sille on käytetty arvoa $0.01 N/mm^3$.



Kuva 1. 2-leikkeisen puikkoliitoksen elementtimalli, jossa puikon myötääminen on otettu huomioon jakamalla plastisoituneet elementit alielementteihin. Alielementtien taivutusjäykkyyttä on redusoitu taivutusmomenttijakauman perusteella.



Kuva 2. Jäykän puikon reunapuristus-siirtymäkäyrä ja materiaaliparametrit k_1 , k_2 ja k_3 . s on puun reunapuristuslujuus.

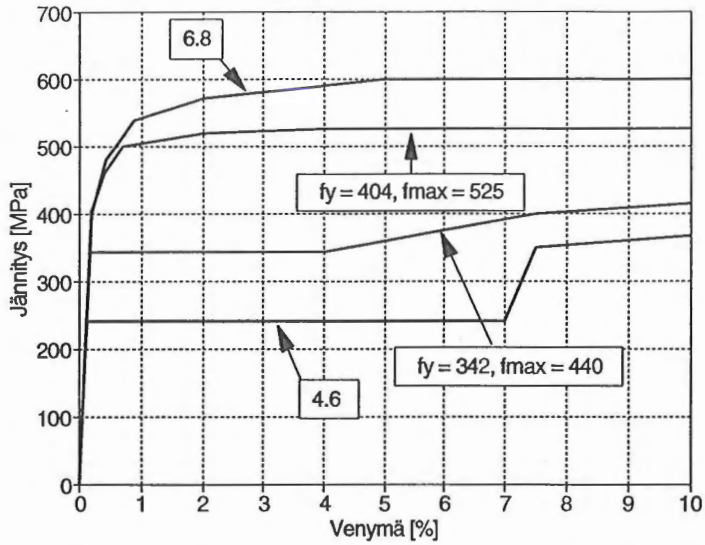
TERÄKSEN MATERIAALIOMINAISUUDET

Liitinmateriaalina puikkoliitoksissa on lähes aina teräs, joskin muitakin materiaaleja kuten puutappeja voidaan käyttää. Teräs käyttäytyy lineaarisesti suhteellisuusrajalle asti ja sen kimmokerroin on $2.1 \cdot 10^5$ MPa. Erilaisesta seostuksesta ja erilaisista teräksen käsittelymenetelmistä johtuen teräslaatujen käyttäytyminen suhteellisuusrajan jälkeen vaihtelee.

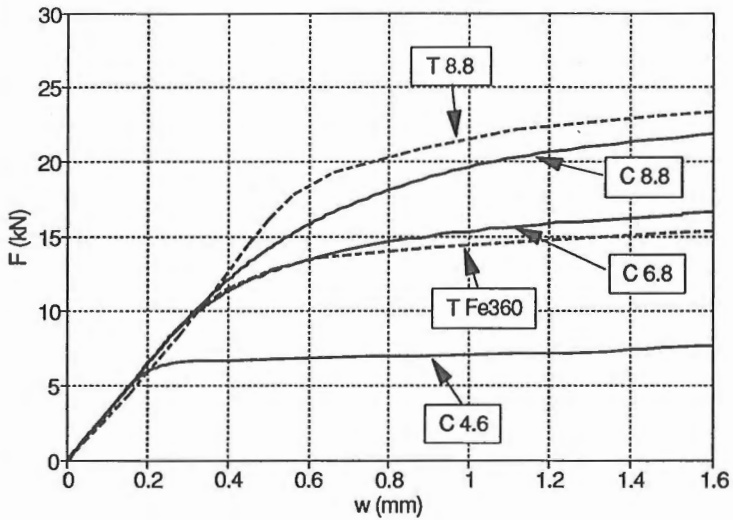
Yleensä alhaisissa lujuusluokissa (esim. kuumatyssätyt pultit lujuusluokassa 4.6) teräksen jännitys-venymäkäyrässä on selvä myötökohta ja tämän jälkeen useiden prosenttien mittainen venymäalue, jossa jännitys pysyy lähes vakiona. Tämän alueen jälkeen myötölujenemisen seurauksena teräksessä jännitys voi vielä kasvaa lähes kaksinkertaiseksi ennenkuin lopullinen murto tapahtuu 20 - 25 % venymällä.

Korkeissa lujuusluokissa (esim. kylmätyssätyt pultit lujuusluokissa 5.8 ja 6.8 sekä lämpökäsitelty 8.8) ei teräksellä ole vakiojännityksen aluetta eikä selvää myötörajaa. Tällöin myötörajan tilalla käytetään 0.2-rajaa, millä tarkoitetaan teräksen jännitystä, jolla syntyy 0.2 % pysyvä venymä. Korkeissa lujuusluokissa murtovenymä on 8 - 12 %.

Kuvassa 3 on esitetty laskennassa käytetyt teräksen jännitys-venymäkäyrät. Teräksen lujuusluokilla määritetään minimiarvot lujuusominaisuuksille. Todellisuudessa teräksen ominaisuudet saattavat ylittää huomattavasti nämä vaatimukset ja puuliitosten koestusten yhteydessä tulisikin määrittää myös teräksen ominaisuudet.



Kuva 3. Teräksen jännitys-venymäkäyrät.



Kuva 4. Lasketun (C) puikon taipuman vertailu koetuloksiin (T) kolmipistetäivutuksessa. Puikon läpimitta on 16 mm ja jänneväli 100 mm. Leijtenin koetulokset (T8.8 ja T Fe360) (1987) on muutettu vastaamaan 100 mm jänneväliä.

LASKENTATULOSTEN TARKASTELU

Puikon kolmipistetäivutus

Tarkastellaan pyöreän puikon plastisoitumista kolmipistetäivutuksessa, kun jänneväli on 100 mm ja puikon läpimitta on 16 mm. Jos materiaali oletetaan kimmo-plastiseksi, alkaa puikon myötääminen jännevälin keskeltä kuorman ollessa 2/3 murtokuormasta. Jos puikon myötölujuus on 240 MPa, on murtolujuus 6.55 kN. Murtokuormalla puikon poikkileikkaus jännevälin keskipisteessä on täysin plastisoitunut ja plastisoituminen on tällöin edennyt puikon ylä- ja alapinnassa alueelle, jonka pituus on L/3.

Kuumamuokatuilla puikoilla materiaalin myötölujeneminen tapahtuu vasta suurilla taipumilla. Kuorma-taipumakuvaaja taivutuskokeessa vastaakin varsin hyvin laskentatuloksia, kun käytetään kimmo-plastista materiaalmallia eikä myötölujenemistä oteta huomioon. Mikäli taipuma kuormituksen loppuvaiheessa halutaan määrittää tarkasti, laskenta tulisi lisäksi suorittaa käyttäen suurten siirtymien teoriaa ottaen huomioon puikkoon syntyvä normaalivoima.

Korkeissa lujuusluokissa, kun selvää myötörajaa ei ole, poikkeaa teräksen jännitys-venymäkäyrän perusteella laskettu kuorma-taipumakuvaaja kimmo-plastisen materiaalmallin laskelmista. Lujuusluokassa 6.8 ($f_y = 480$ MPa) kimmo-plastisen mallin mukainen murtokuorma F_{max} voidaan laskea plastisesta momentista ($M_p = W_p \cdot f_y$) ja on 13.1 kN ja lujuusluokassa 8.8 ($f_y = 640$ MPa) 17.5 kN. Laskentamalli ei anna suoraan puikon murtokuormaa, koska teräksen materiaalmallissa jännitystä ei ole rajoitettu. Kuormituksen loppuvaiheessa taipuma kasvaa kuitenkin hyvin nopeasti ja esimerkiksi 15 mm taipumaa voidaan pitää murtokuormana. Näin määritetty murtokuorma on lähes 25 % suurempi kuin kimmo-plastisen mallin mukainen murtokuorma, koska laskentamalli ottaa huomioon teräksen kapasiteetin 0.2-ajan jälkeenkin.

Kun teräksellä ei ole selvää myötörajaa, todellisen teräksen jännitys-venymäkäyrän perusteella laskettu plastisoitunut vyöhyke ulottuu laajemmalle kuin käytettäessä kimmo-plastista materiaalmallia. Kuvassa 4 on esitetty eri lujuusluokkien minimivaatimusten perusteella lasketut puikkojen keskipisteen

kuorma-taipumakuvaajat sekä Leijtenin (1987) kokeisiin perustuvat taipumat lujuusluokan 8.8 pultille ja lujuusluokan Fe360 puikoille. Vertailtaessa koetuloksia laskentatuloksiin huomataan, että puikon lujuus vastaa kuitenkin lähes lujuusluokan Fe520 vaatimuksia.

Kaksileikkeinen puu/puu-liitos syysuuntaan

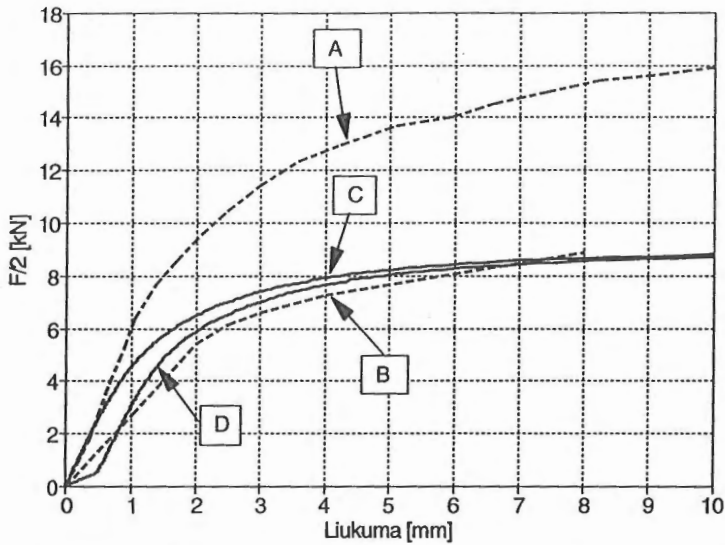
Pulttiliitos

Humphrey et al. (1989 b) ovat mitanneet röntgensäteilyn avulla pultin taipumista kaksileikkeisessä liitoksessa. Reunapuun paksuus t_1 oli 37.5 mm ja keskipuun t_2 oli 75 mm. Pultin läpimitta oli 12.5 mm ja lujuusluokan mukainen minimimurtolujuus oli 525 MPa ja minimimyötölujuus 404 MPa. Laskennassa käytettiin kuvan 3 mukaista teräksen jännitys-venymäkäyrää. Pultinreiän välys oli 0.4 mm, mutteri kierrettiin käsin ja liitos kuormitettiin pienellä esikuormalla ennen varsinaista koetta. Lisäksi mitattiin ohuilla puuviiluilla reunapuristus-siirtymäkäyrän (Humphrey et al. 1989 a). Puun reunapuristuslujuus oli kokeissa 32 MPa.

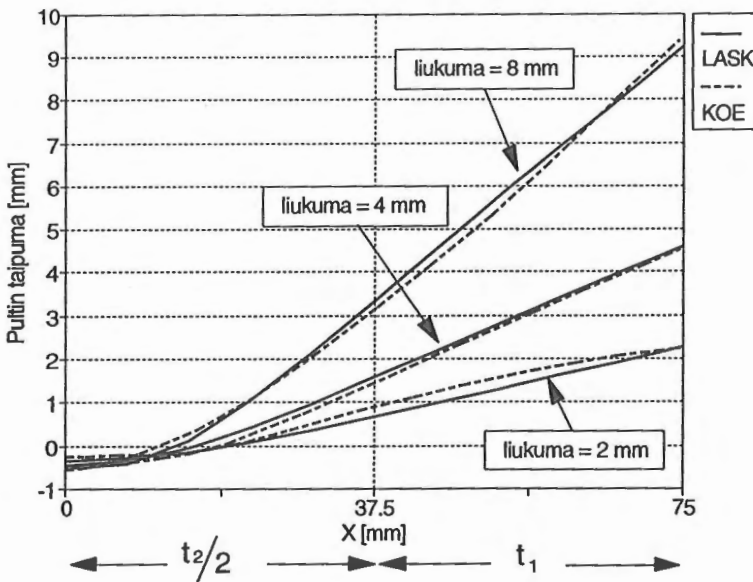
Kuvassa 5 on vertailtu kokeissa mitattua liitoksen kuorma-siirtymäkäyrää mallilla laskettuihin tuloksiin. Laskenta suoritettiin käyttäen 0.4 mm välystä sekä ilman välystä. Lisäksi kuvassa on esitetty Humphreyn et al. (1989 b) pultin taipuman ja reunapuristuskokeiden perusteella laskema pultin leikkausvoiman siirtämä osuus liitoksen voimista.

Osa liitokseen vaikuttavista voimista siirtyy kitkan välityksellä. Pultin taipuminen puristaa puuosia vastakkain ja kasvattaa puuosien välisten kitkavoimien osuutta. Humphreyn et al. (1989 b) mukaan kitkan osuus kokeessa oli noin 40 %. Laskentamallin mukaan kitkan osuus kuormituksen alkuvaiheessa on vähäinen, mutta lisääntyy kuormitusasteen kasvaessa.

Kuvassa 6 on vertailtu röntgensäteilyllä mitattua pultin taipumista laskentatuloksiin, kun välys on 0.4 mm. Laskentatuloksista on poistettu



Kuva 5. Laskentatulosten vertailu Humphreyn et al. (1989,b) tekemiin kokeisiin. A) mitattu kuorma-siirtymäkäyrä ja B) pultin leikkausvoiman osuus kuormista koetulosten mukaan. C) laskettu käyrä, kun pultinreiässä ei ole välystä ja D), kun välys on 0.2 mm.



Kuva 6. Lasketun pultin taipuman vertailu Humphreyn et al. (1989,b) suorittamiin kokeisiin liitoksen siirtymillä 2, 4 ja 8 mm. Välys on 0.4 mm.

alkusiirtymän osuus, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia esikuormitettujen kokeiden tuloksiin. Kuvassa 7 on esitetty laskettu pultin momenttijakauma eri kuormitustasoilla. Pultin murtolujuuden ($f_{\max} = 525 \text{ MPa}$) perusteella laskettu murtomomentti ($M_{\max} = W_p \cdot f_{\max}$) on 171 Nm. Kuormalla $F/2 = 10 \text{ kN}$ puikon taivutusmomentti on selvästi ylittänyt murtomomentin ja liitoksen liukumukset ovat kasvaneet hyvin suuriksi. Myös reunapuristusjännitys on kasvanut huomattavasti reunapuristuslujuutta suuremmaksi.

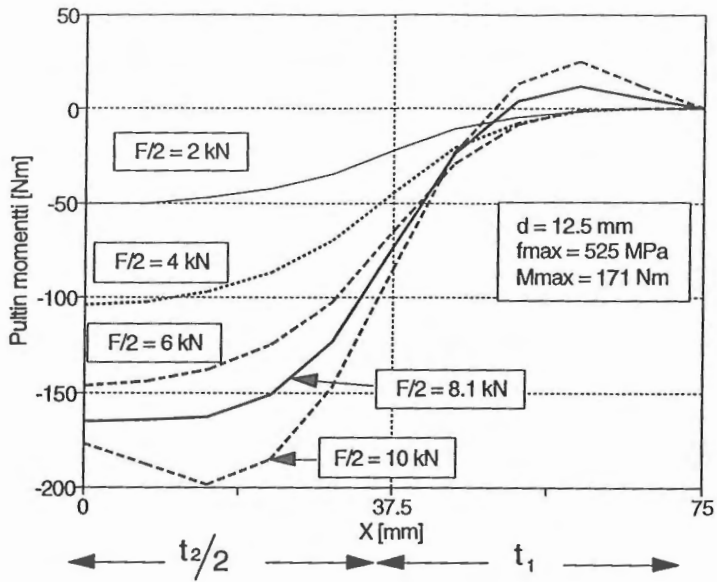
Kuvassa 8 on esitetty laskettu reunapuristusjakauma pitkin puikkoa eri kuormitustasoilla. Välyksen aiheuttamaa jännityksetöntä vyöhykettä reunapuristusjakaumassa ei kuvassa näy selvästi, koska reunapuristusjakauma solmupisteiden välillä on oletettu lineaariseksi ja solmupisteitä on vähän.

Tappivaarnaliitos

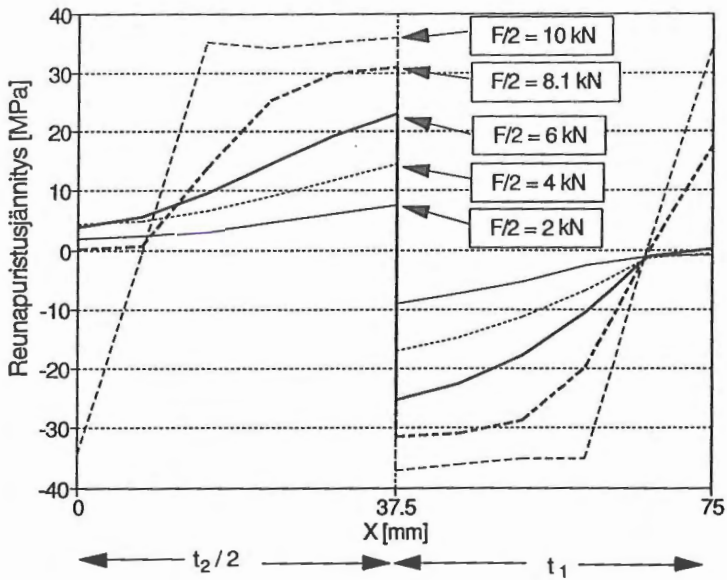
Toisena vertailutapauksena tarkasteltiin tappivaarnaliitosta, jossa reunapuun paksuus t_1 oli 32 mm ja keskipuun paksuus t_2 oli 44 mm. Puun tiheys kuivana 510 kg/m^3 ja kosteus 10%. Tappivaarna valmistettiin sileästä pyöröteräksestä ja lyötiin reikään, jonka halkaisija oli yhtä suuri kuin puikon läpimitta. Puikon läpimitta oli 12 mm ja se oli tehty kuumamuokatusta lujuusluokan Fe360 terästangosta. Vetokokeessa tangon myötölujuudeksi mitattiin 340 MPa. Teräksen murtolujuus oli 440 MPa ja vakiojännityksen alueen venymä 4% (Koponen 1991 b).

Pulttiliitoksessa pultin taipuminen kasvattaa mutterin ja aluslevyn välityksellä puuosien välistä puristusta ja siten liitoksen kapasiteettia. Tappivaarnaliitoksessa puuosia yhteen puristava voima riippuu reunapuun ja puikon välille syntyvistä puikon pituussuuntaisista kitkavoimista, joten kitkan vaikutus tappivaarnaliitoksissa on yleensä pienempi kuin pulttiliitoksissa. Jos puikon taipuma oletetaan pieneksi, voidaan täysin kehittyneiden kitkavoimien vaikutus arvioida yhtälöstä:

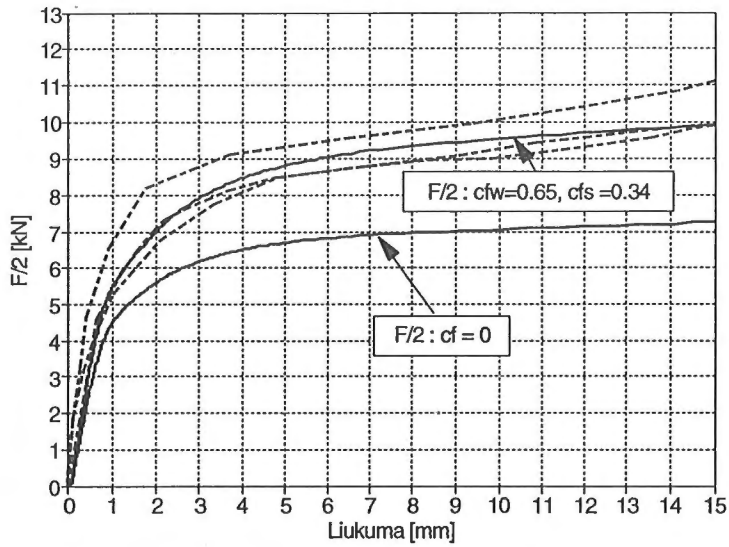
$$F_{\text{total}} / 2 = F_{c_f=0} / 2 + c_{fs} c_{fw} \int_{t_1} | \sigma | d \delta x \quad [\text{N}] \quad (6)$$



Kuva 7. Laskettu pultin momenttijakauma eri kuormitusasteilla.



Kuva 8. Laskettu reunapuristusjännitys jakauma eri kuormitusasteilla.



Kuva 9. Laskentatulosten ($F/2$) vertailu koetuloksiin (Koponen 1991 b). Täysin kehittynyttä kitkaa laskettaessa puuosien välinen kitkakerroin on 0.65 (Humphrey et al 1989,b) sekä puun ja puikon välillä kitkakerroin on 0.34 (Rodd 1988).

missä c_{fw} on puuosien välinen kitkakerroin ja c_{fs} on puun ja puikon välinen kitkakerroin. Kitkavoimien syntymisen edellytyksenä kuitenkin on, että puikon taipuma on riittävän suuri puristamaan puuosat yhteen. Mikäli kuormituksen alkuvaiheessa puuosat eivät ole olleet yhdessä ja rako ei ole sulkeutunut, eivät kitkavoimat pääse kehittymään.

Kuormituksen loppuvaiheessa puikon taipuma kasvaa suureksi ja osa kuormista siirtyy suoraan puikon pituussuuntaisen vetovoiman välityksellä. Puuhun liittimen ympärille syntyy monimutkainen jännitystila, jossa puun poikkisuuntaisten jännitysten osuus kasvaa ja jonka laskennallinen analysointi on hankalaa. Koska laskentamalli perustuu pienten siirtymien oletukseen, ei sillä voida ottaa huomioon puikkoon syntyvää normaalivoimaa.

PÄÄTELMÄT

Epälineaarisen alustamallin laskentatulokset puun syysuunnassa vastasivat hyvin pultti- ja vaarnatappiliitosten käyttäytymistä, kun liitososien välisen kitkan lujuutta lisäävä vaikutus on poistettu koetuloksista. Mallilla arvioitiin myös täysin kehittyneen kitkan vaikutus vaarnatappiliitosten lujuuteen ja kuorma-siirtymäkäyrään. Suoritetuissa vaarnatappiliitosten kokeissa kitka kasvatti liitinvoimia 30 - 40 %. Pulttiliitoksissa kitkan osuus voi kasvaa huomattavasti tätäkin suuremmaksi, mikäli pultin taipuman seurauksena aluslevy painuu puuhun. Erityisesti käytettäessä alhaista lujuusluokkaa olevia hoikkia pultteja kitka saattaa moninkertaistaa liitoksen lujuuden.

Normaaleilla liitindimensioilla puu/puuliitoksessa puikko alkaa myötää, kun liitoksen leikkausvoima on noin puolet lasketusta murtolujuudesta. Myötäämisen alkamiskohta on yleensä liitoksen keskellä keskipuussa, mistä se leviää puikon päitä kohti kuormitusta kasvatettaessa. Tappivaarnaliitoksissa ei puikko yleensä myötää reunapuun kohdalta.

Kun reuna- tai keskipuussa reunapuristusjännitys saavuttaa reunapuristuslujuuden, on puikon myötääminen yleensä edennyt jo varsin pitkälle. Se kummassa puussa myötääminen reunapuristuksessa tapahtuu

ensin, riippuu puuosien paksuussuhteista. Sen jälkeen, kun reunapuristusjännitys on saavuttanut reunapuristuslujuuden keskipuussa, puun plastisoituminen alkaa nopeasti edetä kohti liitoksen keskustaa ja kohtaa lopulta vastakkaiseen suuntaan etenevän puikon myötäämisvyöhykkeen. Tämän jälkeen laskentamallissa liitoksen liukumata kasvavat hyvin nopeasti ja liitos voidaan katsoa murtuneeksi, vaikka mallissa ei saavutetakaan selvää murtokuormaa. Esimerkiksi 15 mm liitoksen liukumaa vastaavaa kuormaa voidaan pitää liitoksen lujutena.

Koska mallissa puun reunapuristuksen plastisoituneen vyöhykkeen ja ominaisuuksiltaan kuumamuokatun puikon täysin plastisoituneen alueen kohtauspiste sijaitsee lähellä puikkoliitosteorian mukaan laskettua plastisen nivelen muodostumiskohtaa, ovat myös näillä teorioilla lasketut liitoksen lujuudet lähes yhtä suuria puun syysuuntaan kuormitetuissa liitoksissa. Kun liittimet vastaavat ominaisuuksiltaan kylmämuokattua terästä, voidaan liitoksen kapasiteetti määrittää epälineaarilla alustamallilla tarkemmin kuin puikkoliitosteoriolla.

Epälineaarisen alustamallin todettiin soveltuvan puolijäykkien puikkoliitosten toiminnan analysointiin ja mitoitukseen lyhytaikaisessa kuormituksessa. Sitä on mahdollista käyttää myös pitkäaikaisominaisuuksien tarkasteluun kunhan alustan ominaisuudet muutetaan viskoelastisiksi.

LÄHDELUETTELO

Ahola, E.: Lujuusoppi, elementtimenetelmä 342. Otakustantamo, Espoo 1977.

Humphrey, P.E., Ostman, L.J. 1989 a: Bolted timber connections. Part I. A wafer technique to model wood deformation around bolts. Wood and Fibre Science 21(3): 239-251

Humphrey, P.E., Ostman, L.J. 1989 b: Bolted timber connections. Part II. Bolt bending and associated wood deformation. Wood and Fibre Science 21(4): 354-366

Kangas, J.: Puurakenteet 3 liitokset, Rakentajain kustannus, Helsinki 1982.

Komatsu, K.; Kamiya, F.; Harashima, Y. 1988: Full-size test and analysis on glulam two-storied portal frames. 1988 International Conference on Timber Engineering, Seattle.

Komatsu, K. 1989: Behaviour of nailed timber joints with steel side plates. Proceedings of 2nd Pacific Timber Engineering Conference, Auckland New Zealand

Koponen, S.: Embedding Characteristics of Wood in the Grain Direction. Talonrakennustekniikan laboratorion julkaisu 25, Teknillinen korkeakoulu, Espoo 1991 a.

Koponen, S.: Modeling the Behaviour of Dowel Type Joints in Wooden Structures. Talonrakennustekniikan laboratorion julkaisu 26, Teknillinen korkeakoulu, Espoo 1991 b.

Koponen, S.: Mekaanisten puuliitosten laskentamenetelmien kehittäminen. Helsingin teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, talonrakennustekniikan laboratorio, lisensiaatintyö, Espoo 1991 c.

Leijten, A.J.M. 1987: SSD-tests on locally reinforced moment joints with 16 mm dowels and bolts. Stevin Laboratory Report 25-87-33/11-TRV13.

Rodd, P. D. Timber joint with improved circular dowel fasteners. Proceedings of the 1988 international conference on timber engineering, volume 1. September 19-22, 1988: 26-37

Smith, I.; Whale, L. R. J.; Hilson, B. O. 1988: An integrated approach to modelling load-slip behaviour of timber joints with dowel type fasteners. 1988 International Conference on Timber Engineering, Seattle.

Simo Koponen, DI, tutkija
Teknillinen korkeakoulu
Talonrakennustekniikan laboratorio