

Laskentatulosten ja testitulosten vertaaminen puurakenteiden liitoksissa

Osa 1: Laskentamenetelmä

1. JOHDANTO

Tämän Tutkielman tavoitteena oli vertailla eurokoodi 5:n mukaisia laskentatuloksia koekuormituksissa saatuihin tuloksiin tyypillisissä puurakenteissa käytettävissä liitostyypeissä. Liitostyypeiksi valittiin naula- ruuvi- ja pulttiliitos.

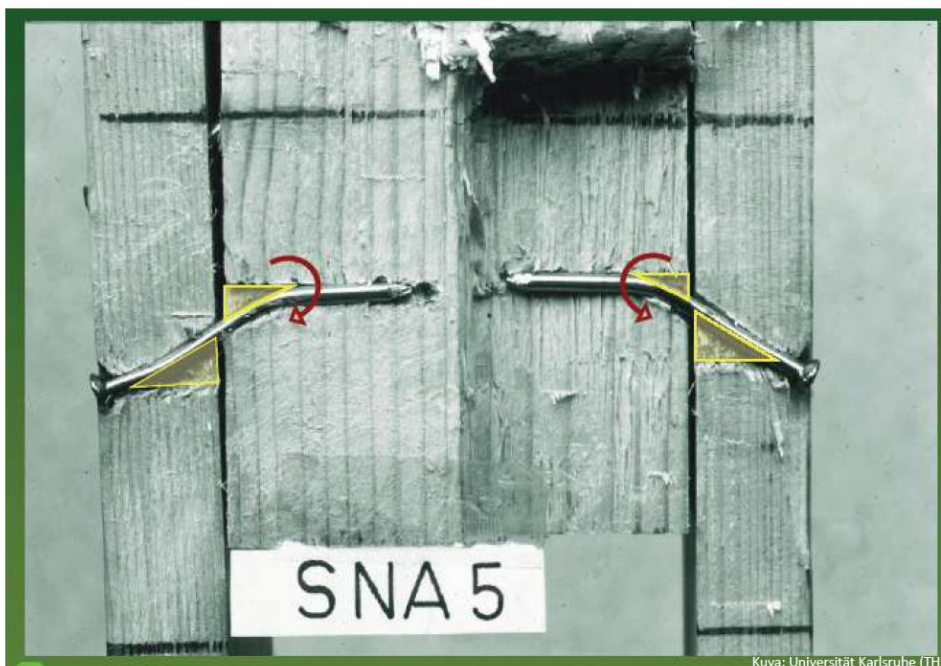
Tarkoituksena oli havainnollistaa liitoksen käyttäytymistä kuormituksen aikana kuormituksen kasvaessa aina murtoon saakka ja vertailla laskentatulosten ja koekuormituksessa saatujen tulosten suuruusluokkaa. Lisäksi haluttiin verrata laskennallisia liitossiirtymiä koekuormituksissa saataviin voima-siirtymäkäyrien antamiin siirtymiin.

Ensimmäisessä osassa keskitytään eurokoodi 5:n mukaiseen liitosmitoituksen periaatteisiin.

2. LAAJENNETTU PUIKKOLIITOSTEORIA

2.1 Yleistä

Käytettäessä metallisia puikkotyypisiä liittimiä puurakenteiden liitoksissa EC5:n mitoitusmenetelmä poikittain kuormitetuille puikkoliittimille pohjautuu Johansenin (1949) kehittämiin yhtälöihin. Yhtälöiden mukaan liitoksen kestävyys riippuu puumateriaalin reunapuristumasta ja liitimeen syntyvästä plastisesta myötönivelestä. Tarkka murtotapa määräytyy liitoksen geometriasta (puuosien paksuus, liittimen paksuus ja pituus) ja materiaaliominaisuuksista (puutavaran reunapuristuslujuus ja liittimen myötömomentti). /2, luento C3/. Kuvassa 2.1 on esitetty murtoon kuormitettu naulaliitos, jossa sekä naulan kannan- että kärjenpuoleisessa puuosassa puu on painunut kasaan liittimen vieressä kuormitetulla puolella (reunapuristuslujuus ylittynyt). Keltainen kolmio kuvaa puuhun tästä syystä syntynyttä tyhjää onkaloa. Lisäksi naukaan on syntynyt myötönivel kärjenpuoleisissa puuosassa. Vasemman puoleisessa naulassa pientä myötäämistä on havaittavissa myös kannanpuoleisessa puussa.

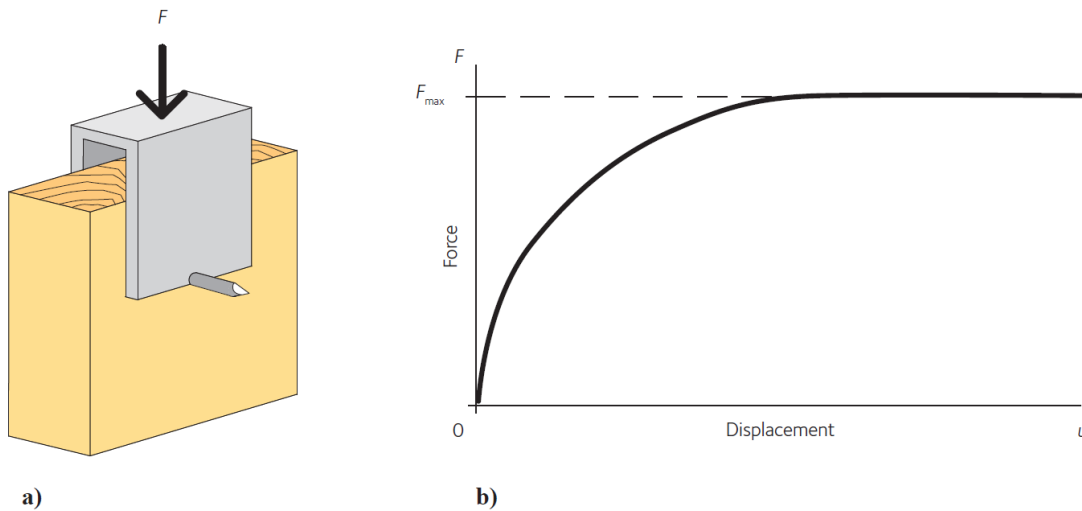


Kuva 2.1 Murtoon kuormitettu naulaliitos /3/.

Monet tutkijat ovat kokeilla tarkistaneet Johansenin yhtälöt ja saaneet kokeiden ja teorian välille hyvän yhteensopivuuden silloin, kun liitettävien puuosien välinen kitka ja liittimen ja puun välisestä tartunnasta aiheutuva puuosia yhteen puristava voima on mimitu /2, C3/2/. Liittimen ja puun välinen tartunta, ja siitä aiheutuva puuosien yhteenpuristuminen, ja tästä edelleen aiheutuva puuosien välinen kitka, kuitenkin lisäävät liittoksen kestävyyttä. EC5:n mukaisessa mitoituksessa ilmiö on otettu huomioon ”köysivaikutus” –termillä, joka lisätään Johansenin yhtälöihin.

2.2 Reunapuristuslujuus

Puun tai puulevyn reunapuristuslujuus määritetään reunapuristuskokeessa saavutettuna murtojännityksenä. Puikon taipuma on minimoitava oikean tuloksen saavuttamiseksi. /2, C3/2/. Tyypillinen koejärjestely ja voimasiirtymäkäyrä nähdään kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Reunapuristuslujuuden koejärjestely ja tyypillinen voima-siirtymäkäyrä /4/.

Reunapuristuslujuus määritetään enimmäisvoiman tai tiettyä siirtymää vastaavan voiman avulla yhtälöstä /2/

$$f_{h,k} = \frac{F_{max}}{dt}$$

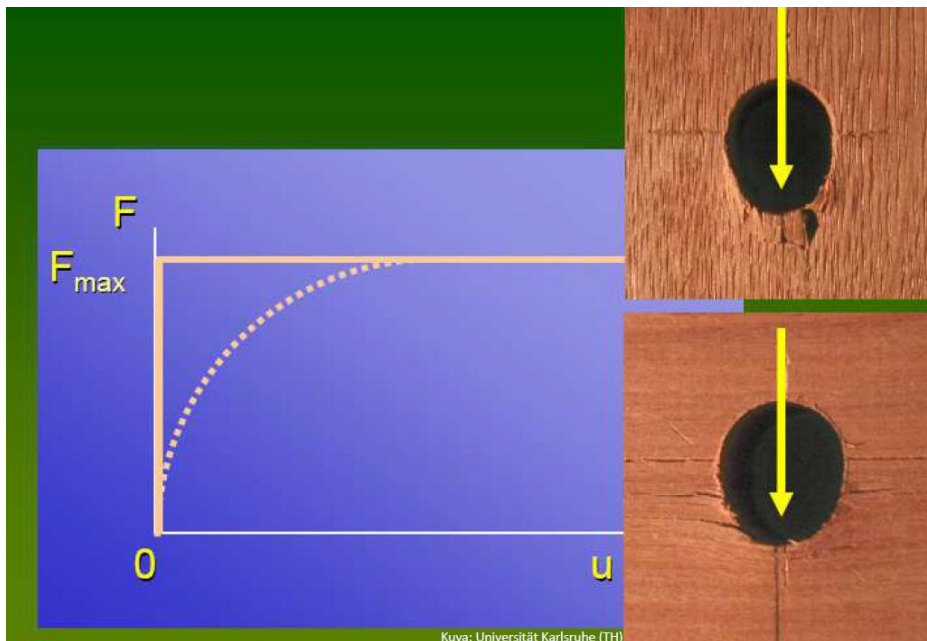
missä

t on koekappaleen paksuus ja

d on puikon halkaisija

Johansenin yhtälöissä puu oletetaan täysin jäykäksi materiaaliksi, jolloin voima-siirtymäkäyrä on kuvan 2.2 mukainen. Tällöin tarkastelu yksinkertaistuu, ja vaikutus lopputulokseen on kuitenkin vähäinen /2, C3/3/. Pienillä liittimen paksuuksilla syysuunnalla ei ole merkittävää vaikutusta reunapuristuslujuuteen, ja reunapuristuslujuus riippuukin vain puun tiheydestä ja liittimen

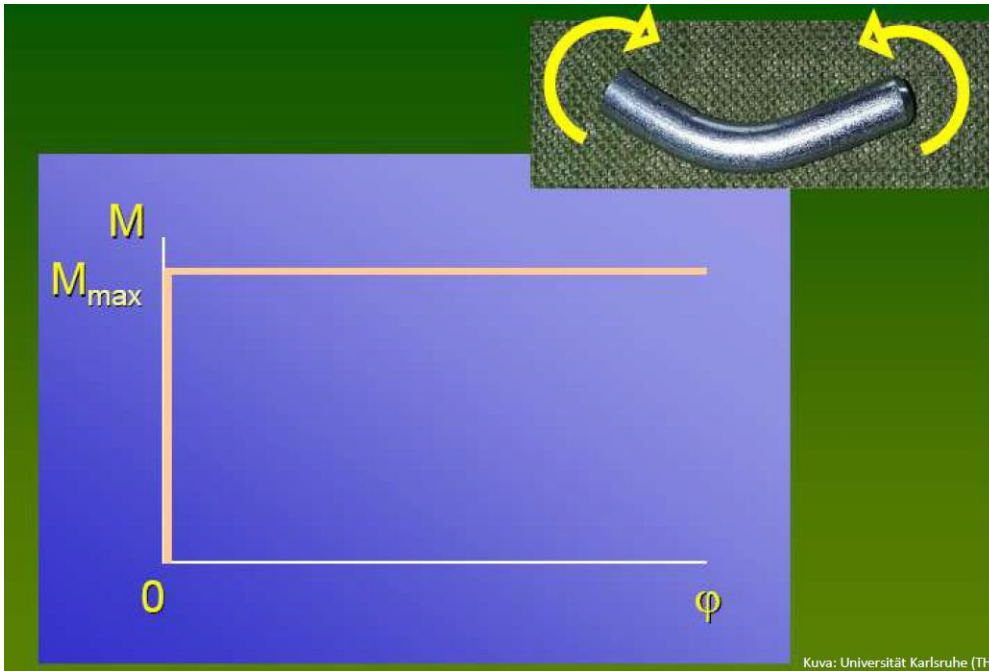
paksuudesta. Syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa puun puristuslujuus on kyllä heikompi, mutta toisaalta syyt vastustavat puristumaa liittimen paksuutta pidemmältä matkalta. Paksummilla liittimillä (ja tehtäessä esiporaus) puun heikompi puristuslujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa alkaa jo näkyä. Paksumpien liittimien osalta (esim pultiliitos) kuormituskulma syysuuntaan nähden otetaan kaavoissa huomioon /3/. Eri materiaaleille on esitetty reunapuristuslujuuden kaavoja EC5:n luvussa 8.3 ja 8.5. Kaavat perustuvat laajoihin kokeisiin /2/.



Kuva 2.3 Reunapuristuskestävyys, voima-siirtymäkuvaaja /3/.

2.3 Myötömomentti

Johansenin yhtälöissä myös liitin oletetaan täysin jäykäksi materiaaliksi. Liittimen otaksutaan saavuttavan täysplastisen momentin ilman asteittain tapahtuvaa kiertymistä. Yksinkertaistettu momentti-kiertymäkäyrä on esitetty kuvassa 2.4.

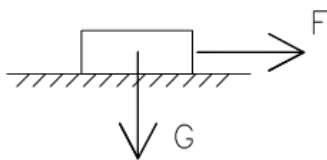


Kuva 2.4 Myötömomentti-kiertymäkuvaaja /3/.

Eri liittimien myötömomenteja on esitetty EC5:n luvuissa 8.3 ja 8.5. Kaavat antavat hieman pienempiä arvoja plastisuusteorian mukaisiin kaavoihin verrattuna. Pienennykset on tehty liitossiirtymien rajoittamiseksi varsinkin paksujen liittimien osalta. /3/

2.4 Köysivaikutus

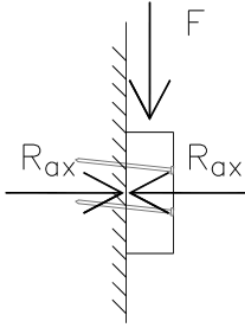
Tarkastellaan kuvassa 2.5 esitettyä perusfysiikkaan liittyvää tilannetta. Tietyn massan omaava kappale aiheuttaa alustaansa painovoimasta aiheutuvan voiman G . Jotta kappale saadaan liikkeeseen, täytyy voiman F olla suurempi kuin μG , missä μ on kappaleen ja alustan välinen kitkakerroin.



Kuva 2.5 Alustalla lepävä kappale.

Kun kuvan 2.6 mukaisessa puu-puu-liitoksessa voima F painaa kappaletta alaspäin, syntyy liitoksessa myös liittimen pituussuuntaista siirtymää. Liittimen ja puun välinen tartunta, ja kannan puolella myös kannan ja puun puristuminen toisiinsa, vastustavat tätä pituussuuntaista siirtymää kummallakin puolella vaikuttavalla ulosvetokestävyuden R_{ax} suuruisella voimalla. Näin syntyy

lisäkapasiteetti, jonka suuruus on μR_{ax} . Eurokoodissa puuosien väliseksi kitkakertoimeksi on valittu varmallalla puolella oleva arvo 0,25. Samaa kitkakerrointa sovelletaan myös teräs-puu-liitoksissa. Murtotavoissa, joissa liittimen pituussuuntainen siirtymä on mukana, Johansenin kaavoihin lisättävä köysivaikutustermi on siis $0,25R_{ax} / 3$



Kuva 2.5 Kitkavoiman syntyminen puu-puu-liitoksessa.

Ulosvetokestävyys R_{ax} on pienempi kummassakin puuosassa vaikuttavista ulosvetokestävyyksistä. Naulaliitoksella kärjenpuoleinen ulosvetokestävyys muodostuu naulan ja puun välisestä tartunnasta, ja kannanpuolella tartunnan lisäksi kannan ja puun välisestä läpivetokestävyyydestä. Ruuviliitoksissa tartunta muodostuu ruavin kierteisen osan ja puun välille. Pulttiliitoksissa, jotka aina esiporataan, ulosvetokestävyys syntyy ainoastaan aluslevyn ja puun välisestä leimapainekestävyydestä /1/. Em. kestävyyksille annetaan kaavoja EC5:n luvussa 8.

2.5 Liitoksen poikittaiskuormakestävyys EC5:ssä

Ensin lasketaan reunapuristuslujuudet liitettävälle puuosille ($f_{h,1,k}$ ja $f_{h,2,k}$), liittimen myötömomentti ($M_{y,Rk}$) ja ulosvetokestävyys ($F_{ax,Rk}$). Nämä voidaan laskea EC5:ssä esitetyillä kaavoilla tai mahdollisissa ETA-lausunnoissa esitetyillä tavoilla. Lisäksi tarvitaan myös reunapuristuslujuuksien suhde ($f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$), jota merkitään symbolilla β . Tämän jälkeen liitoksen poikittaiskuormakestävyys $F_{v,Rk}$ liittintä ja leikettä kohti voidaan yksileikkeisissä liitoksissa laskea kaavalla

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (f) \end{cases}$$

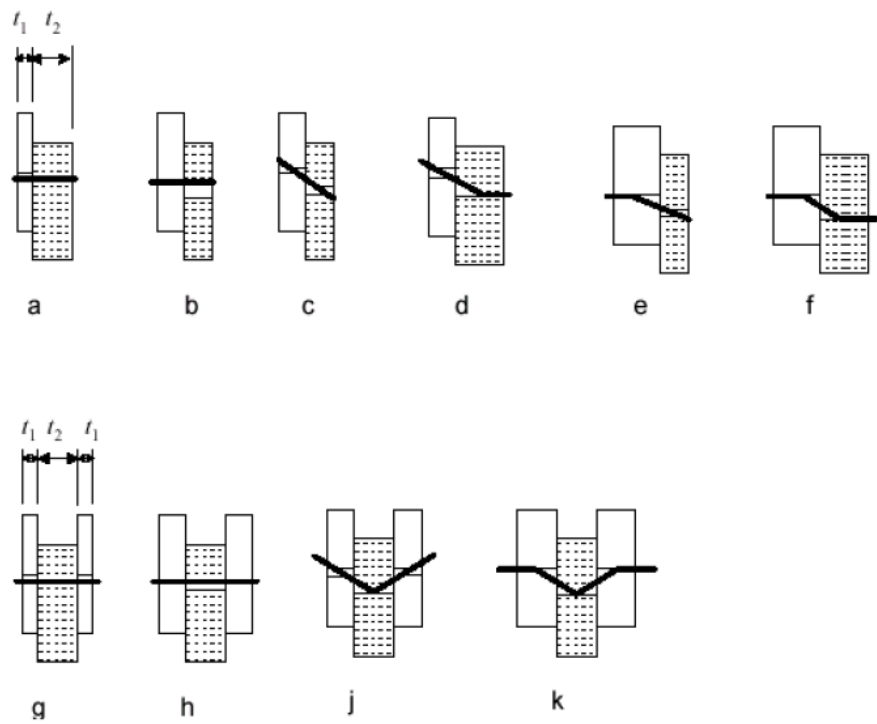
ja kaksileikkeisissä liitoksissa kaavalla

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Kaavoissa esiintyvät t_1 ja t_2 ovat puuosien paksuudet ja d liittimen paksuus. Kaavoja vastaavat murtotavat on esitetty kuvassa 2.6. /1/

Kaavojen alkuosan muodostavat Johansenin yhtälöt, jotka on johdettu liitoksen voima- ja momenttitasapainoehdoista. Kaavojen johtaminen on esitetty mm. lähteessä /4/ (sivut 117-123). Kaavojen loppuosuus on köysivaikutustermi $0,25R_{ax}$. Köysivaikutustermiä ei kuitenkaan saa käyttää täysimääräisenä mikäli sen vaikutus on liian suuri. Köysivaikutustermin osuus voi olla maksimissaan seuraavaa puikkoliitosteorian mukaisesta osuudesta /1, kohta 8.2.2(2)/:

- Pyöreät naulat 15 %
- Nelikulmaiset naulat ja uranaulat 25 %
- muut naulat 50 %
- ruuvit 100 %
- pultit 25 %



Kuva 2.6. Yksi- ja kaksileikkeisten liitosten murtotavat /1, kuva 8.2/.

LÄHTEET

- /1/ SFS-EN 1995-1-1. Puurakenteiden suunnittelu. SFS ry. 2014
- /2/ STEP 1. Puurakenteet. VTT 1996
- /3/ Kevarinmäki Ari. Puikkoliitosteoria ja vinoruuviiliitos. Videoluento. Puuinfo 2019
- /4/ Design of structural timber, Volume 1. Swedish Wood. 2016
- /5/ RIL 201-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2017
- /6/ European Technical Approval ETA-12/0114. ETA Danmark. 2012.