Laskentatulosten ja testitulosten vertaaminen puurakenteiden liitoksissa

Osa 2: Laskenta- ja testitulokset

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.

Tarkoitus 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.

Toisessa osassa mitoitetaan liitokset eurokoodi 5:n mukaan ja verrataan tuloksia koekuormituksessa saatuihin tuloksiin.

2. LASKENTA

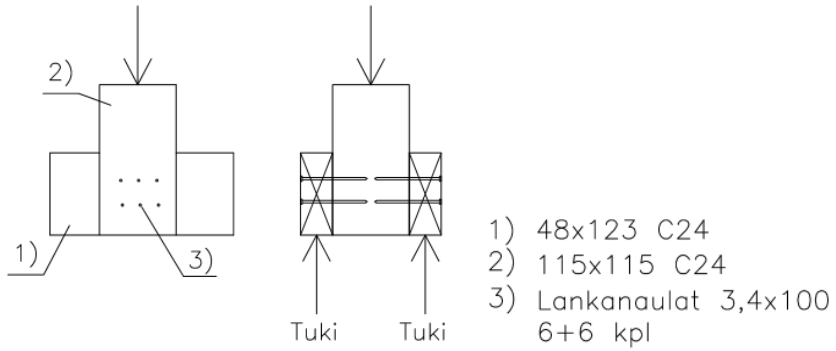
2.1 Yleistä

Laskennassa ei käytty varmuuskertoimia kuormille eikä materiaalille, koska tarkoitus oli verrata laskennallista kuormaa koekuormituksessa saatavaan todelliseen maksimikuormaan, ja tarkastella myös missä kohtaa voima-siirtymäkäyrää laskennallinen kestävyys sijaitsee.

Kosteusolosuhteet ja kuormankesto pyrittiin ottamaan huomioon testausolosuhteita vastaavalla k_{mod}-kertoimella. Puutuotteiden ominaislujuudet ja jäykkyydet vastaavat 5 minuutin kuormitusaikaa ja RH 65 %:n kosteusolosuhteita /5, s.49/. Koekuomituksessa käytettävä puutavavara oli varastoituna laboratoriossa kuivissa sisätiloissa. Kosteutta laboratoriossa ei mitattu, mutta suhteellinen kosteus laboratorion tiloissa talviaikana on n. 25 % lämpötilan ollessa n. 20 C°. Koekuormitukset ajoittuivat kevääseen. Yhden koekuormituksen kesto kokonaisuudessaan oli 5 minuuttia. Laskennallinen maksimikuorma saavutettiin kuormituskokeissa alle puolen minuutin kuormitusajalla. Kaikissa laskelmissa k_{mod}-kertoimelle käytettiin arvoa 1,1.

2.2 Naulaliitos

Naulaliitoksen testaamista varten suunniteltiin kuvassa 3.1 esitetty järjestely. Puutavaran lujuusluokka oli C24, ja nauloiksi valittiin standardin 14592 mukaiset kuumasinkityt lankanaulat 3,4x100.



Kuva 3.1. Naulaliitos.

Naulan myötömomentti laskettiin EC5:n kaavalla 8.14 ja reunapuristuslujuus kaavalla 8.15. Ulosvetokestävyys laskettiin EC5:n kohdan 8.3.2 mukaan. Laskennassa saatiin seuraavat tulokset:

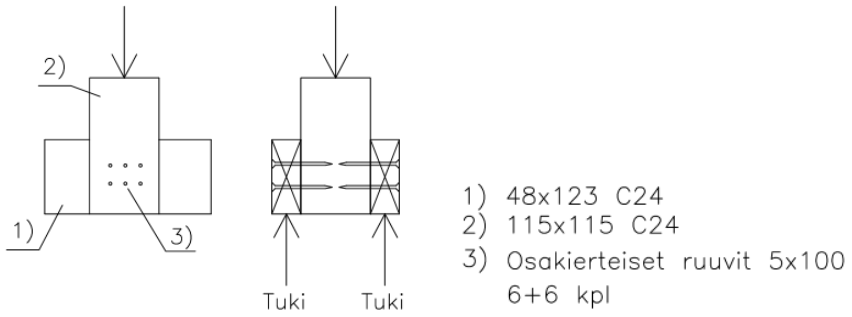
- Liitoksen kestävyys $F_{v,Rk}$ = 17,1 kN (murtotapa f)
- Liitossiirtymä u = 1,9 mm

- Köysivaikutuksen osuus puikkoliitosteorian mukaisesta osuudesta 9,1 %

Laskelma on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

2.3 Ruuviliitos

Ruuviliitoksen testaamista varten suunniteltiin kuvassa 3.2 esitetty järjestely. Puutavaran lujuusluokka oli C24, ja ruuveiksi valittiin osakierteiset itseporautuvat ruuvit SPAX 5x100.



Kuva 3.2. Ruuviliitos.

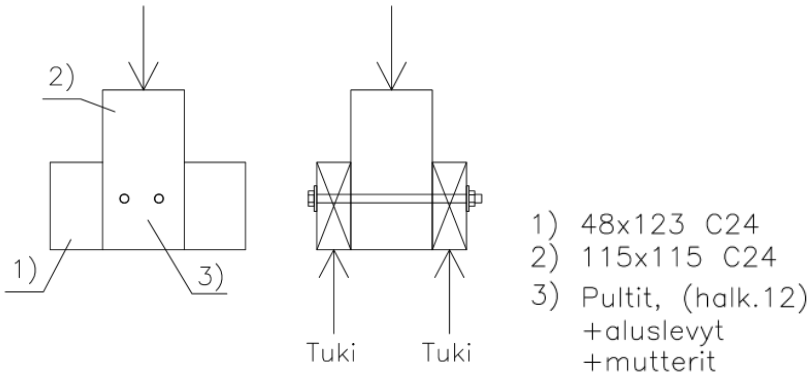
Ruuvilla on ETA-hyväksyntä ETA12/0114 /6/. Ruuvin tarvittavat parametrit (mm. kierteisen osan pituus ja sydänmitta) saatiin ETA-hyväksynnästä, ja ne varmistettiin myös mittaamalla. Myötömomentti, ulosvetolujuus ja kannan läpivetolujuus laskettiin ETA:ssa esitetyillä kaavoilla ja reunapuristuslujuus EC5:n kaavalla 8.15. Laskennassa saatiin seuraavat tulokset:

- Liitoksen kestävyys $F_{v,Rk}$ = 27,2 kN (murtotapa f)
- Liitossiirtymä u = 2,0 mm
- Köysivaikutuksen osuus puikkoliitosteorian mukaisesta osuudesta 100 %

Köysivaikutuksen osuus oli suurempi kuin puikkoliitosteorian mukainen osuus, joten se rajattiin EC5:n mukaiseen maksimiarvoon 100 %. Laskelma on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

2.4 Pulttiliitos

Pulttiliitoksen testaamista varten suunniteltiin kuvassa 3.3 esitetty järjestely. Puutavaran lujuusluokka oli C24, ja pulteiksi valittiin M12x240, joiden lujuusluokka on 8.8. Aluslevyjen halkaisija oli 25 mm ja paksuus 2,5mm. Aluslevyt eivät täytä EC5:n kohdan 10.4.3 vaatimusta (halkaisija min 3xd ja paksuus min 0,3xd).



Kuva 3.3. Pulttiliitos.

Pultin myötömomentti laskettiin EC5:n kaavalla 8.30 ja reunapuristuslujuus kaavoilla 8.31 ja 8.32. Ulosvetokestävyys laskettiin EC5:n kohdan 8.5.2 mukaan. Laskennassa saatiin seuraavat tulokset:

- Kestävyys $F_{v,Rk}$ = 23,4 kN (murtotapa j)
- Liitossiirtymä u = 2,3 mm
- Köysivaikutuksen osuus puikkoliitosteorian mukaisesta osuudesta 14 %.

EC5:n kohdan 10.4.3 mukaisilla aluslevyillä (halk. 3x12mm = 36mm) olisi kestävyydeksi tullut 25,9 kN, ja köysivaikutuksen osalta olisi päästy maksimiin, eli 25 %:iin.

3. KOEKUORMITUKSET

3.1 Yleistä

Koekuormitukset tehtiin SeAMK:n laboratoriossa 1.4.2022. Kuormituskokeet tehtiin Swick Roel – testauslaitteella. Esivoimaksi määritettiin 50 N. Voima-siirtymäkäyrä alkaa piirtymään vasta kyseisen voiman jälkeen. Tällä pyrittiin eliminoimaan osa mahdollisista koekappaleiden valmistusepätarkkuuksista aiheutuvista alkusiirtymistä. Kuormitusnopeudeksi asetettiin 10 mm/min. Testi pysähtyi 50 mm siirtymän kohdalla, tai jännityksen pudotessa riittävän alas.

Koekappaleissa tarvittavat puuosat sahattiin haluttuun mittaan, mitattiin liitinten paikat siten, että naulavälit ja reuna/päätyetäisyydet eivät alita EC5:n taulukon 8.2 mukaisia arvoja. Pulteille porattiin halkaisijaltaan 13 mm reiät (pultin paksuus + 1 mm). Kuvassa 4.2 on esitetty naula- ruuvi- ja pulttiliitoskoekappaleet valmiina. Kaikkia liitostyyppejä tehtiin ja testattiin 2 kappaletta.



Kuva 4.1. Koekappaleet kustakin liitostyypistä.

3.2 Naulaliitos

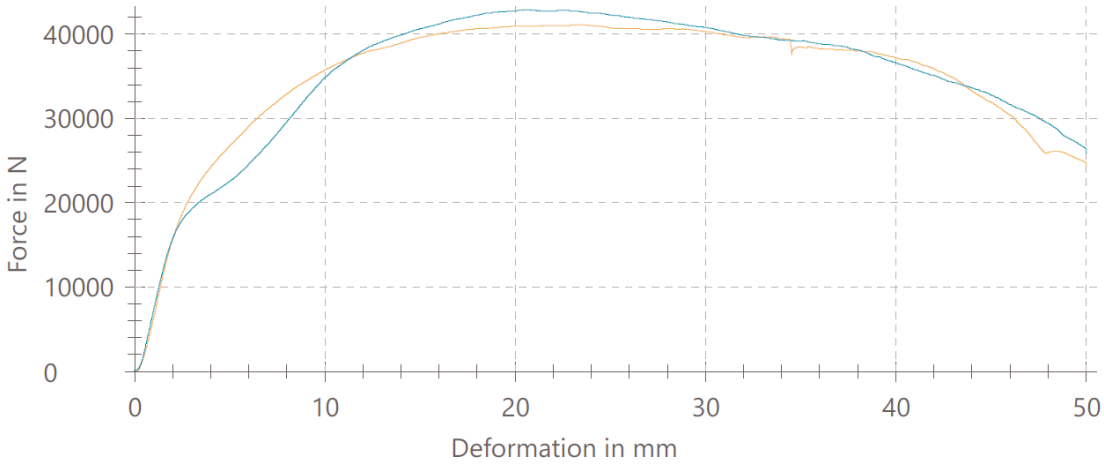
Kuvassa 4.2 on esitetty naulaliitoskoekappale testauslaitteessa. Koekuormitusten voima-siirtymäkuvaajat on esitetty kuvassa 4.4. Kummassakin tapauksessa testi pysähtyi, kun 50 mm siirtymä saavutettiin. Lopputilanteessa nauloissa oli myötönivelet kummassakin puuosassa (vastaa murotapaa f), ja naulat olivat liukuneet pituussuunnassa pääosin kärjenpuoleisessa puussa. Myös laskelman mukaan ulosvetokestävyys kannanpuolella oli selvästi suurempi. Kuvassa 4.3 puuosat on irrotettu toisistaan testin jälkeen.



Kuva 4.2. Naulaliitoskoekappale testauslaitteessa.



Kuva 4.3. Reunapuu irrotettuna keskipuusta naulaliitoksen koekuormituksen jälkeen.



Kuva 4.4. Naulaliitosten voima-siirtymäkäyrät.

Testituloksista voidaan lukea seuraavat tiedot:

- Maksimivoima $F_{v,Rk}$ = 41,4 kN ja 42,8 kN
- Näitä vastaavat liitossiirtymät 23,4 mm ja 20,6 mm
- Laskelman mukaista voimaa 17,1 kN vastaava siirtymä 2,2 mm

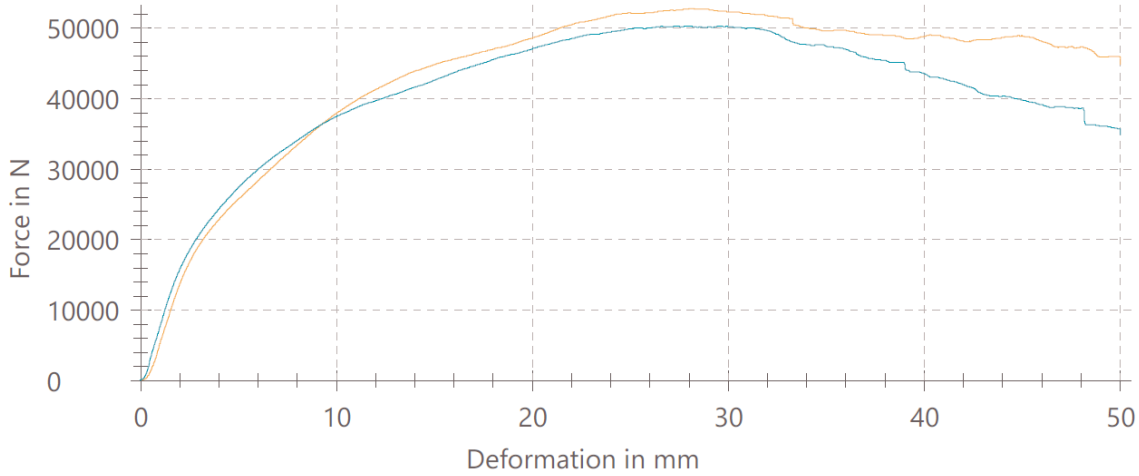
3.3 Ruuviliitos

Kuvassa 4.2 on esitetty ruuviliitoskoekappale testauslaitteessa kuormituskokeen jälkeen.



Kuva 4.5. Ruuviliitoskoekappale testauslaitteessa koekuormituksen jälkeen.

Koekuormitusten voima-siirtymäkuvaajat on esitetty kuvassa 4.6. Myös ruuviliitosten osalta kummassakin kumpikin kuormituskoe pysähtyi, kun 50 mm siirtymä saavutettiin. Lopputilanteessa ruuveissa oletettiin olevan myötönivelet kummassakin puuosassa. Ruuvit olivat liukuneet pituussuunnassa pääosin kannanpuoleisessa puussa (ruuvien kannat olivat uponneet puuhun). Kierteen ja puun välinen tartunta kärjenpuolella oli siis kestävämpi kuin lyhyen kierreosan ja puun välinen tartunta ja kannan läpivetokestävyys kannanpuolella. Myös laskennan mukaan kärjenpuoli oli hieman vahvempi.



Kuva 4.6. Ruuviliitosten voima-siirtymäkäyrät.

Testituloksista voidaan lukea seuraavaa:

- Maksimivoima $F_{v,Rk}$ = 52,7 kN ja 50,3 kN
- Näitä vastaavat liitossiirtymät 28,1 mm ja 29,6 mm
- Laskelman mukaista maksimivoimaa 27,2 kN vastaava siirtymä n. 5 mm

3.4 Pulttiliitos

Kuvassa 4.2 on esitetty pulttiliitoskoekappale testauslaitteessa.



Kuva 4.7. Pulttiliitoskoekappale testauslaitteessa.

Toinen koekuormitus pysähtyi ennen 50 mm siirtymää puuosien hajottua ja sen myötä jännityksen pudottua alle asetetun rajan. Toisen koekuormitus pysähtyi säädetyn 50 mm siirtymän kohdalla jännityksen kasvaessa loppuun saakka. Kuvassa 4.8 on esitetty kummatkin koekappaleet testin päätyttyä.

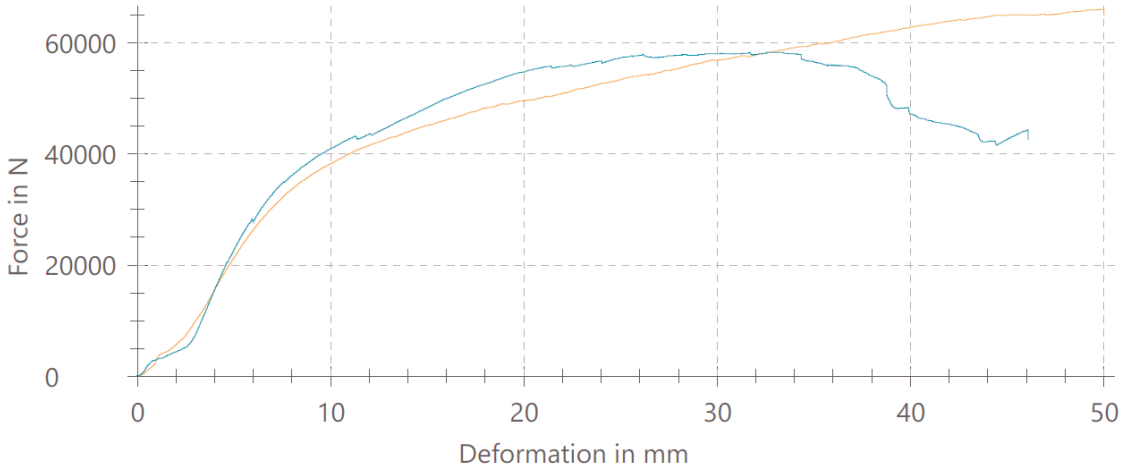


Kuva 4.7. Pulttiliitoskoekappaleet koekuormituksen jälkeen.

Puuosissa havaitaan leimapaineen ylittymistä aluslevyjen alla. Pultteihin oli muodostunut kaksi myötöniveltä keskimmäisen puuosan kohdalle (kuva 4.9). Koekuormitusten voima-siirtymäkuvaajat on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.9. Pultit koekuormituksen jälkeen.



Kuva 4.10. Pulttiliitosten voima-siirtymäkäyrät.

Testituloksista voidaan lukea seuraavaa:

- Maksimivoima $F_{v,Rk}$ = 66,0 kN ja 58,2 kN
- Näitä vastaavat liitossiirtymät 50 mm ja 32,8 mm
- Laskelman mukaista maksimivoimaa 23,7 kN vastaava siirtymä n. 5 mm

3.5 Päätelmät

Naula- ja pulttiliitoksen osalta liitokset kestivät n. 2,5-kertaisen kuorman laskentatuloksiin verrattuna, ruuviliitos vajaan kaksinkertaisen kuorma. Ruuville tehdyt ETA-hyväksynnän mukaiset testit ja sitä kautta räätälöidyt laskentakaavat antavat tarkemman tuloksen kuin harmooniseen tuotestandardiin perustuvat laskentakaavat nauloille ja pulteille. Tämä lienee yksi tekijä, miksi ruuviliitoksen laskennallinen kestävyys oli lähempänä koekuormituksen tulosta.

Koekuormitusten mukaisten maksimivoimien kohdalla oli kuitenkin jo niin suuret liitossiirtymät, ettei sellaisia voida käytännössä sallia. Puun halkeamista voisi käytännössä syntyä jo selvästi aiemmin tiukkojen reunaetäisyyksien tapauksessa, silloin kun liitoksen alla ei ole tukea. Koejärjestelyssä liitoksen alla oli aina metallinen tuki, mikä auttoi puuta pysymään ehjänä suurillakin muodonmuutoksilla. Laskennallinen kestävyys sijoittui melko lähelle voima-siirtymäkäyrän kohtaa, jossa käyrä lähtee loivenemaan. Laskennalliset liitossiirtymät vastasivat naulaliitosten osalta voima-siirtymäkäyrän mukaisia laskennallisen kestävyyden kohdalla olevia siirtymien arvoja. Ruuvi- ja pulttiliitosten kohdalla toteutuneet siirtymät olivat noin tuplasti suurempia (2-3 mm suurempia) kuin laskennalliset siirtymät. Liitoskappaleiden valmistuksen epätarkkuus selittänee asiaa. Testauksen alussa tapahtui todennäköisesti hieman koekappaleen hakeutumista eri asentoon ja alkukierouden oikenemista ennen varsinaista liitossiirtymää, vaikka ilmiötä ohjelmaan asetetulla esivoimalla pyrittiin eliminoimaan.

Koekappaleet olivat silmämääräisesti katsottuna hyvännäköistä, tiheää puutavaraa. Satunnainen joukko lujuusluokan C24 sahatavarasta valituista puutavarasta suuremmalla testimäärällä olisi luultavasti tuonut selvästi huonompiakin tuloksia esille.

4. YHTEENVETO

Tutkielman avulla pystyttiin havainnollistamaan liitoksen käyttäytymistä ja vertaamaan koekuormitusten ja laskentatulosten suuruusluokkaa. Tarkemman tutkimuksen (esim jonkun liitoksen kapasiteetin selvittäminen kokeellisesti) tekemiseksi tulisi tehdä suurempia koesarjoja, jolloin tarvittava 5 %:n fraktiili olisi löydettävissä. Koekappaleiden valmistuksessa ja koejärjestelyissä tulisi myös eliminoida alkupainumat siten, että liitossiirtymät olisivat luotettavasti luettavissa voima-siirtymäkäyrältä. Myös koekappaleiden kosteuspitoisuus tulisi varmistaa mittaamalla, ja sovittaa testinopeus siten, että voitaisiin käyttää tarkkaa k_{mod}-arvoa.

Testatut liitostyypit edustuvat sitkeää murtotapaa, mikä onkin toivottavaa hauraan murtotavan sijaan. Eurokoodin mukaisessa mitoittamisessa kuormaa kasvatetaan kuormakohtaisilla kertoimilla, jotka ovat luokkaa 1,15 – 1,5, ja liitoksille käytetään osavarmuuslukua, joka on 1,3. Näin ollen kokonaisvarmuudeksi tulee noin 1,8 (tarkka arvo riippuu eri kuormien osuuksista liitokseen kohdistuvassa voimassa). Varmuutta mitoituksessa vaikuttaisi siis olevan.

LÄHTEET

/1/ SFS-EN 1995-1-1. Puurakenteiden suunnittelu. SFS ry. 2014

/2/ STEP 1. Puurakenteet. VTT 1996

/3/ Kevarinmäki Ari. Puikkoliitosteoria ja vinoruuviliitos. 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