

Eurokoodi-laskentaohjelmat puurakenteisten pientalojen suunnittelussa

Sami Kärkkäinen

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Sami Kärkkäinen	
Työn nimi Eurokoodi-laskentaohjelmat puurakenteisten pientalojen suunnittelussa	
Päiväys 19.12.2012	Sivumäärä/Liitteet 57+27
Ohjaaja(t) Lehtori Matti Mikkonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) KPM-Engineering Oy/ DI Esa Suomalainen	
Tiivistelmä <p>Tämän insinööritöön tavoitteena oli löytää ja tutkia eurokoodia käyttäviä laskentaohjelmia apuvälineiksi puurakenteisten pientalojen suunnitteluun. Tarkasteltaviksi laskentaohjelmiksi valittiin <i>Finnwood 2.3 SR1</i>, <i>Jigi 2012</i> puumoduuli, <i>PupaX5</i> ja yksityinen levyjäykistystä laskeva Excel-laskentapohja. Tavoitteena oli löytää sopiva laskentaohjelma avuksi jokapäiväiseen suunnitteluun, kun siirrytään käyttämään eurokoodia kantavien puurakenteiden suunnittelussa.</p> <p>Työn lähtökohtana oli tutkia valittuja laskentaohjelmia laskennan ja vertailun avulla. Työ aloitettiin perehtymällä ohjelmiin laskemalla mallitalosta valittuja rakenteita sekä ohjelmilla että käsinlaskennalla. Tuloksia ja käytettävyyttä vertaamalla laskentaohjelmista saatiin tarpeeksi tietoa niiden käyttöominaisuuksien selvittämiseen. Rakenteiden mitoitus suoritettiin käsinlaskennassa ja laskentaohjelmissa käyttäen viimeisintä standardia <i>SFS-EN 1995-1-1 Eurocode 5: Puurakenteiden suunnittelu</i> ja <i>RIL 205-1-2009: Puurakenteiden suunnitteluohjetta</i>.</p> <p>Työn toimeksiantaja oli tamperelainen KPM-Engineering Oy, jolla on sivutoimipiste Kuopiossa. Laskentaohjelmien ja käsinlaskennan tuloksia vertaamalla saatiin paljon hyödyllistä tietoa ohjelmien laskentamenetelmistä, ja samalla opittiin niiden käyttöä. Opinnäytetyössä kerätyn tiedon perusteella toimistossa voidaan siirtyä käyttämään laskentaohjelmia kantavien puurakenteiden mitoituksessa, ja lisäksi ohjelmien käyttöä opetetaan muille työntekijöille.</p>	
Avainsanat eurokoodi, laskentaohjelmat, puurakenteet, pientalot	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Sami Kärkkäinen			
Title of Thesis Eurocode calculation software in designing the timber structure of single family dwellings			
Date	December 19, 2012	Pages/Appendices	57+27
Supervisor(s) Mr Matti Mikkonen, Lecturer			
Client Organisation /Partners KPM-Engineering Oy/ Mr Esa Suomalainen, M.Sc			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was commissioned by KPM-Engineering Ltd from Tampere which has a side office in Kuopio. The purpose of this thesis was to find and study pieces of calculation software that use Eurocode to help designing the timber structure of single family dwellings. The chosen pieces of calculation software were <i>Finnwood 2.3 SR1</i>, <i>Jigi 2012</i> wood module, <i>PupaX5</i> and a private Excel spreadsheet application that calculates board stiffening. The goal was to find suitable calculation software to help everyday designing when transferring into using Eurocode in timber structures.</p> <p>The starting point of the thesis was to study the chosen pieces of calculation software with the help of comparison and calculation. The thesis was started by studying the software by calculating selected timber structures of the example house with calculation software and by hand calculation. By comparing the results and usability, enough information was gathered from the calculation software in order to find out their operating features. The structural designing in the calculation software and hand calculation were made by the latest standards <i>SFS-EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures</i> and <i>RIL 205-1-2009: Design of timber structures guide</i>.</p> <p>A lot of information was gathered about the calculation methods and the use of calculation software by comparing the results of both the calculation software and hand calculation. The office of Kuopio can transfer into using Eurocodes in designing wood structures with the help of the results of this thesis. In addition, the use of the calculation software is going to be taught to other employees.</p>			
Keywords Eurocode, calculation software, timber structures, single family dwellings			
public			

ALKUSANAT

Haluan kiittää vanhempiani, tyttöystävääni ja ystäviäni saamastani tuesta opiskelun ja opinnäytetyön aikana.

Lisäksi haluan kiittää lehtori Matti Mikkosta opinnäytetyöni ohjauksesta. Työn tilaajan KPM-Engineering Oy:n puolelta haluan kiittää Kuopion toimipisteen toimistopäällikköä DI Esa Suomalaista ja myös kaikkia muita työkollegoita saamastani ohjauksesta opinnäytetyötäni tehdessä.

Kuopiossa 19.12.2012

Sami Kärkkäinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	EUROKOODILASKENTA-OHJELMAT PUURAKENNESUUNNITTELUSSA	10
2.1	Eurokoodit	10
2.2	Laskentaohjelmat	11
2.2.1	<i>Finnwood 2.3 SR1</i>	11
2.2.2	<i>PupaX5</i>	12
2.2.3	<i>Jigi 2012</i>	13
2.2.4	KPM-Engineering Oy: <i>EC Jäykistys-Excel</i>	13
2.3	Pientalojen puurakennesuunnittelu	14
3	MALLITALON MITOITUSTUTKIMUS	18
3.1	Mallitalon esittely	18
3.2	Mallitalon rakenteiden laskentatulokset	21
3.2.1	Kattoristikon kannatinpalkki	21
3.2.2	Välipohjapalkki	23
3.2.3	Pilari	27
3.2.4	Jäykistävä päätyseinä	28
3.3	Mitoitustutkimuksen arviointi	30
4	LASKENTA-OHJELMIEN KÄYTTÖ PUURAKENNESUUNNITTELUSSA	32
4.1	<i>Finnwood 2.3 SR1</i>	32
4.1.1	Käyttöliittymä ja käytettävyys	32
4.1.2	Rakenteen mitoittaminen	33
4.1.3	Tulokset	35
4.2	<i>PupaX5</i>	36
4.2.1	Käyttöliittymä ja käytettävyys	36
4.2.2	Rakenteen mitoittaminen	37
4.2.3	Tulokset	39
4.3	<i>Jigi 2012</i> : Puumoduuli	40
4.3.1	Käyttöliittymä ja käytettävyys	40
4.3.2	Rakenteen mitoittaminen	41
4.3.3	Tulokset	43
4.4	KPM-Engineering Oy: <i>EC Jäykistys-Excel</i>	44
4.4.1	Käyttöliittymä ja käytettävyys	44
4.4.2	Levyjäykistysmitoitus	45
4.4.3	Tulosteet	46
5	OHJELMIEN VERTAILUA PIENTALOSUUNNITTELUSSA JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	47

5.1 Ohjelmien soveltuvuus ja käytettävyys	47
5.2 Laskenta ja mitoitus	48
5.3 Tulosten vertailua	51
5.4 Johtopäätökset	52
6 POHDINTA	53
LÄHTEET	55
KUVALUETTELO	57
TAULUKOT	57

LIITTEET

- Liite 1 Käsineläskentatulokset kattoristikön kannatinpalkista
- Liite 2 Käsineläskentatulokset välipohjapalkista
- Liite 3 Käsineläskentatulokset pilarista
- Liite 4 Käsineläskentatulokset pätyseinän levyjäykistyksestä

1 JOHDANTO

Suomessa ollaan siirtymässä käyttämään eurokoodeja kantavien rakenteiden suunnittelussa, mikä luo uusia haasteita ja ponnisteluja konsultti- ja suunnittelu yrityksille. Eurokoodien on tarkoitus syrjäyttää nykyisin vielä rinnakkain käytössä oleva Suomen rakennusmääräyskokoelma vuoden 2013 aikana, jonka jälkeen kaikkien suunnittelu-toimistojen on siirryttävä eurokoodisuunnitteluun. Eurokoodeissa käsitellään ja ohjataan kantavien rakenteiden suunnittelua yksityiskohtaisemmin ja tarkemmilla laskentaperiaatteilla, mikä taas vaatii suunnittelijoilta tarkempia ja laajempia laskutoimituksia. Samalla tämä vaikuttaa suunnittelu aikatauluihin. Jotta suunnittelu aikatauluissa ja tehokkaassa suunnitteluprosessissa voidaan jatkossakin pysyä, tulevat käytössä olevat apu- ja laskentaohjelmat yhä tärkeämmiksi kantavien rakenteiden mitoituksissa.

Opinnäytetyössäni on tarkoitus tutkia markkinoilla olevaa kolmea laskentaohjelmaa, jotka laskevat ja mitoittavat puurakenteita Eurokoodi 5:n mukaisesti. Tutkittavat ohjelmat ovat *Finnwood 2.3 SR1*, *Jigi 2012* ja *PupaX5*. Tarkoituksena on selvittää, mitkä näistä ohjelmista soveltuvat parhaiten juuri puurakenteisten pientalojen suunnitteluun apuvälineiksi. Tämän takia on tarkoitus tutkia mahdollisimman nopeita ja helpokäyttöisiä ohjelmia. En ole ottanut tutkimukseeni mukaan esimerkiksi raskaskäyttöisiä mallintamisohjelmia, joiden pelkän tietomallin tekemiseen saattaa kuluva koko suunnitteluprosessiin varattu aika. Ohjelmia ja niiden käyttöä on tarkoitus tutkia ja vertailla puurakenteisen esimerkkitalon avulla, josta lasken määräävimmit rakenteet yhdestä palkista, pilarista, välipohjapalkista värähtelymitoituksen kanssa ja ulkoseinän levyjäykistyksestä. Tässä työssä ei tarkastella rakenteiden palomitoituksia, liitosten ja ristikoiden mitoitusta, eikä yläpohjan jäykistystä.

Työn tilaaja on tamperelainen KPM-Engineering Oy, jonka Kuopion toimipisteessä työskentelen. KPM-Engineering Oy kuuluu FMC Group-konserniin, joka on osa ruotsalaista Sweco-konsernia. Yhteensä tähän eri suunnittelualojen asiantuntijoista koostuvaan organisaatioon kuuluu 7 700 henkilöä ympäri maailman. Toivottavasti työstäni on hyötyä KPM-Engineering Oy:lle siirryttäessä täysin eurokoodisuunnitteluun, varsinkin pientalojen suunnittelun osalta. Pientaloja suunnitellaan paljon Kuopion toimipisteessä ja lähes kaikki suunnitelmat tehdään vielä nykyisin Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisesti, joten siirtyminen eurokoodeihin ei ole niin helppoa. Työni avulla yrityksen suunnittelijat saavat tietoa siitä, mitkä ovat hyviä suunnittelutyökaluja avuksi heidän jokapäiväisessä suunnittelussa. Tavoitteena ei välttämättä ole löytää yhtä ainutta laskentaohjelmaa, jolla voi laskea kaiken. Tarkoituksena on

lähinnä kerätä tietoa, millä laskentaohjelmalla saa helpoiten, nopeimmin, ja oikeaoppisen tiedon ulos, olipa kyseessä sitten pelkän palkin mitoitus tai useamman rakeneosan mitoitus.

Jotta saisin pidettyä työni kohtuullisissa mittapuitteissa, valitsin tutkittaviksi laskentaohjelmiksi *Finnwood 2.3 SR1:n*, *Jigin* puumoduulin, *PupaX5:n* ja KPM-Engineering Oy:n tekemän *EC Jäykistys-Excelin*. Päädyin näihin laskentaohjelmiin omien käyttökokemusten, työkollegoilta saatujen ja netistä löytämieni tietojen pohjalta. Työni alkaa esimerkkitalon rakenteiden käsinlaskemisella ja yhtä aikaa laskentaohjelmilla mitoittaen. Tuloksia ja käyttökokemuksia vertailemalla ohjelmista on tarkoitus kerätä tarpeellinen tieto päämäärän saavuttamiseksi.

2 EUROKOODILASKENTA-OHJELMAT PUURAKENNESUUNNITTELUSSA

2.1 Eurokoodit

Eurokoodit ovat eurooppalaisia standardeja, jotka ohjaavat ja määräävät kantavien rakenteiden suunnittelua. Eurokoodit on laatinut *Euroopan standardisointijärjestön* (CEN) teknillinen komitea (Eurocodes 2012). Standardeja on tällä hetkellä 58 osaa ja ne kattavat esimerkiksi varmuuden määrittämisperiaatteita, kuormien kuten lumi-, hyöty-, tuuli-, onnettomuus-, palo- ja nosturikuormien määrittämisperiaatteita. Eurokoodit sisältävät myös yksityiskohtaiset ohjeet eri rakennusmateriaalien suunnitteluun, sekä tietoa niiltä vaadittaviin laatu- ja ominaisuustekijöihin. Lisäksi jokaisella maalla on vielä omat kansalliset liitteensä, joissa on erikseen ohjeita ja määräyksiä kullekin maalle ominaisille tekijöille, kuten maasto- ja ilmasto-olosuhteista aiheutuville eroille. Suomessa kansallisia liitteitä laatii ja päivittää Ympäristöministeriö talonrakennuksen osalta ja Liikennevirasto siltojen osalta. (Eurokoodi help desk 2012a.)

Eurokoodien kehittämisestä tehtiin päätös komissiossa vuonna 1975, ja ensimmäinen versio eurokoodeista julkaistiin noin 10 vuotta myöhemmin vuonna 1984. Vuonna 1989 komissio ja jäsenmaat tekivät sopimuksen *Euroopan standardijärjestön* (CEN) kanssa eurokoodien valmistelusta ja julkaisemisesta. CEN julkaisi esistandardeja (ENV) vuosina 1992-1998, joihin jäsenmailla oli mahdollisuus lisätä omat arvonsa Kansalliseen soveltamisasiakirjaan (*National Application documents* NAD). Esistandardien muuttaminen varsinaiseksi standardisarjaksi aloitettiin vuonna 1998, ja niitä on kehitetty tähän päivään asti. Suomessa ensimmäinen standardipaketti otettiin käyttöön 1.11.2007, jolloin keskeisimmät talonrakennuksen suunnittelua koskevat ohjeet oli suomennettu. Tällä hetkellä viimeisiä paketteja suomennetaan ja niiden kansallisia liitteitä valmistellaan. Ympäristöministeriö on tiedottanut, että eurokoodeihin siirrytään kokonaan 1.7.2013. Siihen asti eurokoodien standardeja ja Suomen rakennusmääräyskokoelmaa voi käyttää rinnakkain. (Eurokoodi help desk 2012a; Eurokoodi help desk 2012b.)

Yksi eurokoodeihin kuuluvista standardeista on puurakenteiden suunnittelua käsittelevä *SFS-EN 1995-1-1 Eurocode 5*, joka on suomennettu versio alkuperäisestä *EN 1995-1-1* –painoksesta. Kyseisestä standardista on myös *Suomen Rakennusinsinöörien Liitto* (RIL) tehnyt oman versionsa *RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje*. Käytän kumpaakin teosta omassa opinnäytetyössäni.

2.2 Laskentaohjelmat

Työhöni valitsin alustavien tutkimusten jälkeen kolme laskentaohjelmaa: Metsä Woodin *Finnwood 2.3 SR1*, Virtual Systems Oy:n *Jigi* ja Pauli Närhen kehittämä *PupaX5*. Lisäksi ulkoseinän levyjäykistyksen tutkimiseen valitsin KPM-Engineering Oy:n *EC Jäykistys-Excelin*, jonka käännöstyön Suomen rakennusmääräyskokoelman B10:stä Eurokoodi 5:n mukaiseksi on tehnyt Karim Seghaier opinnäytetyönään Tampereella (2008).

Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto (SKOL ry) on myös kehittänyt omia Excel-laskentapohjia yhdessä eri suunnittelutoimistojen ja ammattikorkeakoulujen kanssa. Laskentapohjia on tehty niin teräs-, betoni- ja puurakenteista kuin myös muuratuista rakenteista. (SKOL ry 2012.) Jätin nämä laskentapohjat pois työstäni rajoittaakseni laajuutta, joten niiden mahdolliseen jatkotutkintaan on aihetta.

Eri puurakenteiden suunnitteluun liittyviä Eurokoodi-laskentaohjelmia on myös saatavilla Puuinfo Oy:n internetsivuilta. Puuinfo Oy on voittoa tavoittelematon yhtiö, jonka omistavat Metsäteollisuus ry, Suomen Puutavara- ja Rakennustarvikekauppiaasyhdistys ry sekä Maa- ja metsätaloustuottajain keskusliitto MTK ry (Puuinfo). Laskentaohjelmia on esimerkiksi välipohjapalkkien värähtelyn laskemiseen ja seinän palomitoitukseen. Jätin myös nämä laskentaohjelmat jatkotutkittavaksi, enkä sisällyttänyt niitä työhöni.

2.2.1 *Finnwood 2.3 SR1*

Finnwood 2.3 SR1 on Metsä Woodin omistama puurakenteiden mitoittamiseen kehitetty laskentaohjelma. Ohjelma on ilmainen ja sen voi ladata internetistä Metsä Woodin sivuilta rekisteröitymisen jälkeen. *Finnwood 2.3 SR1* -ohjelmaversio mitoittaa puurakenteita Eurokoodi 5:n (*EN 1995-1-1*), sen täydennysosan *A1:2008*, näiden Suomen kansallisten liitteiden ja *RIL205-1-2009*-suunnitteluohjeen mukaisesti. VTT on tarkastanut (*VTT-S-03937-12*) kolmantena osapuolena *Finnwood 2.3 SR1*-ohjelmaversion. (Metsä Wood 2012.)

Ohjelma mitoittaa katto- ja lattiapalkit, pilarit ja *Kerto-Ripa®*-elementeillä tehtävät ala-, väli- ja yläpohjalaatat. *Finnwood*-laskentaohjelmaan on valmiiksi syötetty yleisimpien Suomessa käytettävien puumateriaalien tiedot ja Metsä Woodin omat Kertopuu-tuotteet. Mitoittaa voi seuraavilla materiaaleilla: *Kerto®* (tyypit S, Q, T ja QP), liima-

puu, standardipilarit (Metsä Woodin kuningaspalkki), rakennepuutavara ja *Kerto-Ripa*-elementit. (Metsä Wood 2012.)

Finnwood 2.3 SR1 –laskentaohjelmalla voi laskea palkkien ja pilarien taivutus- ja leikkauskestävyyden, taipuman, välipohjapalkin värähdyksen, kiepahduksen, nurjahduksen ja tukipainekestävyydet. Ohjelma osaa ottaa huomioon puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuksen. *Finnwoodista* saa tulostettua raportin mitoituksista, ja laskelmat voi tallentaa tiedostotyyppiksi .s01.

2.2.2 *PupaX5*

PupaX5 on Pauli Närhen puu- ja teräspalkkien mitoittamiseen suunnittelema laskentaohjelma. Pauli Närhi omistaa Insinööritoimisto Pauli Närhi Tmi:n, joka on toiminut vuodesta 1983 Nurmeksessa. Päätoimenkuvana on rakennesuunnittelu. (Insinööritoimisto Pauli Närhi.)

PupaX5 on eurokoodikäännös aiemmalle *Pupax*-versiolle, jonka Närhi teki työnsä ohessa apuvälineeksi rakennesuunnitteluun. Alun perin ohjelman nimi oli pelkkä *Pupa*, jonka levitys Närhen oman yrityksen ulkopuolelle alkoi jo 80-luvun puolivälissä. Myöhemmin ohjelmaan lisättiin teräspalkkien laskentaominaisuuksia, jolloin nimi muutettiin *Pupaxiin* (extended Pupa). Uusin eurokoodiversio *PupaX5* valmistui vuoden 2012 alkupuolella. Laskentaohjelma on maksullinen. (Insinööritoimisto Pauli Närhi.) *PupaX5* on Visual Basic –pohjainen, jonka tallennustiedoston tyyppi on .pup.

PupaX5 mitoittaa puu- ja teräspalkkeja Eurokoodi 5:n ja 3:n mukaan. Laskentaohjelmassa on mukana myös mahdollisuus mitoittaa nyt syrjäytyvän Suomen rakennusmääräyskokoelman normiston B10:n ja B7:n mukaan. Laskentaohjelma laskee palkin taivutus- ja leikkauskestävyyden, taipuman, yksinkertaistetun välipohjapalkin värähtelyn ja minimitukipituudet. *PupaX5*:een on syötetty materiaalitiedot Kertopuusta, liimapuusta, rakennesahatavarasta, pyöröhirrestä, IPE-, INP-, HEA-, HEB-, HEM- ja UNP-valssatuista palkeista, kuin myös neliö-, suorakaide- ja pyöreäputkipalkeista. Verrattuna aiempaan *Pupax*-versioon uusina profiileina ovat tulleet myös valssattu tasakylkinen ja erikylkinen L-teräs. Ohjelmasta voi tulostaa sekä graafisen että numeerisen raportin.

2.2.3 *Jigi 2012*

Jigi 2012 on suomalaisen A&S Virtual Systems Oy:n kehittämä laskentaohjelma rakennusten rasi- ja kestävyyden laskemiseksi. Ohjelmasta voi ladata ilmaisen statiikkamoduulin *Jigin* internetsivuilta, mutta mitoitusmoduulit vaativat maksullisen lisenssin toimiakseen. *Jigissä* on teräs-, betoni- ja puumitoituksen moduulit. Statiikkamoduuli laskee 3D-elementtimenetelmällä ja mitoitusmoduulit perustuvat uusimpiin eurokoodistandardeihin (EN) ja niiden kansallisiin liitteisiin. (Jigi-Soft 2012a.)

Jigin statiikkamoduulissa kehän laskenta perustuu 1. kertaluvun analyysiin eli niin sanottuun FEM analyysiin (*FEM, finite element method*). *Jigi* ratkaisee niin 2- kuin 3-ulotteisia sauvarakenteita. Rakenteiden mitoituksessa otetaan huomioon siirtymien, taipumien, kiertymien, taivutusmomenttien, vääntömomenttien, leikkaus- ja normaali-voimien ja tukireaktioiden laskenta. Ohjelma tarkastaa siirtymiä, rasituksia ja mitoitusta 30 eri pisteessä elementin matkalla. Leikkausmuodonmuutoksia ohjelma ei tarkastele koko rakenteen jäyhyysmatriisissa, vaan se huomioidaan laskettaessa sauvan sisäistä muodonmuutosta. *Jigistä* voi tulostaa statiikkaraportin ja kaikki laskentamallit tallennetaan XML-tiedostoon, jonka tunniste on .jigi. (Jigi-Soft 2012b.)

Keskityn tässä kappaleessa kertomaan pelkästään *Jigin* puumitoitusmoduulista, koska työni aihe on rajattu puurakenteisiin. *Jigin* puurakenteiden moduuli sisältyy ohjelmaversioon *Jigi 2012 v.3.0.0*, ja se ilmestyi osaksi *Jigi*-laskentaohjelmaa vuoden 2011 syksyllä. Puumitoitusmoduuli on tullut myöhemmin ohjelmaan kuin teräs- ja betonirakenteiden moduulit. Puurakenteiden moduuli laskee *Eurokoodi 5:n* mukaan (SFS-EN-1995-1-1_2004). *Jigin* puumoduulilla voi laskea palkkeja ja pilareita. Laskennassa se ottaa huomioon taivutusrasituksen kahden akselin ympäri ja normaali-voiman kestävyden. Muita laskennassa tehtäviä tarkasteluja ovat leikkauskestävyyden tarkastelu puun syiden välillä ottaen huomioon tehollinen leveys ja kuorman vähennys päiden lähellä, sekä lujuusarvon pienennys suhteessa aikaluokkaan ja käyttöluokkaan. Materiaaleina mitoituksessa voi käyttää kertopuuta, liimapuuta, lujuusluokiteltua sahatavaraa ja puukuitulevyä. (Jigi-Soft 2012c.)

2.2.4 KPM-Engineering Oy: *EC Jäykistys-Excel*

Alun perin *Jäykistys-Excel* on luotu vuonna 2003 KPM-Engineering Oy:ssä, jolloin sen lähteenä oli käytetty *RIL 144-2002: Rakenteiden kuormitusohjeet, RIL 120-2004: Puurakenteiden suunnitteluhjeet, RakMk B10, Tyyppihyväksytyt Gyproc-rakenteet:*

Laskentaohje, Rakennusten jäykistys, Fischer-kiinnikkeet: Kiinnikeluettelo ja suunnitteluohje. Nykyisen muodon ja eurokoodiin perustuvan laskennan Jäykistys-Excel sai vuonna 2008, kun Karim Seghaier teki käännöksen opinnäytetyönään Tampereella. Päivityksessä lähteinä on käytetty *RIL 201-1-12008: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, RIL 205-1-2007: Puurakenteiden suunnitteluohje* ja Gyprocin, Knaufin ja Suomen kuitulevyn tyyppihyväksytyjä laskentaohjeita. (Seghaier 2008, 37.) Kyseessä on yksityinen, ainoastaan yrityksen omaan käyttöön tarkoitettu rakennuksen kokonaisjäykistystä laskeva Excel-pohjainen laskentaohjelma. Laskentaohjelmalla voidaan laskea ulko- ja sisäseinien jäykistys, sisäkaton jäykistys, seinien ja levyjen kiinnitykset ja ankkuroinnit, sekä vesikaton jäykistyksestä ristikoiden kokonaisjäykistys ja vesikattotason jäykistys tuulikuormaa vastaan. Ulko- ja sisäseinien jäykistys tapahtuu levyillä.

Edellä hieman tarkennusta seinien jäykistykseen tarkasteluun, koska käsittelen sitä opinnäytetyössäni. *Jäykistys-Excel* -laskentapohjan toimintaperiaatteena on, että siihen syötetään tarvittavat rakennuksen lähtötiedot, joiden perusteella se laskee automaattisesti tuulikuorman ja jakaa sen käyttäjän antamille jäykistäville seinille. Tämän jälkeen ohjelma laskee jäykistävän seinän kestävyden määrätylevylle/levyparille ja kiinnikkeille. Lopuksi ohjelma laskee myös seinien ankkuroinnin niin risteävään seinään kuin vapaaseen päähän valitun kiinnitintyyppin mukaan.

2.3 Pientalojen puurakennesuunnittelu

Yleisimmät puurakenteisten pientalojen runkojärjestelmät ovat paikalla rakennettu runko, hirsirunko ja elementtirungot. Elementtijärjestelmään kuuluvat pre-cut, pien-, suur- ja tilaelementtitalot (Siikanen 1998, 221-225). Tarkasteltavat puurakenteet pientalojen suunnittelussa määräytyvät sen mukaan, millä runkojärjestelmällä talo tehdään. Mallitalo, josta olen tehnyt mitoitustutkimuksen tähän työhön, on suurelementtitalo. Kerron seuraavaksi lyhyesti suurelementtitalon rakennesuunnittelusta.

Suurelementtitalon rakenteiden suunnittelu alkaa yleensä kattoristikoiden mittojen suunnittelusta ja niiden paikalleen sijoittamisella pohjakuvan päälle. Tämän jälkeen on helpompi arvioida, mitä kattoristikoiden kannatinpalkkeja tarvitaan, ja mitä poikkeileikkausta tai materiaalia mahdollisesti käytetään, jotta palkki saadaan kestävä katolta tulevat kuormat. Suurelementtitaloissa on yleensä vakiokokoinen yläjuoksupalkki, jonka on katsottu kestävyydeltään riittävän yleisimpiin tilanteisiin. Niinpä seinien päällä olevaa yläjuoksupalkin kestävyyttä harvoin tarkastetaan, paitsi tilanteissa,

joissa epäillään vakioratkaisun kestävyyttä. Sama pätee pienten aukkojen kohdalla, joten yläsidepuun kestävyys tarkastetaan ainoastaan leveiden aukkojen kohdalla. Palkit mitoitetaan laskentaohjelmalla ja erityisesti kuormien oikein mitoittaminen on tärkeää, jotta laskentaohjelmista saatuihin tuloksiin voidaan luottaa. Eurokoodien myötä palkkien laskemisessa on alettu kiinnittää enemmän huomiota kiepahdukseen, joka vaikuttaa palkin taivutuslujuuden $f_{m,d}$ arvoon (Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL205-1, 2009, 76-79). Kaikki laskentaohjelmat eivät vielä tätä huomioi, joten kiepahduksen tarkastelu jää silloin suunnittelijan vastuulle. Jos palkki on hyvin sivuttaistuettu, niin kiepahduskestävyyttä ei tarvitse silloin erikseen tutkia. Muuten kattopalkkeista tarkastetaan taivutus- ja leikkauskestävyys ja taipuma, jonka raja-arvona kattojen pääkannattimissa on $L/300$ (Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL205-1, 2009, 90).

Kun palkit on saatu mitoitettua, tutkitaan seuraavana runkotolppien kestävyudet. Yleensä rungon kantavana sahatavarana käytetään poikkileikkaukseltaan 173 mm tai 198 mm korkeaa C24 lujuusluokiteltua sahatavaraa. Tällöin tolpan paksuus on yleensä 42 mm. Normaaleissa pientaloissa nämä poikkileikkaukset riittävät hyvin peruskuormien kannatteluun, kun runkopuiden väli on 600 mm. Tätä runkojakoa edellyttää jo talon seinälevyjen kiinnitys ja levyjäykistyksen toimivuus. Niinpä rakennesuunnittelussa ei ole tarpeen tutkia jokaista runkotolppaa, vaan ainoastaan leveiden aukkojen pielitolpat ja isoja kuormia kantavien palkkien alle jäävät tolpat. Näissä tilanteissa, joissa tolpan kestävyys on tarkistettava, käytetään yleensä pilarin laskentaohjelmaa. Tärkeää on tutkia, ettei tolppa pääse nurjahtamaan heikommassa suunnassa eli seinätolpan z-suunnassa (pystysuunta). Toinen suunta on estetty nurjahtamasta esimerkiksi seinälevyillä, jolloin tätä toisen suunnan, y-suunnan (sivusuunta), tarkastelua ei tarvitse tehdä. Muita huomioon otettavia asioita ovat rakenteen osapinnalle tuulen paikallisesta tuulenpaineesta kohdistuvan taipuman tarkastaminen ja tästä aiheutuvan puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuksen tarkastaminen. Seinätolppien lisäksi lasketaan myös kaikki vesikattoa kannattavat terassin pilarit.

Kaksikerroksisissa pientaloissa yksi tärkeämmistä rakenteista on välipohja ja sen mitoitus. Välipohjapalkisto on hyvä suunnitella ennen kuin lasketaan alakerran runkotolppien kestävyys, jotta tiedetään tarkasti kuormituspisteiden sijainnit. Lisäksi jo perustussuunnitteluvaiheessa on ollut tärkeää miettiä, missä kohtaa rakennusta tarvitaan kantavia seinälinjoja, jotta välipohjapalkistolle ei tule liian suuria jännevälejä. Normaalien palkin kestävyysien tarkastelun lisäksi Eurokoodi 5:ssä yksi tärkeä välipohjapalkin mitoittava tekijä on värähtely ja sen rajoittaminen sallittuihin arvoihin. Suomen rakennusmääräyskokoelman B10:ssä välipohjapalkin värähtelyä ei ole ai-

emmin varsinaisesti rajoitettu kuin sillä, että hyötykuormasta aiheutuva taipuma saa olla enintään 12 mm. *RIL 120-2007* painoksessa, mikä perustuu B10 normiin, värähtelyn tarkastaminen tosin jo vaaditaan ja siihen otetaan kantaa. Eurokoodi 5:llä lasettaessa värähtelyn vaikutus on joka tapauksessa tarkastettava. Eurokoodi 5:n mukaan välipohjan ominaistajuus ei saa alittaa 9 Hz:ä ja 1 kN pistekuormasta välipohjapalkille aiheutuva taipuma ei saa olla enempää kuin 0,5 mm (Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL205-1, 2009, 91-93). Ominaisajuuden rajoittaminen perustuu siihen, ettei kävelystä tai juoksusta aiheutuva jaksollinen taajuus pääse lähellekään lattiarakenteen ominaistajuutta. Vaarana on, että resonoidessaan lattia tärähtelee epämiellyttävästi tai pahimmassa tapauksessa romahtaa kokonaan. Pistekuorman taipumarvoa saa korottaa yläpuolisen huoneen suurimman mitan mukaan (Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL205-1, 2009, 91). Taipuma-arvon korotus perustuu oletukseen, jonka mukaan pienessä huoneessa ihminen kävelee hitaammin.

Värähtelyn laskeminen on vielä sen verran tuore asia, että kovinkaan moni laskentaohjelma ei osaa sitä täysimääräisesti ottaa huomioon. Tällä hetkellä yleisin tapa mitoittaa värähdys on laskea se Eurokoodi 5 lyhennetyin suunnitteluohjeen mukaan, jolloin pääasiassa yksittäisen palkin taivutusjäykkyys otetaan huomioon. Tällöin ei esimerkiksi ylä- ja alapuolisia mekaanisesti kiinnitettyjä koolauksia ja yläpuolisia levyjä oteta huomioon taivutusjäykkyydessä. Eurokoodi 5 Lyhennetyin suunnitteluohjeen mukaan ainoat keinot lisätä taivutusjäykkyyttä on ottaa liittolaattavaikutus huomioon joko rakenteellisesti tai työmaalla liimaamalla yläpuolinen levy välipohjapalkistoon, tai jos palkiston päälle valetaan betonilaatta. (EC5 lyhennetty suunnitteluohje 2011, 22-23). Lyhennetty suunnitteluohje vaatii myös poikittaisjäykisteitä välipohjapalkkien väleihin, joiden toiminnasta käytännössä värähtelyä estävänä tekijänä on risteäviä mielipiteitä. Koska suurimmassa osassa puuvälipohjarakenteita on kuitenkin alapuolella kattolevyjen ja yläpuolella lattialevyjen kiinnitykseen poikittaiskoolaus, olisi hyvä ottaa huomioon myös näiden tuoma tehollinen hyöty taivutusjäykkyyden laskennassa. Mitä parempi tehollinen taivutusjäykkyys on, sitä pienempiä palkkien poikkileikkauksia tarvitaan. Suunnittelijan päätettäväksi jää, kuinka tarkasti hän mitoittaa välipohjan taivutusjäykkyyden ja aiheutuuko tästä alimitoitusta vai ylimitoitusta.

Puurakenteiset pientalot jäykistetään yleensä ulko- tai sisälevyillä. Levyjäykistykseensä rakennus jäykistetään kokonaistuulikuormaa vastaan, jolloin tuulen aiheuttama vaakavoima pitää saada vietyä perustuksille, jotta talo ei pääse kaatumaan. Rakennuksen ylä- ja välipohja oletetaan niin jäykäksi, että se pystyy välittämään tuulesta aiheutuvat vaakavoimat kaikille jäykistäville seinille ja näiden seinien levyjen kautta edelleen perustuksille. Tuulikuorman suuruuden mukaan on jäykistäviä levyjä oltava

tarpeeksi päädyn ja sivuseinän vastaista tuulta vastaan. Nykyään useaan pientaloon laitetaan esimerkiksi erikoiskovat kipsilevyt ulkoseinien sisäpuolelle, kuin myös kantaviin ja ei kantaviin sisäseiniin. Näistä levyistä saatava kapasiteetti pitää riittää kokonaistuulikuorman vaakaleikkausvoimaa vastaan. Kapasiteetteja laskiessa voi lisäksi ottaa huomioon myös mahdollisen ulkopuolisen tuulensuojalevyn jäykkyyden. Eurokoodissa määritellään miten tällainen yhteisvaikutus pitää ottaa huomioon niin levyjen, kuin niiden liittimien kapasiteeteissa. Myös monelta levyvalmistajalta saa tyyppi- hyväksytyjä laskentaohjeita levyjäykistykseen laskemiseen ja tietoa heidän tuotteidensa kapasiteeteista. Lisäksi on myös tärkeää laskea seinien oikea ankkurointi alajuoksuun ja alajuoksuun kiinnitys perustuksiin. Jäykistävien seinien päätytolpat ovat suurien rasitusten vaikutuksessa, joten päätyrunkotolppienkin kestävyys pitää tarkastaa.

Suunnittelijan on laskettava yhtenä rakennesuunnittelun työvaiheena edellisessä kappaleessa mainittu levyjäykistys, vaikka sitä ei vielä kaikkien kuntien rakennusvalvonnat vaadi. Laskuperiaatteina voi käyttää esimerkiksi ”korkean palkin” menetelmää tai menetelmää, jossa otetaan huomioon rakennukseen tuulesta aiheutuva vääntö rakennuksen kiertokeskiön ympäri. Korkean palkin laskentamallissa kaikki jäykistävät seinät oletetaan tuiksi, ja itse tuulen puoleinen seinä palkiksi, jolloin voidaan tuulesta aiheutuvat rasitukset laskea tukiseinille. Suunnitteluvaiheessa jäykistykseen voi tarkistaa joko käsinlaskennalla tai jos käytössä on Excel-laskentapohja seinäjäykistykseen laskentaan.

Suurelementtitalon rakenteiden suunnittelussa on paljon muitakin huomioitavia asioita, kuten vesikattotason ja kattoristikoiden jäykistys. Mahdolliset palomitoitukset varsinkin rakennukseen liittyvän autotallin yhteydessä pitää myös tehdä. Lisäksi mekaanisten liittimien ja esimerkiksi palkkikenkien kestävyys pitää tarkastaa. Varsinkin liittimien kestävyysien laskeminen on hyvin työlästä eurokoodilla laskettaessa. Eurokoodissa liittimien laskennassa pitää ottaa enemmän asioita huomioon kuin, mitä RakMk B10:n mukaan laskettaessa. Tässä opinnäytetyössä ei tutkita yläpohjan, ristikkoiden ja vesikaton jäykistystä, palomitoitusta tai mekaanisten kiinnikkeiden laskentaa, joten niitä ei tämän tarkemmin käsitellä.

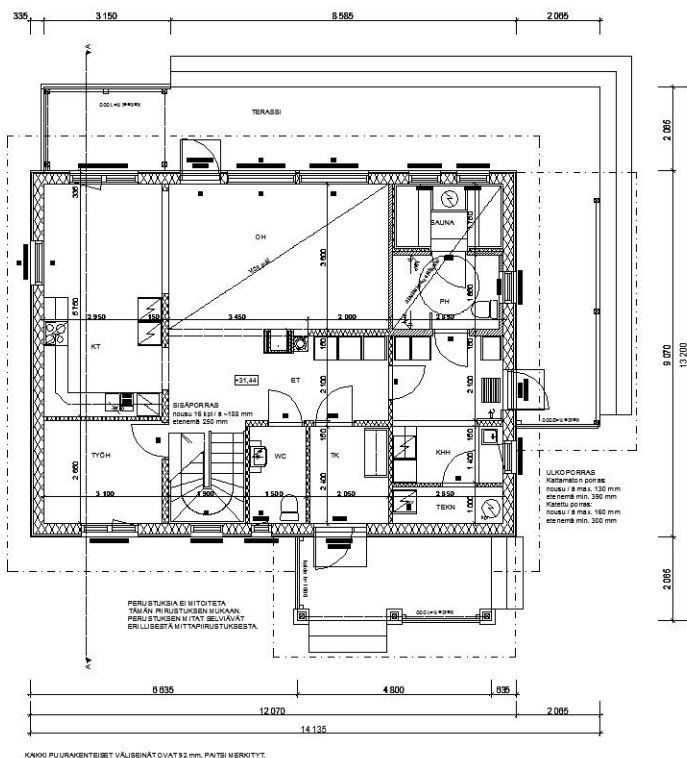
3 MALLITALON MITOITUSTUTKIMUS

3.1 Mallitalon esittely

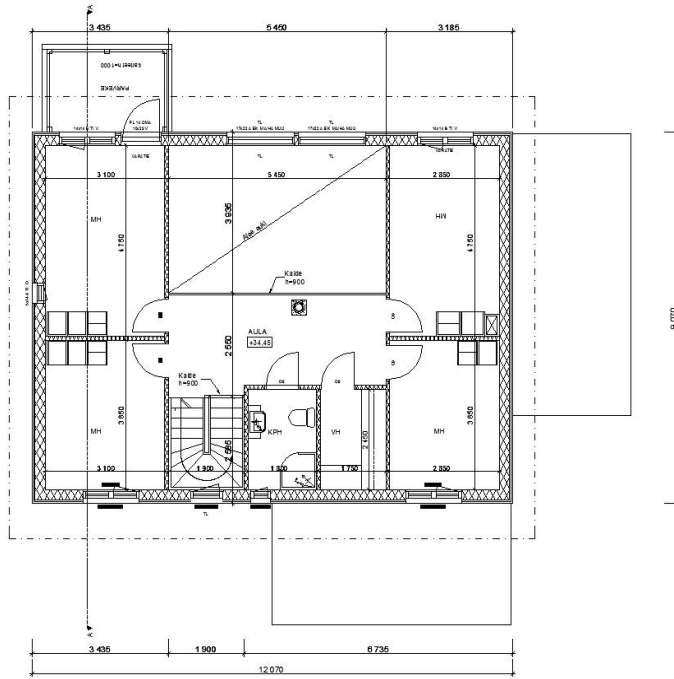
Seuraavaksi esittelyssä on todellinen, jo syyskuussa 2012 valmistunut rakennuskohde, joka valittiin malliksi rakennelaskelmille. Rakennelaskut on tehty ensiksi käsinlaskennalla, jonka jälkeen ne on laskettu tutkittavilla laskentaohjelmilla. Tarkoituksena oli saada vertailtavia tuloksia ja samalla oppia käyttämään laskentaohjelmia, sekä perehtyä niiden laskentaperiaatteisiin.

Mallitaloksi valittiin yksi suurelementtitalo Omatalo Oy:n mallistosta. Talon rakennesuunnitelmat on tehnyt Sami Kärkkäinen KPM-Engineering Oy:stä ja arkkitehtikuvat on allekirjoittanut Lasse Juselius Omatalo Oy:stä. Talo on perinteinen kaksikerroksinen puurakenteinen pientalo, jonka seinät ovat tehdasvalmisteisia suurelementtejä. Välipohja on puurakenteinen. Kyseinen kohde valittiin, koska se on hyvä esimerkki rakenteiden laskentaan ja laskentaohjelmien tutkintaan.

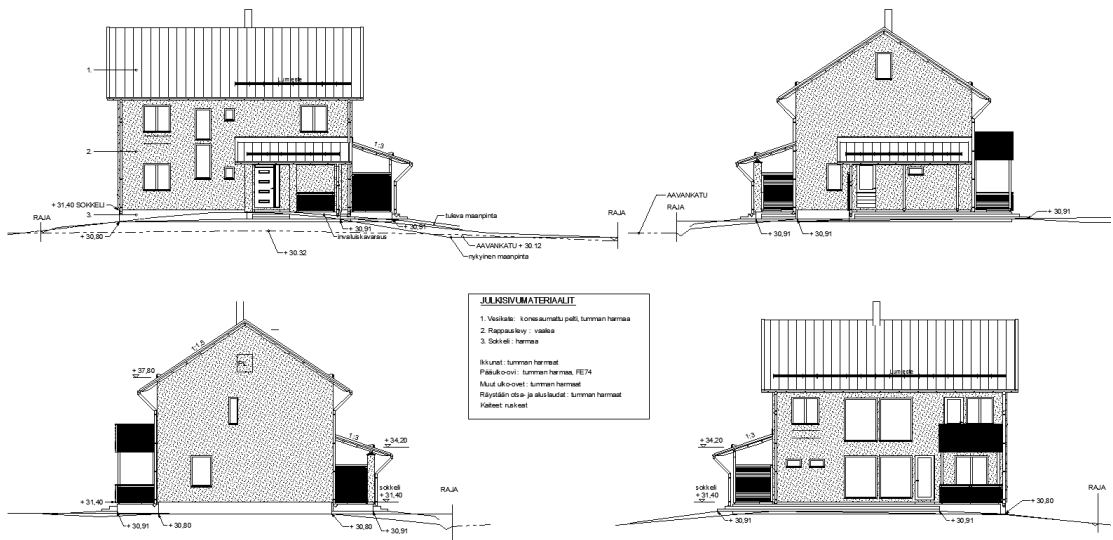
Alla on kuvat rakennuksen 1. ja 2. kerroksien pohjapiirustuksista (Kuva 1. ja Kuva 2.), julkisivuista (Kuva 3.) ja poikkileikkauksesta (Kuva 4.).



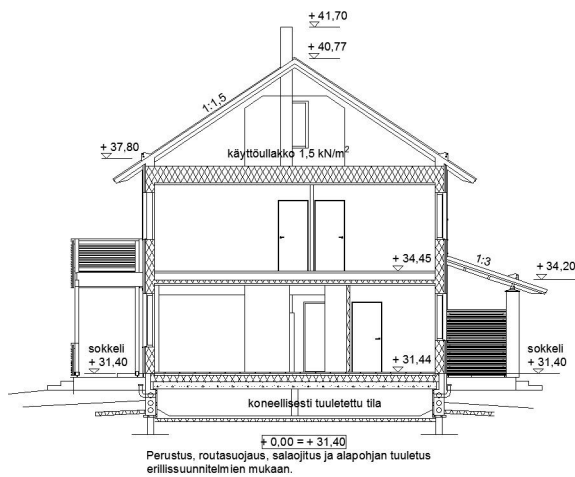
Kuva 1. Mallitalon pohjapiirustus, 1 krs



Kuva 2. Mallitalon pohjapiirustus, 2krs

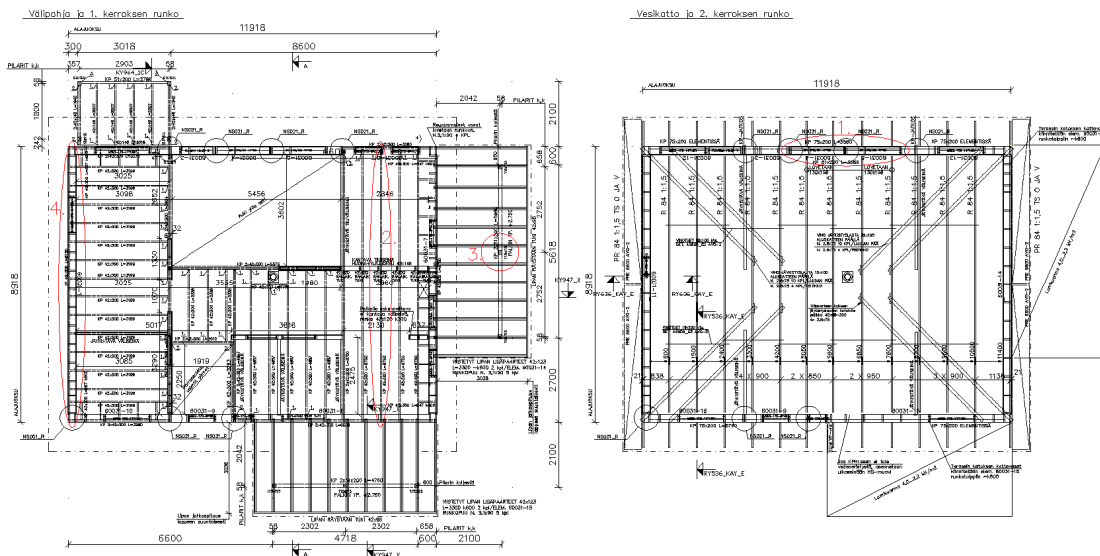


Kuva 3. Mallitalon julkisivukuvat

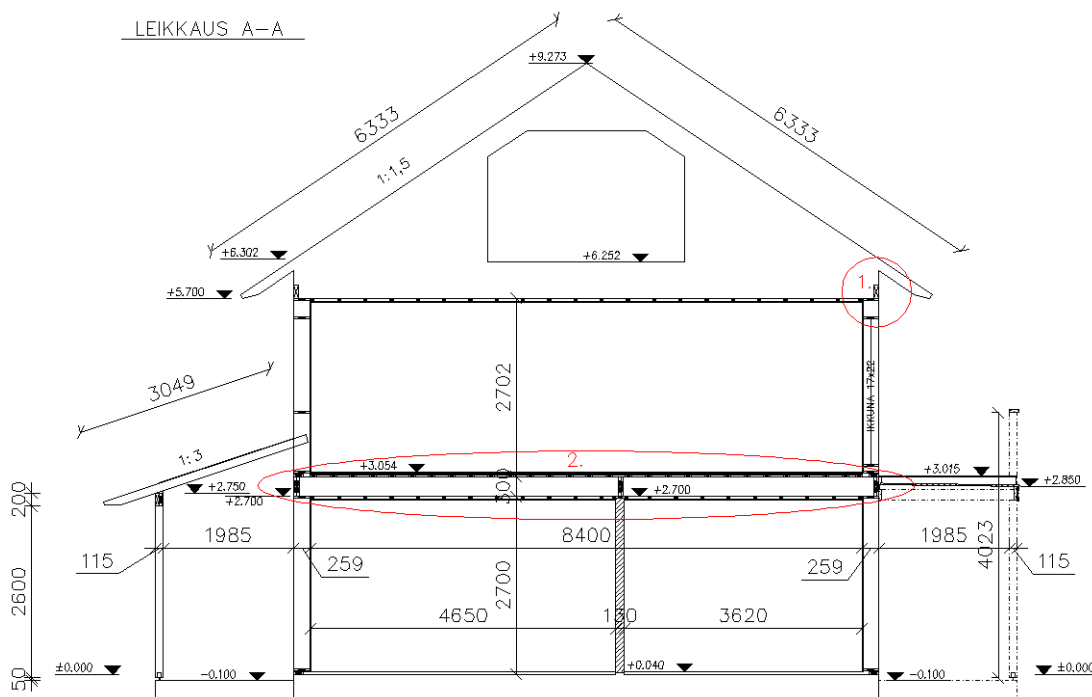


Kuva 4. Mallitalon leikkaus

Seuraavaksi alla on rakennesuunnitelmapiirustuksia kyseisestä mallitalosta (Kuva 5. ja Kuva 6.), joihin on merkitty numeroilla laskettavat ja mitoitettavat rakenteet: katto-ristikon kannatinpalkki (1.), välipohjapalkki (2.), pilari (3.) ja jäykistävä päätyseinä (4.).



Kuva 5. Mallitalon rakenneplaanit



Kuva 6. Mallitalon rakenneleikkaus

Rakenneleikkaukseen (Kuva 6.) välipohjapalkki on piirretty eri kohdasta, kuin mitä plaanin (Kuva 5.) leikkauskohta A-A ilmoittaa. Oikeasti leikkauksessa pitäisi olla ylös asti avonainen aukko oikealla puolella rakennusta. Havainnollistamisen vuoksi leikkaukseen on kuitenkin piirretty tarkasteltava välipohja. Laskuesimerkeissä rakenteet eivät välttämättä täysin vastaa tässä talossa todellisesti käytettyjä rakenteita.

3.2 Mallitalon rakenteiden laskentatulokset

3.2.1 Kattoristikon kannatinpalkki

Kattopalkin laskentaa varten on valittu yläkerran kahden vierekkäisen 17x22 ikkunan yläpuolinen palkki. Palkki on kaksiaukkoinen, koska ikkunat ovat vierekkäin ja välissä on vain kaksi 42 mm paksua runkotolppaa. Palkin ensimmäinen jänneväli on 1 779 mm ja toinen jänneväli on 1 753 mm. Kuormitusalueena on puolet koko katolta tulevasta kuormista. Käsinelaskentaa (Liite 1) on helpotettu jättämällä laskuista pois käytöullakolta tuleva hyötykuorma, mikä pitäisi todellisuudessa ottaa huomioon. Lumikuorma on laskettu eurokoodin mukaan täysin kiinteänä kuormana, joten lumen liikkuuutta ei ole laskuissa otettu huomioon. Lisäksi käsinelaskennassa kaikki katolta tulevat kuormat on oletettu tasaiseksi kuormaksi, vaikka oikeasti kuormat tulevat risti-koilta pistekuormina.

Taulukko 1. Kattopalkin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan

Kuormitukset:		
Omapaino:	Kate	$g_{k,1}=0,3 \text{ kN/m}^2$
	Yläpohja	$g_{k,2}=0,35 \text{ kN/m}^2$
Lumikuorma ($<2,75 \text{ kN/m}^2$)		$q_1= 1,75 \text{ kN/m}^2$
Palkin mitat ja materiaali:		
Kertopuu (Kerto-S)	75x200	
Laskennassa käytetyt luokat:		
Seuraamusluokka	CC2	$K_{FI}=1,0$
Käyttöluokka	1	
Aikaluokka	Keskipitkä	

Aikaluokista keskipitkä aikaluokka aiheuttaa palkille määräävimmit kuormitukset, joten muiden aikaluokkien tuloksia ei tarkastella. Seuraavan sivun vertailutaulukoissa on käsinelaskennan ja laskentaohjelmien antamia tuloksia tukireaktioiden, maksimimomentin, taivutuskestävyyden, leikkauskestävyyden, taipuman ja tukipaineiden arvoista. Taipuman tarkastelussa on hetkellinen ja lopullinen taipuma. Ainoastaan määräävämmän jännevälin taipuma on ilmoitettu eli tässä tapauksessa pidemmän jännevälin taipuma. Taipumat on laskettu käyttörajatilassa. Kiepahdusta ei pääse tapahtumaan kyseiselle palkille, joten kiepahdustarkastelun laskelmia ei ole otettu huomioon vertailutaulukossa (Taulukko 2.). Laskentaohjelmista vertailussa on mukana *Finnwood 2.3 SR1*, *PupaX5* ja *Jigi 2012*.

Taulukko 2. Kattopalkin laskentatulokset

Laskentaohjelma:		Finnwood	PupaX5	Jigi 2012	Käsinlasku
Tulokset:		2.3 SR1			
Tukireaktiot (kN)	F _A	11,91	11,89	11,91	11,90
	F _B	39,23	39,25	39,21	39,21
	F _C	11,62	11,61	11,62	11,62
Max leikkaus (kN)		19,70	19,71	19,70	19,70
Max momentti (kNm)		6,93	6,95	6,91	6,93
Taivutuskestävyys (N/mm ²)	Tulos	13,86*	13,90	14,00	13,86
	Raja-arvo	30,80*	30,79	30,50	30,80
	Käyttöaste	45 %	45 %	45 %	45 %
Leikkauskestävyys (N/mm ²)	Tulos	1,97*	1,97	1,97	1,97
	Raja-arvo	2,73*	2,73	2,73	2,73
	Käyttöaste	72 %	72 %	72 %	72 %
Taipuma (mm) (w _{inst} / w _{net})	Tulos	- / 1,3	1,0 / 1,2	1 / -	1,01 / 1,26
	Raja-arvo	- / 5,9	L/300	EI	- / 5,93
	Käyttöaste	21 %	17% / 21%	EI	21 %
Tukipainekestävyys (N/mm ²)					
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	3,78*	EI	EI	3,78
	Raja-arvo	6,86*	20 mm**	EI	6,84
	Käyttöaste	55 %	EI	EI	55 %
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	6,23*	EI	EI	6,22
	Raja-arvo	6,86*	72 mm**	EI	6,84
	Käyttöaste	91 %	E	EI	91 %
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	1,84*	EI	EI	1,84
	Raja-arvo	5,43*	20 mm**	EI	5,44
	Käyttöaste	34 %	EI	EI	34 %

* Ohjelma ilmoittaa arvon kN- tai kNm -yksikössä, mutta olen kääntänyt arvon N/mm² -yksikköön helpottamaan vertailua

** Ohjelma ilmoittaa minimiarvon millimetreissä

Kuten yllä olevasta taulukosta 2 huomataan, ei ohjelmien ja käsinlaskennan välillä ole merkittäviä eroja. Pienet erot arvoissa saattavat johtua siitä, miten ohjelmat antamaan arvoja pyöristävät, tai millä menetelmä statiikka on laskettu. Lisäksi osa arvoista on käännetty vastaamaan taulukossa annettuja yksiköitä, joten niiden pyöristykset eivät välttämättä täysin vastaa tarkkoja arvoja. Esimerkiksi *Finnwood*-laskentaohjelma ilmoittaa taivutus- ja leikkauskestävyyden arvot kilonewtoneina (kN) poikkileikkauksille, joten ne on muutettu yksikköön N/mm². Taulukossa 2 "EI" tarkoittaa, että ohjelma ei joko ilmoita tai laske ollenkaan kyseistä arvoa.

Finnwood 2.3 SR1:n tulokset ovat melkein identtiset käsinlaskennan tuloksiin verrattuna, joten siinä suhteessa ohjelma vaikuttaa luotettavalta. Kuten taulukosta 2 huomataan, ohjelma tarkistaa samat asiat kuin mitä käsinlaskennassa on laskettu.

PupaX5:n arvot ovat lähes samat kuin käsinlaskennan tulokset. Taipuman arvoissa *PupaX5* antaa käyttöasteen myös hetkelliselle taipumalle, vaikka periaatteessa kat-topalkeissa ei tarvitse raja-arvoa huomioida kuin lopulliselle taipumalle. Käyttöasteen *PupaX5* laskee molemmille sekä hetkelliselle että lopulliselle taipumalle käyttäjän määräämän raja-arvon mukaan, mikä tässä tapauksessa on $L/300$. Tukipainekestävyydet *PupaX5* ilmoittaa tukien vähimmäispituuksina, jolloin tukipainelaskelmien tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia kyseisen ohjelman kohdalla.

Jigi 2012 antaa statiikan, taivutus- ja leikkauskestävyyden osalta samankaltaiset arvot verrattuna käsinlaskentaan. Pienet eroavaisuudet arvoissa saattaa johtua siitä, että ohjelma laskee statiikkaa elementtimenetelmällä (FEM). Ohjelma ilmoittaa ainoastaan hetkellisen taipuman, joten lopullisen taipuman arvoa ei ole vertailussa. *Jigin* tämän tutkimuksen aikaisessa versiossa ei ole kiepahduksen tai tukipainekestävyyden tarkastelua, joten siksi arvot puuttuvat taulukosta 2.

3.2.2 Välipohjapalkki

Välipohjapalkin laskentaa varten on valittu pisin palkki, joka on pohjakuvasta katsottuna talon oikeanpuoleisella välipohjalohkolla. Palkki tukeutuu sivuseinillä oleviin reuna-palkkeihin ja talon keskellä sijaitsevaan kantavaan tiiliseinään. Palkki on kaksiaukkoinen, jonka pitempi jänneväli on 4 738 mm ja lyhyempi jänneväli on 3 688 mm. Välipohjapalkit ovat 600 mm jaolla, joten myös kuormitusalue on 600 mm. Välipohjarakenne ylhäältä alaspäin lueteltuna on: 3x 15 mm lattiakipsilevyt, 19x100 k300 koolaus, kertopuupalkki 45x300, 47x47 k400 sisäkaton koolaus ja katossa kipsilevy (eli välipohjan alapuolella). Välipohjan hyötykuorma oletetaan täysin liikkuvaksi eurokoodin laskutavan mukaan.

Taulukko 3. Välipohjapalkin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan

Kuormitukset:		
Omapaino:	Välipohja Ei kantavat seinät	$g_{k,1}=0,6 \text{ kN/m}^2$ $g_{k,2}=0,3 \text{ kN/m}^2$
Hyötykuorma A:	Liikkuvuus 100%	$q_1= 2,00 \text{ kN/m}^2$
Palkin mitat ja materiaali:		
Kertopuu (Kerto-S)	45x300	
Laskennassa käytetyt luokat:		
Seuraamusluokka	CC2	$K_{FI}=1,0$
Käyttöluokka	1	
Aikaluokka	Keskipitkä	

Käsinlaskentaa (Liite 2) on helpotettu siten, että hyötykuorman liikkuvuutta ei ole otettu huomioon, mikä vaikuttaa kaksiaukkoisella palkilla tukireaktioihin ja momentteihin. Statiikkaohjelmalla tutkittaessa kuitenkin huomattiin, että leikkaus ja taivutus tulevat mitoittaviksi palkin keskituen kohdalla keskipitkässä aikaluokassa, kun molemmilla jänneväleillä on täysi kuormitus. Lisäksi kaksiaukkoiselle palkille, jolla on koko matkalla tasainen kuorma, on olemassa valmiiksi johdettuja laskukaavoja. Käsinlaskennassa taipumien laskentaa on yksinkertaistettu ajattelemalla pisin jänneväli yksiaukkoiseksi. Siksi käsinlaskennalla saadut tulokset taipumien osalta eivät ole vertailukelpoisia laskentaohjelmien antamien tuloksien kanssa. Värähtelyn käsinlaskennassa on otettu huomioon pelkän palkin taivutusjäykkyys *EI*. Palkki ei pääse kiepahtamaan, joten sitä ei ole otettu mukaan vertailuun. Mitoittava kuormitusyhdistelmä on keskipitkä aikaluokka, joten muita aikaluokkia ei ole vertailussa. Kaikki muut paitsi taipuman arvot on laskettu murtorajatilassa. Laskentaohjelmista vertailussa on mukana *Finnwood 2.3 SR1*, *PupaX5* ja *Jigi 2012*.

Taulukko 4. Välipohjapalkin laskentatulokset

Laskentaohjelma:		Finnwood	PupaX5	Jigi 2012	Käsinlasku
Tulokset:		2.3 SR1			
Tukireaktiot (kN)	F _A	4,83	4,83	4,83	4,55
	F _B	12,91	12,92	12,91	12,91
	F _C	3,71	3,71	3,71	2,94
Max leikkaus (kN)		6,92	6,93	6,16	6,92
Max momentti (kNm)		5,62	5,64	5,62	5,62
Taivutuskestävyys (N/mm ²)	Tulos	8,33*	8,35	8	8,33
	Raja-arvo	29,33*	29,33	28,5	29,33
	Käyttöaste	28 %	28 %	29 %	28 %
Leikkauskestävyys (N/mm ²)	Tulos	0,77*	0,76	0,68	0,77
	Raja-arvo	2,73*	2,73	2,73	2,73
	Käyttöaste	28 %	28 %	25 %	28 %
Taipuma (mm) (w _{inst} / w _{net})	Tulos	5 / 6,5	5 / 6,5	5,1 / -	8,18/10,72
	Raja-arvo	11,8 / 15,8	L/300	EI	11,85/15,80
	Käyttöaste	43% / 41%	32% / 41%	EI	69% / 68%
Värähtely (Hz)	Tulos	9,8	8	EI	8,6
	Raja-arvo	9	EI	EI	9,0
	Käyttöaste	92 %	EI	EI	105 %
1 kN taipuma (mm)	Tulos	0,6	1,1	EI	-
	Raja-arvo	0,7	EI	EI	0,7
	Käyttöaste	89 %	EI	EI	-
Tukipainekestävyys (N/mm ²)					
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	4,83*	EI	EI	4,55
	Raja-arvo	34,56*	14 mm**	EI	34,70
	Käyttöaste	14 %	EI	EI	13 %
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	12,91*	EI	EI	12,91
	Raja-arvo	34,2*	24 mm**	EI	34,20
	Käyttöaste	38 %	EI	EI	38 %
Tuki 1 (N/mm ²)	Tulos	3,71*	EI	EI	2,94
	Raja-arvo	34,56*	12 mm**	EI	34,70
	Käyttöaste	11 %	EI	EI	9 %

* Ohjelma ilmoittaa arvon kN- tai kNm -yksikössä, mutta olen kääntänyt arvon N/mm² -yksikköön helpottamaan vertailua

** Ohjelma ilmoittaa minimiarvon millimetreissä

Välipohjapalkin tuloksissa on osittain merkittäviä eroja laskentaohjelmien välillä. Käsinlaskentaan verrattuna suurimmat erot tulevat taipumissa ja värähtelytarkastelussa, koska käsinlaskennassa palkki on laskettu yksiaukkoisena pitemmän jännevälän mukaan. Käsinlaskennan tuloksista 1 kN pistekuormasta aiheutuvan taipuman arvo on jätetty pois taulukosta 4, koska se ei ole vertailukelpoinen tulos. Käsinlaskettuna taipuman tulokseksi saatiin käyttöasteena 226 % (Liite 2, s. 8), mikä eroaa huomattavasti *Finnwoodin* ja *PupaX5:n* antamista arvoista. Vertailukelpoisen tuloksen olisi saanut ainoastaan toisella statiikkaohjelmalla. Koska värähtelyn ja taipuman lasken-

taa on oikaistu käsinlaskennassa muuttamalla palkki yksiaukkoiseksi, niin värähtelyn arvot on vielä tarkastettu KPM-Engineering Oy:n käytössä olevilla *Liittolaatta-* ja *Värähtely-Exceleillä*. Kyseisiä Excel-laskentapohjia ei tässä työssä tutkita, joten niiden antamat tulokset on lisätty liitteisiin (Liite 2, s. 9-10). Pienet eroavaisuudet tukireaktioissa, mitoittavissa leikkauksen ja momentin arvoissa, taivutus- ja leikkauskestävyyksissä johtuu todennäköisesti siitä, miten laskentaohjelmat pyöristävät arvoja, tai niiden laskentatavasta. Käsinlaskennan tulokset reunatukien tukireaktioissa ja tukipainekestävyyksissä eivät ole vertailukelpoisia, koska hyötykuorman liikkuvuutta ei ole otettu huomioon. Hyötykuorman liikkuvuus aiheuttaa reunatuille suurempia kuormituksia. Taulukossa 4 ”EI” tarkoittaa sitä, että ohjelma ei joko ilmoita tai laske ollenkaan kyseistä arvoa.

Finnwood 2.3 SR1:n mitoittavien leikkauksen, momentin, taivutus- ja leikkauskestävyyden arvot vastaavat käsinlaskennalla saatuja arvoja. Suurimmat erot ovat värähtelymitoituksen arvoissa, koska *Finnwoodilla* voi ottaa huomioon poikittaiskoolauksia ja lattialevyjä taivutusjäykkyydessä, mikä vaikuttaa ominaistajuuteen ja 1 kN piste kuorman taipumaan. Ohjelman taivutusjäykkyyden laskentaperiaate ei kuitenkaan täysin selvinnyt tutkimuksessa. *Finnwood* todennäköisesti laskee kaikkien rakenneosien minimi taivutusjäykkyydet yhteen, eikä se ota huomioon mekaanisten liittimien vaikutusta. Tässä esimerkissä on valittu *Finnwoodin* mitoitusasetuksista välipohjapalkin yläpuolelle koolaus 100x22 k300 ja 2x 15 mm lattiakipsilevyt. Alapuolinen koolaus on sahatavaraa 45x45 k400 jaolla. Tukipaineiden arvot eroavat verrattuna käsinlaskennan tuloksiin, koska hyötykuorman liikkuvuutta ei ole otettu huomioon.

PupaX5:n tulokset mitoittavien leikkauksen, momentin, taivutus- ja leikkauskestävyyden osalta ovat samat kuin käsinlaskennan ja esimerkiksi *Finnwoodin* tulokset. Pienet erot saattavat johtua tulosten pyöristystavoista. Värähtelyn tarkastuksessa *PupaX5* ei ota huomioon muita tekijöitä kuin pelkästään välipohjapalkin taivutusjäykkyyden. Ominaistaajuus on todennäköisesti pyöristetty alaspäin, jotta tulos pysyy varmalla puolella. Pistekuorman aiheuttama taipuma on pienempi kuin käsinlaskennan, koska *PupaX5* huomioi kaksiaukkoisuuden vaikutuksen taipumia laskettaessa. Tukipainekestävyyksien arvot ohjelma ilmoittaa tukien vähimmäispituuksina, joten tulokset eivät ole siinä suhteessa vertailukelpoisia.

Jigillä lasketuissa arvoissa on pieniä heittoja taivutuskestävyyden ja leikkauskestävyyden käyttöasteissa. Ohjelma on esimerkiksi pienentänyt taivutuskestävyyden raja-arvoa $f_{m,d}$ vedetyn sauvan vertailupituuden suhteen lasketulla kertoimella k_f . Kertoimella k_f kerrotaan Eurokoodi 5:n mukaan ainoastaan vetolujuuden ominaisarvoa $f_{t,0,k}$.

Leikkauskestävyyden käyttöaste on pienempi verrattuna muihin laskentaohjelmiin, koska *Jigi* vähentää tukien lähellä leikkausvoimaa. Leikkausvoimaa vähennetään tukien vieressä pituuden h eli palkin korkeuden verran. Tällöin mitoittavan leikkausvoiman arvo pienenee vähän (vertaa $0,68 \text{ N/mm}^2 < 0,77 \text{ N/mm}^2$). Värähtelyä, 1 kN:n pistekuorman taipumaa ja tukipainekestävyyksiä *Jigi* ei laske tämän opinnäytetyön aikaisessa versiossa.

3.2.3 Pilari

Pilarin laskentaan on valittu ulkopuolinen pilari mallitalon oikean puolen päädyn terrassilta. Kyseessä on terrassin keskimäinen pilari, jonka korkeus on 2 600 mm. Laskuesimerkissä on kuviteltu tilanne, jossa terrassin pitempi sivu lasitetaan, jolloin keskimäiselle pilarille tulee myös vaakaan tasaista tuulikuormaa. Pilari on tuettu päistään nivelellisesti. Pilari on lasituksella estetty nurjahtamasta heikompaan suuntaan eli y-suuntaan. Kuormitusleveys tuulikuormalle on 3 303 mm ja katolta tulee kuormia $6,18 \text{ m}^2$ alueelta.

Taulukko 5. Pilarin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan

Kuormitukset:		
Omapaino:		$g_k = 0,3 \text{ kN/m}^2$
Lumikuorma ($s_k < 2,75 \text{ kN/m}_2$):		$q_1 = 3,70 \text{ kN/m}^2$
Tuulikuorma:		$q_w = 0,49 \text{ kN/m}^2$
Pilarin mitat ja materiaali:		
Liimapuu (GL32c)	115x180	
Laskennassa käytetyt luokat:		
Seuraamusluokka	CC2	$K_{FI} = 1,0$
Käyttöluokka	2	
Aikaluokka	Hetkellinen	
Maastoluokka	III	

Käsinlaskennassa (Liite 3) tuulikuorma on laskettu Eurokoodi 5 lyhennetyin suunniteluohjeen mukaan. Määrävin aikaluokka tässä tapauksessa on hetkellinen aikaluokka, joten muita aikaluokkia ei ole otettu huomioon vertailussa. Nurjahduskerroin on määritetty Eurokoodi 5 lyhennetyin suunniteluohjeen sivun 27 nurjahduskerroinikäyrän mukaan. Nurjahduspituuden kertoimena on käytetty $L_c = 1,0$. Laskentaohjelmista vertailussa on mukana *Finnwood 2.3 SR1* ja *Jigi 2012*.

Taulukko 6. Pilarin laskentatulokset

Laskentaohjelma:		Finnwood	Jigi 2012	Käsinlasku
Tulokset:		2.3 SR1		
Max normaalivoima (kN)		26,12	26	26,12
Max momentti (kNm)		2,05	2,05	2,06
Nurjahduskerroin		EI	EI	0,90
Puristuskestävyys (N/mm ²)	Tulos	1,26*	1,3	1,26
	Raja-arvo	EI	23,3	21,86
	Käyttöaste	EI	5 %	6 %
Taivutuskestävyys (N/mm ²)	Tulos	3,30*	3	3,32
	Raja-arvo	EI	28,2	32,26
	Käyttöaste	EI	12 %	10 %
Puristus+taivutus ≤ 1	Tulos	0,16	0,17	0,16
	Raja-arvo	1,00	1,00	1,00
	Käyttöaste	16 %	17 %	16 %
Taipuma (mm) W_{inst}	Tulos	1,26	1,3	1,12
	Raja-arvo	8,7	EI	8,67
	Käyttöaste	15 %	EI	13 %

* Ohjelma ilmoittaa arvon kN- tai kNm -yksikössä, mutta olen kääntänyt arvon N/mm² -yksikköön helpottamaan vertailua

Pilarin laskentatuloksissa *Finnwood* antaa lähes samat arvot kuin käsinlasku. Ohjelma ei ilmoita käyttämäänsä nurjahduskerrointa, vaikka laskennassa huomioikin nurjahduksen. Tuloksista voidaan päätellä, että nurjahduskerroin on suurin piirtein sama kuin käsinlaskemalla saatu kerroin. *Finnwood* ei ilmoita puristuksen ja taipuman raja-arvoja erikseen ellei yhteisvaikutuksen määräävä kuormitustapaus ole myös yksistään näiden osalta mitoittava.

Jigin versiossa ei vielä ole nurjahdustarkastelua, joten se osaa tällä hetkellä ainoastaan laskea normaalivoiman ja taivutuksen kestävyudet erikseen. Taulukkoon 6 olen yhdistänyt hetkellisen aikaluokan puristuksen ja taivutuksen kestävyyksien arvot. Tästä syystä *Jigin* laskentatulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia muiden tulosten kanssa.

3.2.4 Jäykistävä päätyseinä

Jäykistyslaskentaan on valittu pohjakuvasta katsottuna vasemman puoleisen päädyn seinä. Laskuissa tarkastellaan seinälle tulevaa vaakaleikkausvoimaa, kapasiteettia, ja ankkurointia. Esimerkissä ei ole laskettu koko talon jäykistyslaskelmia, vaan pelkistetään yhden seinän jäykistys. Valittu päätyseinä on 8 390 mm pitkä ja jäykistävinä levyinä on sisäpuolen 13 mm paksu erikoiskova Gyproc-kipsilevy. Seinän runko on

C24 lujuusluokiteltua sahatavaraa. Tuulikuorma on määritetty käyttämällä Eurokoodi 5 lyhennettyä suunnitteluohjetta. Ensimmäisen kerroksen jäykistävien seinien on pysyttävä ottamaan vastaan katolle, 2. kerroksen ja noin puolet 1. kerroksen seinäalueelle tulevasta kuormasta. Oletuksena on, että yläpohja ja välipohja ovat tarpeeksi jäykkiä siirtääkseen vaakakuormat jäykistävälle seinille.

Taulukko 7. Jäykistävän päätyseinän lähtötiedot Eurokoodi 5 mukaan

Kuormitukset:	
Tuulikuorma:	$W_d = 5,66 \text{ kN/m}$
Materiaalit ja mitat:	
Seinän runkopuu C24	42x256
GEK 13 kipsilevy	13x1 200x2 650
Ruuvi QTR29	4,2x29
Lankanaula	3,4x100
Laskennassa käytetyt luokat:	
Seuraamusluokka	CC2 $K_{FI}=1,0$
Käyttöluokka	1
Aikaluokka	Hetkellinen
Maastoluokka	III

Ehjiä eli täysleiveitä (1 200 mm) kipsilevyjä seinän sisäpuolella on 5 kappaletta. Laskelmassa huomioon otetaan vain näiden levyjen kapasiteetit. Liitinväli levyissä on 100 mm kauttaaltaan. Tuloksia vertaillaan KPM-Engineering Oy:n omaan *EC Jäykistys-Excellin*.

Taulukko 8. Jäykistävän päätyseinän laskentatulokset

Laskentaohjelma:	EC Jäykistys-Excel	Käsinlaskenta
Tulokset:		
Seinän päähän tuleva piste-kuorma F_d (kN)	18,60	21,08
Kipsilevyn ja ruuvien kapasiteetti liitinvälillä 100 (kN)	5,04	4,98
Seinän leikkausvoimakkestävyys (kN)	25,16	24,90
Mitoitusehto (%)	74 %	85 %
Lankanaulan 100x3,4 leikkauskestävyys (kN)	0,803	0,8
Naulojen lukumäärä (seinän ankkurointi alajuoksuun)	24 kpl	27 kpl
Naulojen väli (seinän ankkurointi alajuoksuun)	300 mm	300 mm
Noste risteävään seinään (kN)	5,90	6,65
Naulojen lukumäärä (seinän ankkurointi risteävään seinään)	8 kpl	9 kpl
Naulojen väli (seinän ankkurointi risteävään seinään)	300 mm	250 mm

Laskentatavat ovat samat sekä *Jäykistys-Excelissä* että käsinlaskennassa (Liite 4), joten suurin syy taulukon 8 tuloksien heittelyyn on tuulikuorman määrittäminen. Käsinlaskennassa tuulikuorma on määritetty Eurokoodi 5 lyhennetyin suunnitteluohjeen mukaan, joka antaa suuremman kuorman kuin tarkka laskentatapa. *Jäykistys-Excel* sitä vastoin laskee tarkemmin eurokoodin mukaan tuulikuormia, minkä takia rasiutukset eivät ole niin suuria. Laskentapohja esimerkiksi huomioi katolle kohdistuvan tuulikuorman nettopainekertoimen erikseen ja seinille tulevan tuulikuorman nettopainekertoimen erikseen. Jos tuulikuormat olisivat samat, niin taulukon 8 tulokset olisivat lähes identtiset pieniä pyöristyseroavaisuuksia huomioon ottamatta.

3.3 Mitoitustutkimuksen arviointi

Tutkimustuloksista voi hyvin luottavaisin mielin todeta, että tulokset ovat statiikan ja lujuusopin tuloksien osalta varsin yhteneväiset, vaikka laskentamenetelmissä onkin eroavaisuuksia. Prosentuaalisesti erot tukireaktioiden, mitoittavien leikkausten, momenttien, leikkaus- ja taivutuskestävyyksien osalta ovat hyvin pienet kaikkien kolmen laskentaohjelman kesken. Prosentuaalisesti erot pysyvät keskimäärin alle 10 %:n, mikä ei mielestäni ole kovin merkittävää. Käsinlaskentaan verrattuna tulokset ovat

tydyttävästi yhteneväisiä, vaikka käsinlaskentaa on osittain yksinkertaistettu verrattuna todelliseen tilanteeseen. Suurimmat erot ohjelmien välillä tulevat siitä, mitä kaikkea niillä voi laskea tai tutkia.

Tuloksien mukaan eniten eroavaisuuksia on esimerkiksi värähtelyn, taipumien ja tukipainekestävyyksien laskennassa. Varsinkin värähtely tuntuu edelleen aiheuttavan suuria vaikeuksia ohjelmatekijöille. Monet laskentaohjelmat laskevat värähtelyä hyvin yksinkertaistetusti. Tästä syystä ei ole ihme, jos väitetään että eurokoodien myötä välipohjapalkkien poikkileikkaukset ovat suurentuneet. Eroja on myös kiepahduksen tutkinnassa. Kiepahduksen laskenta on oikeastaan pelkästään *Finnwood*-ohjelmassa, koska *PupaX5*:ssä on kiepahduskertoimen laskenta ainoastaan yksiaukkoisille palkeille. Kiepahdustarkastelu on tullut ehkä suurempaan arvoon eurokoodin myötä, joten sitä ei ole vielä kaikki ohjelmakehittäjät ehtineet omaksua ohjelmiinsa.

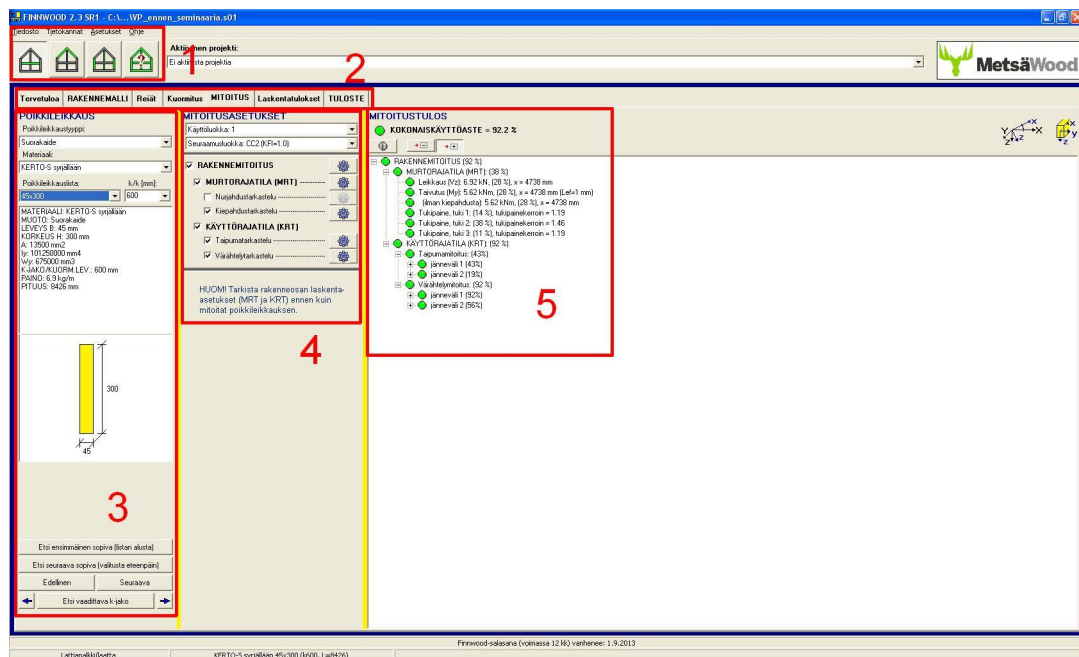
Jotta tulokset olisivat lähes täysin verrattavissa käsinlaskentatuloksiin, olisi kannattanut valita palkeiksi yksiaukkoisia peruspalkkeja. Halusin kuitenkin ottaa määrääviä rakenteita tutkittavaksi, koska harvoin oikeassa suunnittelussa on pelkästään yksiaukkoisia palkkeja. Moniaukkoisten palkkien statiikan laskeminen on vaikeampaa käsin, varsinkin taipumien ja liikkuvan hyötykuorman osalta. Jos tuloksia haluaisi vertailla tarkemmin käsinlaskennalla saatuihin arvoihin, voisi rakenteiden statiikan ratkaista esimerkiksi elementtimenetelmällä laskien. Tämä on kuitenkin verrattain suuri kokonaisuus käsinlaskentaprosessista, joten en edes yrittänyt ratkoa rasisitusvoimia elementtimenetelmällä. Tutkimuksessa ei ollut mukana yhtään yksiaukkoista tai useampi kuin kaksiaukkoista palkkia, joten niiden tutkiminen jää toiseen kertaan. Sen verran mitä tarkastelin laskenta-arvoja ajattelemalla palkkien pisimmät jännevälit yksiaukkoiseksi, niin tulokset vastasivat yhtä tarkasti toisiaan kuin kaksiaukkoisillakin palkeilla. Prosentuaalisesti erot olivat hyvin pieniä yksiaukkoisilla palkeilla. Tietenkin johtuen jo siitä, että statiikan laskeminen yksiaukkoiselle palkille on paljon helpompaa kuin useampiaukkoiselle.

Levyjäykistyksen laskeminen sekä käsin että Excel-laskentapohjalla on hyvin samankaltaista, koska periaatteessa Excelillä laskemista voi verrata käsinlaskentaan. Vaikka tarkoituksena oli lähinnä tutkia laskentapohjan laskentakaavojen ajantasaisuutta, niin oli silti mielenkiintoista huomata, kuinka paljon tuulikuorman tarkka määrittäminen vaikuttaa tuloksiin. Jäykistys-Exceliin on annettu naulojen leikkauskestävyydet suoraan, joten niiden laskuperiaatteet eivät selvinneet kaavoista. Käsinlaskennan naulalaskun tuloksen mukaan kiinnittimet on laskettu todennäköisesti samoilla kaavoilla ja laskentaperiaatteilla kuin käsinlaskussa.

4 LASKENTAOHJELMIEN KÄYTTÖ PUURAKENNESUUNNITTELUSSA

4.1 Finnwood 2.3 SR1

4.1.1 Käyttöliittymä ja käytettävyys



Kuva 7. Metsä Woodin Finnwood 2.3 SR1:n käyttöliittymä

Finnwoodin ominaisuudet on jaettu omiin lohkoihin, jotka etenevät loogisessa järjestyksessä. Kun katsoo laskentaohjelman ikkunaa, niin vasemmassa yläreunassa on perinteiset *Windows*-tyyliset valikot, joista voi tallentaa, avata aiempia laskelmia ja muokata tietokantoja ja laskenta-asetuksia. Näiden valikkojen alapuolella on painikkeet (1), joista periaatteessa aloitetaan mitoitus valitsemalla haluttu rakenne joko valmiista laskentamallipohjista, tai käyttäjä tekee oman rakenteen eli vapaan rakenteen. Valitun rakenteen jälkeen avautuu rakennemalli-välilehti, johon syötetään tukien tyypit, jännevälit ja kuormitusleveys. Tästä eteenpäin rakennemalli mitoitetään siirtymällä aina välilehdeltä (2) seuraavalle, kunnes rakenne on mitoitetu. Yllä olevassa kuvassa (Kuva 7.) on "MITOITUS"-välilehti auki, jossa vasemmalla puolella on poikkileikkaukseen liittyvät valinnat (3), keskellä ruutua on mitoitusasetukset (4) ja oikealla puolella mitoitus tulokset (5). Välilehdet (2) on nimetty seuraavassa järjestyksessä: "Tervetuloa", "RAKENNEMALLI", "Reiät", "Kuormitus", "MITOITUS", "Laskentatulokset" ja "TULOSTE". Tämä käyttöjärjestelmän yksinkertaisuus ja järjestelmällisyys mitoituksen etenemisessä on käyttäjäystävällinen ja nopeuttaa suunnittelua.

Valikot ja välilehdet ovat selkeitä ja käyttäjää opastavaa tietoa löytyy jokaiselta välilehdeltä jonkin verran. Käyttöjärjestelmän etuihin voi myös luetella sen, että laskenta-asetusta, kuormaa tai poikkileikkausta muuttamalla ohjelma ottaa huomioon vaikutukset automaattisesti laskelmiin ja tuloksiin. Käyttäjän ei tarvitse erikseen muistaa painaa mitään ”mitoita” tai ”laske” -nappia. Ohjelma on muutenkin suhteellisen helppo oppia käyttämään, kunhan sitä on muutaman kerran testannut ja tutkinut kaikki laskenta-asetukset tarkasti läpi.

4.1.2 Rakenteen mitoittaminen

Finnwoodilla rakenteen mitoittaminen tapahtuu järjestelmällisesti. Kun rakennemalli on luotu eli jännevälit, tuet, kuormitusleveys ja mahdolliset reiät määritelty, niin seuraavaksi käyttäjä antaa rakenteelleen kuormat. Kuormat ja niistä aiheutuvat kuormitusyhdistelmät on valmiiksi luotu riippuen siitä, minkä rakenteen käyttäjä on valinnut rakennemalli-välilehdellä. Jos käyttäjä esimerkiksi on valinnut välipohjapalkin, niin kuormissa on jo valmiiksi omapaino ja hyötykuorma oletusarvoineen. Tämän lisäksi näistä kahdesta kuormasta on muodostettu valmiiksi yleisimmät kuormitusyhdistelmät. Kuormitusyhdistelmissä on mukana myös hyötykuorman liikkuvuudesta aiheutuvat kuormitusyhdistelmät, kun hyötykuorman liikkuvuus on asetettu 0 % suuremmaksi. Kuormia ja kuormitusyhdistelmiä voi myös itse lisätä, mutta silloin rakenne pitää muuttaa rakennemallivälilehdellä vapaaksi rakenteeksi.

Rakenteen varsinainen mitoittaminen tapahtuu mitoitusvälilehdellä, josta on esimerkiksi Kuva 7.) edellisellä sivulla. Mitoitusvälilehdellä valitaan poikkileikkauksen koko ja käytettävät laskentaluokat sekä -asetukset. Poikkileikkausvalikossa (Kuva 7, kohta 3) määritetään poikkileikkaustyyppi, materiaali ja poikkileikkauksen koko. Mitoitusasetukset (Kuva 7, numero 4) pitää käydä erittäin huolellisesti läpi, jotta saa luotettavia tuloksia. Esimerkiksi aina kun ohjelman käynnistää uudelleen on ”RAKENNE-MITOITUS” -kohdassa valittuna asetukset, joiden mukaan rakenneosan omapaino huomioidaan automaattisesti. Jos rakenneosan omapainon on jo ottanut huomioon tasaisessa omapaino-kuormassa, pitää tämä asetus muistaa poistaa. Lisäksi samassa kohdassa on aina oletuksena päällä asetus, joka ottaa huomioon taipuman laskennassa leikkausmuodonmuutoksen vaikutuksen. Jos leikkausmuodonmuutosta ei halua ottaa huomioon, on asetus otettava pois päältä. Leikkausmuodonmuutos suurentaa taipuman arvoja. Testaillemalla saatiin jopa 20 % eroja taipuma-arvoihin yksiaukkoisella palkilla vaihtamalla leikkausmuodonmuutoksen huomioon ottavaa asetusta päälle ja pois. Mitoitusasetuksien nurjahdustarkastelussa on aina oletuksena tar-

kistus nurjahdukselle pystysauvan molempiin z- ja y-suuntiin. Mitoittaessa nurjahdusasetuksista valitaan vain ne suunnat, mitkä pystyvät nurjahtamaan. Mitoitusasetusten kiepahdustarkastelun kohdassa kannattaa perehtyä Eurokoodi 5:n tulkintaan kiepahduksesta, koska muuten asetukset eivät välttämättä avaudu käyttäjälle kovin helposti. *Finnwood* antaa asetusten määrittämiseen tosin pientä helpotusta ohjekirjassaan.

Mitoitusvälilehden yksi tärkeimmistä tarkasteluista on värähtelytarkastus, jos mitoiteetaan välipohjapalkkia. Värähtelytarkastuksen asetuksista voi ottaa huomioon poikittaiskoolauksien ja päällä olevan lattialevyn antaman hyödyn taivutusjäykkyyteen, mikä vaikuttaa välipohjarakenteen ominaistajuuden ja taipuman pistekuormatarkastelun arvoihin. *Finnwood* ei siis täysin noudata värähtelyn osalta yksinkertaistettua Eurokoodi 5 lyhennetyin suunnitteluohjeen mukaista laskentatapaa. Ohjelmassa on huonoa, että valittavia yläpuolisia poikittaiskoolaus ja levy-yhdistelmiä on rajatusti, eikä niitä voi itse lisätä. Sama koskee myös alapuolisia poikittaiskoolauksia. Värähtelyasetuksiin voi myös ilmoittaa yläpuolisen huoneen pisimmän mitan, jolloin ohjelma automaattisesti korottaa taipuman 0,5 mm:n sallittua arvoa. Alle kuuden metrin huoneimitat vaikuttavat taipuman sallittuun arvoon korottavasti. Korotuskerroin k määräytyy suoraan kirjan *RIL 205-1-2009* kuvan 7.2 mukaan. *Finnwood* käyttää ominaistajuuden laskennassa rakenteen hyötykuorman pitkäaikaisosuuden pinta-alayksikön massana oletusarvoa 30 kg/m^2 . Eurokoodi 5 lyhennytyssä suunnitteluohjeessa ohjeistetaan käyttämään arvoa, joka lasketaan kaavasta $0,3 \cdot q_k$. Muihin värähtelyn laskenta-asetuksien määrittämiin voi perehtyä samaisen asetusikkunan info-paneelistä.

Mitoitusvälilehden viimeinen eli oikeanpuoleinen alue (Kuva 7, numero 5) kertoo mitoituksen tulokset. Ohjelma ilmoittaa käyttöasteella ja vihreällä pompulalla, jos mitoitusohjeet täyttyvät ja punaisella pompulalla, jos mitoitusohjeet eivät täyty. Jos mitoitusohjeet eivät täyty, käyttäjän tarvitsee vain poikkileikkausvalikosta klikata "Etsi seuraava sopiva"-näppäintä, jolloin ohjelma automaattisesti etsii valitun materiaalin mukaan kestävä poikkileikkauksen. Käyttäjä voi myös itse valita haluamansa seuraavan poikkileikkauksen. Poikkileikkauksia voi lisätä eri materiaaleille, jos sopivaa ei löydy valmiiksi listasta. Lisääminen on yksinkertaista, koska valitun materiaalin poikkileikkaukselle tarvitsee antaa vain leveys ja korkeus. Poikkileikkausten mittojen syöttämisessä saattaa olla tiettyjä reunaehtoja materiaalista riippuen. Esimerkiksi liimapuulle pienin sallittu poikkileikkauksen korkeus on 180 mm johtuen liimapuulamelleille määrätystä leveydestä, joka on 45 mm.

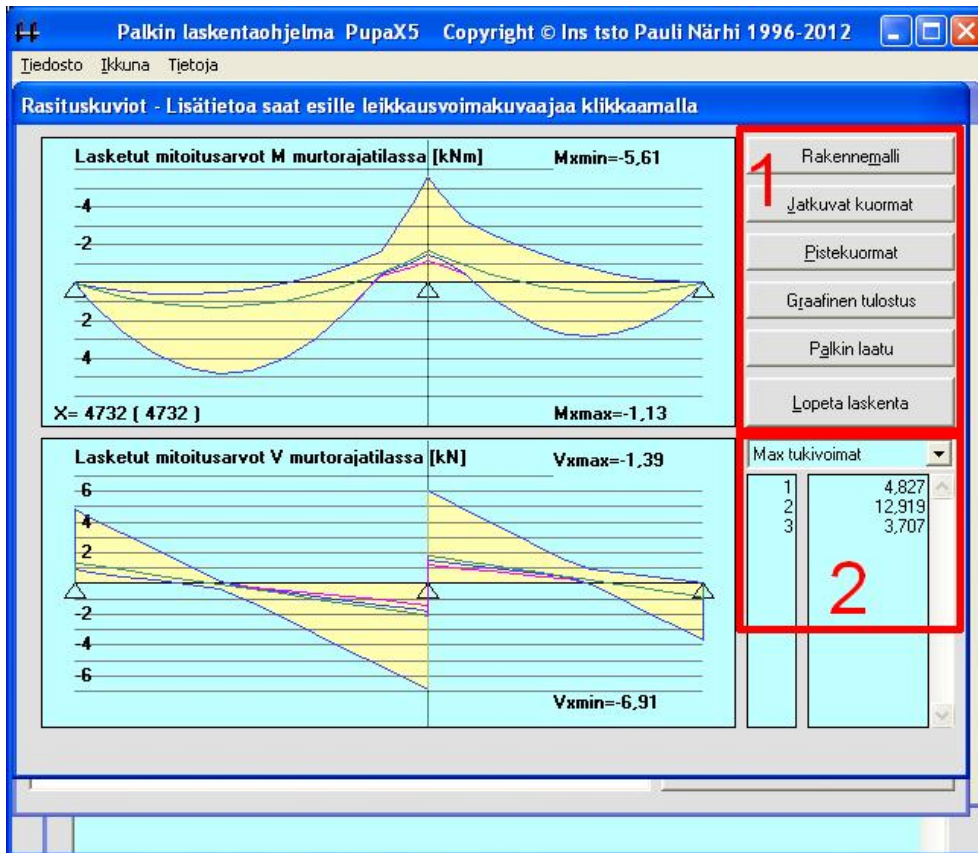
4.1.3 Tulokset

Finnwoodissa laskennan tuloksia voi tarkastella oikeastaan kolmessa eri kohdassa. Heti mitoitusvälilehdeltä näkee palkin käyttöasteet, ja siinä myös ilmoitetaan lasketut tulokset. Lisäksi tuloksia voi tarkastella laskentatulokset-välilehdellä, jossa on esitetty laskentatulosten kuvat ja käyrät. Ohjelma piirtää leikkausvoimakuvan, momenttikäyrän ja taipuman käyrän. Kuvia ja käyriä voi tarkastella haluamassaan kuormitusyhdistelmässä.

Lopullista raporttia voi tarkastella tuloste-välilehdeltä ja siitä on helppo tulostaa haluamansa tiedot. Raportissa on ilmoitettu projektitiedot, rakennetiedot, kuormitukset, kuormitusyhdistelmät, mitoitus-tiedot, reiät, tukireaktiot ja muut huomiot. Tulostesivun vasemman reunan valikosta voi rajata tulosteen sisältöä, jolloin kaikkea ei aina tarvitse tulostaa. Ohjelma osaa myös tulostaa suoraan *PDF*:ksi, jolloin erillistä *PDF*:n tulostusohjelmaa ei tarvita.

4.2 *PupaX5*

4.2.1 Käyttöliittymä ja käytettävyys

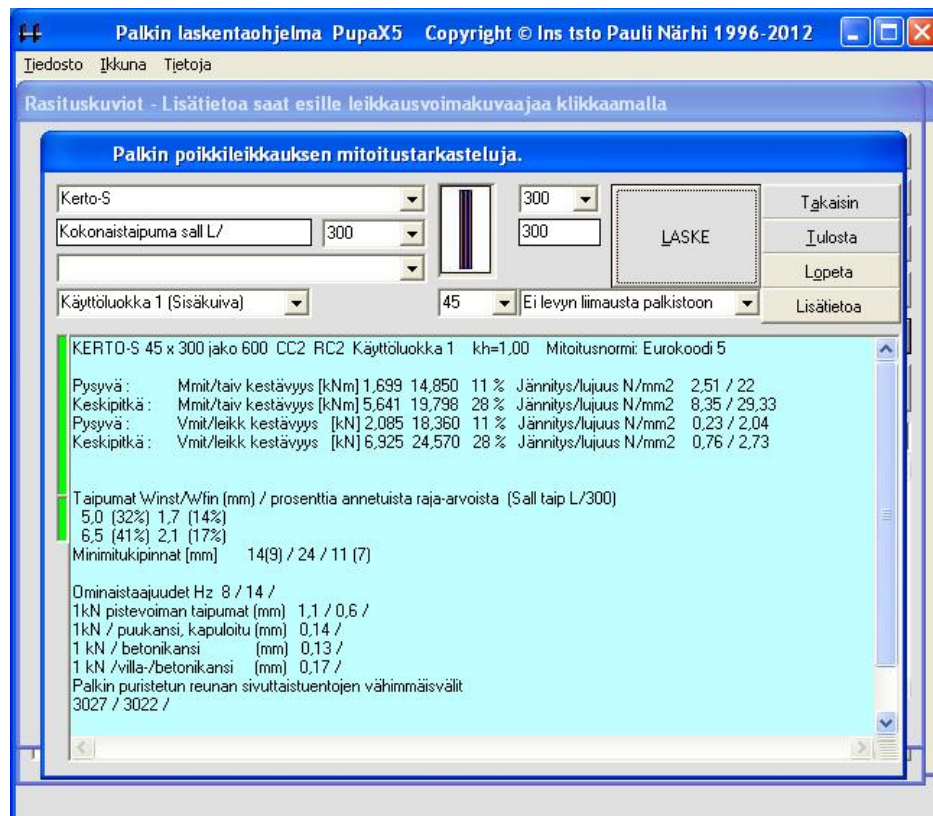
Kuva 8. Pauli Närhen *PupaX5*:n käyttöliittymä

Pauli Närhen suunnittelema ja tekemä *PupaX5* on yksinkertaisella käyttöjärjestelmälään hyvä. Ohjelma on todennäköisesti koodattu *Visual Basicilla*, ja ohjelmasta on haluttu tehdä mahdollisimman yksinkertainen ja helppokäyttöinen apuohjelma palkkien mitoitukseen. Kuvassa 8 näkyy ohjelman päävalikko, josta palkin mitoitus etenee valintapalkkien (1) kautta. Valintapalkkia klikkaamalla aukeaa aina uusi ikkuna pääikkunan sisään. Mitoitus alkaa syöttämällä ensiksi jännemitat ja kuormitusleveys kohdassa "Rakennemalli", jonka jälkeen kuormat ja kuormatyytit annetaan kohdissa "Jatkuvat kuormat" ja "Pistekuormat". Varsinainen mitoitus tapahtuu lopuksi kohdassa "Palkin laatu", jossa valitaan haluttu poikkileikkaus, materiaali ja käyttöluokka. Ohjelma näyttää statiikan tulokset päävalikon vasemmalla puolella kuvaajina ja oikealla puolella tuloksina (Kuvan 8 numero 2). Ohjelman käyttöjärjestelmästä on hyvä muistaa, ettei se osaa automaattisesti muuttaa kuormien pituuksia, jos jännevälejä pidentetään. Jos jännevälejä pienennetään, niin silloin kuormien pituudet automaattisesti lyhenee oikeaksi. Jännevälien muuttamisen jälkeen on suositeltavaa aina tarkastaa annetut kuormat ennen mitoituksen jatkamista.

PupaX5:llä voi edelleen mitoittaa Suomen rakennusmääräyskokoelman B10:n ja B7:n normin mukaan, mikä on hyvä asia. Vanhalla normilla mitoittaminen onnistuu helposti valitsemalla kuormitusyhdistelmien kertoimien alarajavälikosta kerroin 1,2, jolloin ohjelma muuttaa automaattisesti käyttöjärjestelmänsä mitoittamaan B10:n ja B7:n mukaan. Ominaisuuden avulla voi vertailla mitoitus tuloksia RakMk:n ja Eurokoodin välillä.

Ohjelma on melko helppo oppia käyttämään silloin, jos on saanut ohjeistusta jo kokenemmalta käyttäjältä. Huonona puolena on, että *PupaX5* ei kovin paljoa ohjaa käyttäjää. Aktivoimalla joitakin ikkunoita ja painamalla *F1*-näppäintä tietokoneen näppäimistöstä saa esiin vähän lisätietoa ja apua. Varsinaista ohjekirjaa ohjelman käyttöön ei ole, joten itseopiskelua siinä mielessä vaaditaan. Ohjelman selkeys ja yksinkertaisuus kuitenkin helpottavat itseopiskelua.

4.2.2 Rakenteen mitoittaminen



Kuva 9. Pauli Närhen *PupaX5*:n mitoitusikkuna

Kuvassa 9 on esitetty *PupaX5*:n mitoitus tarkastelu. Kuva on otettu kuvankaappauksella tässä työssä tarkastelussa olleesta välipohjapalkista. Kuten kuvasta näkyy, niin

mitoitusta varten ohjelman valikoista annetaan haluttu materiaali, lopputaipuman sallittu raja-arvo, käyttöluokka sekä palkin leveys ja korkeus.

Materiaaleissa on yleisimmät lujuusluokitellut sahatavarat, *Kerto-S*, liimapuutyypit ja yleisimmät teräsprofiilit. Materiaaleja ei voi lisätä ohjelmaan, mutta tavallisimmissa tapauksissa valmiiksi ohjelmoidut materiaalit riittävät hyvin ainakin pientalosuunnittelun tarpeisiin. *PupaX5*:n hyvä ominaisuus on palkin poikkileikkauksen vapaa annettavuus. Ohjelman alavetovalikoissa on valitulle materiaalille yleisimpiä leveyksiä ja korkeuksia valmiiksi, mutta käyttäjä voi myös itse määrittellä vapaasti palkin leveyden ja korkeuden. Ohjelma osaa ottaa huomioon nämä epäviralliset leveydet ja korkeudet automaattisesti laskelmissaan. Poikkeustapauksena ovat jotkin teräsprofiilit, joissa annetaan pelkästään joko leveys tai korkeus.

Palkin leikkauskestävyyteen vaikuttavan kertoimen k_{cr} voi valita mitoitusvälilehdellä. Kerrointa käytetään halkeamien huomioon ottavan palkin tehollisen leveyden b_f laskemiseen. Tehollinen leveys otetaan huomioon leikkauskestävyyden laskennassa. Kerroin k_{cr} on sahatavaralla ja liimapuulla 0,67 ja muilla standardin *EN 13986* mukaisilla puutuotteilla 1,0. Ohjelma ottaa huomioon myös materiaalista ja palkin korkeudesta määräytyvän kertoimen k_h , jolla voi korottaa tai pienentää taivutuslujuuden ominaisarvoa. Tukipainetarkastelun *PupaX5* tekee ilmoittamalla minimitukipintojen pituuden, jonka se laskee suoraan eurokoodin ja tukipainekestävyyden määrittämiseksi asetettujen reuna-ehtojen mukaisesti. Ominaisuus on hyvä, koska käyttäjä näkee heti, paljonko palkin pitää vähintään olla tuen päällä.

Yhtenä huonona puolena *PupaX5*:ssä on kiepahdustarkastelun puuttuminen lähes kokonaan. Ohjelmassa otetaan kantaa kiepahduksen laskemiseen lisätietoaikkunassa, jossa käyttäjää muistutetaan huomioimaan kiepahduksen vaikutus palkin taivutuskestävyyteen. Ohjelma myös laskee valmiiksi taivutuskestävyyttä pienentävän k_{crit} -kertoimen yksiaukkoisille palkeille. Moniaukkoisille palkeille tätä kerrointa ei voi kuitenkaan suoraan soveltaa. Mielestäni kerroin olisi voitu integroida vähentämään suoraan kiepahduksesta johtuvaa taipumalujuuden arvoa, jos kiepahdus on mahdollista.

Taipumat *PupaX5* mitoittaa normaalisti jännevälien, tukien määrän ja pahimman kuormitustapauksen mukaan. Ohjelma osaa ottaa automaattisesti huomioon niin sanotun shakkivaikutuksen eli hyötykuorman liikkuvuuden moniaukkoisten palkkien jänneväleillä. Hyötykuorman liikkuvuus otetaan huomioon vain silloin, jos käyttäjä on määrännyt jollekin kuormalle liikkuvuutta. Liikkuvuuden voi määrittellä kuormia annet-

taessa. Kuormia voi antaa pelkästään kolmea erilaista, mikä on aika rajattua. Omanpainon lisäksi voi antaa vain kahta muuttuvaa kuormaa. Toinen muuttuvista kuormista käsitellään aina 100 % liikkuvana, ja toiseen kuormaan käyttäjä voi itse määrätä kiinteän osuuden prosenttimäärän. *PupaX5*:ssä ei voi lisätä kuormatyyppejä tai kuormitusyhdistelmiä, joten ohjelma mitoittaa ainoastaan valmiiksi ohjelmoiduilla kuormatyypeillä ja aikaluokilla. Kuormien kertoimet ja mitoittettava aikaluokka on sidottu siihen, mikä kuormatyyppi on valittu kuormia annettaessa.

Värähtelyä *PupaX5* ei kovin monimutkaisesti osaa laskea. Ominaisaajuuden laskennassa ohjelma ottaa huomioon vain palkin taivutusjäykkyyden tai taivutusjäykkyyttä voi lisätä päälle liimatulla levyllä. Värähtelyn yksinkertaisen laskutavan vuoksi, sitä ei kannata käyttää värähtelyn tutkinnassa. Ohjelma tarkastaa myös 1 kN pistekuorman vaikutuksen taipumaan, mutta laskennassa ohjelma ottaa huomioon vain pelkän palkin tai palkin ja liimatun levyn taivutusjäykkyyden ja palkin jatkuvuuden tukien yli. Lisäksi ohjelma laskee taipumatarkastelun kapuloidulle puukannelle, betonikannelle ja villa-/betonikannelle.

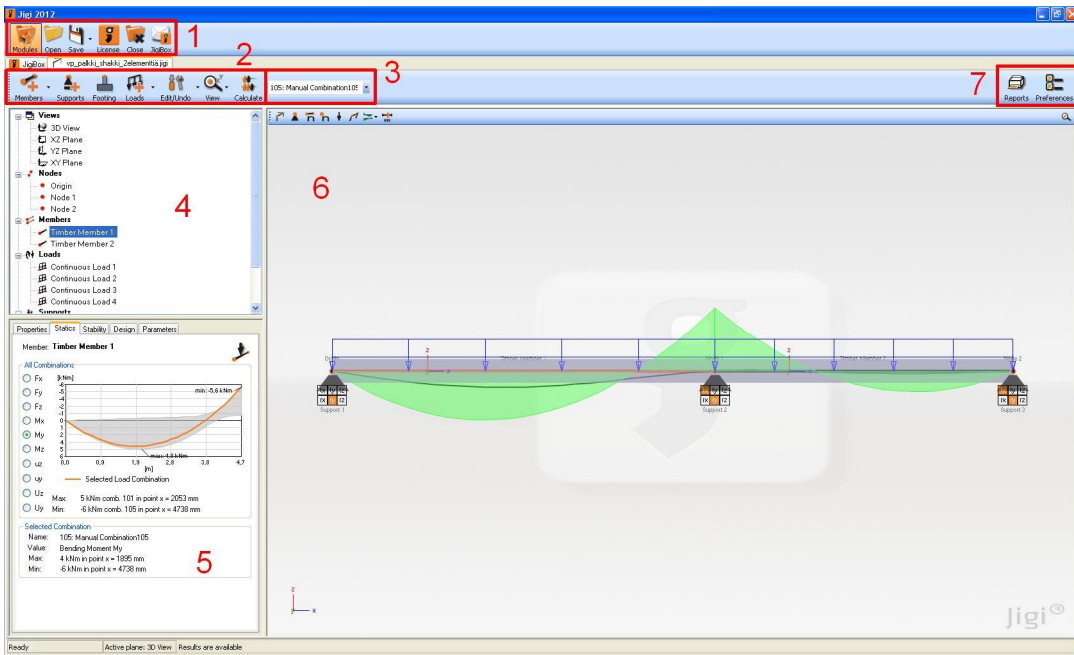
4.2.3 Tulokset

PupaX5:ssä tuloksia voi tarkastella niin sanotussa pääikkunassa, jossa näkyy leikkausvoima ja momenttikäyrä sekä statiikan laskentatulokset. Varsinaisia mitoittustuloksia tarkastellaan ”Palkin laatu”-ikkunassa, jossa määritetään poikkileikkaus ja materiaali. Lasketut arvot on annettu selkeästi käyttöasteineen määräävässä aikaluokassa, jolloin erehdysten tekeminen mitoittustulosten tarkastelussa jää vähäiseksi.

Ohjelmasta saa tulostettua kahta eri raporttityyppiä: numeerisen tulosteen ja graafisen tulosteen. Nimensä mukaisesti numeerisessa tulosteessa on koottu kuormien tiedot ja statiikan ääriarvot pelkästään lukuina. Graafisessa tulosteessa on leikkausvoimakuvan ja momenttikäyrän lisäksi ilmoitettu mitoittavat tukivoimat, leikkauskestävyyden ja taivutuskestävyyden tulokset sekä taipumien ja ominaisaajuuden arvot. Molemmat tulosteet ovat vain yhden sivun mittaiset, joten niitä on helppo lukea ja käyttäjä saa nopeasti selville haluamansa laskentatulokset.

4.3 Jigi 2012: Puumoduuli

4.3.1 Käyttöliittymä ja käytettävyys



Kuva 10. A&S Virtual Systems Oy:n *Jigi 2012* käyttöliittymä

Jigin käyttöliittymän ulkoasu muistuttaa isojen kansainvälisten ohjelmavalmistajien laskentaohjelmia. *Jigin* kansainvälisyys ilmenee jo käyttöliittymästä, jonka kieli on englanti. Hyvänä puolena meille suomalaisille on kuitenkin se, että raportin kielen voi vaihtaa asetuksista suomeksi. Tätä asetusta ei tosin voi tallentaa, joten kieli on muistettava vaihtaa aina ohjelman käynnistyttyä uudelleen.

Jigin valikot (Kuva 10. Kohdat 1 ja 2) muistuttavat hieman *Autodeskin* nykyisin käytämiä *Ribbon*-valikoita, esimerkiksi ohjelmissa *AutoCAD* ja *Revit*. *Jigin* valikot ovat selkeät ja ne etenevät loogisessa järjestyksessä mitoituksen kannalta. Käyttäjä määrittää ensiksi rakennemallin ja käytettävät materiaalit. Seuraavaksi valikoista määrätään tuet ja kuormat. Viimeisestä ”Calculate”-napista (2) ohjelma laskee luodun rakenteen. Koska *Jigi* on elementtimenetelmällä laskeva laskentaohjelma, voi rakenteet olla paljon monimutkaisempia kuin muissa tässä työssä tarkasteltavina olevissa laskentaohjelmissa.

Muita tärkeitä kohtia käyttöliittymässä on alasvetovalikko (3), josta valitaan mitoittava kuormitusyhdistelmä, vasemmalla oleva rakenneosalista (4), johon *Jigi* luettelee kaikki rakenteen näkymät, solmut, elementit, kuormat ja tuet. Vasemmalla alhaalla on ikkuna (5), jossa esimerkiksi muokataan rakenneosalistan (4) ominaisuuksia, arvoja,

laskenta-asetuksia ja katsellaan laskentatuloksia. Numerolla 6 on itse rakennemalli ikkuna, johon rakenne luodaan, ja jossa sitä voi tarkastella jopa 3D näkymässä. Myös tähän rakennemallikuvaan saa joitakin rasiuskuvioita näkymään, kun rakenne on laskettu ja mitoitettu. Viimeisenä valikkona on kohta 7 (Kuvassa 10), josta pääsee luomaan laskennan raporttia ja muokkaamaan ohjelman yleisiä asetuksia.

Jigi on aluksi melko haasteellinen oppia käyttämään. Varsinaista kunnon ohjekirjaa ohjelmalle ei ole lukuun ottamatta lyhyttä käyttäjäopasta. Oppaassa neuvotaan lyhyesti mitoituksen aloitus, mutta sen syvällisempiä ominaisuuksia siinä ei käsitellä. *Jigin* kehittäjä A&S Virtual Systems Oy tosin järjestää usealla paikkakunnalla niin ilmaisia kuin maksullisiakin *Jigi*-koulutuksia, joten ehkä siitä syystä monen sivun opuksia ei ole haluttu julkisesti levittää. Ohjelmassa itsessään on melko vähän ohjeistavaa tietoa, joten ilman koulutusta *Jigin* käyttö vaatii melko paljon itseopiskelua.

Koska *Jigillä* voi suunnitella kehärakenteita ja muuten kolmiulotteisia rakenteita, on se käyttöjärjestelmältään raskas normaalien yksittäisten rakenteiden, kuten esimerkiksi yksittäisen palkin mitoittamiseen. Ohjelmaan voisi lisätä myös nopeuttavia ominaisuuksia varsinkin tukien laittamiseen. Kun rakenteelle määritetään tukia, täytyy suunnittelijan tietää tarkasti, mitkä vapausasteet pitää olla lukittuna ja mitkä vapaana. Tämä tuottaa varsinkin vasta valmistuneille suunnittelijoille ylimääräistä päänvaivaa, koska koulussa on totuttu käyttämään niveltukia ja kiinteitä niveltukia. Niinpä ohjelmassa olisi hyvä olla valmiiksi yleisimpiä tukia, joihin olisi vapausasteet määritetty valmiiksi. Nämä voisivat olla vaikka erillisenä osana "Supports" eli tukivalikossa. Vapausasteiden määrääminen ei välttämättä ole vaikeaa kokeneelle suunnittelijalle, mutta pikatuot nopeuttaisi kuitenkin yksinkertaisen rakenteen suunnittelua. Kaiken kaikkiaan *Jigin* käyttöliittymä on kuitenkin hyvä, jossa varsinkin 3D-näkymä saa plus-saa. Muutamien käyttäjää helpottavien ominaisuuksien jälkeen *Jigistä* saisi vielä käyttäjäystävällisemmän. Lisäksi ohjelman sisäistä opastusta voisi lisätä.

4.3.2 Rakenteen mitoittaminen

Jigissä mitoittaminen alkaa solmujen sijoittamisella, minkä jälkeen halutulla materiaali- ja poikkileikkaus-elementillä valitaan elementin alkava ja päättyvä solmu. Elementtisauvojen määrä kannattaa miettiä tarkasti, koska *Jigi* tarkastelee rakennetta sitä tarkemmin, mitä useampia elementtejä luodaan. Esimerkiksi tässä työssä tutkittava kaksiaukkoinen välipohjapalkki jaettiin kahteen elementtisauvaan, joiden liittyvä sol-

mupiste oli keskimmaisella tuella. Näin rakenteesta saatiin tarkempaa tietoa, ja lisäksi jako oli aiheellista myös kuormitusyhdistelmien takia, josta lisää myöhemmin.

Rakennemallin luonnissa valitaan materiaali, poikkileikkaus ja lujuusluokka ennen elementtisauvojen asettamista. *Jigissä* on yleisimpiä poikkileikkauksia syötetty valmiiksi, mutta väistämättä tulee tilanne, että haluttua poikkileikkausta ei materiaalis-
tasta löydy. Itse ohjelmaan ei ole koodattu sisäistä työkalua, jolla voisi automaattisesti lisätä omia poikkileikkauksia, mutta niitä voi kuitenkin lisätä pienen kiertotien kautta. *Jigin* asennuskansiossa on nimittäin tekstitiedosto "TimberSections.txt", johon voi lisätä puun poikkileikkauksia. Tämä tosin vaatii uuden rivin lisäämisen tekstitiedoston, johon pitää osata ilmoittaa oikeassa järjestyksessä noin 17 kyseisen poikkileikkauksen ominaisuustietoa, mikä saattaa tuottaa vaikeuksia.

Kuormia ja mittoja lisätessä kannattaa ottaa huomioon muutamia asioita. Kun antaa mitä tahansa desimaalisia arvoja *Jigissä*, niin kannattaa ne antaa aina pilkulla. Joitakin, esimerkiksi jänneväliden mittoja tai tasaisen kuorman arvoja voi laittaa pisteen kanssa. Joissakin tapauksissa ohjelma kuitenkin antaa virheilmoituksen, kun käyttäjä pistettä erottamaan desimaalia. Käyttäessäni ohjelmaa huomasin, että joka tapauksessa on turvallisempaa antaa desimaalisia arvoja pilkun kanssa. Näin toimittuna ohjelma ei enää tehnyt virheilmoitusta ollenkaan. Kysyin tästä asiasta myös ohjelman tekijöiltä, joiden mukaan virhe johtuu maakohtaisista asetuksista. Suomen maa-asetusten mukaan ohjelmassa käytetään pilkkua erottamaan desimaalit. Muuta huomioitavaa kuormien syöttämisessä on se, että *Jigi* ei automaattisesti laske kuormitusyhdistelmiä liikkuvalla kuormalle. Jos liikkuvuuden haluaa ottaa huomioon, joutuu käyttäjä tekemään itse kuormitusyhdistelmät ja mahdolliset uudet kuormitustapaukset. Tämä ei sinänsä ole kovin vaikea prosessi, koska *Jigiin* voi lisätä kuormatyyppejä ja kuormitusyhdistelmiä, mutta se vie joka tapauksessa suunnittelijan aikaa.

Rakenteen laskennan ja mitoituksen jälkeen saatuja tuloksia voi tarkastella Kuvan 10 kohdassa 5. *Jigillä* laskettaessa on oltava erittäin tarkka siitä, että muistaa valita kuormitusyhdistelmien alavetovalikosta (Kuva 10, kohta 3) oikean kuormitusyhdistelmän, ennen kuin alkaa tarkastella tuloksia. Sama pätee myös aikaluokan ja käyttöluokan valinnalle, jotka pitää muistaa vaihtaa elementin "Parameters" kohdasta. Jos näitä ei muista vaihtaa oikeaksi, voi vahingossa tarkastella aivan väärää kuormitustilannetta väärässä aika- ja käyttöluokassa. Taipumien tarkasteluun pitää taas muistaa vaihtaa käyttörajatilan kuormitusyhdistelmä alavetovalikosta (Kuva 10, kohta 3), muulloin tulokset näyttävät isompia taipumia, jos vahingossa tarkastelee murtorajatilan kuormilla. Tähän ominaisuuteen olisi hyvä saada lisää automatiikkaa, koska ny-

kyinen käytäntö lisää virhetulkintojen mahdollisuutta. Taipuman tarkastelussa ohjelma ilmoittaa ainoastaan hetkellisen taipuman w_{inst} -arvon, joten suunnittelijan täytyy laskea lopullinen taipuma $w_{net,fin}$.

Muita huomioon otettavia asioita *Jigin* puurakennemoduulissa on eurokoodissa määriteltujen, varmuutta tuovien kertoimien laskentatavat. Esimerkiksi laskiessani tässä työssä käsitellyjä rakenteita huomasin, että *Jigi* kertoo taivutuslujuuden ominaisarvoa vetolujuuden ominaisarvoon vaikuttavalla kertoimella k_t , joka määräytyy materiaalista ja sen vertailupituudesta riippuen. Eurokoodin mukaan vetolujuuden ominaisarvoa $f_{t,0,k}$ voi korottaa tai alentaa tällä kyseisellä kertoimella, mutta *Jigi* näyttää soveltavan tätä myös taivutuslujuuden ominaisarvoon $f_{m,k}$. *Jigin* tekijöistä Joni Hynynen kommentoi, että kerroin otetaan huomioon yhdistettyjen jännitysten takia. Tämä ei kuitenkaan selitä, miksi kerrointa käytetään myös pelkästään taivutetussa palkissa. Vaikka taivutetussa palkissa on myös vetoa palkin alapinnassa, ei normi varsinaisesti kehota käyttämään vetolujuuden kerrointa taivutetuissa palkeissa. Joka tapauksessa suurimmassa osassa laskentatapauksia kertoimen vaikutus on varmuutta lisäävä, joten ei siitä sinänsä ole haittaa. Ohjelmaan on tehty myös muita varmuutta lisääviä ominaisuuksia kertoimien avulla. Liimapuun korkeudesta johtuvan taivutuslujuuden ominaisarvoa muuttava kerroin k_n ei näyttäisi saavan yli 1 arvoa, jos laskennallisesti kerroin olisi yli 1,1. Eurokoodi 5:n mukaan kerroin saa olla enimmillään 1,1, jolloin kyseistä arvoa saisi käyttää, jos laskennallinen arvo menee yli 1,1. Ohjelma kuitenkin pyöristää arvon tässä tapauksessa 1:seen. Arvon ollessa yli 1, sillä on positiivinen vaikutus taivutuslujuuteen ja kertoimen ollessa alle 1, sillä on negatiivinen vaikutus taivutuslujuuteen.

Tämän työn aikaisessa *Jigin* puumoduulin versiossa ei pysty laskemaan värähtelyä, kiepahdusta, nurjahdusta tai tukipainekestävyyksiä. *Jigissä* on vielä paljon puutteita puurakennemitoituksen osalla, mutta on otettava huomioon puumoduulin keskeneräisyys. Tekijät päivittävät ohjelmaa koko ajan, ja A&S Virtual Systemsin toimitusjohtajan Juha Airolan mukaan seuraavassa *Jigin* päivitysversiossa on jo mukana värähtelylaskenta ja nurjahdus puurakenteiden mitoituksessa.

4.3.3 Tulokset

Tuloksia voi tarkastella elementtien ikkunoissa, niin kuin aiemmin kerroin. Varsinaiset tulosteet saa kuitenkin kohdan 7 (Kuva 10.) "Reports" painikkeesta. Raportin kieleksi voi valita suomen kielen. Raportti-ikkunasta voi valita, mitä haluaa tulostaa: statiikka-

jäykistykseen laskeminen tarvitsee. Esillepano on mielestäni hyvä ja selkeä. Ohjelmassa on käyttäjää ohjeistettu erivärisillä kentillä, joihin joko syötetään arvoja tai johon arvot ilmaantuvat automaattisesti käyttäjän asettamien arvojen mukaan. Valkoisissa soluissa on yleensä ilmoitettu tulokset. Laskentapohjassa on käytetty hyvin alavetovalikoita nopeuttamaan laskentaan vaikuttavien valintojen tekemistä. Alavetovalikoista valitaan esimerkiksi jäykistävät levyt ja kiinnitintyyppit.

Varsinaista ohjetta en löytänyt *EC Jäykistys-Excelille*, mutta koska laskentapohja on tehty yrityksessä, niin työntekijät kyllä saavat tarvittaessa ohjeistusta muilta. Lisäksi kyseisestä Excel-laskentapohjasta on myös tehty opinnäytetyö, joten siitäkin saa tarvittaessa apua ohjelman laskentaperiaatteisiin. Ohjelmaa oppii joka tapauksessa käyttämään muutaman kerran jälkeen.

4.4.2 Levyjäykistykseen mitoitus

Levyjäykistykseen laskeminen aloitetaan syöttämällä laskentapohjaan rakennuksen mittoja, pinta-aloja ja rakennukselle tulevia kuormia, joiden mukaan laskentapohja laskee automaattisesti rakennukselle vaakaan tulevan kokonaistuulikuorman. Tuulikuorman laskennassa laskentapohja ottaa huomioon tarkasti tuulen painekertoimet. Seuraavaksi laskentapohjaan syötetään levyryhmä, jäykistävien seinien mitat sekä päädyt sivuseinän suunnassa. Jäykistäville seinille määrätään alavetovalikoista jäykistävät sisä- ja ulkolevyt sekä näiden liitinvälit. Laskentapohja osaa ottaa huomioon levyparien kapasiteettien eroavaisuudet, kuten eurokoodissa on määritelty. Viimeiseksi annetaan levyjen määrä seinässä. Ohjelmassa on kaksi saraketta, johon levymääriä voi antaa sen mukaan, onko levy leveydeltään täysi vai leikattu. Leikatun levyn pitää olla välillä 600 - 1 200 mm.

Kun kaikki yllä olevat toimenpiteet on suoritettu, niin laskentapohja laskee jäykistäville seinille tulevat kuormat, niiden kapasiteetit, ankkuroitavat nosteet risteäviin seiniin ja vapaisiin päihin sekä tarvittavat liittimet ja niiden jaot. Liittimiä voi valita vapaasti sen mukaan, minkä liittimien kapasiteetteja ohjelmaan on syötetty. Liittimet ja syötetyt kapasiteetit käyttäjä näkee erilliseltä välilehdeltä.

Ylä- ja välipohja täytyy olettaa tarpeeksi jäykiksi, jotta ne siirtävät vaakavoimia jäykistäville rakenteille. Vain tällöin laskentapohjan antamiin tuloksiin voi luottaa. *Jäykistys-Excel* ei laske tuulesta aiheutuvaa vääntöä, minkä voidaan olettaa vaikuttavan rakennukseen, kun ylä- ja välipohja toimivat tarpeeksi jäykkinä rakenteina. Ohjelmassa on

huonoa, että se ei tarkasta esimerkiksi seinien reunimmaisten tolppien kestävyyttä. Suunnittelijan täytyy erikseen tarkistaa kestäkö reunatolpat niihin kohdistuvaa nostetta tai puristusta.

4.4.3 Tulosteet

Erillistä tulostetta laskentapohjasta ei saa muuta kuin tulostamalla mitoitussivun (Kuva 11.). Ohjelmaan olisi voitu lisätä vielä selkeämpi tulostesivu erilliselle välilehdelle. Nykyään on yleistä, että rakennusvalvonnat haluavat laskentatuloksia myös jäykistyslaskelmista, joten selkeämpi tulostesivu olisi etuna.

5 OHJELMIEN VERTAILUA PIENTALOSUUNNITTELUSSA JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

5.1 Ohjelmien soveltuvuus ja käytettävyys

Pientalojen rakennesuunnittelussa on tärkeää, että apuna käytettävät laskentaohjelmat ovat mahdollisimman nopeita ja helppokäyttöisiä. Suunnitteluaikeiden ollessa hyvin lyhyitä on näillä ominaisuuksilla tärkeä merkitys. Kaikki tarkastelemani ohjelmat soveltuvat pientalosuunnitteluun käyttöliittymänsä ja nopeutensa puolesta, jotkin paremmin kuin toiset.

Finnwood 2.3 SR1 on suhteellisen helppokäyttöinen järjestelmältään ja käyttäjäystävällinen uudemmallekin käyttäjälle. Se ei palkkia laskettaessa ehkä päihitä *PupaX5*:n nopeaa tuloksen saantia, mutta on ominaisuuksiltaan ehdottomasti *PupaX5*:ttä ja *Jigin* puumoduulia parempi. *Finnwoodin* ulkoasu on selkeä ja käyttöjärjestelmä on suunniteltu siten, että rakenteen mitoittaminen etenee loogisessa järjestyksessä. Tämä ei sinänsä ole mikään ylivoimainen etu verrattuna muihin tutkittuihin laskentaohjelmiin, koska myös niissä on selkeät ulkoasut ja rakenteen mitoittaminen etenee loogisesti.

PupaX5 on erittäin nopeakäyttöinen pikaiseen palkin laskentaan, mutta monipuolisuutta siinä ei ole. Pauli Närhi onkin nimenomaan suunnitellut ohjelman palkkien laskentaan. *PupaX5* on ehkä helpoin oppia käyttämään verrattuna muihin tarkastelemiini ohjelmiin. Tämä johtuu käyttöjärjestelmän yksinkertaisuudesta, koska ohjelman soveltuvuutta muiden rakenteiden laskentaan ei ole tarvinnut ottaa huomioon.

Jigin puumoduuli jää hieman jälkeen käyttöjärjestelmän nopeudessa ja helppokäyttöisyydessä verrattuna muihin tässä työssä tutkittuihin laskentaohjelmiin. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että *Jigistä* on haluttu tehdä kehärakenteita laskeva apuväline rakennesuunnitteluun. Pientalosuunnittelussa harvoin tarvitsee laskea kehärakenteita, joten siksi ohjelma vaikuttaa raskaalta tähän käyttötarkoitukseen. Käyttöjärjestelmässä on lisäksi joitakin asioita, jotka pitää ottaa tarkasti huomioon, kuten aiemmin mainitsemani pisteen ja pilkun käyttö desimaalisten arvojen syötössä. *Jigissä* on kuitenkin potentiaalia, kunhan ohjelma koko ajan jatkaa kehitystään. Toiveena olisi, että tekijät ottaisivat huomioon myös pientalosuunnittelijat ja yksinkertaistaisivat muutamia asioita käyttöjärjestelmässä. Tämän voisi toteuttaa esimerkiksi tekemällä erillisen yksinkertaistetun moduulin *Jigiin*.

KPM:n *Jäykistys-Excellä* ei voi suoraan verrata muihin työssäni tutkimiin laskentaohjelmiin, koska se on tehty Excelillä ja siten vastaa periaatteessa käsinlaskentaa. Laskentapohjassa on ainoastaan rakennuksen jäykistykseen laskentaa, joten vertailukohdaksi ei ole muihin ohjelmiin. Käyttäjäkokemukseni perusteella totean kuitenkin, että ohjelma on ominaisuuksiltaan tarpeet täyttävä ja ulkoasu on tehty selkeäksi ja ymmärrettäväksi. Käyttäjän ymmärrystä laskentaperiaatteista auttaa se, että kaikki kaavat ovat näkyvillä Excelin soluissa. Laskentaperiaatteita ei olisi niin helppo ymmärtää koodatuissa ohjelmissa.

5.2 Laskenta ja mitoitus

Laskenta- ja mitoitusominaisuuksiltaan kaikki tutkittavat ohjelmat eroavat toisistaan melko paljon. Eurokoodin myötä puurakenteiden mitoitukseen on tullut uusia varmuuskertoimia ja rakenteen tarkastelukohteita. Suunnittelijan tai käyttäjän odotukset ovat, että laskentaohjelmat ottavat huomioon kaikki nämä kertoimet ja tarkastelukohdet. Eurokoodilla laskevien laskentaohjelmien vertailussa tärkeään asemaan nousee nimenomaan niiden laskennalliset ominaisuudet. Pientalosuunnittelun näkökulmasta nämä ovat yksi- tai moniaukkoisten palkkien, pilarien ja jäykistykseen tarkastelu niin, että eurokoodin määräämät vaatimukset täyttyvät. Ohessa tutkin *Finnwoodin*, *PupaX5:n* ja *Jigin* puumoduulin ominaisuuksia ja viimeisessä kappaleessa KPM:n *EC Jäykistys-Excellä*.

Palkkien laskennassa eurokoodi kehottaa tutkimaan leikkaus-, taivutus- ja vetolujuuden, taipuman, kiepahduksen ja välipohjapalkeissa lisäksi värähtelyn. Lisäksi materiaalista riippuvia kertoimia saa käyttää eri ominaislujuuksien varmuuksien kertomiseen normaalien varmuus-, aikaluokka- ja käyttöluokkakertoimien lisäksi. Tässä työssä tutkittavista ohjelmista vain *Finnwood 2.3 SR1* saa kiitettävän arvosanan ottaessaan huomioon lähes kaikki mainitsemani tarkastelut. *Jigissä* ja *PupaX5:ssä* on osittain puutteita eurokoodin mukaisessa palkin mitoittamisessa, jolloin niitä käytettäessä tarvitaan muita ohjelmia tai omia taulukkolaskentapohjia täydentämään mitoitusta. Ohjelmista ainoastaan *Finnwood* tutkii normaalien rasiuskestävyyksien lisäksi myös kiepahduksen ja värähtelyn laajemmin kuin muut tarkasteltavat ohjelmat. *PupaX5:ssä* on periaatteessa kiepahdustarkastelu yksiaukkoisille palkeille, mutta se laskee ainoastaan kiepahduskertoimen, jonka voi halutessaan ottaa huomioon taivutuslujuuden arvossa. Moniaukkoisien palkkien laskenta on riskialtista, koska kiepahdusta ei voi laskea niille. Värähtelyn ominaistajuuden tarkastus *PupaX5:ssä* on pelkästään palkille, eikä muita vaikuttavia tekijöitä huomioida. Niinpä jos *PupaX5:tä* käyttää välipoh-

japalkkien laskentaan, on suositeltavaa käyttää lisänä myös jotakin tarkemmin värähtelyä laskevaa laskentaohjelmaa. *Jigin* puumoduulista vastaavasti puuttuu kokonaan nurjahdus, kiepahdus- ja värähtelytarkastus, vaikka *Jigin* seuraavassa versiossa nurjahdus ja värähtely pitäisi jo olla. Tältä osin *Jigi* vaatii lisätutkintaa aina sitä mukaa, kun uusi versio ilmestyy.

Ohjelmat ottavat huomioon myös varmuuskertoimia vähän eri tavalla keskenään. Kaikki tarkasteltavat ohjelmat *Jäykistys-Excellä* lukuun ottamatta laskevat materiaaleista riippuvia kertoimia, jotka vaikuttavat materiaalin lujuusominaisuuksiin. Kaikki kolme ohjelmaa *Finnwood*, *PupaX5* ja *Jigi* laskevat esimerkiksi palkin korkeuden vaikutuksen taivutuslujuuteen. Laskuja tehdessäni huomasin, että ainakin *Jigi* ei päästä joissakin tapauksissa kertoimien arvoa yli yhden, jolloin ne lisäävät lujuutta. Lisäksi kertopuupalkkia mitoittaessa huomasin, että *Jigi* alentaa taivutuslujuuden ominisarvoa vetolujuuden ominisarvoon vaikuttavalla kertoimella k_t , joka voidaan laskea materiaaliikohtaisen sauvan vertailupituuden mukaan. Periaatteessa Eurokoodi 5:ssä näin ei kehoiteta k_t -kerrointa käyttämään. Pientalojen suunnittelussa näillä kertoimilla ei ole sinänsä kovin suurta vaikutusta, koska kuormat ovat pieniä.

Pilarien mitoitus ei ole näistä kolmesta ohjelmasta järkeä tehdä tällä hetkellä kuin *Finnwoodilla*. *PupaX5* ei laske pilareita ja *Jigin* puumoduuli ei laske nurjahduksen vaikutusta, jolloin mitoitus ei sinänsä ole eurokoodin normien mukainen. Pilarin mitoitus on toteutettu *Finnwoodissa* hyvin ottaen huomioon pientalorakentamisen. Valmiita rakennemalleja on normaalille nivelelliselle pilarille ja runkotolpalle, mitkä yleensä ovat tärkeitä pientalojen rakennesuunnittelussa. *Finnwoodilla* voi myös ottaa huomioon kuormien epäkeskisyyden vaikutuksen mitoitukseen pilareita laskettaessa. Pientaloissa pilarien päähän kohdistuu monesti epäkeskisyyttä, kun paksun liimapuupilarin päälle lovetaan reunaan esimerkiksi kertopuupalkki.

Kuormien määrittäminen rakenteelle on tärkeää, ja sen jälkeen niiden kertominen eurokoodin mukaisilla varmuuskertoimilla aika- ja käyttöluokan mukaan. Eurokoodilla laskettaessa on yleistä, että tarkasteltavia kuormitusyhdistelmiä saattaa normin mukaan kertyä jopa kymmeniä, joista todellisuudessa vain osa muodostuu mitoittaviksi. Pientalosuunnittelussa hyvin useasti mitoittavat aikaluokat ovat joko keskipitkä tai hetkellinen aikaluokka. Näiden perusteella tarvitsee käyttää oikeastaan muutamaa kuormitusyhdistelmää. Nämä yhdistelmät on koodattu valmiiksi kaikkiin kolmeen laskentaohjelmaan. Tarvittaessa omia kuormitusyhdistelmiä pystyy tekemään *Finnwoodissa* ja *Jigissä*, mutta ei *PupaX5:ssä*. Tämä ei sinänsä haittaa *PupaX5:n* käytettävyyttä, koska se ottaa huomioon yleisimmät kuormitusyhdistelmät, ja osaa myös au-

tomaattisesti laskea hyötykuorman liikkuvuudesta aiheutuvat muutokset rasituksiin. *PupaX5*:ssä kuormitusyhdistelmät määräytyvät sen mukaan, minkä luokan käyttäjä on valinnut kuormalle. *Finnwood*issa ainoastaan valmiilla rakenteilla voi muokata kuormaluokkia ja kuormitusyhdistelmiä. *Jig*issä vastaavasti voi luoda omia kuormaluokkia ja kuormitusyhdistelmiä vapaasti. Tämä koskee myös hyötykuorman liikkuvuuden määrittämistä, koska sitä ohjelma ei ota automaattisesti huomioon kuormitusyhdistelmissä. Niinpä se vie suunnittelu-aikaa, kun käyttäjä joutuu luomaan kuormitusyhdistelmät joka kerta uudestaan.

Pientalojen rakenteiden suunnittelussa on myös tärkeää, mitä poikkileikkauksia mitoituksissa käytetään. Varsinkin talotehtaille suunniteltaessa suunnittelijan yleensä täytyy käyttää niitä sahatavaroita, liimapuita ja kertopuita, mitä talotehdas toimittaa. Tämän takia on tärkeää, että suunnitteluohjelmalla voi laskea kaikenlaisia poikkileikkauksia. Palkin mitoittamisessa *PupaX5*:n ehdoton vahvuus on poikkileikkauksen määrittäminen vapaasti materiaalista riippumatta, jolloin mitoitus onnistuu millä tahansa puutavaralla. Sama pätee *Finnwoodiin*, jossa voi lisätä materiaalikirjastoon omia poikkileikkauksia. Omille poikkileikkauksille annetaan leveys, korkeus ja vierekkäisten palkkien määrä. *Jigissäkin* poikkileikkauksia voi lisätä, mutta niiden lisääminen on vaikeaa. *Jigin* tiedostojuuressa olevan poikkileikkaustekstitiedoston päivittäminen ei ole yksinkertaista, ja vaatii käyttäjältä esimerkiksi poikkileikkauksen painon, ympärysmittan, korkeuden, leveyden, alan, jäyhyysmomentin, jäykkyyshmomenttien ja plastisen jäykkyyshmomentin ilmoittamista.

Rakennuksen levyjäykistyksen laskeminen KPM:n *EC Jäykistys-Excelillä* on pientalo-suunnittelun näkökulmasta tarpeeksi riittävää, vaikka ohjelmaa voisi vielä kehittää esimerkiksi laskemaan väännön aiheuttaman vaikutuksen seinien kuormituksiin. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole yksiselitteistä laskentatapaa levyjäykistykselle, ja saatavilla olevia ohjelmia on vähän. Talotehtailta ja suunnittelutoimistoilla saattaa olla omia jäykistyslaskentapohjia, mutta varsinaisiin eurokoodi-laskentaohjelmiin jäykistystarkastelua ei ole sisällytetty. Niinpä tämän hetkinen KPM:llä käytössä oleva laskentapohja on tarpeeksi välttävä jäykistyslaskujen tekoon. Jäykistystarkastelun tulokset kelpaavat todisteeksi rakennusvalvontaan, jos niitä vaaditaan. Jatkotutkittavaksi jää, onko tyyppihyväksytyjä eurokoodilla laskettuja levykapasiteetteja tullut lisää, joita ei vielä laskentapohjassa ole. Lisäksi *Jäykistys-Exceliin* voisi laskea lisää liittintyyppisiä, joita voi käyttää levyjen kiinnitykseen tai seinien ankkuroimiseen. Ohjelma kuitenkin kattaa nykyiselläänkin yleisimmät levyt ja kiinnittimet.

Vertailukohdetta KPM:n *Jäykistys-Excelille* tässä työssä ei ole, koska levyjäykistystä laskevia ohjelmia ei julkisesti ole saatavilla. SKOL ry (*Suunnittelu- ja konsulttialojen liitto ry*) on julkaissut yhden levyjäykistys-Excelin, mutta sitä en sisällyttänyt tähän tutkielmaan. Nopealla vilkaisulla sekään ei olisi ollut täysin vertailukelpoinen KPM:n Excelin kanssa, koska siinä mitoitetaan vain yhden levyn jäykistystä.

5.3 Tulosten vertailua

Mitoitustutkimuksessa mielestäni selvisi hyvin, mitä eroja on laskentatuloksellisesti ohjelmissa. Koska suurin osa statiikan ja rasisituslukuksien arvoista olivat lähes samat, voidaan olettaa, että perusmitoituksessa ei ole kovin suuria eroja ohjelmistojen välillä. Prosentuaalisesti alle 10 %:n jäävät eroavaisuudet eivät ole merkittäviä paitsi ihan raja-tapauksessa, jolloin rakenteen käyttöaste lähentelee joka tapauksessa 100 %. Sen sijaan suurimmat eroavaisuudet tulosten perusteella tulivat värähtelymitoituksessa. Välipohjapalkin värähtelyn laskentatuloksissa esimerkiksi *Finnwoodin* ja *PupaX5:n* ilmoittamissa taipumien arvoissa on 45 %:n ero ja lisäksi ominaistajuudessa noin 10 %:n ero. Paikoittain tämä voi tarkoittaa jopa sitä, että pelkästään *PupaX5:llä* laskettaessa välipohjarakenteiden korkeudet ja palkkijaot saattavat olla kaksinkertaiset siitä, mitä tarkempi tarkastelu antaisi.

Pilarin tai tolpan mitoitukseen ohjelmista soveltuu vain *Finnwood* ja *Jigi*, joista *Jigistä* puuttuu nurjahdustarkastelu. Niinpä tarkkaa vertailukohdetta *Finnwoodille* ei ole, ja tulosten mukaan se on ainut vaihtoehto pilarin mitoittamiselle tässä työssä tutkittavista laskentaohjelmista.

Kattoristikon kannatinpalkkien tulokset olivat kaikilla ohjelmilla lähes samat. Tämän mukaan kaikkia kolmea ohjelmaa voisi käyttää pientalosuunnittelussa kattopalkin laskentaan, joten ohjelmien ominaisuudet ja käytettävyys ratkaisee. Mielestäni kattopalkin mitoituksessa kätevin ohjelma on *PupaX5*, mutta tähän saattaa myös vaikuttaa aiempi kokemukseni *Pupaxin* käytöstä. On myös otettava huomioon, että *PupaX5* ei laske kiepahdusta kuin yksiaukkoiselle palkille, joten suunnittelijan on aina muistettava tarkastaa kiepahdus vielä erikseen.

Jos vertaillaan ohjelmien tulosteiden esitystapaa, niin ehdottomasti joutuisin on katsoa tulokset palkin laskennassa *PupaX5:stä* tai *Finnwoodista*. *Jigin* käyttämä tyyli ei ole oikein sovelias nopeaan tulosten tarkasteluun. Minusta kuormitusyhdistelmän valitseminen *Jigissä* aiheuttaa turhaan väärrien tulkintojen mahdollisuutta. *Jigi* kyllä

ilmoittaa tuloksien maksimi- ja minimiarvot elementtisauvan statiikkaikkunassa, mutta varsinkin taipuman tapauksessa tämä maksimi-arvo on murtorajatilan isoimman kuormitustapauksen mukaan. Tällöin taipuma-arvo on huomattavasti oikeaa käyttörajatilan arvoa isompi. Pienellä parannuksella *Jigin* tulosteiden pikatarkastelusta saisi käyttökelpoisemman ja nopeamman. Nyt tulosten tarkastelussa pitää olla tarkka, että tarkastelee oikeaa kuormitusyhdistelmää ja käyttöluokkaa.

EC Jäykistys-Excelin antamissa tuloksissa eniten vaikuttaa se, miten eurokoodin mukainen tuulikuorma lasketaan. Käsinlaskulla sain tulokseksi karkean arvion tuulikuormasta, ja laskentapohja laskee sitä vastoin tuulikuorman tarkemmin. Voidaan kuitenkin todeta, että erot ovat järkeenkäyviä ja tuloksissa paikoittain olevat vähän reilun 10 %:n erot on selitettävissä tuulikuorman laskentatavalla.

5.4 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää sopivimmat eurokoodia käyttävät laskentaohjelmat pientalojen rakennesuunnittelun avuksi. Tutkimuksessa kerättyjen tietojen perusteella parhaimmat apuvälineet puupalkin laskentaan ovat *PupaX5* ja *Finnwood 2.3 SR1*, pilarin osalta *Finnwood 2.3 SR1* ja levyjäykistyksen laskennassa KPM:n *EC Jäykistys-Excel* on ajantasainen ja käyttökelpoinen. Välipohjapalkkien suunnittelussa *PupaX5* tarvitsee rinnalle jonkun muun ohjelman, joka tarkastelee paremmin värähtelyn mitoitusta. *Finnwoodissa* värähtelyn voi laskea paremmin, mutta jos sen laskentaan on olemassa vielä tarkempia työkaluja, niin niiden käyttö on suositeltavaa.

Yleisesti ottaen kaikista tässä työssä tutkimistani ohjelmista on jotain hyötyä pientalojen eurokoodisuunnittelussa. Sekoittamalla ominaisuuksia keskenään ja vertailemalla tuloksia saa suunnittelija enemmän varmuutta laskelmilleen. Ominaisuudet paranevat koko ajan, kun ohjelmistokehittäjät ehtivät päivittää ohjelmiaan. Siitä syystä tämän tutkimuksen tiedot vanhenevat nopeasti. Jään mielenkiinnolla odottamaan, mitä kehitystä tapahtuu *Jigin* puumoduulissa, joka vielä tällä hetkellä on sopimaton apuvälineeksi pientalojen puurakennesuunnitteluun. *Jigin* seuraavaan versioon on jo tulossa puristetun sauvan nurjahdustarkastus ja välipohjapalkin värähtelymitoitus, mitkä jäävät valitettavasti tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

6 POHDINTA

Työtä tehdessäni huomasin kuinka paljon vie aikaa tässä työssä tutkittavien ohjelmien tutkiminen. Laskentaohjelmien käyttö ja luottamuksen saanti tuloksiin vie aikaa. Aikaa vie myös opettelu, jos ei ole käytössä kunnan ohjeita. Tutkimusta tehdessä kuitenkin huomasin tutkittavien asioiden huomioon ottamisen helpottuvan sitä mukaa, kun eurokoodisuunnittelu palautui taas mieleen.

Päällimmäisenä tutkimuksesta jäi mieleen se, että laskentaohjelmia käyttäessä pitää tuntea hyvin käytettävä normi ja käytettävän laskentaohjelman laskentaperiaatteet. Kaikkien asetusten tutkiminen on erittäin tärkeää, jotta luotettavaa tietoa saa ohjelmista ulos. Lisäksi sain mielestäni hyvän käsityksen siitä, mihin seikkoihin pitää kiinnittää huomiota uusissa laskentaohjelmissa, ja mitä laskennallisia asioita pitää selvittää ennen kuin voi luottaa laskentaohjelman antamiin tuloksiin. Ajallisesti tämän tutkimuksen paikkansapitävyys ei ole pitkä, ja jatkuvaa lisätutkimusta saatavissa olevista ohjelmista, ja jo tiedossa olevien ohjelmien päivitetystä versioista vaaditaan.

Työ oli mielestäni mielenkiintoinen tehdä ja suhteellisen laaja. Kun aluksi pohdittiin työn toimeksiantajan kanssa aihealaajuutta, oli tarkoitus tutkia kaikkia mahdollisia apuvälineitä pientalosuunnittelun avuksi perustuksien mitoittamisesta kattoristikoiden jäykistykseen asti. Tämä olisi kuitenkin ollut liian laaja aihealue, joten siinä mielessä olen tyytyväinen nykyiseen sisältöön. Työn toteutus oli helppoa, koska käytettävissäni oli täydet versiot kaikista ohjelmista työpaikalla, jossa minulla oli myös mahdollisuus tehdä opinnäytetyötäni.

Käsinlaskujen tulokset eivät kaikilta osin ole vertailukelpoisia ja ne lähinnä auttoivat minua muistuttamaan mieleen eurokoodia, mutta toisaalta valitut rakenteetkin olivat haasteellisia. En tarkoituksella halunnut työssä tutkia pelkästään yksinkertaisia rakenteita kuten yksiaukkoisia palkkeja. Rakenteita olisi voinut yrittää ratkaista elementtimenetelmällä, mutta se olisi vienyt liikaa aikaa. Käsinlaskennan paikoittaisista epätarckuuksista ja laskentaohjelmien tuloksien vertailusta ainakin selviää, mitä eroja tuloksiin tulee laskettaessa yksiaukkoisella tai kaksiaukkoisella palkilla. Myös hyötykuorman liikkuvuuden vaikutus selviää tuloksia vertaamalla.

Toivon tutkimuksestani olevan hyötyä toimeksiantajalle, kun mietitään mitä laskentaohjelmia jatkossakin tullaan käyttämään yrityksen sisällä puurakennesuunnittelussa, ja mistä puurakennesuunnittelun osa-alueista kannattaisi lähteä itse kehittämään

apuohjelmaa tai laskentapohjaa. Itselleni tästä prosessista on ollut todella suuri hyöty ja voin nykyään käyttää varmemmin eurokoodi-laskentaohjelmia. Ohjelmista keräämäni tiedon avulla voin myös opettaa työkollegoita käyttämään eurokoodi-laskentaohjelmia ja tarvittaessa pitämään opetustilaisuuksia sisäisenä koulutuksena.

LÄHTEET

EC5 lyhennetty suunnitteluohje 2011. *Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu Lyhennetty suunnitteluohje*. Julkaisija: Puuinfo Oy.

Eurocodes 2012. Eurokoodit. Eurokoodien tarkoitus [verkkosivu] [viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.eurocodes-online.com/index.php?page=principles-of-the-eurocode>

Eurokoodi help desk 2012a [verkkosivu] [viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi>

Eurokoodi help desk 2012b. Historia [verkkosivu] [viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/Historiaa/contentstausta.htm>

Insinööritoimisto Pauli Närhi. Etusivu [verkkosivu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.inspnarhi.fi/index.htm>

Jigi-Soft 2012a. Etusivu. [verkkosivu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.jigi-soft.fi/fi/etusivu/>

Jigi-Soft 2012b. Moduulit. Statiikka [verkkosivu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.jigi-soft.fi/fi/moduulit/statiikka>

Jigi-Soft 2012c. Moduulit. Puurakenteet [verkkosivu] [viitattu: 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.jigi-soft.fi/fi/moduulit/puurakenteet>

Metsä Wood 2012. Ammattirakentaminen. Finnwood –mitoitushjelma [verkkosivu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.metsawood.fi/ammattirakentaminen/finnwood/Pages/Default.aspx?z=4cf5a322-eaff-4410-ba26-f5dfe385dfee>

Puuinfo. Mikä on Puuinfo? Puuinfon esite [verkkosivu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/>

Puurakenteiden suunnitteluohje: RIL205-1. 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

Seghaier, K. 2008. *Jäykistyslaskentaohjelman muuntaminen Eurokoodin mukaiseksi* Tampereen ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennustekniikka. Tutkintotyö [verkojulkaisu] [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9576/Seghaier.Karim.pdf?sequence=2>

Siikanen, U. 1998. *Puurakennusten suunnittelu*. 5. painos. Helsinki: Rakennustieto Oy.

SKOL ry 2012. Toiminta. Eurocode-laskentapohjat [verkkosivu] [viitattu 6.11.2012] Saatavissa: http://www.skolry.fi/toiminta/tutkimus_ja_kehitys/eurocode-laskentapohjat

KUVALUETTELO

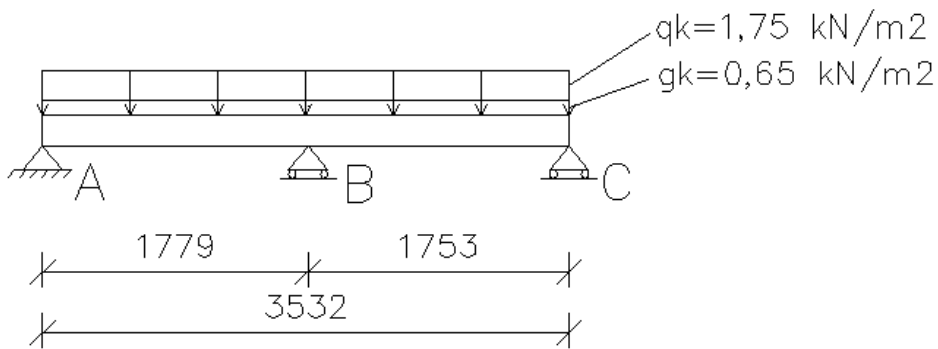
Kuva 1 Mallitalon pohjapiirustus, 1 krs.....	18
Kuva 2 Mallitalon pohjapiirustus, 2 krs.....	19
Kuva 3 Mallitalon julkisivukuvat.....	19
Kuva 4 Mallitalon leikkaus.....	19
Kuva 5 Mallitalon rakenneplaani.....	20
Kuva 6 Mallitalon rakenneleikkaus.....	20
Kuva 7 Metsä Woodin <i>Finnwood 2.3 SR1</i> :n käyttöliittymä.....	32
Kuva 8 Pauli Närhen <i>PupaX5</i> :n käyttöliittymä.....	36
Kuva 9 Pauli Närhen <i>PupaX5</i> :n mitoitusikkuna.....	37
Kuva 2 A&S Virtual Systems Oy:n <i>Jigi 2012</i> käyttöliittymä.....	40
Kuva 2 KPM:n <i>EC5 Jäykistys-Excel</i>	44

TAULUKOT

Taulukko 1 Kattopalkin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan.....	21
Taulukko 2 Kattopalkin laskentatulokset.....	22
Taulukko 3 Välipohjapalkin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan.....	23
Taulukko 4 Välipohjapalkin laskentatulokset.....	25
Taulukko 5 Pilarin lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan.....	27
Taulukko 6 Pilarin laskentatulokset.....	28
Taulukko 7 Jäykistävän päätyseinän lähtötiedot Eurokoodi 5:n mukaan.....	29
Taulukko 8 Jäykistävän päätyseinän laskentatulokset.....	30

Liite 1 Käsineläskentatulokset kattoristikon kannatinpalkista

Vapaakappalekuva:



Kuormat:

Peltikatteen omapaino: $0,3 \text{ kN/m}^2$ Yläpohjan omapaino: $0,35 \text{ kN/m}^2$ Lumikuorma maassa s_k : $2,5 \text{ kN/m}^2$ Lumikuorma katolla ($s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$): $0,8 \cdot \frac{60^\circ - 33,69^\circ}{30} \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 1,75 \text{ kN/m}^2$ Kuormitusleveys: 5269 mm

Omapaino (KRT):

$$G_k = 5,269 \text{ m} \cdot 0,65 \text{ kN/m}^2 = 3,42 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma (KRT)

$$Q_k = 5,269 \text{ m} \cdot 1,75 \text{ kN/m}^2 = 9,22 \text{ kN/m}$$

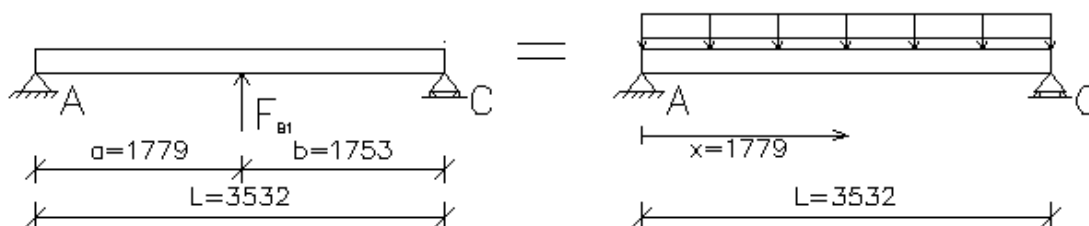
Yhteensä (KRT)

$$q = 3,42 \text{ kN/m} + 9,22 \text{ kN/m} = 12,64 \text{ kN/m}$$

Tukireaktiot ja suurin momentti omasta painosta:

Arvot on ratkaistu kimmoviivateorian ja taipuman avulla. Kaksiaukkoisen palkin keskimäinen tuki poistetaan, jolloin palkki ajatellaan yksiaukkoiseksi palkiksi. Seuraavaksi tarkastellaan syntyneen yksiaukkoisen palkin taipumia tapauksissa, joissa keskimäisen tuen kohdalla on pistekuorma F_{B1} ja toisessa tapauksessa yksiaukkoista palkkia kuormittaa tasainen kuorma. Kun kohdassa a ja x taipuman arvo on nolla, saadaan keskimäisen tuen eli pistekuorman F_{B1} arvo laskettua. Seuraa-

vassa lasken omapainolle ja lumikuormalle omat arvot. Lumikuorma ajatellaan eurokoodin mukaan täysin liikkumattomaksi kuormaksi.



Taipuma v , kohdassa $x=a=1779$ mm

$$v = \frac{G_k}{24 \cdot EI} \cdot (L^3 x - 2Lx^3 + x^4) = \frac{F_{B1} a^2 b^2}{3LEI}$$

$$F_{B1} = \frac{G_k \cdot (L^3 x - 2Lx^3 + x^4) \cdot 3L}{24 a^2 b^2} = \frac{3,42 \cdot (3,532^3 \cdot 1,779 - 2 \cdot 3,532 \cdot 1,779^3 + 1,779^4) \cdot 3 \cdot 3,532}{24 \cdot 1,779^2 \cdot 1,753^2} \text{ kN}$$

$$F_{B1} = 7,55 \text{ kN}$$

Momentti tuen A ympäri myötöpäivään, jolloin voidaan ratkaista tukireaktio F_{C1} :

$$F_{C1} = \frac{\frac{G_k \cdot L^2}{2} - F_{B1} \cdot a}{L} = \frac{\frac{3,42 \cdot 3,532^2}{2} - 7,55 \cdot 1,779}{3,532} = 2,24 \text{ kN}$$

Momentti tuen B ympäri myötöpäivään, jolloin voidaan ratkaista tukireaktio F_{A1} :

$$F_{A1} = \frac{\frac{G_k \cdot L^2}{2} - F_{B1} \cdot b}{L} = \frac{\frac{3,42 \cdot 3,532^2}{2} - 7,55 \cdot 1,753}{3,532} \text{ kN} = 2,29 \text{ kN}$$

Seuraavaksi ratkaistaan momentti M_{B1} tuen B kohdalla:

$$M_{B1} = -\frac{G_k \cdot b^2}{2} + F_{C1} \cdot b = \left(-\frac{3,42 \cdot 1,753^2}{2} + 2,24 \cdot 1,753 \right) \text{ kNm} = -1,33 \text{ kNm}$$

Samat rasituslaskelmat myös lumikuormalle:

$$F_{B2} = \frac{9,22}{24} \cdot (3,532^3 \cdot 1,779 - 2 \cdot 3,532 \cdot 1,779^3 + 1,779^4) \cdot 3 \cdot 3,532 \text{ kN} = 20,35 \text{ kN}$$

$$F_{C2} = \frac{\frac{9,22 \cdot 3,532^2}{2} - 20,35 \cdot 1,779}{3,532} = 6,03 \text{ kN}$$

$$F_{A2} = \frac{\frac{9,22 \cdot 3,532^2}{2} - 20,35 \cdot 1,753}{3,532} \text{ kN} = 6,18 \text{ kN}$$

$$M_{B2} = \left(-\frac{9,22 \cdot 1,753^2}{2} + 6,03 \cdot 1,753 \right) \text{ kNm} = -3,60 \text{ kNm}$$

Kuormitusyhdistelmät (MRT):

Kuormitusyhdistelmästä keskipitkä aikaluokka on määräävin, joten tarkastelen vain sitä.

Seuraamusluokka CC2 $\Rightarrow K_{FI}=1,0$

$$P_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot G_q = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 3,42 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 9,22 \text{ kN/m} = 17,76 \text{ kN/m}$$

$$F_{A,d} = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot F_{A1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot F_{A2} = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 2,29 \text{ kN} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 6,18 \text{ kN} = 11,90 \text{ kN}$$

$$F_{B,d} = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot F_{B1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot F_{B2} = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 7,55 \text{ kN} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 20,35 \text{ kN} = 39,21 \text{ kN}$$

$$F_{C,d} = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot F_{C1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot F_{C2} = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 2,24 \text{ kN} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 6,03 \text{ kN} = 11,62 \text{ kN}$$

$$M_{B,d} = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot M_{B1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot M_{B2} = 1,15 \cdot 1,0 \cdot (-1,33) + 1,5 \cdot 1,0 \cdot (-3,60) = -6,93 \text{ kNm}$$

Tarkastellaan kertopuupalkki 75x200, jossa $b=75\text{mm}$ ja $h=200\text{mm}$.

Käyttöluokka on 1 ja muut tarvittavat kertoimet:

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.43})$$

$$k_{\text{mod}} = 0,8 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.45})$$

$$k_{\text{def}} = 0,6 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.46})$$

$$k_{cr} = 1,0 \quad (\text{EN 1995-1-1 s.35})$$

$$c = 0,58 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.78})$$

$$k_{c,90} = 1,0 \quad (\text{EN1995-1-1 s.38})$$

Taivutuslujuuteen vaikuttava kerroin:

$$k_h = \left(\frac{300}{h} \right)^s = \left(\frac{300}{200} \right)^{0,12} = 1,05 \leq 1,2 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.50})$$

Kertopuun lujuusominaisuudet (RIL205-1-2009 s.50):

$$f_{m,k} = 44 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$f_{v,k} = 4,1 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$f_{c,90,d} = 4 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$E_{mean} = 13800 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$E_{0,05} = 11600 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Taivutuskestävyys:

Taivutusjännitys:

$$\delta_{m,y,d} = \frac{6 \cdot M_{B,d}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 6,93 \cdot 10^6}{75 \cdot 200^2} \text{ N} / \text{mm}^2 = 13,86 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Taivutuslujuus:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{44 \cdot 0,8}{1,2} \text{ N} / \text{mm}^2 = 29,33 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{m,y,d} \leq f_{m,k} \cdot k_h = 13,86 \text{ N} / \text{mm}^2 \leq 29,33 \text{ N} / \text{mm}^2 \cdot 1,05 = 30,80 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad (45 \%)$$

Leikkauskestävyys:

Maksimi leikkausvoima:

$$V_d = F_{A,d} - P_d \cdot a = 11,90 \text{ kN} - 17,76 \text{ kN} / \text{m} \cdot 1,779 \text{ m} = -19,70 \text{ kN}$$

Palkin tehollinen leveys:

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 1,0 \cdot 75 \text{ mm} = 75 \text{ mm}$$

Leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{19700 \text{ N}}{75 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm}} = 1,97 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{4,1 \cdot 0,8}{1,2} \text{ N} / \text{mm}^2 = 2,73 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d \leq f_{v,d} = 1,97 N / mm^2 \leq 2,73 N / mm^2 \quad (72\%)$$

Kiepahduskestävyys:

Tehollinen pituus:

$$l_{ef} = 0,9 \cdot l + 2h = 0,9 \cdot 1779 mm + 2 \cdot 200 mm = 2001,1 mm$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\delta_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} = \frac{0,58 \cdot 75^2}{200 \cdot 2001,1} \cdot 11600 N / mm^2 = 94,56 N / mm^2$$

Palkin suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\delta_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{44}{94,56}} = 0,682$$

Ehto:

$$k_{crit} = 1, \text{ kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \text{ eli toisin sanoen kiepahdus ei vaikuta palkin taivutuslujuuteen}$$

Tukipainekestävyydet:

Tuki 1, leveys $l_1 = 45 mm$:

Tukireaktio:

$$F_d = F_{A,d} = 11,90 kN$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_1} = \frac{11900 N}{75 mm \cdot 42 mm} = 3,78 N / mm^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{1,c,90,ef} = 30 mm + l_1 = 30 mm + 42 mm = 72 mm$$

Tukipaine kerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{1,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} = \frac{72}{42} \cdot 1,0 = 1,71$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 3,78N/mm^2 \leq 1,71 \cdot 4N/mm^2 = 3,78N/mm^2 \leq 6,84N/mm^2 \quad (55\%)$$

Tuki 2, leveys $l_2 = 84mm$

Tukireaktio:

$$F_d = F_{B,d} = 39,21kN$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_2} = \frac{39210N}{75mm \cdot 84mm} = 6,22N/mm^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{2,c,90,ef} = 30mm + l_2 + 30mm = 30mm + 84mm + 30mm = 144mm$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{2,90,ef}}{l_2} \cdot k_{c,90} = \frac{144}{84} \cdot 1,0 = 1,71$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 6,22N/mm^2 \leq 1,71 \cdot 4N/mm^2 = 6,22N/mm^2 \leq 6,84N/mm^2 \quad (91\%)$$

Tuki 3, leveys $l_3 = 84mm$

Tukireaktio:

$$F_d = F_{C,d} = 11,62kN$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_3} = \frac{11620N}{75mm \cdot 84mm} = 1,84N/mm^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{3,c,90,ef} = l_3 + 30mm = 84mm + 30mm = 114mm$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{3,90,ef}}{l_3} \cdot k_{c,90} = \frac{114}{84} \cdot 1,0 = 1,36$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 1,84 \text{ N/mm}^2 \leq 1,36 \cdot 4 \text{ N/mm}^2 = 5,44 \text{ N/mm}^2 \leq 5,44 \text{ N/mm}^2 \quad (34 \%)$$

Taipuma:

Isoin taipuma on ensimmäisellä pisimmällä jännevälillä, jonka sijainnin voi laskea kaavasta:

$$x_2 = a \cdot \sqrt{\frac{F_A - 0,25qa}{3F_A - 0,45qa}} = \left(1,779 \cdot \sqrt{\frac{8,47 - 0,25 \cdot 12,64 \cdot 1,779}{3 \cdot 8,47 - 0,46 \cdot 12,64 \cdot 1,779}} \right) \text{ m} = 0,774 \text{ m} = 774 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma:

$$w_{inst} = \frac{x_2}{EI} \cdot \left[\frac{F_A}{6} \cdot (a^2 - x_2^2) - \frac{q}{24} \cdot (a^3 - x_2^3) \right]; \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{suorakaide poikkileikkaus})$$

$$w_{inst} = \frac{774}{13800 \cdot \frac{200 \cdot 75^3}{12}} \cdot \left[\frac{8470}{6} \cdot (1779^2 - 774^2) - \frac{12,64}{24} \cdot (1779^3 - 774^3) \right] = 1,01 \text{ mm}$$

Omapainon hetkellinen taipuma kuormien suhteella laskettuna:

$$w_{inst,g} = \frac{G_k}{G_k + Q_k} \cdot w_{inst} = \frac{3,42}{3,42 + 9,22} \cdot 1,01 \text{ mm} = 0,273 \text{ mm}$$

Lumikuorman hetkellinen taipuma kuormien suhteella laskettuna:

$$w_{inst,q} = \frac{Q_k}{G_k + Q_k} \cdot w_{inst} = \frac{9,22}{3,42 + 9,22} \cdot 1,01 \text{ mm} = 0,737 \text{ mm}$$

Lopullinen taipuma:

$$w_{net,fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst,g} + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot w_{inst,q} = (1 + 0,6) \cdot 0,273 \text{ mm} + (1 + 0,2 \cdot 0,6) \cdot 0,737 \text{ mm} = 1,26 \text{ mm}$$

Raja-arvot:

$$w_{inst} = \frac{a}{400} = \frac{1779mm}{400} = 4,45mm$$

$$w_{net,fin} = \frac{a}{300} = \frac{1779mm}{300} = 5,93mm$$

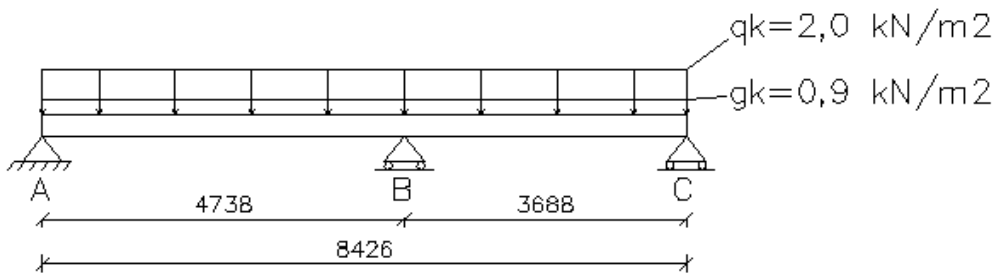
Mitoitusehto:

$$w_{inst} \leq \frac{a}{400} = 1,01mm \leq 4,45mm \quad (23 \%)$$

$$w_{net,fin} \leq \frac{a}{300} = 1,26mm \leq 5,93mm \quad (21 \%)$$

Liite2 Käsinlaskentatulokset välipohjapalkista

Vapaakappalekuva:



Kuormat:

Välipohjarakenteen omapaino:	$0,6 \text{ kN/m}^2$
Kiinteiden väliseinien omapaino:	$0,3 \text{ kN/m}^2$
Hyötykuorma:	$2,0 \text{ kN/m}^2$

Kuormitusleveys/palkkijako: 600 mm

Omapaino (KRT):

$$G_k = 0,6 \text{ m} \cdot 0,9 \text{ kN/m}^2 = 0,54 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma (KRT)

$$Q_k = 0,6 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 1,20 \text{ kN/m}$$

Yhteensä (KRT)

$$q = 0,54 \text{ kN/m} + 1,20 \text{ kN/m} = 1,74 \text{ kN/m}$$

Kuormitusyhdistelmät (MRT):

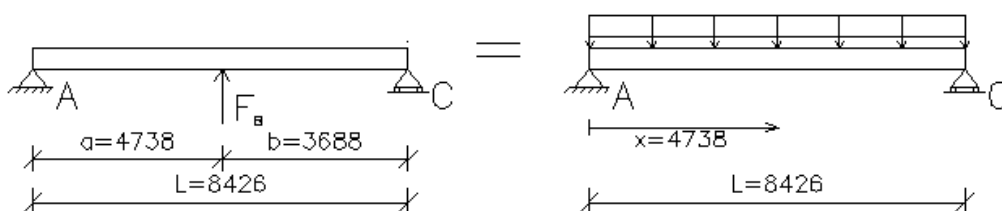
Kuormitusyhdistelmistä keskipitkä aikaluokka on määräävin, joten tarkastelen vain sitä.

Seuraamusluokka CC2 $\Rightarrow K_{FI}=1,0$

$$P_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_k = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 0,54 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \text{ kN/m}^2 = 2,42 \text{ kN/m}$$

Tukireaktiot ja suurin momentti omasta painosta:

Arvot on ratkaistu taipuman avulla. Kaksiaukkoisen palkin keskimmäinen tuki poistetaan, jolloin palkki ajatellaan yksiaukkoiseksi palkiksi. Seuraavaksi tarkastellaan syntyneen yksiaukkoisen palkin taipumia tapauksissa, joissa keskimmäisen tuen kohdalla on pistekuorma F_B ja toisessa tapauksessa yksiaukkoista palkkia kuormittaa tasainen kuorma. Kun kohdassa a ja x taipuman arvo on nolla, saadaan keskimmäisen tuen eli pistekuorman F_B arvo laskettua. Seuraavassa lasken omapainolle ja hyötykuormalle omat arvot. Olen ajatellut hyötykuorman täysin liikkumattomaksi kuormaksi, vaikka eurokoodin mukaan se pitäisi välipohjapalkeissa olla täysin liikkuvaa kuormaa. Yksinkertaistuksen tein helpottaakseni käsinlaskentaa. Kuormat on annettu murtorajatilassa.



Taipuma v , kohdassa $x=a=4738$ mm

$$v = \frac{P_d}{24 \cdot EI} \cdot (L^3 x - 2Lx^3 + x^4) = \frac{F_{B,d} a^2 b^2}{3LEI}$$

$$F_{B,d} = \frac{P_d}{24} \cdot \frac{(L^3 x - 2Lx^3 + x^4) \cdot 3L}{a^2 b^2} = \frac{2,42}{24} \cdot \frac{(8,426^3 \cdot 4,738 - 2 \cdot 8,426 \cdot 4,738^3 + 4,738^4) \cdot 3 \cdot 8,426}{4,738^2 \cdot 3,688^2} \text{ kN}$$

$$F_{B,d} = 12,91 \text{ kN}$$

Momentti tuen A ympäri myötävävään, jolloin voidaan ratkaista tukireaktio $F_{C,d}$:

$$F_{C,d} = \frac{\frac{P_d \cdot L^2}{2} - F_{B,d} \cdot a}{L} = \frac{2,42 \cdot 8,426^2 - 12,91 \cdot 4,738}{8,426} = 2,94 \text{ kN}$$

Momentti tuen B ympäri myötävävään, jolloin voidaan ratkaista tukireaktio $F_{A,d}$:

$$F_{A,d} = \frac{\frac{P_d \cdot L^2}{2} - F_{B,d} \cdot b}{L} = \frac{2,42 \cdot 8,426^2 - 12,91 \cdot 3,688}{8,426} \text{ kN} = 4,55 \text{ kN}$$

Seuraavaksi ratkaistaan momentti $M_{B,d}$ tuen B kohdalla:

$$M_{B,d} = -\frac{P_d \cdot b^2}{2} + F_{c,d} \cdot b = \left(-\frac{2,42 \cdot 3,688^2}{2} + 2,94 \cdot 3,688 \right) \text{kNm} = -5,62 \text{kNm}$$

Tarkastellaan kertopuupalkki 45x300, jossa $b=45\text{mm}$ ja $h=300\text{mm}$.

Käyttöluokka on 1 ja muut tarvittavat kertoimet:

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.43})$$

$$k_{\text{mod}} = 0,8 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.45})$$

$$k_{\text{def}} = 0,6 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.46})$$

$$k_{cr} = 1,0 \quad (\text{EN1995-1-1 s.35})$$

$$k_{c,90} = 1,0 \quad (\text{EN1995-1-1 s.38})$$

Taivutuslujuuteen vaikuttava kerroin:

$$k_h = \left(\frac{300}{h} \right)^s = \left(\frac{300}{300} \right)^{0,12} = 1,0 \leq 1,2 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.50})$$

lujuusominaisuudet (RIL205-1-2009 s.50):

$$f_{m,k} = 44 \text{N} / \text{mm}^2$$

$$f_{v,k} = 4,1 \text{N} / \text{mm}^2$$

$$f_{c,90,d} = 4 \text{N} / \text{mm}^2$$

$$E_{\text{mean}} = 13800 \text{N} / \text{mm}^2$$

$$E_{0,05} = 11600 \text{N} / \text{mm}^2$$

Taivutuskestävyys:

Taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \cdot M_{B,d}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 5,62 \cdot 10^6}{45 \cdot 300^2} \text{N} / \text{mm}^2 = 8,33 \text{N} / \text{mm}^2$$

Taivutuslujuus:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} = \frac{44 \cdot 0,8}{1,2} \text{N} / \text{mm}^2 = 29,33 \text{N} / \text{mm}^2$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{m,y,d} \leq f_{m,k} \cdot k_h = 8,33 \text{ N/mm}^2 \leq 29,33 \text{ N/mm}^2 \quad (28 \%)$$

Leikkauskestävyys:

Maksimi leikkausvoima:

$$V_d = F_{A,d} - P_d \cdot a = 4,55 \text{ kN} - 12,91 \text{ kN/m} \cdot 4,738 \text{ m} = -6,92 \text{ kN}$$

Palkin tehollinen leveys:

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 1,0 \cdot 45 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$$

Leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{6920 \text{ N}}{45 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}} = 0,77 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{4,1 \cdot 0,8}{1,2} \text{ N/mm}^2 = 2,73 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto:

$$\tau_d \leq f_{v,d} = 0,77 \text{ N/mm}^2 \leq 2,73 \text{ N/mm}^2 \quad (28 \%)$$

Kiepahduskestävyys:

Palkki on täysin estetty kiepahtamasta, joten tarkastelua ei tehdä.

Tukipainekestävyydet:

Tuki 1, leveys $l_1 = 162 \text{ mm}$:

Tukireaktio:

$$F_d = F_{A,d} = 4,55 \text{ kN}$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_1} = \frac{4550 \text{ N}}{45 \text{ mm} \cdot 162 \text{ mm}} = 0,62 \text{ N/mm}^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{1,c,90,ef} = 30mm + l_1 = 30mm + 162mm = 192mm$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{1,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} = \frac{192}{162} \cdot 1,0 = 1,19$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 0,62N/mm^2 \leq 1,19 \cdot 4N/mm^2 = 0,62N/mm^2 \leq 4,76N/mm^2 \quad (13 \%)$$

Tuki 2, leveys $l_2 = 130mm$

Tukireaktio:

$$F_d = F_{B,d} = 12,91kN$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_2} = \frac{12910N}{45mm \cdot 130mm} = 2,21N/mm^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{2,c,90,ef} = 30mm + l_2 + 30mm = 30mm + 130mm + 30mm = 190mm$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{2,90,ef}}{l_2} \cdot k_{c,90} = \frac{190}{130} \cdot 1,0 = 1,46$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 2,21N/mm^2 \leq 1,46 \cdot 4N/mm^2 = 2,21N/mm^2 \leq 5,84N/mm^2 \quad (38 \%)$$

Tuki 3, leveys $l_3 = 162mm$

Tukireaktio:

$$F_d = F_{C,d} = 2,94kN$$

Puristusjännitys:

$$\delta_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l_3} = \frac{2940N}{45mm \cdot 162mm} = 0,40N/mm^2$$

Tuen tehollinen leveys:

$$l_{3,c,90,ef} = l_3 + 30mm = 162mm + 30mm = 192mm$$

Tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{3,90,ef}}{l_3} \cdot k_{c,90} = \frac{192}{162} \cdot 1,0 = 1,19$$

Mitoitusehto:

$$\delta_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} = 0,40N/mm^2 \leq 1,19 \cdot 4N/mm^2 = 0,40N/mm^2 \leq 4,76N/mm^2 \quad (9\%)$$

Taipuma:

Koska rakenteessa on oikeasti liikkuvaa hyötykuormaa, tekee se taipuman laskemisesta käsin hyvin hankalaa. Tässä laskussa olen yksinkertaistanut taipuman laskua niin, että olen ajatellut isoimman jännevälin yksiaukkoiseksi ja tarkastanut taipuman yksiaukkoiselle palkille.

Omapainon hetkellinen taipuma:

$$w_{inst,g} = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_k \cdot a^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_k \cdot a^4}{E_{mean} \cdot \frac{bh^3}{12}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,54 \cdot 4738^4}{13800 \cdot \frac{45 \cdot 300^3}{12}} mm = 2,54mm$$

Lumikuorman hetkellinen taipuma:

$$w_{inst,q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_k \cdot a^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_k \cdot a^4}{E_{mean} \cdot \frac{bh^3}{12}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,2 \cdot 4738^4}{13800 \cdot \frac{45 \cdot 300^3}{12}} mm = 5,64mm$$

Hetkellinen taipuma yhteensä:

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} = 2,54mm + 5,64mm = 8,18mm$$

Lopullinen taipuma:

$$w_{net,fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst,g} + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot w_{inst,q} = (1 + 0,6) \cdot 2,54mm + (1 + 0,3 \cdot 0,6) \cdot 5,64mm = 10,72mm$$

Raja-arvot:

$$w_{inst} = \frac{a}{400} = \frac{4738mm}{400} = 15,80mm$$

$$w_{net,fin} = \frac{a}{300} = \frac{4738mm}{300} = 11,85mm$$

Mitoitusehto:

$$w_{inst} \leq \frac{a}{400} = 8,18mm \leq 15,80mm \quad (52 \%)$$

$$w_{net,fin} \leq \frac{a}{300} = 10,72mm \leq 11,85mm \quad (90 \%)$$

Värähtely:

Värähtelyn tarkastus Eurokoodi 5 lyhennetyin ohjeen mukaan (s.21-23). Värähtelyn laskennassa kaksiaukkoisen palkin pisin jänneväli on ajateltu yksiaukkoiseksi, jotta käsinlaskenta olisi helpompaa. Näin ajatellun yksiaukkoisen palkin jänneväli L on 4738 mm. Laskuissa s tarkoittaa palkkija-koa.

Palkin taivutusjäykkyys:

$$(EI)_p = E_{mean} \cdot I_y = E_{mean} \cdot \frac{bh^3}{12} = 13800N/mm^2 \cdot \frac{45mm \cdot 300^3mm^3}{12} = 1,4 \cdot 10^{12} Nmm^2$$

Lattian omapainon ja pitkäaikaisen hyötykuorman yhteinen massa:

$$m = \frac{g_k + \psi_2 \cdot q_k}{9,81m/s^2} = \frac{900N/m^2 + 0,3 \cdot 2000N/m^2}{9,81m/s^2} = 152,9kg/m^2$$

Lattian ominaistajuuus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_p}{s \cdot m}} = \left(\frac{\pi}{2 \cdot 4,738^2} \cdot \sqrt{\frac{1,4 \cdot 10^{12}}{0,6 \cdot 152,9}} \right) Hz = 8,64Hz$$

Lattian taipuma 1 kN pistekuormasta jännevälän keskellä:

$$\delta_p = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_p} = \frac{1000 \text{ N} \cdot 4738^3 \text{ mm}^3}{48 \cdot 1,4 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 1,58 \text{ mm}$$

Eurokoodi 5 lyhennetyin suunnitteluohjeen mukaan yli 4 metrin jännevälillä pitää olla kaksi poikittaisjäykistelinjaa. Todellisuudessa näitä poikittaisjäykistelinjoja ei ole, kuten eurokoodi ne määrittelee. Niinpä olen laskennassa valinnut kertoimen k_B arvoksi 1,0.

Lattiapalkin etäisyydestä johtuva kerroin:

$$k_s = \sqrt{\frac{s}{0,6}} = \sqrt{\frac{0,6}{0,6}} = 1,0$$

Lattian poikittaissuunnan jäykkyyden ja huoneen koon huomioon ottava kerroin:

$$k_B = 1,0$$

Lattiarakenteen yläpuolisen huoneen mitan huomioon ottava kerroin:

$$k = \frac{1}{0,318 + 0,114 \cdot L} \geq 1; \quad L = \text{huoneen suurin mitta}$$

$$k = \frac{1}{0,318 + 0,114 \cdot 3,65} = 1,4 \geq 1 \quad \text{OK!}$$

Mitoitusehto:

$$k_B \cdot k_s \cdot \delta_p \leq 0,5 \text{ mm} \cdot k$$

$$1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,58 \text{ mm} \leq 0,5 \text{ mm} \cdot 1,4$$

$$1,58 \text{ mm} \leq 0,7 \text{ mm} \quad (226 \%)$$

Seuraavalla sivulla on vertailuksi KPM-Engineering Oy:n oman *Värähtely-Excelin* antamat tulokset. Taivutusjäykkyys on laskettu *Liittolaatta-Excelillä*.

KPM-Engineering Oy: Liittolaatta-Excel:

PUULAATAN TEHOLLINEN TAIVUTUSJÄYKKYYS EC5					
Levyn tiedot		Palkin tiedot		Poikittaiskoolaus	
Lujuusluokka=	Kipsi	Lujuusluokka=	Kerto-S	Lujuusluokka=	C18
E=	4000 N/mm ²	E=	13800 N/mm ²	h=	19 mm
b=	473,6 mm	b=	45 mm	k-jako=	300 mm
h=	30 mm	h=	300 mm	liitintyyppi=	naula
liitintyyppi=	ruuvi	k-jako=	600 mm	liitin lkm/liitos=	2 kpl
d=	4,2 mm	jänneväli=	4738 mm	d=	3,1 mm
s=	300 mm	tiheys=	510 kg/m ³	tiheys=	380 kg/m ³
liitin lkm/liitos=	2 kpl			K _{ser} =	761 N/mm
tiheys=	1027 kg/m ³				
K _{ser} =	2851 N/mm				
E _{l,levy} =		7107 Nm ² /m		S _{tot} =	
E _{l,palkki} =		2328750 Nm ² /m		K _{tot} =	
E _{l,min} =		2335857 Nm ² /m		1202 N/mm	
A=	14214 mm ²	A=	13500 mm ²		
γ=	0,138	γ=	1		
a=	176,6 mm	a=	7,4 mm		
E _{l,lisä} =	425139 Nm ² /m	Tämä lisätään kehan jäykkyyteen kantavassa suunnassa!			
E _{l,ef} =	2760996 Nm ² /m	Tämän pitäisi alle E _{l,kehä} +E _{l,lisä}			
E _{l,ef} / E _{l,min} =	1,18				

Laatan taivutusjäykkyys pituussuuntaan

PUULAATAN TEHOLLINEN TAIVUTUSJÄYKKYYS EC5					
Liittolaatan jänneväli=		4000 mm		Välpalkin h=	
				300 mm	
				Välpalkin k-jako=	
				600 mm	
				Välpalkin lujuusluokka=	
				Kerto-S	
				Välpalkin tiheys=	
				510 kg/m ³	
Levy		Yläpuolinen koolaus		Alapuolinen koolaus	
Lujuusluokka=	Kipsi	Lujuusluokka=	C18	Lujuusluokka=	C18
h=	30 mm	k-jako=	300 mm	k-jako=	400 mm
liitintyyppi=	ruuvi	b=	100 mm	b=	47 mm
d=	4,2 mm	h=	19 mm	h=	47 mm
ruuvausväli s=	300 mm	liitintyyppi=	naula	liitintyyppi=	naula
E=	4000 N/mm ²	d=	3,1 mm	d=	3,1 mm
b=	300 mm	liitin lkm/liitos=	2 kpl	liitin lkm/liitos=	2 kpl
tiheys=	1027 kg/m ³	E=	9000 N/mm ²	E=	9000 N/mm ²
K _{ser} =	2851 N/mm	tiheys=	380 kg/m ³	tiheys=	380 kg/m ³
		K _{ser} =	761 N/mm	K _{ser} =	761 N/mm
E _{l,levy} =	9000 Nm ² /m	K _{tot,levy} =	601 N/mm	S _{tot} =	300 mm
E _{l,yläkoolaus} =	1715 Nm ² /m	K _{tot,yläkoolaus} =	761 N/mm	NA=	268,6 mm
E _{l,alakoolaus} =	6862 Nm ² /m	K _{tot,alakoolaus} =	571 N/mm		
E _{l,min} =	17577 Nm ² /m				
A=	9000 mm ²	A=	1900 mm ²	A=	1656,75 mm ²
γ=	0,083	γ=	0,194	γ=	0,171
a=	112,4 mm	a=	87,9 mm	a=	245,1 mm
E _{l,lisä} =	722652 Nm ² /m				
E _{l,ef} =	740228 Nm ² /m				
E _{l,ef} / E _{l,min} =	42,11				

Laatan taivutusjäykkyys poikittaissuuntaan

KPM-Engineering Oy: Värähtely-Excel:

PERUSTIEDOT		
A	B	C
LATTIAPALKKI	PÄÄLLYSRAKENNE (KOHTISUORAAN PALKIN SUUNTAA VASTEN)	PÄÄPALKKI (KOHTISUORAAN PALKIN SUUNTAA VASTEN)
Laatan tuenta ssff	$E_B = 9000$ N/mm ²	$E_C = 15000$ N/mm ²
Lujuusluokka K-S	$I_B = 88733$ mm ⁴	$I_C = 775018125$ mm ⁴
$E_L = 13800$ N/mm ²	$L_B = 4$ m	$L_C = 0$ m
palkin leveys b 45 mm	$K_B\text{-jako} = 300$ mm	$K_C\text{-jako} = 2025$ mm
palkin korkeus h 300 mm	Määrätty $L_B =$ m	
$I_L = 101250000$ mm ⁴		
$L_L = 4,738$ m		
$K_L\text{-jako} = 600$ mm		
lattian paino = 90 kg/m ²		
kok. paino = 150 kg/m ²	NÄITÄ SÄÄTÄMÄLLÄ VOI MÄÄRÄTÄ HALUTUN EI:N	
Määrätty $E_L = 2760996$ Nm ² /m	Määrätty $E_B = 740228$ Nm ² /m	Määrätty $E_C = 0$
$E_L = 2760996$ Nm ² /m	$E_B = 740228$ Nm ² /m	$E_C = 0$ Nm ² /m
		$f_{o,p} =$ Hz
LAATAN ALIN OMINAISTAAJUUS		
	$f_{o(ssss)} =$ Hz	
	$f_{o(ssff)} = 9,493$ Hz	
	$f_{o(ssss)} =$ Hz	
	$f_{o(ssff)} =$ Hz	
	$f_o = 9,493$ Hz	
TAIPUMAEHTO		
TAIPUMA LATTIAPALKISSA	$u_1 = 1,586$ mm	
TAIPUMA PÄÄPALKISSA	$u_2 = 0,000$ mm	
TAIPUMA LAATASSA ssss	$u_3 = 0,000$ mm	Isomman huoneen pisin seinämitta = 3,65 m
TAIPUMA LAATASSA ssff	$u_4 = 0,269$ mm	$k_L = 1,362$
TAIPUMA LAATASSA sess	$u_5 = 0,000$ mm	Sallittu taipuma = 0,681 mm
TAIPUMA LAATASSA seff	$u_6 = 0,000$ mm	
	$u = 0,269$	

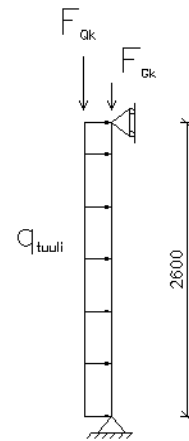
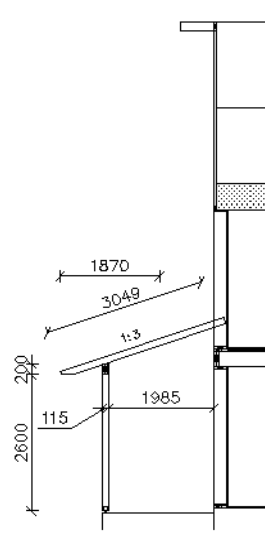
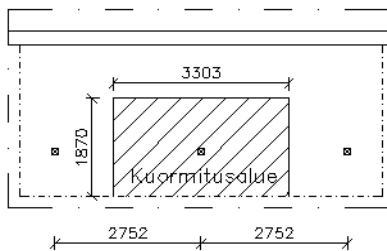
Laatan alin ominaistaajuus ja taipuma

Excel-laskentapohjilla laskemalla sain värähtelyn ominaistaajuudeksi 9,493 Hz ja taipumaksi 0,269 mm. Laatta on laskettu yhteen suuntaan kantavana (ssff).

Liite 3 Käsineläskentatulokset pilarista

Rakenneleikkaus ja vapaakappalekuva:

Terassi, pohjakuva



Pilarin päähän tulevat pistekuormat on esitetty vapaakappalekuvassa selkeyden takia irrallaan, todellisesti kuormat tulevat pilarin päähän. Kuormien epäkeskisyyttä ei huomioida. Laskennassa on ajateltu, että terassin pisimmälle sivulle tulee lasitus, jolloin tuulikuorma vaikuttaa pilarin koko matkalla. Lasitus estää samalla nurjahduksen heikompaan suuntaan eli pilarin y-suuntaan.

Kuormat:

Terassin katon omapaino: $0,30 \text{ kN/m}^2$

Korotettu lumikuorma ($s_k \leq 2,75 \text{ kN/m}^2$): $3,70 \text{ kN/m}^2$

Tuulikuorma: $0,49 \text{ kN/m}^2$

Kuormitusleveys: 3303 mm

Pilarin pituus L : 2600 mm

Omapaino (KRT):

$$N_{G,k} = 3,303 \text{ m} \cdot 1,87 \text{ m} \cdot 0,30 \text{ kN/m}^2 = 1,85 \text{ kN}$$

Lumikuorma (KRT)

$$N_{Q,k} = 3,303 \text{ m} \cdot 1,87 \text{ m} \cdot 3,70 \text{ kN/m}^2 = 22,85 \text{ kN}$$

Tuulikuorma (KRT):

$$Q_{tuuli,k} = 3,303 \text{ m} \cdot 0,49 \text{ kN/m}^2 = 1,62 \text{ kN/m}$$

Yhteensä (KRT)

$$N_q = 1,85kN + 22,85kN = 24,70kN$$

Momentti:

$$M = \frac{Q_{tuuli} \cdot L^2}{8} = \frac{1,62kN/m \cdot (2,6m)^2}{8} = 1,37kNm$$

Kuormitusyhdistelmät (MRT):

Kuormitusyhdistelmistä hetkellinen aikaluokka on määräävin, joten tarkastelen vain sitä.

Seuraamusluokka CC2 => $K_{FF}=1,0$

Tuulikuorma määrävä, hyötykuorma ja lumikuorma ei määrävä:

$$N_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot N_{G,k} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{tuuli,k} + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot N_{Q,k}$$

$$N_d = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,85kN + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 0kN + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 22,85kN = 26,12kN$$

$$M_d = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 1,37kNm = 2,06kNm$$

Tarkastetaan pilari, jonka materiaali on liimapuu GL32c ja poikkileikkaus on 115x180. Leveys 115 mm on tuuleen suuntaan ja korkeus on 180 mm.

Käyttöluokka on 2 ja muut tarvittavat kertoimet:

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.43})$$

$$k_{\text{mod}} = 1,1 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.45})$$

Taivutuslujuuteen vaikuttava kerroin:

$$k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^s = \left(\frac{600}{180}\right)^{0,1} = 1,13 \leq 1,1 \text{ eli valitaan } 1,1 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.49})$$

Lujuusominaisuudet (RIL205-1-2009 s.48):

$$f_{m,k} = 32N/mm^2$$

$$f_{v,k} = 3,2N/mm^2$$

$$f_{c,0,k} = 26,5 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$E_{mean} = 13700 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$E_{0,05} = 11100 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Nurjahduskestävyys:

Suurin pistekuorma pilarin päässä, ei epäkeskisyyttä:

$$N_d = 26,12 \text{ kN}$$

Nurjahduspituus z-suunnan nurjahduksessa:

$$L_{c,z} = 1,0 \cdot L = 1,0 \cdot 2600 \text{ mm} = 2600 \text{ mm}$$

Suorakaidepoikkileikkauksen jäyhyysäde:

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{180 \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 51,96 \text{ mm}$$

Hoikkuusluku:

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} = \frac{2600 \text{ mm}}{51,96 \text{ mm}} = 50,04$$

Nurjahduskerroin katsotaan Eurokoodi 5 lyhennetyin ohjeen sivun 27 käyrästä:

$$k_{c,y} \approx 0,9$$

Puristusjäännitys:

$$\delta_{c,o,d} = \frac{N_d}{bh} = \frac{26120 \text{ N}}{115 \text{ mm} \cdot 180 \text{ mm}} \text{ N} / \text{mm}^2 = 1,26 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Puristuslujuus:

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{26,5 \cdot 1,1}{1,2} \text{ N} / \text{mm}^2 = 24,29 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Taivutuskestävyys:

Taivutusjäännitys:

$$f_{m,d} = \frac{6 \cdot M_d}{bh^2} = \frac{6 \cdot 2,06 \cdot 10^6}{115 \cdot 180^2} \text{ N} / \text{mm}^2 = 3,32 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Taivutuslujuus:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot k_h = \left(\frac{32 \cdot 1,1}{1,2} \cdot 1,1 \right) N/mm^2 = 32,26 N/mm^2$$

Mitoitusehto taivutus + puristus:

$$\frac{\delta_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\delta_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,32 N/mm^2}{32,26 N/mm^2} + \frac{1,26 N/mm^2}{0,9 \cdot 24,29 N/mm^2} \leq 1$$

$$0,27 \leq 1 \quad (16 \%)$$

Taipuma:

Lasketaan hetkellinen taipuma w_{inst} :

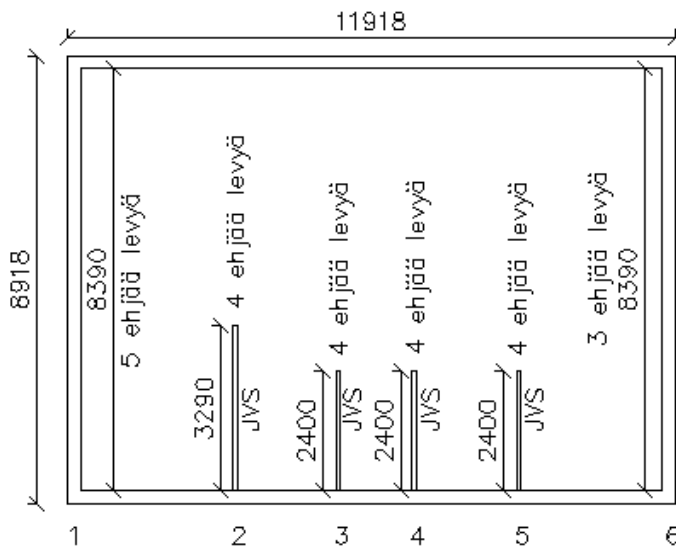
$$w_{inst,q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{tuuli} \cdot L^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{tuuli} \cdot L^4}{E_{mean} \cdot \frac{hb^3}{12}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,49 \cdot 2600^4}{13700 \cdot \frac{115 \cdot 180^3}{12}} mm = 1,12 mm$$

Mitoitusehto:

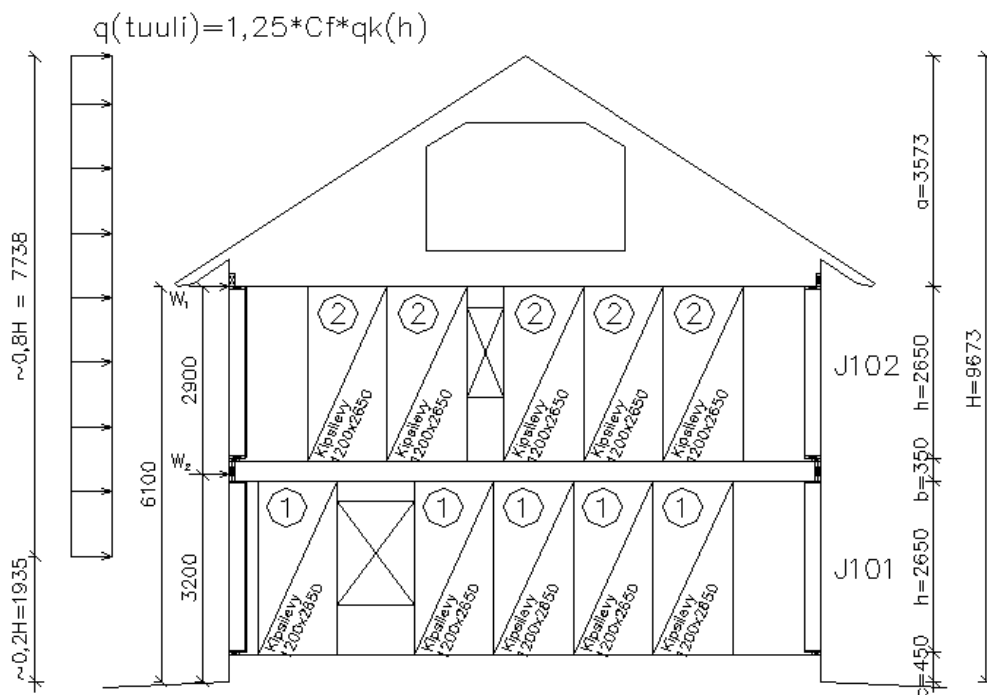
$$w_{inst,q} \leq \frac{L}{300} = 1,12 mm \leq \frac{2600 mm}{300} = 8,67 mm \quad (13 \%)$$

Liite 4 Käsineläskentatulokset päätyseinän levyjäykistyksestä

1. kerroksen jäykistävät päätyseinät ja päädyn suuntaiset jäykistävät kevyet väliseinät:



Päätyseinän leikkaus, jossa näkyvät ehjät levyt:



Laskelmissa tarkastellaan siis alakerran päätyseinää eli seinälinjan 1 seinää J101. Seinällä J101 on vain yksi seinälohko (numero 1 ympäröitynä), jonka levyistä määräytyy seinän jäykistävää kapasiteettiä. Levyjä seinällä J101 on yhteensä 5 kappaletta. Seinän jäykistävää levyä on kipsilevy GEK 13 mm. Levyt kiinnitetään seinään kipsiruuveilla QTR29.

Rakennuksen ylä- ja välipohja oletetaan tarpeeksi jäykiksi, jotta ne siirtävät vaakakuormia jäykistävälle seinille. Seiniltä tulevat kuormat on ankkuroitava suoraan perustuksille.

Lasketaan levyjäykistys pelkästään ehjillä eli täysleveillä levyillä, eikä huomioida katkottujen tai aukkojen kohdalla olevien levyjen kapasiteetteja. Yhden levyn mitat ovat siis 1200 mm x 2650 mm.

Lähtötiedot:

Jäykistävän seinän runkomateriaali C24 lujuusluokiteltu sahatavara:

$$\rho_k = 350 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.47})$$

$$\gamma_M = 1,4 \quad (\text{RIL205-1-2009 s.43})$$

Kuormat:

Eurokoodi 5 lyhennetty suunnitteluohje (s.12-13):

Maastoluokka III ja rakennuksen korkeus 9673 mm, joten sivun 13 kuvasta 2.4

$$q_k(h) = 0,45 \text{ kN} / \text{m}^2$$

ja voimakerroin sivun 13 taulukosta 2.3

$$c_f = 1,3$$

Rakennuksen mittoja:

$$a=3,573\text{m}$$

$$b=0,35\text{m}$$

$$c=0,45$$

$$h=2,65\text{m}$$

$$H=9,673\text{m}$$

$$L=11,918\text{m}$$

Ominaiskuormien aiheuttamat voimasuureet:

Välipohjatasoon kohdistuva viivakuorma käyttörajatilassa:

$$w_{k,1} = 1,25 \cdot c_f \cdot q_k(h) \cdot \left[(c + h - 0,2 \cdot H) + b \cdot \left(\frac{h}{2} \right) \right]$$

$$w_{k,1} = 1,25 \cdot 1,3 \cdot 0,45 \text{ kN} / \text{m}^2 \cdot \left[(0,45\text{m} + 2,65\text{m} - 0,2 \cdot 9,673\text{m}) + 0,35\text{m} \cdot \left(\frac{2,65\text{m}}{2} \right) \right] = 2,08 \text{ kN} / \text{m}$$

Yläpohjatasoon kohdistuva viivakuorma käyttörajatilassa:

$$w_{k,1} = 1,25 \cdot c_f \cdot q_k(h) \cdot \left(a + \frac{h}{2} \right) = 1,25 \cdot 1,3 \cdot 0,45 \text{ kN/m}^2 \cdot \left(3,573 \text{ m} + \frac{2,65 \text{ m}}{2} \right) = 3,58 \text{ kN/m}$$

Jäykistävälle päätyseinällä J101 tuleva kuorma (MRT):

n = levyjen määrä jäykistävässä seinässä

$\sum_{n \geq 1} n$ = levyjen määrä yhteensä koko jäykistystasossa

$$F_d = 1,5 \cdot (w_{k,1} + w_{k,2}) \cdot \frac{n}{\sum_{i \geq 1} n_i} \cdot L = 1,5 \cdot (2,08 \text{ kN/m} + 3,58 \text{ kN/m}) \cdot \frac{5}{24} \cdot 11,918 \text{ m} = 21,08 \text{ kN}$$

GEK-13 kipsilevyn ja QRT29 liittimen yhteiskapasiteetti katsotaan Gyproc-valmistajan tyyppihyväksytystä taulukosta (Glasroc-komposiittikipsilevyjen GHO 13, GHU 13, GHS 9 ja Rigidur kuituvahvistelevyjen GFH 13 sekä Gyproc rakennuslevyjen GN 13, GEK 13, GF 15, GTS 9 ja GL 15 käyttö rankarakenteisten rakennusten jäykistämiseen, s. 8-9 Taulukot 3 ja 4).

Kapasiteetti 2,4 m korkealla GEK 13-levyllä, joka on kiinnitetty ruuvilla QTR29 liitinvälillä 100 mm:

$$F_{v,d} = 5,66 \text{ kN} \quad (\text{Taulukko 3, s.8})$$

Levykorkeuden korjauskerroin levykorkeudelle 2700 mm:

$$c_i = 0,88 \quad (\text{Taulukko 4, s.9})$$

Yhden levyn leikkauskapasiteetti:

$$F_{V,d} = F_{v,d} \cdot c_i = 5,66 \text{ kN} \cdot 0,88 = 4,98 \text{ kN}$$

Seinän J101 seinälohkon 1 leikkausvoimakestävyys:

$$F_{V,Rd} = n \cdot F_{V,d} = 5 \cdot 4,98 \text{ kN} = 24,90 \text{ kN}$$

Mitoitusehto:

$$F_d \leq F_{V,Rd} = 21,08 \text{ kN} \leq 24,90 \text{ kN} \quad (85 \%)$$

Seinän J101 ankkurointi alajuoksuun:

Tässä laskuharjoituksessa kaikki ankkuroinnit tehdään lankanaulalla LN 100x3,4, vaikka ankkuroitavien naulojen määrä ei olisikaan järkevä.

Aluksi lasken lankanaulan LN 100x3,4 leikkausvoimakestävyyden. Seinän J101 ankkuroitava alajuoksu on 33 mm paksua puuta ja se ankkuroidaan 42 mm paksuun alaohjauspuuhun. Puiden lujuusluokka on C24. Aikaluokka on hetkellinen ja käyttöluokka on 2.

Lähtötiedot:

leikkeiden lukumäärä $m = 1$ (RIL205-1-2009 s.217)

aikavaikutuskerroin $k_{\text{mod}} = 1,1$ (RIL205-1-2009 s.45)

liitospuun materiaalivarmuusluku $\gamma_M = 1,4$ (RIL205-1-2009 s.43)

naulan nimellispaksuus $d = 3,4\text{mm}$

Ankkuroitava alajuoksu $t_1 = 33\text{mm}$

Alaohjauspuu $t_2 = 42\text{mm}$

Ehdot tunkeumasyvyyksille:

$t_1 \geq 8d = 33\text{mm} \geq 8 \cdot 3,4\text{mm} = 27,2\text{mm}$ ja OK!

$t_2 \geq 12d = 42\text{mm} \geq 12 \cdot 3,4\text{mm} = 40,8\text{mm}$ OK!

Koska tunkeumasyvyyksien ehdot toteutuvat käytetään k_t -kerrointa:

$$k_t = \max \begin{cases} 1 + 0,3 \cdot \frac{t_1 - 8d}{8d} = 1 + 0,3 \cdot \frac{33\text{mm} - 27,2\text{mm}}{27,2\text{mm}} = 1,064 \\ 1 + 0,3 \cdot \frac{t_2 - 12d}{12d} = 1 + 0,3 \cdot \frac{42\text{mm} - 40,8\text{mm}}{40,8\text{mm}} = 1,1018 \end{cases}$$

Puun ominaistiheydestä riippuva kerroin:

$$k_p = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}} = \sqrt{\frac{350}{350}} = 1,0$$

Esiporaamattoman naulan ominaisleikkauskestävyys leikettä kohden:

$$R_k = 120d^{1,7} = 120 \cdot (3,4\text{mm})^{1,7} = 960,94\text{N}$$

Lankanaulan LN 100x3,4 leikkausvoimakestävyys:

$$F_{V,d,naula} = m \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_p \cdot k_t \cdot R_k = 1 \cdot \frac{1,1}{1,4} \cdot 1,0 \cdot 1,064 \cdot 960,94N = 803,34N \approx 0,8kN$$

Seinälle J101 kohdistuva leikkausvoima $F_{V,d} = 21,08kN$

Ankkuroitavien naulojen lukumäärä:

$$n_{1,naula} = \frac{F_{V,d}}{F_{V,d,naula}} = \frac{21,08kN}{0,8kN} = 26,4 \approx 27$$

Jäykistävän seinän J101 pituus 8390 mm, joten naulojen väli:

$$s_{1,naula} = \frac{L}{n_{1,naula}} = \frac{8390mm}{27} = 311mm \approx 300mm$$

Seinän J101 ankkurointi risteävään seinään:

Vaakaleikkausvoimat siirtyvät levyjen ja seinän kautta perustuksille, jolloin toiseen päähän seinää tulee nostetta ja toiseen päähän puristusta. Risteävän seinän korkeus on 2650 mm.

Risteävään seinään kohdistuva noste:

$$N_d = \frac{21,08kN}{8,39m} \cdot 2,65m = 6,65kN$$

Naulojen lukumäärä:

$$n_{2,naula} = \frac{N_d}{F_{V,d,naula}} = \frac{6,65kN}{0,8kN} = 8,3 \approx 9$$

Naulojen väli:

$$s_{2,naula} = \frac{h}{n_{2,naula}} = \frac{2650mm}{9} = 294mm \approx 250mm$$

