

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikka
Suvi Karilainen

Opinnäytetyö

Metrirunko – puurakenteisen elementin mitoitus

Työn ohjaaja
Työn tilaaja
Tampere 6/2009

DI Risto Lilja
Väärin Puutavara Oy

Karilainen, Suvi

Metrirunko – puuelementin mitoitus

63 sivua

Kesäkuu 2009

DI Lilja, Risto

Väärin Puutavara Oy

Tiivistelmä

Tässä työssä tutkitaan puurakenteisen Metrirunko-elementin kestävyyttä ja jäykkyyttä. Elementin idea perustuu sen momenttijäykkään liitokseen sekä sen suunnittelun ja käytön helppouteen. Metrirungosta ei vielä ole olemassa aikaisempaa tutkittua tietoa, koska se on suhteellisen uusi tuote markkinoilla. Tarkoitus onkin selvittää, pitääkö valmistajan lupaus liitoksen jäykkyydestä paikkansa.

Tässä työssä tarkastellaan elementin jäykkyyttä erityisesti sellaisissa tapauksissa, joissa elementti ei enää olekaan kokonainen. Koska Metrirunko-elementin jäykkyys perustuu sen lovetuihin liitoksiin, on aivan selvää, että elementti ei voi olla yhtä jäykkä, kun jäykistäviä liitoksia onkin vähemmän. Kun elementtiin tehdään aukko ikkunaa varten, siitä samalla poistetaan jäykistäviä rakenteita. Myöskään lyhyemmällä seinän osuudella, jossa elementin vaakamitta lyhenee suhteessa korkeuteen, ei jäykkyys voi olla sama kuin täysipitkällä elementillä. Erityisesti keskitytään tutkimaan tapauksia, joissa elementti on katkaistu lyhyemmäksi osaksi.

Tehdyt tutkimukset ja laskelmat osoittavat, että kun kokonaista Metrirunko-elementtiä kuormitetaan Suomen olosuhteissa suurimmalla mahdollisella kuormituksella, se ei välttämättä kestä kuormia, eikä pysy riittävän hyvin muodossaan. Toisaalta kuormista riippuen, voi lyhytkin osa elementtiä olla riittävän jäykkä. Voidaan siis todeta, että elementille tulevista kuormista pitkälti riippuu, kestääkö Metrirunko-elementti ilman lisäjäykistystä, ja onko se riittävän jäykkä toimiakseen rakennuksen jäykistävänä seinänä.

Karilainen, Suvi

Metrirunko – dimensioning of a wooden element

63 pages

June 2009

Lilja, Risto (MSc)

Väärin Puutavara Oy

Abstract

This thesis concentrates on a wooden element called Metrirunko. Main focus is on analysing the rigidness of this element. Especially in cases when the element isn't complete. Metrirunko-element's idea is based on it's rigid joints and easiness of designing and use. First the walls are set up and afterwards openings are done where ever needed. Metrirunko has a constant length and it can be cut into shorter pieces when needed.

It's obvious that when element is shorter or has an opening it can't be as stiff as the whole element. This thesis examines how much the shortening of element affects on it's rigidness.

Execution of this thesis is that it mostly depends on the strain whether the element endures or not. In circumstances of Finland there might be cases, when even the whole element fails to endure, but also there are cases when shorter element is rigid enough to function as stiffening part of the building.

Keywords

wooden element, rigidness, dimensioning, Comsol Multiphysics,

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Sisällysluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Työn kuvaus	7
2.1 Tehtävän taustaa	7
2.2 Metrirunko-elementti	7
3 Elementin laskenta ja mitoitus	12
3.1 Laskennan taustatietoa	12
3.2 Rakennemalli	14
3.3 Pystykuormat	15
3.4 Vaakakuormat	16
3.5 Kuormitusyhdistelmät	18
4 Laskennan kulku käsinlaskentana	20
4.1 Laskennan lähtötietoja	20
4.2 Syysuuntainen puristus	22
4.3 Syysuuntainen veto	23
4.4 Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus	23
4.5 Taivutus	24
4.6 Leikkaus	25
4.7 Yhdistetyt jännitykset	25
4.8 Nurjahdus	26
4.9 Kiepahdus	28
4.10 Liitokset	29
4.11 Käyttörajatila	30
5 Elementin laskenta mitoitusohjelmalla	32
5.1 Comsol Multiphysics -ohjelma	32
5.2 Rakennemalli	32
5.3 Elementin kuormitus	33
5.4 Rakenteen staattinen tasapaino	34

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikka

5.5 Rakenneosien kestävyys	34
5.6 Käyttörajatila.....	35
5.7 Laskennan tulosten tarkastelu	35
6 Koko rakennuksen jäykistys	43
7 Tulokset ja niiden arviointi	45
8 Yhteenveto ja kokonaisuuden lopputarkastelu	46
Lähteet	47
Liitteet.....	48
Liite 1: Esimerkkilaskelma	48
Liite 2: Elementin piirrustukset	60
Liite 3: Excell-taulukko	

1 Johdanto

Puurakenteisten pientalojen markkinat koostuvat tällä hetkellä jatkuvasti laajenevasta elementtiteollisuudesta ja pikkuhiljaa väistyvästä hartiapankkirakentamisesta. Suomessa on paljon puutalotehtaita ja niillä kaikilla on omat elementtityypinsä ja elementteihin liittyvät vakioliitoksensa ja -rakenteensa. Perinteisellä pitkästä tavarasta rakentamiskäytännölläkin on vielä kannattajansa, mutta siinä missä paikan päällä rakentamalla materiaalikustannuksissa säästetään, menetetään yleensä rakennusajassa. Metrirunko-elementti sijoittuu edellisten välimaastoon. Valmistaja kuvaakin elementtiä askeleeksi pitkätavararakentamisesta tehdasrakentamisen suuntaan.

Metrirunko on suhteellisen uusi tuote, eikä siitä vielä ole olemassa riittävästi tutkittua ja laskettua informaatiota. Tässä työssä on tarkoitus paneutua tämän puurunkoisen seinäelementin rakenteisiin ja ominaisuuksiin tekemällä laskelmia ja käsittelemällä siihen liittyviä asioita mahdollisimman laajasti. Tavoitteena on saada elementille nykyisten normien mukaiset laskelmat, joista selviävät elementin kestävyys ja jäykkyys erilaisissa tilanteissa. Laskelmat pyritään tekemään yleispäteviksi, jotta niitä voitaisiin soveltaa mahdollisimman moniin erilaisiin rakennuksiin.

Jäykistys on yksi tämän työn keskeisistä asioista. Perinteisesti rakennuksen jäykistys seinissä on hoidettu rakennuslevyillä tai vinojäykisteillä. Metrirunko-elementin valmistaja kuitenkin lupaa, että elementin liitos on momenttijäykkä, mikä tarkoittaa, että muuta käykistystä ei tarvita. Työssä tutkitaan kokonaisten elementtien lisäksi lyhyempiä elementtejä, ja sitä, miten elementin lyhentäminen vaikuttaa elementin jäykkyyteen.

2 Työn kuvaus

2.1 Tehtävän taustaa

Metrirunko-elementin kehittäjä on Ruoveden Väärinmajalla sijaitseva Väärin Puutavara Oy. Yritys tuottaa monenlaisia puutuotteita, joista tässä työssä keskitytään puuvalmistukseen ulkoseinäelementtiin, Metrirunkoon. Elementti on kehitetty yhteistyössä Insinööri- ja Arkkitehtuuritoimisto TMX:n kanssa, ja se on melko uusi tuote. Elementin kehittämisen rahoittivat Tampereen ammattikorkeakoulu ja Tekes tutkimuksesta liiketoimintaa -rahoituksella. (Väärin Puutavara Oy.)

Metrirunko on tuotteistettu ja ensimmäiset rakennukset menetelmällä on jo pystytetty Kankaanpäässä ja Taipalsaarella. Tavoitteena on vallata osa Suomen pientalo markkinoista ja samalla tehdä puurunkoelementistä uusi suomalainen rakennusalan vientituote. (Väärin Puutavara Oy.)

Tässä työssä on tarkoitus tehdä elementistä kattavat laskelmat, joissa tutkitaan elementin rakenneosien kestävyyttä kuormia vastaan, sekä elementin kestävyyttä kokonaisena yksikkönä. Lisäksi laskelmilla selvitetään esimerkiksi elementin lyhentämisen vaikutuksen jäykkyyteen ja kestävyuteen. Valmistaja luettelee elementin käyttökohteiksi rivitalot, pientalot, talousrakennukset ja erilaiset hallit. Niinpä tässä työssä on luontevaa keskittyä asuinrakennukseen, koska sille asetetut vaatimukset ovat tiukemmat kuin esimerkiksi talousrakennuksella.

2.2 Metrirunko-elementti

Metrirunko-elementti on puurakenteinen seinäelementti, joka sisältää puurungon ja tarvittaessa höyrynsulkumuovin. Elementin tarkoituksena on helpottaa ja nopeuttaa rungon pystytystä, jolloin rakennus saadaan nopeammin säältä suojaan kuin paikalla tehty tolparunkoinen. Isonkin rakennuksen ulkoseinärunгон ja katon pystytys onnistuu muutamassa päivässä. Metrirunko-elementit ovat kuusi metriä pitkiä ja vasta työmaalla elementit tarvittaessa sahataan oikean mittaisiksi. Näin ollen elementti ei juuri rajoita ra-

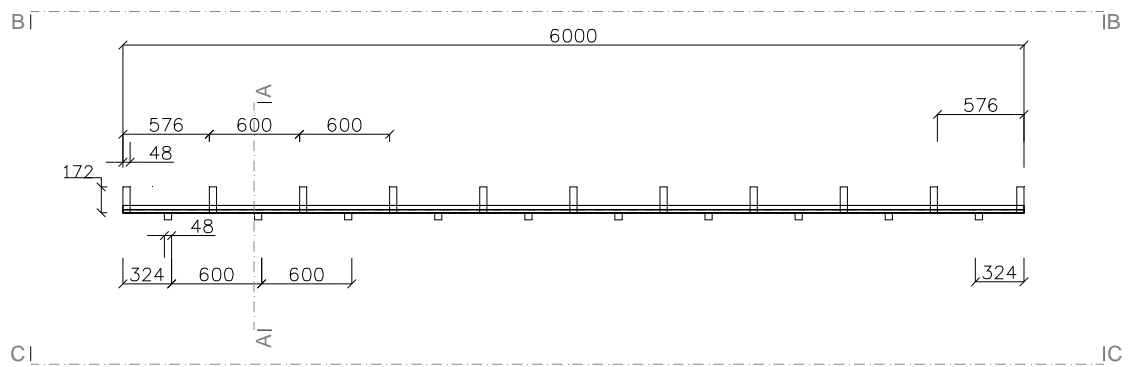
kennuksen mittoja, koska edelliseltä seinältä jääneellä elementin pätkällä voidaan aloittaa seuraavan seinän teko. (Väärin Puutavara Oy.)

Perinteisiin ulkoseinäelementteihin verrattuna Metrirunko-elementillä suunnitteluvaihe on helpompi ja nopeampi. Elementtien liitoksia nurkissa ei tarvitse erikseen suunnitella, koska kaikkien elementtien päät ovat samanlaiset ja liitokset nurkissa tehdään aina samalla tavalla. Myös työskentely työmaalla on helpompaa. Koska elementit ovat niin kevyitä, että ne voidaan siirrellä ja pystyttää miesvoimin, nosturia ei välttämättä yksikerroksisessa rakennuksessa tarvita. Toisaalta Metrirunko-elementtiä käytettäessä aikaa kuluu työmaalla enemmän ulko- ja sisäverhouksen tekemiseen sekä seinien eristämiseen. (Väärin Puutavara Oy.)

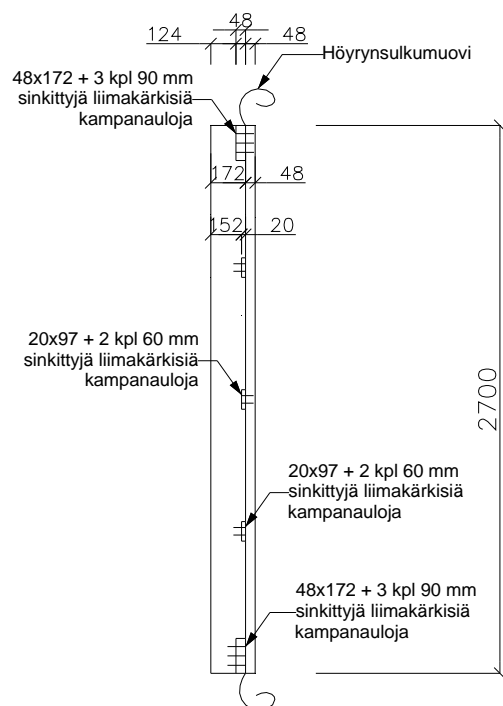
Kuten kuvioista 1-5 nähdään, Metrirunko-elementti koostuu pystytolpista, jotka ovat 600 mm:n etäisyydellä toisistaan. Tolpat ja samalla siis koko elementti on tarpeen mukaan erikorkuinen, esimerkiksi asuinrakennuksessa 2,7 metriä korkeilla tolilla saadaan huonekorkeus sopivaksi, kun taas erilaisissa hallirakennuksissa voi 2,5 metrin korkeus riittää mainiosti. Pystytolppien kokovaihtoehdot ovat: 48 x 145, 172, 196, 221 tai 246 mm. Tolppakoot mukailevat lämmöneristeiden vakiopaksumuksia, joten oikea tolppakoko löytyy aina riippuen siitä, paljonko lämmöneristettä kuhunkin seinään tarvitaan.

Tässä työssä käytetään laskelmiin 48 x 172 mm:n kokoista, 2,7 metriä korkeaa runkotohppaa, koska tarkoitus on tutkia pientaloon soveltuvaa elementtiä. Tällä runkokoolla nykyiset lämmöneristysvaatimukset täyttyvät helposti käyttämällä tavanomaisia ulkoseinään tarkoitettuja lämmöneristelevyjä.

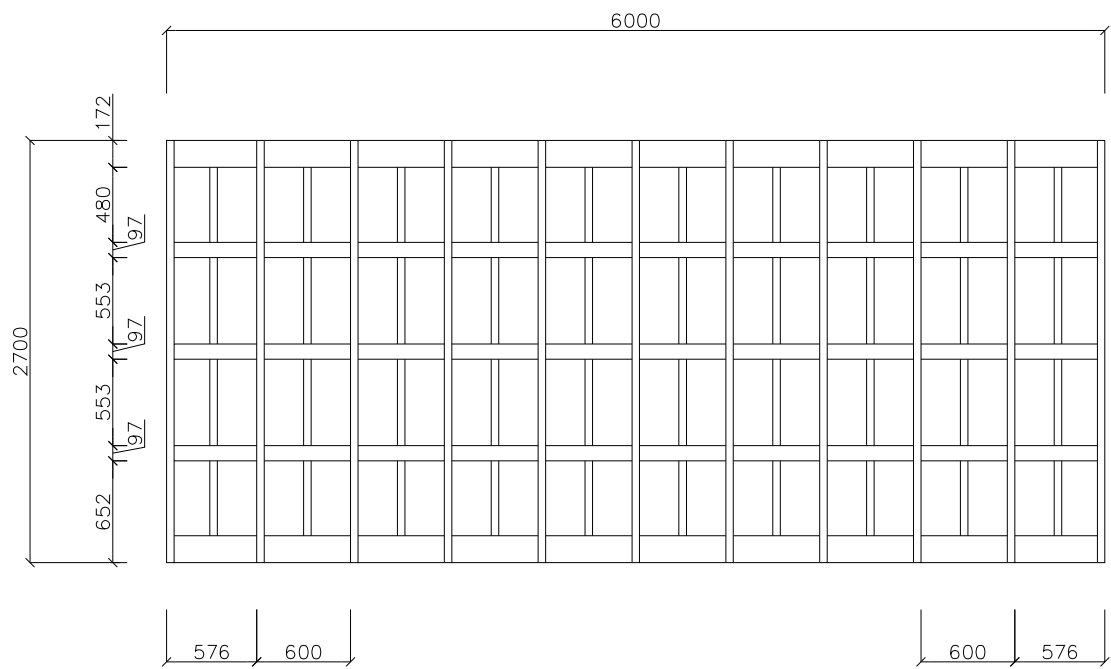
Tolpat on sidottu toisiinsa 48 x 172 -ylä- ja alapalkeilla, jotka on lovettu tolppien ylä- ja alapäihin. Lisäksi elementissä on kolme vaakalautaa, kooltaan 20 x 97 mm, jotka on lovettu tolppien kylkeen tasajaolla ja kiinnitetty kahdella kampanaulalla jokaisessa liitoskohdassa. Pystytolppien jakoväli on suunniteltu niin, että seinään on helppo lisätä lämmöneristelevyitä, sekä tehdä tarvittavat aukot esimerkiksi ikkunoita varten. Pystytolppien lisäksi elementissä on limittäin pystytolppien kanssa pystyrimat (48 x 48, 600 mm:n jaolla), joiden lomaan esimerkiksi tuulensuojalevyt on helppo asentaa.



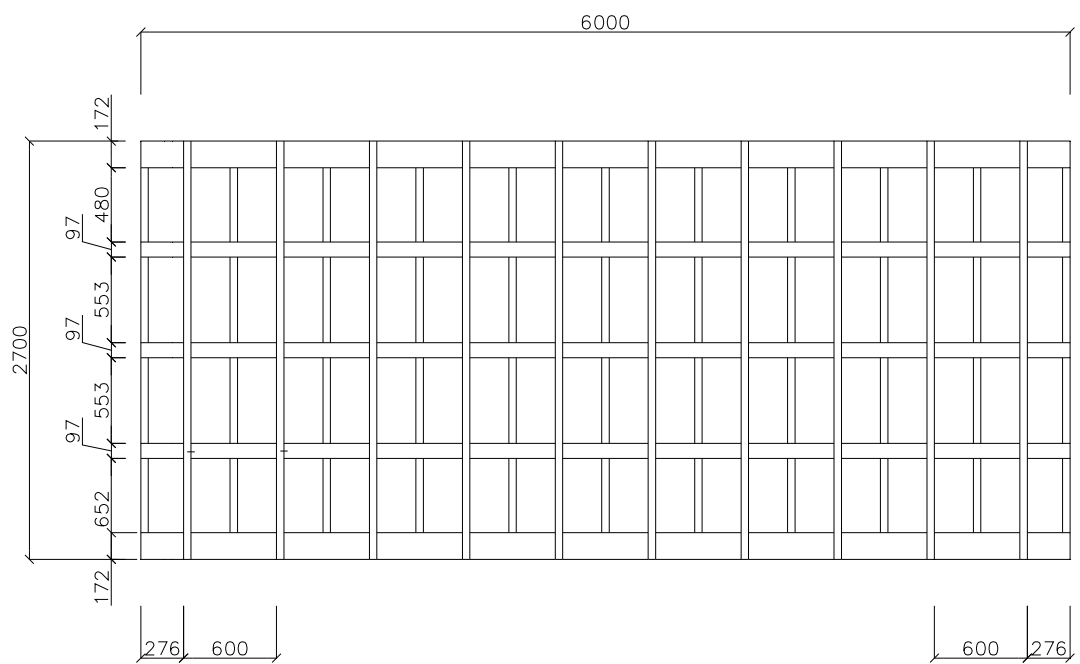
Kuvio 1: Metrirunko-elementti päältä päin kuvattuna



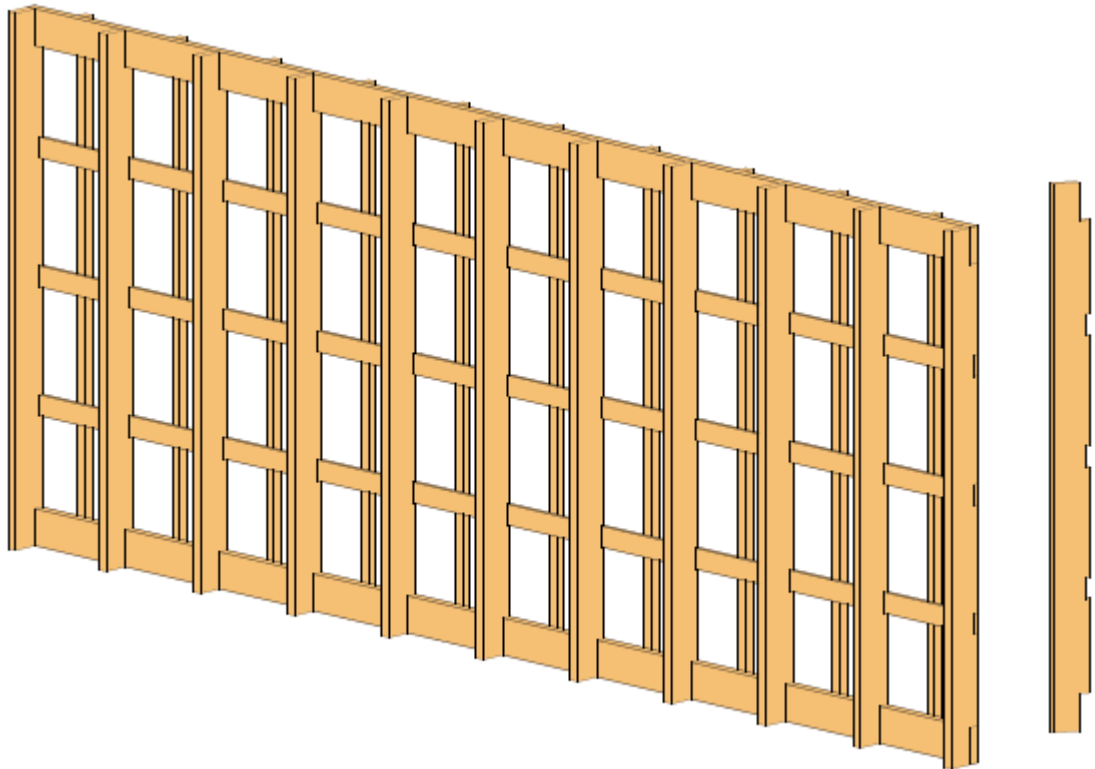
Kuvio 2: Leikkaus A – A



Kuvio 3: Leikkaus B – B



Kuvio 4: Leikkaus C – C



Kuvio 5: Metrirunkoelementti ja pystytolppa

Metrirunko-elementin asennetaan kuten muutkin puurakenteiset elementit. Elementit nostetaan paikoilleen, asetetaan oikeaan asemaan, tuetaan ja kiinnitetään naulaamalla alapuuhun kiinni. Elementtien asennus aloitetaan rakennuksen nurkasta ja edetään täysillä kuuden metrin elementeillä seuraavaan nurkkaan asti. Jos seinän pituus ei ole kuudella metrillä jaollinen, elementti katkaistaan nurkan kohdalla, ja yli jäävällä pätkällä jatketaan seuraavalla seinällä. (Väärin Puutavara Oy.)

Elementtien välisissä liitoksissa pystytolppien väliin lisätään solumuovikaista, joka tiivistää elementtisauman. Elementtien liitokset tehdään naulaamalla yhteen puristetut elementit toisiinsa. Kun kaikki seinät ovat kiinnitetty paikoilleen, ikkuna- ja oviaukot tehdään oikeisiin paikkoihin leikkaamalla elementtiin tarvittavat reiät. Tämän jälkeen voidaan töitä jatkaa kattoristikoiden tai välipohjan asennuksella. Seuraavassa vaiheessa asennetaan vesikatto sekä ulkoseinien lämmöneriste ja ulkoverhous, minkä jälkeen töitä päästään jatkamaan säältä suojassa. (Väärin Puutavara Oy.)

3 Elementin laskenta ja mitoitus

3.1 Laskennan taustatietoa

Elementin laskelmat on tehty puurakenteiden suunnittelustandardin Eurokoodi 5:n mukaan. Suurin osa laskennasta on tehty koneellisesti käyttäen apuna Comsol Multiphysics -mitoitus- ja laskentaohjelmaa. Käsinlaskentana voidaan tarkastella elementin yksittäisten rakenneosien kestävyyttä maksimirasituksia vastaan, esimerkiksi puristuksen ja taipumuksen kestävyyttä, pystytolppien nurjahduskestävyyttä sekä yläpalkin kiepahdusta ja taipumaa. Elementin laskenta kokonaisuutena sekä jäykkyystarkastelut olisivat turhan monimutkaisia ja työläitä käsinlaskettaviksi.

Koko elementin käyttäytymistä on helpoin tarkastella mitoitus- ja laskentaohjelmien avulla, koska ne ottavat huomioon elementin toiminnan kokonaisuutena ja ennen kaikkea huomioivat kaikki mahdolliset kuormitustapaukset. Mitoitusohjelma yleensä lisäksi etsii kuormitustapausten joukosta elementin kannalta vaarallisimmat tapaukset kullekin rakenneosalle. Comsol Multiphysics -ohjelma on kuitenkin tarkoitettu hieman erityyppiseen laskentaan, joten sillä laskiessa kuormitusyhdistelmät on muodostettava itse.

Tässä työssä tutkitaan yksittäistä elementtiä erillään ja siihen kohdistuvia voimia eikä niinkään jonkin tietyn rakennuksen elementtejä. Tästä johtuen laskennassa pitää tehdä tiettyjä oletuksia koskien rakennusta, johon elementit tulevat. Työn tarkoituksena on tehdä luotettavat laskelmat niin, että niitä voidaan hyödyntää kaikissa elementeissä ja kaikenmuotoisissa rakennuksissa. Näin ollen laskelmissa pitää olettaa esimerkiksi luonnonkuormien, tuulen ja lumen olevan maksimissaan Suomen mittakaavassa.

Elementtiin kohdistuvien voimien suuruuksiin vaikuttavat rakennuksessa käytetyt materiaalit ja niiden paino, sekä luonnonkuormien kautta olennaisesti myös rakennuksen muoto ja korkeus. Metrirunko-elementtiä käytettäessä ei rakennuksen kerroslukua ole rajoitettu. Rakennusmääräyskokoelman osasta E1 löytyy kuitenkin joitain rajoituksia rakennuksille tällaista puuelementtiä käytettäessä. Paloluokka P1 on pois rajattu, koska kantavat rakenteet ovat puuta, joka ei kestäisi tulipalossa sortumatta. Sen sijaan paloluokat P2 ja P3 ovat mahdollisia.

Paloluokkaan P2 kuuluvan rakennuksen kantavien rakenteiden vaatimukset ovat paloteknisesti luokan P1 tasoa matalampia. Riittävä turvallisuustaso luokan P2 rakennuksessa saavutetaan asettamalla vaatimuksia seinien, sisäkattojen ja lattioiden pintaosien ominaisuuksille. Lisäksi kerroslukua ja henkilömääriä on rajoitettu rakennuksen käytöstä riippuen. (Suomen rakentamismääräyskokoelma E1 2002, 9).

Paloluokkaan P3 kuuluvan rakennuksen kantaville rakenteille sensijaan ei aseteta erityisvaatimuksia palonkeston suhteen. Riittävä turvallisuustaso saavutetaan rakennuksen kokoa ja henkilömääriä rajoittamalla käytöstä riippuen. (Suomen rakentamismääräyskokoelma E1 2002, 9).

Kuten taulukosta 1 nähdään, metrirunko-elementeistä rakennettu rakennus voi käytännössä olla 1-4 kerroksinen. Jos pysytään omakotitalojen tavanomaisessa paloluokassa P3, rakennus voi olla enintään kaksikerroksinen. Kuitenkin kun seinien, sisäkattojen ja lattioiden pintaosien vaaditut ominaisuudet täyttyvät, eli rakennus on luokkaa P2, rakennus voi olla palotekniseltä kannalta jopa nelikerroksinen. Tässä työssä pysytään paloluokassa P3, koska useimmat pientalot ovat enintään kaksikerroksisia. Tällöin ei myöskään pintarakenteiden erityisvaatimuksia tarvitse ottaa huomioon.

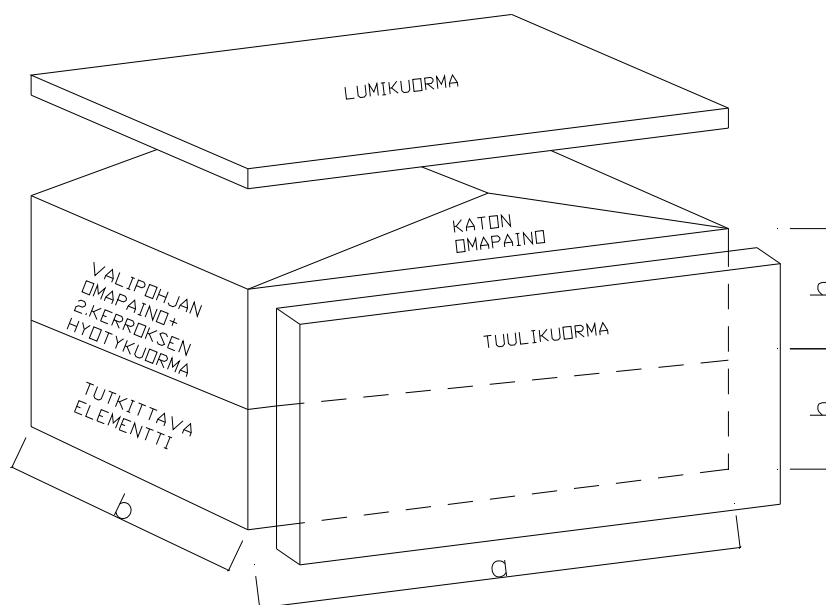
Taulukko 1: Rakennuksen kokoa koskevat rajoitukset (Suomen rakentamismääräyskokoelma E1 2002, 10)

Rakennuksen ominaisuus	Rakennuksen paloluokka		
	P1	P2	P3
KERROSLUKU			
– yleensä	ei rajoitusta	enintään 2	enintään 2
– asuinrakennus, työpaikkarakennus	ei rajoitusta	enintään 4	enintään 2
– tuotanto- tai varastorakennus, autosuoja	ei rajoitusta	enintään 2	enintään 1
KORKEUS			
– yleensä	ei rajoitusta	enintään 9 m	enintään 9 m
– asuinrakennus, työpaikkarakennus	ei rajoitusta	enintään 14 m	enintään 9 m
– yksikerroksinen tuotanto- tai varastorakennus	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 14 m
KERROSALA			
Kerrosala yleensä			
– yksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 2400 m ²
– kaksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 1600 m ²
Kerrosala tuotanto- ja varastorakennuksissa sekä autosuojissa			
– yksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei rajoitusta
– kaksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei sallittu
<i>Selostus</i>	<i>Rakennuksen korkeus on julkisivupinnan ja vesikaton leikkausviivan korkeus maan pinnasta (MRA 58 §). Tarvittaessa lasketaan rakennuksen nurkkapisteidien korkeuksien keskiarvo.</i>		

3.2 Rakennemalli

Jotta elementille tulevat rasitukset voidaan laskea, rakennukselle pitää valita jotkin mitat ja muoto. Laskelmissa käytettävän esimerkkirakennuksen tulisi olla sellainen, että sen avulla saadaan elementille tulevat rasitukset maksimiinsa. Elementin jäykkyykslaskentaan vaikuttaa huomattavasti rakennuksen muoto. Valmistaja lupaa, että elementin liitokset ovat tarkkoja ja momenttijäykkiä, ja tarkoitus onkin selvittää kuinka jäykkä elementti todellisuudessa on. Tulee myös ottaa huomioon, että vaikka kokonaisella elementillä on tietty jäykkyys, esimerkiksi suuret ikkuna-aukot sekä elementin lyhentäminen vaikuttavat elementin jäykkyyteen olennaisesti.

Laskelmissa oletetaan, että rakennuksen jäykistys hoidetaan pelkästään elementin jäykkyydellä, ei esimerkiksi levyillä, ja että väliseinät ovat kevyitä, eivätkä osallistu rakennuksen jäykistämiseen. Valmistaja muistuttaa kuitenkin, että kahden elementin pituinen (12 m) seinän osuus on maksimi, joka voidaan rakentaa ilman poikittaista jäykistävää rakennetta (Keskustelut Tero Markkasen kanssa). Tätä voidaan pitää yhtenä reunaehtona laskelmissa. Myöskään katon tai välipohjan ei näissä laskelmissa oleteta jäykistävän rakennusta.



Kuvio 6: Rakennukseen vaikuttavat kuormat

3.3 Pystykuormat

Rakennuksen omapainot koostuvat katon, seinien ja välipohjan painoista riippuen siitä, onko rakennus yksi- vai kaksikerroksinen.

Kuviossa 7 nähdään maanpinnan lumikuorman ominaisarvot Suomessa. Lumikuorma lasketaan seuraavasti.

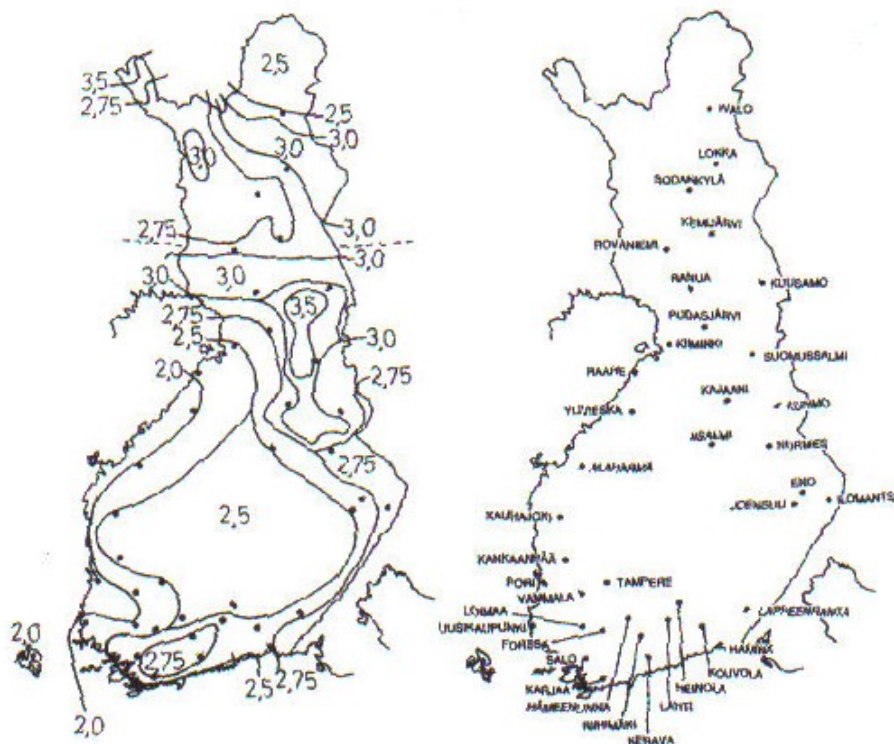
$$s = \mu \cdot s_k \quad (1)$$

jossa

s = lumikuorman ominaisarvo,

s_k = peruslumikuorma katolla,

μ = muotokerroin.

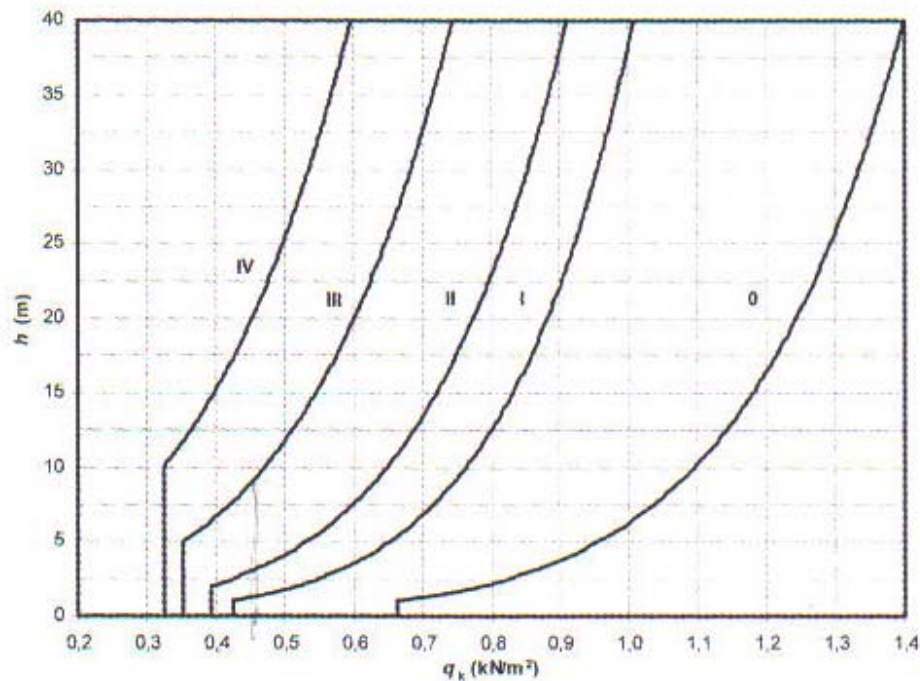


Kuvio 7: Maanpinnan lumikuorman ominaisarvo s_k (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 11)

Kaksikerroksisessa rakennuksessa elementille tulee pystykuormia lisäksi toisen kerroksen hyötykuormasta. Asuinrakennuksessa hyötykuorman ominaisarvo on $2,0 \text{ kN/m}^2$.

3.4 Vaakakuormat

Vaakasuuntaan elementtiin vaikuttaa tuulikuorma (Kuvio 8). Jotta tuulikuorma saataisiin mahdollisimman isoksi, oletetaan rakennuksen sijaitsevan maastoluokassa I. Maastoluokka I määritellään seuraavasti: järvi tai alue, jolla on vähäistä kasvillisuutta eikä esteitä (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 12).



Kuvio 8: Tuulen nopeuspaineen ominaisarvot q_k (h) eri maastoluokissa (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 13)

Rakennukseen kohdistuva vakavuuslaskelmissa käytettävä staattinen kokonaistuulikuorma saadaan kaavan 2 mukaisesti.

$$F_{w,k} = C_f \cdot q \cdot A \quad (2)$$

jossa

$F_{w,k}$ on kokonaistuulikuorma, sen oletetaan vaikuttavan $0,6 \cdot h$ korkeudella maasta,

C_f = voimakerroin, umpinaisilla rakennuksilla yleensä $C_f = 1,3$,

q = tuulen nopeuspaine,

A = rakenteen tuulta vastaan kohtisuora projektiopinta-ala.

Pystyrakenteiden mahdollisesta vinoudesta tai kuormituksen epäkeskisyydestä aiheutuvat lisävaakavoimat voidaan laskea kaavasta 3 (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 11).

$$H_L = \frac{B}{L} \frac{P_d}{150} \geq \frac{P_d}{250} \quad (3)$$

jossa

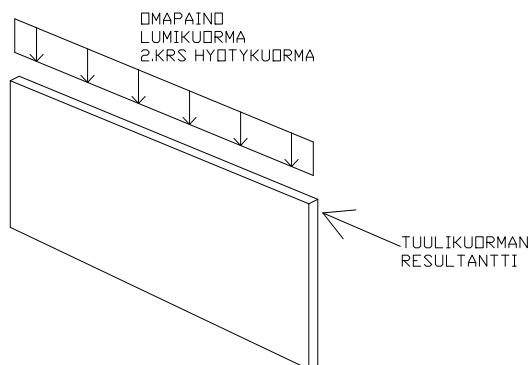
H_L on lisävaakavoima rakennuksen pidemmässä suunnassa,

P_d on pystykuorman laskenta-arvo,

B on rakennuksen leveys,

L on rakennuksen pituus.

Kun kaikki edellämainitut kuormat lasketaan, saadaan elementti yksinkertaisempaan muotoon (Kuvion 9). Ulkoisia kuormia elementille kertyy siis pystysuuntaisista kuormista, jotka vaikuttavat tasaisesti koko elementin matkalla, sekä vaakasuuntaisesta tuulikuormasta, jonka resultantti vaikuttaa elementin ylänurkassa.



Kuvio 9: Elementille tulevat kuormat

3.5 Kuormitusyhdistelmät

Jotta saataisiin selville vaarallisimmat kuormien yhdistelmät kullekin rakenneosalle ja koko elementin vakavuudelle, kuormista tulee tehdä kaikki mahdolliset yhdistelmät. Joissain tapauksissa rasiutukset ovat kovimmillaan, kun kaikki kuormat ovat maksimissaan, mutta on myös tapauksia, joissa rasiutus on kovempi, kun jotkin kuormat ovat minimissään. Esimerkiksi kun elementtiin kohdistuva pystykuorma on mahdollisimman pieni ja tuulikuorman resultantti puolestaan mahdollisimman suuri, elementti pääsee vinoutumaan, jolloin siirtymä on suurimmillaan.

Mitoitusohjelmat laskevat yleensä automaattisesti kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelmät ja etsivät niiden joukosta pahimmat tapaukset. Käsien laskien tämä on hiukan työläämpää. Taulukoissa 2 - 4 on esitetty kaikki eri yhdistelmät, jotka tässä tapauksessa tulisi laskea, jotta saadaan selville niistä vaarallisimmat. Muuttuvia kuormia on tapauksesta riippuen kaksi tai kolme: lumi ja tuuli joka tapauksessa, sekä kaksikerroksisessa rakennuksessa lisäksi välipohjan hyötykuorma.

Taulukko 2: Kuormien mitoitusarvot staattisen tasapainon tarkastelussa (Eurokode. Rakenteiden suunnitteluperusteet 2002, 86)

Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat	
Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut
$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

$$\gamma_{Gj,sup} = 1,10$$

$$\gamma_{Gj,inf} = 0,90$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5 \text{ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa)}$$

$$\gamma_{Q,i} = 1,5 \text{ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa)}$$

Taulukko 3: Kuormien mitoitusarvot rakenneosien kestävyys tarkastelussa (Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet 2002, 88)

Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat	
Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut
$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

$$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$$

$$\gamma_{Gj,inf} = 1,00$$

$$\gamma_{Q,1} = \gamma_{Q,i} = 1,5 \text{ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa)}$$

Taulukko 4: Kuormien mitoitusarvot käyttörajatilassa (Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet 2002, 90)

Yhdistelmä	Pysyvät kuormat G_d		Muuttuvat kuormat Q_d	
	Epäedulliset	Edulliset	Määräävä	Muut
Ominaisyhdistelmä	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Tavallinen yhdistelmä	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Pitkäaikaisyhdistelmä	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Taulukko 5: Kertoimen ψ suositusarvot rakennuksille (Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet 2002, 4)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1-3) ^{*)}			
Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,50	0,20	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
HUOM. Kertoimien ψ arvot voidaan määrittellä kansallisessa liitteessä. ^{*)} Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen.			

4 Laskennan kulku käsinlaskentana

Elementin laskenta ja mitoitus kokonaisuutena tehdään mitoitusohjelmien avulla, mutta yksittäisten elementin osien kestävyys voidaan tarkastaa helposti myös käsinlaskien. Tähän tarkoitukseen pitää etsiä kuormitustapaukset, jotka aiheuttavat mahdollisimman suuret rasitukset laskettavaan rakenneosaan. Käsinlasketut tulokset antavat kuitenkin vastauksen vain näiden yksittäisten osien kestävyydestä niihin kohdistuvia maksimirasituksia vastaan, eivät elementin kestävyydestä kokonaisuudessaan. Liitteenä (Liite 1) on esimerkkilaskelma erään rakennuksen yhden elementin kestävyydestä erilaisissa tilanteissa ja eri kuormituksilla.

Murtorajatilassa on syytä tarkastaa pystytolppien kestävyys syysuuntaiselle puristukselle, sekä taivutukselle ja nurjahdukselle. Ylä- sekä alapalkkiin kohdistuu joissain kuormitustapauksissa suuri syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus. Yläpalkin osalta pitää tarkastaa kestävyys leikkaus- ja taivutusrasitukselle, myös kiepahdustarkastelu on syytä tehdä. Tuuli aiheuttaa tietyissä kuormitustapauksissa yläpalkkiin syysuuntaista puristusta, mikä taas vaikuttaa olennaisesti elementin jäykkyysslaskennassa. Käyttöraajatilassa sensijaan pitää tutkia rakenneosien taipumat, siirtymät sekä liitosten kestävyys. Ellei toisin ole mainittu, kaikki tässä työssä esiintyvät kaavat ovat lähteestä Eurokoodi 5, Puurakenteiden suunnittelu.

4.1 Laskennan lähtötietoja

Puutavara: C24

Aikaluokka: keskipitkä tai hetkellinen, vaihtelee tapauksen mukaan.

Käyttöluokka: 2

Laskennassa tarvittavien kertoimien määrittelyssä tarvitaan tietoa rakenteen olosuhteista kuormitustilanteessa. Elementti tulee olemaan käyttökuokassa 2, joka määritellään seuraavasti. ”Käyttöluokassa 2 on tyypillistä, että materiaalien kosteus on lämpötilaa 20 °C vastaava ja ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää arvon 85 % vain muutamana viikkona vuodessa (Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu 2004, 50).”

Kuorman kesto ja puun kosteus vaikuttavat puun lujuus- ja jäykkysominaisuuksiin ja ne otetaan laskelmissa huomioon k_{mod} -kertoimella. Taulukoista 6 ja 7 valitaan kuorman aika- ja käyttöluokka, joiden perusteella saadaan laskuissa käytettävä muunnoskerroin k_{mod} .

Taulukko 6: Muunnoskerroimen k_{mod} arvot (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 17)

Materiaali	Standardi	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
			Pysyvä kuorma	Pitkäaikainen kuorma	Keskipitkä kuorma	Lyhytaikainen kuorma	Hetkellinen kuorma
Sahatavara	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,60	0,55	0,65	0,70	0,90

Taulukko 7: Kuormien aikaluokat (Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu 2004, 50)

Kuorman aikaluokka	Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta - 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko - 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle yksi viikko
Hetkellinen	

Taulukko 8: Esimerkkejä kuormien jaottelusta aikaluokkiin (Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu 2004, 50)

Kuorman aikaluokka	Esimerkkejä kuormista
Pysyvä	oma paino
Pitkäaikainen	varastoitu tavara
Keskipitkä	välipohjan hyötykuorma, lumi
Lyhytaikainen	lumi, tuuli
Hetkellinen	tuuli, onnettomuuskuorma

4.2 Syysuuntainen puristus

Pystytolpalle syysuuntaista puristusta aiheuttavat pystykuormat. Jotta palkki kestää puristuksen, tulee seuraavan ehdon toteutua.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (4)$$

jossa

$\sigma_{c,0,d}$ on syysuuntaisen puristusjännituksen mitoitusarvo,

$f_{c,0,d}$ on syysuuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo,

k_{mod} on muunnoskerroin,

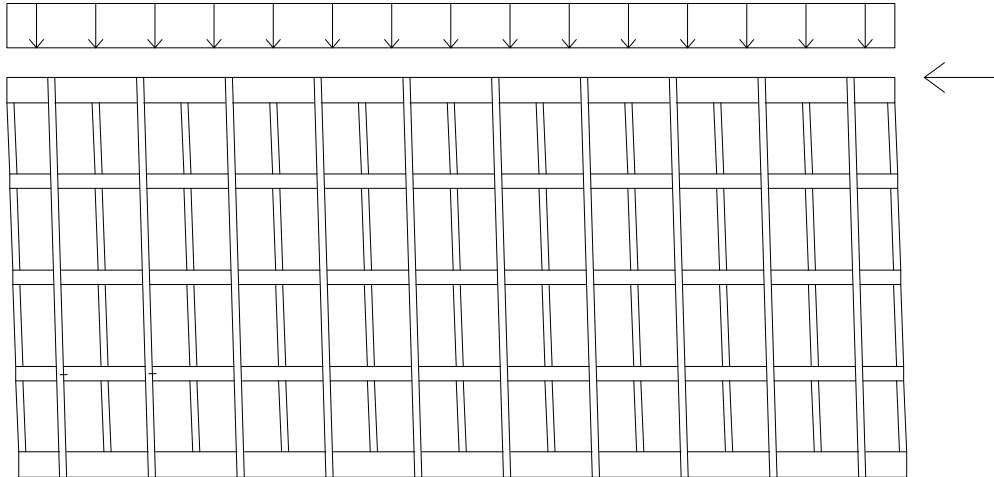
γ_M on materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku, joka sahatavaralla on 1,3.

Myös vaakapalkin kestävyys syysuuntaista puristusta vastaan pitää tarkistaa, mutta siihen kohdistuvan vaakasuuntaisen puristusvoiman aiheuttaa tuuli, mikä huomioidaan k_{mod} -kertoimella (Taulukko 6).

Samassa kuormitustapauksessa syysuuntaista puristusta aiheutuu myös vaakalaudoille (Kuvio 10), joten myös vaakalaudan kestävyys puristukselle on tarkastettava.

4.3 Syysuuntainen veto

Kuormitustapauksessa, jossa elementin ylänurkkaan vaikuttava tuulikuorman resultantti on maksimissaan ja elementtiin vaikuttava pystykuorma minimissään, elementti pyrkii taipumaan salmiakin muotoon, jolloin pystytolpille aiheutuu syysuuntaista vetoa Kuvion 10 mukaisesti.



Kuvio 10: Tuulikuorman resultantin aiheuttama vetorasitus pystytolpissa

Seuraava ehto tulee tarkastaa.

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (5)$$

jossa

$\sigma_{t,0,d}$ on syysuuntaisen puristusjännituksen mitoitusarvo,

$f_{t,0,d}$ on syysuuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo.

4.4 Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus

Syysuuntaa vastaan kohtisuoraa puristusta aiheutuu yläpalkille sekä alapalkille rakennuksen omapainoista, mahdollisesta 2. kerroksen hyötykuormasta sekä lumikuormasta. Jotta palkki kestäisi rasitukset, seuraavan ehdon tulee täyttyä.

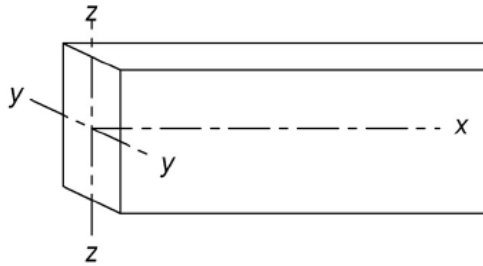
$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = 1 \cdot \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (6)$$

jossa

$\sigma_{c,90,d}$ on syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristusjännituksen mitoitusarvo,

$f_{c,90,d}$ on syysuuntaa vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo,

$k_{c,90}$ on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman sijainti, halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruus. Arvo vaihtelee välillä 1-4, riippuen siitä, miten kuorma jakautuu yläpalkille.



Kuvio 11: Sauvan akselit

4.5 Taivutus

Taivutusta yläpalkille z-suunnassa (Kuvio 11) aiheuttavat rakennuksen omapainot, mahdollinen 2. kerroksen hyötykuorma sekä lumikuorma. Tuulikuorma sensijaan aiheuttaa palkille samanaikaisesti y-suuntaista taivutusta. Jotta palkki kestää taivutuksen, tulee seuraavien ehtojen toteutua.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7)$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (8)$$

joissa

$\sigma_{m,y,d}$ ja $\sigma_{m,z,d}$ ovat taivutusjännitysten mitoitusarvot eri akselien suhteen tapahtuvassa taivutuksessa,

$f_{m,y,d}$ ja $f_{m,z,d}$ ovat vastaavien taivutuslujuuksien mitoitusarvot,

$k_m = 0,7$ sahatavaralla, kun kyseessä suorakaidepoikkileikkaus. Kertoimen avulla otetaan huomioon jännitysten uudelleen jakautuminen ja poikki-leikkauksen materiaalin epähomogeenisuuden vaikutus.

4.6 Leikkaus

Leikkausvoimaa yläpalkille aiheuttavat pystykuormat.

$$\tau_d \leq f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \quad (9)$$

jossa

τ_d on leikkausvoiman mitoitusarvo,

$f_{v,d}$ on leikkauslujuuden mitoitusarvo.

4.7 Yhdistetyt jännitykset

Yhdistettyjä jännityksiä muodostuu sekä yläpalkille että pystytolpalle. Palkin kannalta pitää tarkastaa kestävyys yhtä aikaa pystykuormien aiheuttamalle taivutukselle sekä tuulen aiheuttamalle syysuuntaiselle puristukselle. Tolpalle sen sijaan puristusta aiheuttavat pystykuormat ja taivutusta tuulikuorma. Jotta rakenneosat kestäisivät kyseiset rasitukset, seuraavien ehtojen tulee toteutua.

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{\text{crit}} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (12)$$

joissa

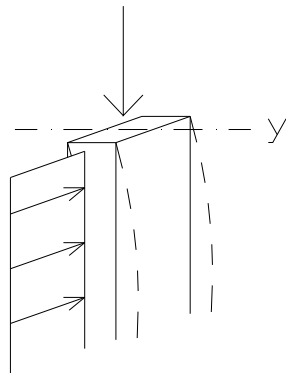
k_{crit} on kiepahduskerroin,

$k_{c,y}$ ja $k_{c,z}$ ovat nurjahduskertoimia.

Kuormien aiheuttamien jännitysten lisäksi tulee mitoituksessa ottaa huomioon ne jännitykset, jotka aiheuttavat pilarin alkukäyryydestä ja taipumista sekä kuorman epäkeskisyydestä.

4.8 Nurjahdus

Tolpan nurjahdus otetaan huomioon pienentämällä puristuslujuutta nurjahduskeroimella $k_{c,y}$ tai $k_{c,z}$ kaavojen 13 - 16 mukaan. Ensin lasketaan pystytolpan suhteellinen heikkous, jonka avulla nurjahduskertoimet saadaan selville. Tässä tapauksessa riittäisi, kun tarkastellaan tolppan nurjahdusta y-akselin ympäri eli tolpan vahvempaan suuntaan. Tämä siksi, koska heikommassa suunnassa tolppalle ei tule tuulen aiheuttamaa taivutusrasitusta. Varmuuden vuoksi on kuitenkin hyvä tarkastaa nurjahdus myös z-akselin ympäri, jolloin tolppaan kohdistuu ainoastaan puristusrasitus.



Kuvio 12: Pystytolpan nurjahdus y-akselin ympäri

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (13)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (14)$$

joissa

λ_y ja $\lambda_{rel,y}$ ovat taivutusta y-akselin suhteen vastaava hoikkuusluku ja siitä

laskettu suhteellinen hoikkuus,

λ_z ja $\lambda_{rel,z}$ ovat taivutusta z-akselin suhteen vastaava hoikkuusluku ja siitä

laskettu suhteellinen hoikkuus,

$E_{0,05}$ = on viiden prosentin (alempaa) fraktiilia vastaava, syysuuntaista

kuormitusta vastaavan kimmokertoimen arvo.

Nurjahduskertoimet lasketaan kaavoilla 15 ja 16.

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (15)$$

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (16)$$

jossa $\beta_c = 0,2$ sahatavaralle.

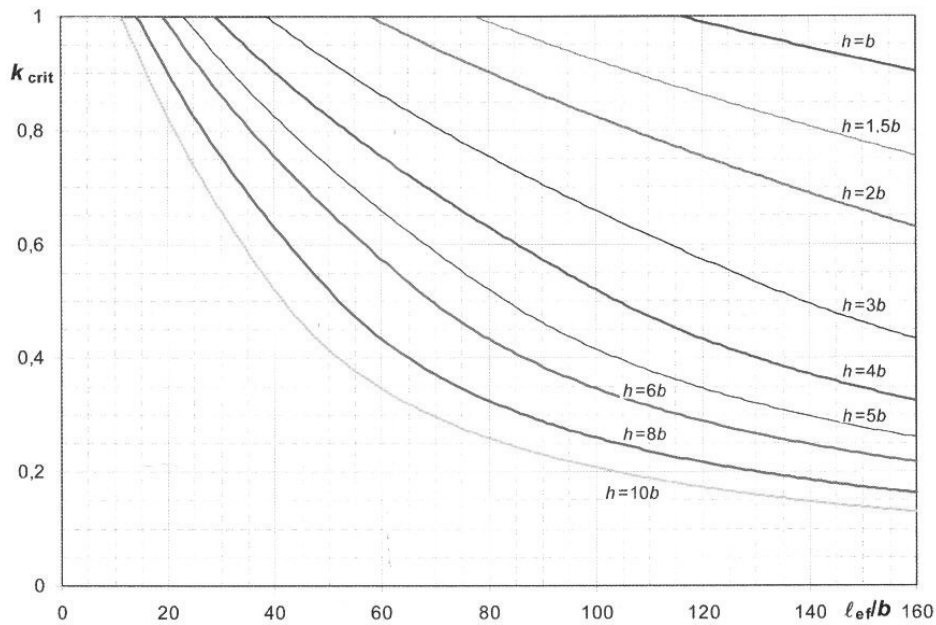
Samalla tavoin lasketaan palkille nurjahduskerroin $k_{c,z}$. Palkilla kuormat tulevat eri suunnista kuin tolpalla.

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (17)$$

$$k_z = 0,5(1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (18)$$

4.9 Kiepahdus

Yläpalkin kohdalla otetaan kiepahdus huomioon pienentämällä taivutuslujuutta kiepahduskeroimella k_{crit} . Kiepahduskerroin voidaan laskea tai arvioida kuvaajalta (Kuvio 13).



Kuvio 13: Kiepahduskertoimen k_{crit} riippuvuus tehollisen pituuden l_{ef} suhteesta palkin leveyteen b , kun h on palkin korkeus (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 27)

$$l_{ef} = a + 2h \quad (19)$$

jossa

l_{ef} on tehollinen kiepahduspituus,

a on palkin puristetun reunan poikittaistuentäväli,

h on palkin korkeus.

4.10 Liitokset

Elementin liitoksissa olevien nauhojen oletetaan ottavan vastaan vain puuosien suuntaisia leikkausvoimia ja pitävän puuosat yhdessä. Nauhojen ei siis oleteta osallistuvan liitoksen jäykistykseen, vaan jäykistys hoidetaan kokonaan liitoksen muodolla eli loveuksella. Naulaukselle ei ole esimerkiksi määritetty minkäänlaisia reunaetäisyyksiä, joten sen ei voida olettaa ottavan vastaan momenttia liitoksessa. Liittimien leikkauskestävyys tulee kuitenkin tarkastaa. Kahden puuosan välisen naulaliitoksen kestävyys ominaisarvo on pienin seuraavista.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,2,k} t_2 d \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (20)$$

jossa

$F_{v,Rk}$ on kestävyys ominaisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti,

$f_{h,1,k}$ ja $f_{h,2,k}$ ovat puosauvojen 1 ja 2 reunapuristuslujuuksien ominaisarvot,

t_1 ja t_2 ovat puosauvojen paksuus tai liittimen tunkeuma puuhun,

d on liittimen paksuus tai halkaisija,

β on sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde,

$M_{y,Rk}$ on liittimen myötömomentin ominaisarvo,

$F_{ax,Rk}$ on liittimen ulosvetokestävyys ominaisarvo.

4.11 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa tarkastetaan elementtiin kohdistuvien rasitusten aiheuttamat muodonmuutokset. Ulkoiset kuormat aiheuttavat elementin osissa taipumia eri suuntiin ja lisäksi siirtymiä esimerkiksi liitoskohdissa. Taulukossa 9 on esitetty taipumien ja rakennuksen vaakasiirtymien enimmäisarvot.

Taulukko 9: (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 21)

Rakenne	$w_{inst}^{1)}$	$w_{net,fin}^{2)}$	$w_{fin}^{3)}$
Pääkannattimet	$l/400$	$l/300$	$l/200$
Orret ja muut toisiokannattimet	-	$l/200$	$l/150$
Rakennuksen vaakasiirtymä	-	$H/300$	-

jossa

l on jänneväli

H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus

1) Koskee pelkästään lattioita

2) Ei koske tukipisteiden välillä kaarevia tai taitteellisia rakenteita/ rakenneosia.

3) Koskee esikorotettuja sekä tukipisteiden välillä kaarevia tai taitteellisia rakenteita.

Palkin taipuma lasketaan kaavalla 21. Palkin jännevälinä voidaan pitää elementin tolpaväliä, mutta lisäksi on erikseen tutkittava ikkuna- tai oviaukon kohdalla oleva pidempi jänneväli.

$$u_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot u_{inst,g} + (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) \cdot u_{inst,q1} + (\psi_{0,1} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \cdot u_{inst,q2} \quad (21)$$

jossa

u_{fin} on lopputilassa vallitseva muodonmuutostila,

k_{def} on käyttöluokasta riippuva virumaluku (Taulukko 10),

$u_{inst,g}$, $u_{inst,q1}$, $u_{inst,q2}$ ovat kuormasta g, q1 tai q2 aiheutuva hetkellinen muodonmuutostila,

$\psi_{2,1}$ ja $\psi_{2,i}$ ovat muuttuvien kuormien pitkäaikaisarvon yhdistelykertoimet,

$\psi_{0,i}$ ovat muuttuvien kuormien yhdistelykertoimia.

Taipuma tässä tapauksessa, kun kyseessä on moniaukkoinen palkki, lasketaan kaavalla 22.

$$u_{inst} = \frac{1}{184,6} \frac{P \cdot l^4}{EI} \quad (22)$$

Taulukko 10: Sahatavaran virumaluvun k_{def} arvot (Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje 2008, 17)

Materiaali	Standardi	Käyttöluokka		
		1	2	3
Sahatavara	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00

Elementin ylänurkan siirtymä lasketaan mitoitusohjelmalla, koska sen käsinlaskenta olisi työlästä.

5 Elementin laskenta mitoitusohjelmalla

5.1 Comsol Multiphysics -ohjelma

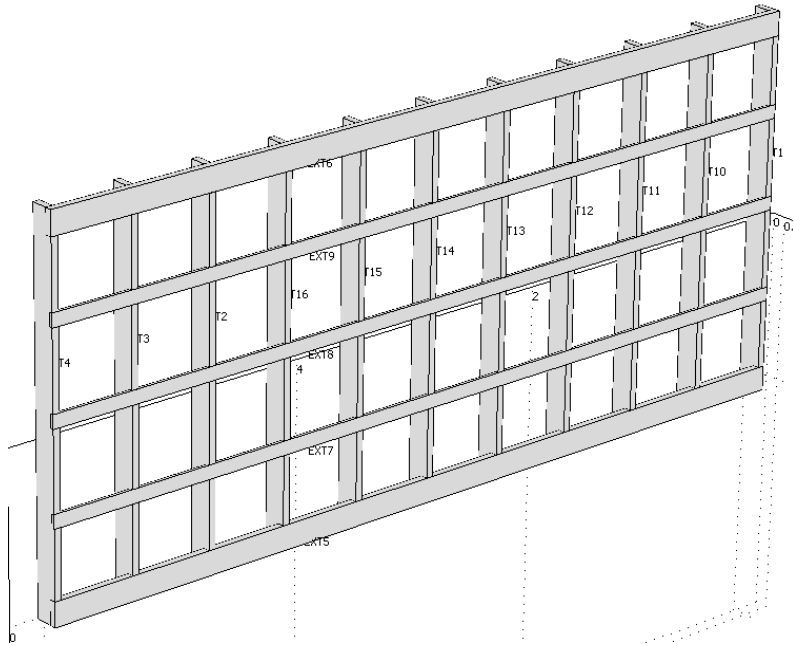
Comsol Multiphysics on elementtijärjestelmään perustuva todella monipuolinen rakenteiden laskenta- ja analysointiohjelma. Ohjelmassa on erittäin laaja materiaalitietokanta, joka sisältää tarkat tiedot materiaaleista, niiden ominaisuuksista sekä käyttäytymisestä eri tilanteissa. Comsolilla voidaan laskea ja analysoida rakenteen tai sen osan muodonmuutoksia sekä rakenteeseen kohdistuvia voimia ja jännityksiä esimerkiksi palotilanteessa tai rakenteen lämpölaajetessa. Ohjelmalla voidaan laskea monimutkaisia ja suuriakin rakenteita, mutta se soveltuu erittäin hyvin myös pienten yksityiskohtien analysointiin.

Comsol Multiphysics -ohjelman ominaisuudet ovat todella laajat, ja tässä työssä tarvitaan vain murto-osaa siitä, mihin Comsol pystyisi. Ominaisuudet tulevatkin paremmin esiin, kun tarkastellaan jotakin rakennetta tai kappaletta tarkemmin ja halutaan siitä irti muutakin kuin tavanomainen lujuus- ja rasitusanalyysi. Esimerkiksi virtaus, diffuusio, sähkömagneettisuus, lämmönsiirtyminen, akustiikka ja ominaisvärähtely kuuluvat ohjelman perusominaisuuksiin ja hoituvat Comsolilla taitavalta käyttäjältä helposti.

Tässä työssä keskitytään Comsolilla jäykkyysslaskentaan sekä elementin liitoskohtaan, siihen kohdistuviin rasituksiin ja siellä tapahtuviin muodonmuutoksiin.

5.2 Rakennemalli

Elementin rakennemallin luominen Comsolilla aloitetaan piirtämällä elementin osista poikkileikkaukset, antamalla niille mitat ja muodostamalla niistä kokonainen elementti (Kuvio 14). Tämän jälkeen elementille annetaan materiaalitiedot, joiden perusteella laskelmat voidaan tehdä. Kun vielä lisätään kuormat ja tuet, laskenta voidaan suorittaa.



Kuvio 14: Comsol Multiphysics -ohjelmalla piirretty Metrirunko-elementti

5.3 Elementin kuormitus

Koska Comsol ei laske automaattisesti kaikkia mahdollisia kuormitusyhdistelmiä, on järkevintä valita manuaalisesti kuormitusyhdistelmistä pahimmat taulukko-ohjelman avulla, ja tehdä tarkastelu Comsol-ohjelmassa näillä valituilla yhdistelmillä. Excellillä voidaan helposti tehdä luettelo kaikista mahdollisista yhdistelmistä, joita kuormista saadaan kussakin tapauksessa. Listasta on helppo poimia pahimmat yhdistelmät ja suorittaa laskenta niillä. Tämän työn liitteenä (Liite 3) on excell-tilukko kaikista kuormitusyhdistelmistä.

Tässä työssä tehtiin elementin laskenta esimerkkilaskelman (Liite 1) mukaan ja käytettiin esimerkkilaskelman kuormia myös Comsolissa. Tapausta helpotti oleellisesti, että oli tiedossa kuormat sekä rakennuksen koko ja muoto. Tämä nimittäin karsii ohjelmaan syötettävät kuormitustapaukset vain muutamaaan. Kuten käsinlaskiessakin todettiin, yksittäisten rakenneosien pahimmat rasitukset muodostuvat, kun kaikki kuormat ovat maksimissaan. Muodonmuutosten kannalta taas pahin kuormitusyhdistelmä saattaa olla pystykuormien ollessa minimissään ja vaakakuormien sensijaan maksimissaan. Jotta

saataisiin kattavampi tulos, joka pätee mille tahansa elementille, tulisi ohjelmaan syöttää kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelmät, mutta tällöinkin ohjelmassa jouduttaisiin vielä muuttamaan kuormia manuaalisesti. Tässä suhteessa Comsol ei ole paras työkalu tämän kaltaiseen tehtävään. Ohjelman hyötypuolena taas voidaan mainita, että se antaa tulokset erittäin näyttävänä ja tarkkoina kuvaajina.

5.4 Rakenteen staattinen tasapaino

Tätä työtä varten elementin laskenta suoritettiin kahdella eri kuormituksella jokaisessa tarkastelussa. Rakenteen staattisen tasapainon kohdalla ensimmäisessä kuormitustapauksessa pystysuuntainen kuormitus sekä vaakasuuntaisten voimien resultantti ovat maksimissaan, kun tarkastellaan esimerkkilaskelmassa käytettyjä kuormia. Nämä kuormat on valittu niin, että elementin kuormitus muodostuisi mahdollisimman suureksi. Luonnonkuormat ovat Suomen mittakaavassa maksimissaan ja rakenteiden omapainot ovat arvioitu mahdollisimman suuriksi. Toisessa kuormitustapauksessa tuulikuorman aiheuttama vaakasuuntainen voima on maksimissaan, mutta pystykuormat sen sijaan mahdollisimman pienet. Näin elementille aiheutuu mahdollisimman suuri vaakasuuntainen rasitus, eikä pystykuorma ole pitämässä elementtiä paikoillaan kuten edellisessä tapauksessa.

5.5 Rakenneosien kestävyys

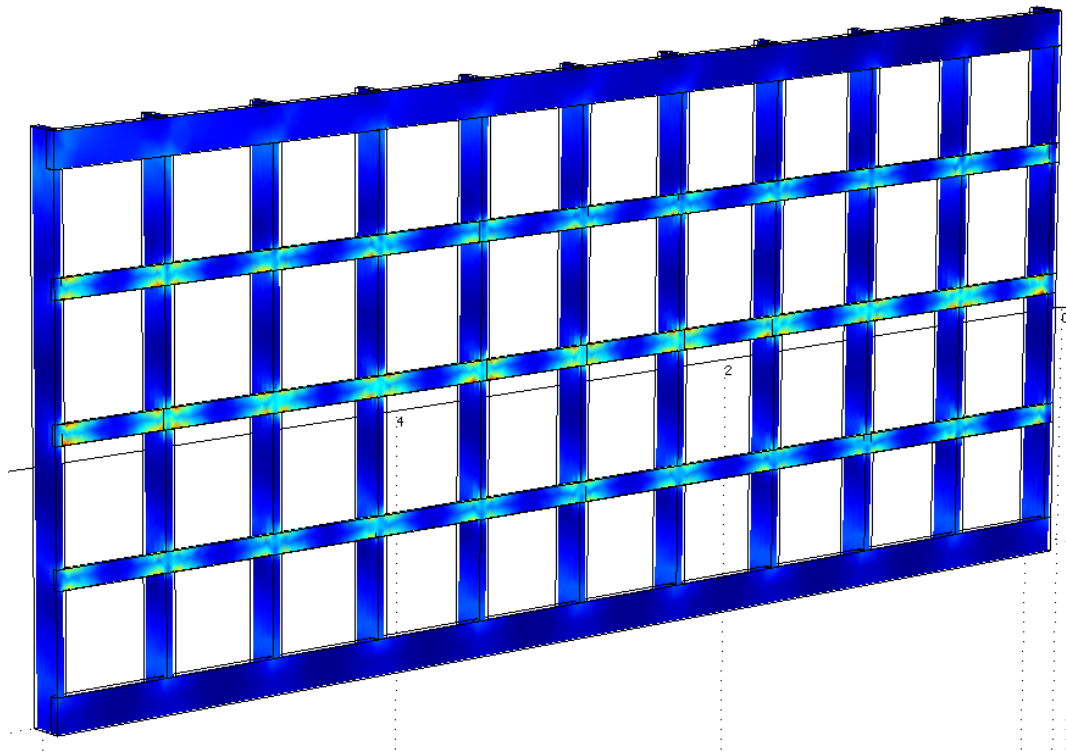
Comsolilla rakenneosien kestävyys tarkistetaan myös kahdella eri kuormituksella, valiten excell-taulukosta (Liite 3) rakenneosien kannalta pahimmat yhdistelmät. Toisessa rasitukset ovat maksimissaan ja toisessa vaakakuorma suurin mahdollinen ja pystykuorma sensijaan mahdollisimman pieni. Kuten käsinlaskentana (Liite 1) jo todettiin, suuri osa kokonaisen elementin rakenneosista kestää hyvin, kun tolppaväli pysyy normaalina, eli toisin sanoen elementtiä ei katkaista osiin eikä elementtiin tehdä aukkoja.

5.6 Käyttörajatila

Muodonmuutokset kuten siirtymät ja taipumat tarkastetaan käyttörajatilan kuormituksilla. Samoin kuin edellä, elementin kestävyys tarkastetaan kahdella kuormitustapauksella myös käyttörajatilassa.

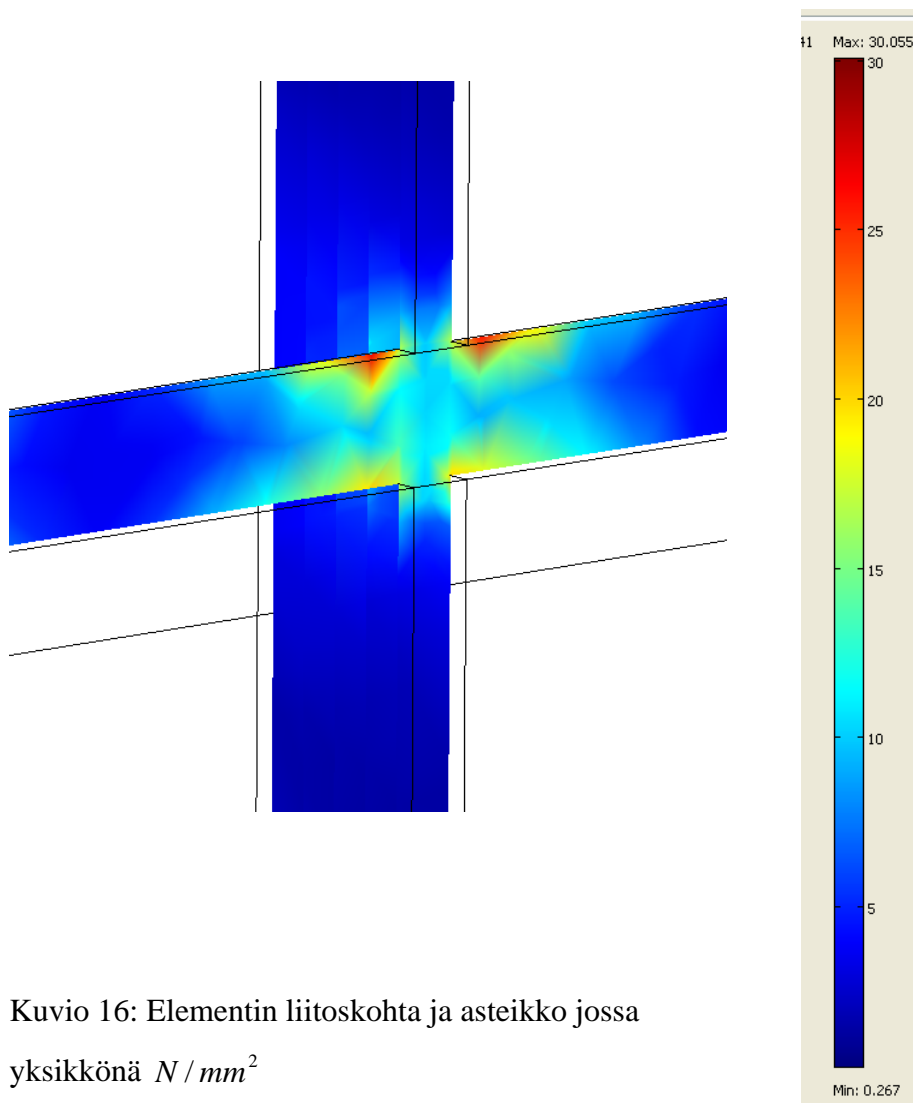
5.7 Laskennan tulosten tarkastelu

Ensimmäinen laskenta suoritettiin kokonaiselle elementille maksimikuormituksella tarkastellen rakenteen staattista tasapainoa. Käytännössä rakenneosien kestävyys voidaan tässä esimerkissä tarkastella samalla, koska näiden kahden tapauksen laskentamaksimi- ja laskentaminimikuormat ovat lähes samat. Kuviosta 15 nähdään elementissä vaikuttavat rasitukset. Koska vaakasuuntainen tuulikuorman resultantti vaikuttaa elementin vasemmassa ylänurkassa, se aiheuttaa jännityksiä elementin liitoskohtiin ja pyrkii vääntämään vaakalautoja liitoksen kohdalta.



Kuvio 15: Elementissä vaikuttavat jännitykset

Kun tarkastellaan liitoskohtaa tarkemmin (Kuvio 16), nähdään, että suurimmat rasitukset kohdistuvat vaakalautaan. Suurimmillaan tässä kuormitustapauksessa rasitus on $30,0 N/mm^2$ kun taas vaakalaudan puristuskestävyys on vain noin $18,0 N/mm^2$ (Liite 1). Kokonainen elementti ei siis kestä rasituksia ilman lisäjäykistystä näillä kuormilla, kun tarkastellaan rakenneosien kestävyyttä. Rakenteen staattisen tasapainon kannalta kokonainen elementti on riittävän jäykkä ja kestävä, sillä kuten asteikosta nähdään, on tolppien alapäissä vain pienet jännitykset. Elementin kiinnitys alajuoksuun tapahtuu naulaamalla se suhteellisen tiheästi alapalkista kiinni, joten voidaan todeta, että kiinnitys on elementin irtoamisen ja kaatumisen kannalta riittävä. Olivatpa naulat sitten minikäyttöä tahansa, on niiden ulosvetolujuus joka tapauksessa tässä tapauksessa moninkertainen (Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet 2005, 81).

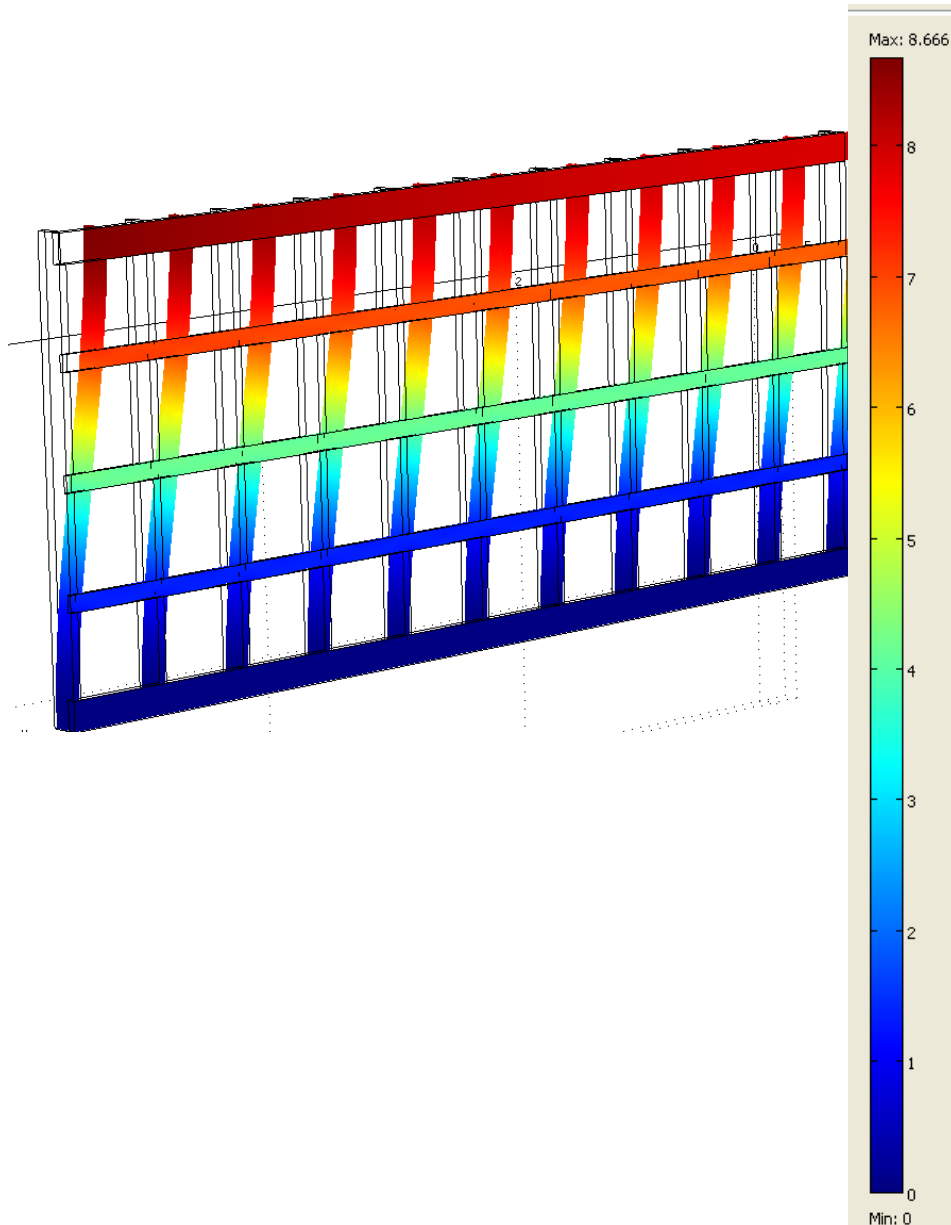


Kuvio 16: Elementin liitoskohta ja asteikko jossa yksikkönä N/mm^2

Vaikka se tässä tapauksessa on tarpeetonta, samat tarkastelut tehdään toisella kuormitustapauksella, jossa vaakakuorma on maksimissaan ja pystykuorma minimissään. Laskenta tuottaa samanlaisen kuvaajan, jossa maksimijännitys samalla tavoin ylittää vaakalaudan kestävyuden.

Oletetusti kokonainenkaan elementti ei ole riittävän jäykkä eikä näinollen kestä rasiuksia. Tämä johtuu siitä, että kaksikerroksisessa rakennuksessa alakerran elementille tulevan maksimi vaakakuorman resultantti kertyy niin suurelta alalta ja on niin suuri, että se ylittää elementin vaakalautojen kestävyuden.

Kun tarkastellaan edelleen elementin muodonmuutoksia käyttörajatilan kuormilla, saadaan seuraavanlainen kuvaaja (Kuvio 17). Kuviossa punaisin väri kuvaa suurinta siirtymää, ja maksimi siirtymä tällä kuormituksella on $8,7 \text{ mm}$. Rakennuksen suurin sallittu vaakasiirtymä on $H/300$, eli tässä tapauksessa $2700/300 = 9 \text{ mm}$. Kuuden metrin pituis- ta, kokonaista elementtiä voidaan siis pitää käyttörajatilan kannalta riittävän jäykkänä. Tämä ei kuitenkaan riitä, vaan tuloksena näillä kuormilla on että elementti ei ilman lisäjäykistystä, kuten esimerkiksi rakennuslevyjä, kestä sille tulevia rasiuksia.



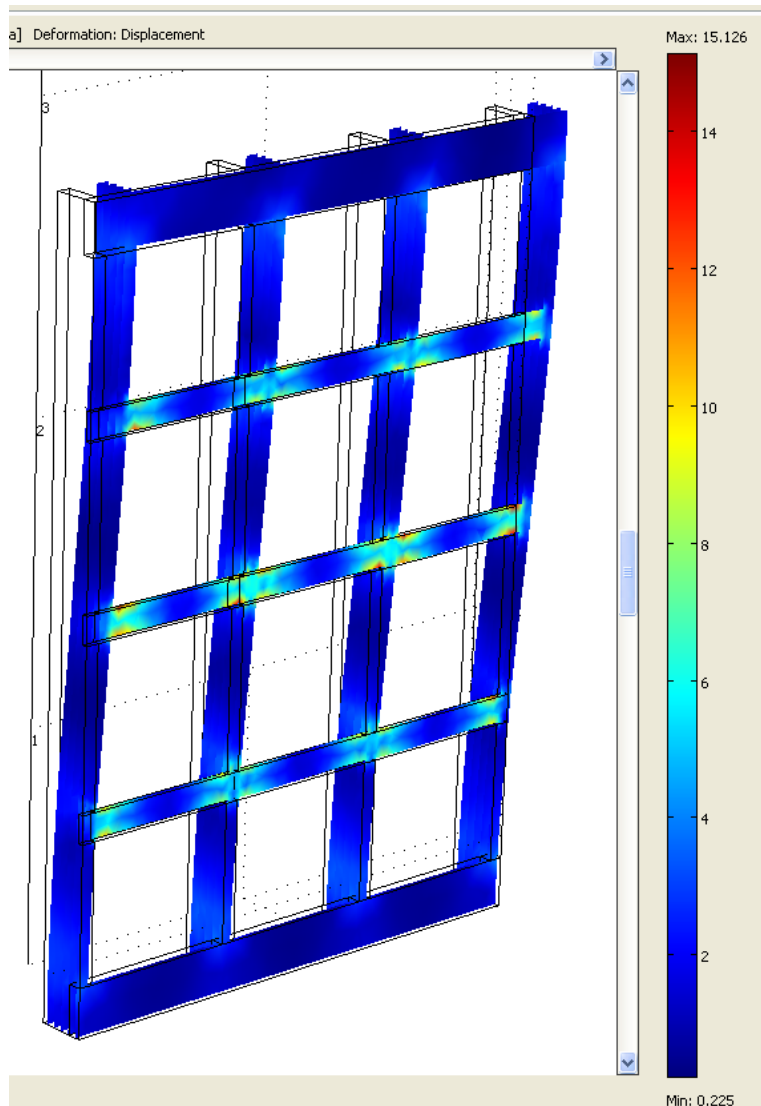
Kuvio 17: Elementin muodonmuutokset käyttörajatilassa, kun pystykuorma on minimissään ja vaakakuorma maksimissaan, asteikon yksikkönä millimetri

Pitää ottaa huomioon, että nyt laskenta on suoritettu mahdollisimman suurilla kuormilla. Jos rakennus olisi esimerkiksi vain yksikerroksinen, olisivat pystykuormat huomattavasti pienemmät, samoin elementille tuleva vaakakuorma. Jossain tapauksessa kaksikerroksisen rakennuksen kokonainen elementti voisi hyvin kestää rasitukset, kun esimerkiksi tuulikuorman resultantti voisi olla huomattavasti esimerkkilaskelmassa arvioitua pienempi. Seuraavaksi tutkitaan samaa rakennusta yksikerroksisena, jotta voidaan vertailla miten kuormituksen pieneminen vaikuttaa elementin kestävyyteen ja jäykkyyteen. Ja

samalla selvitettyä, soveltaisiko Metrirunko-elementti sellaisenaan yksikerroksisiin rakennuksiin ilman lisäjäykistystä.

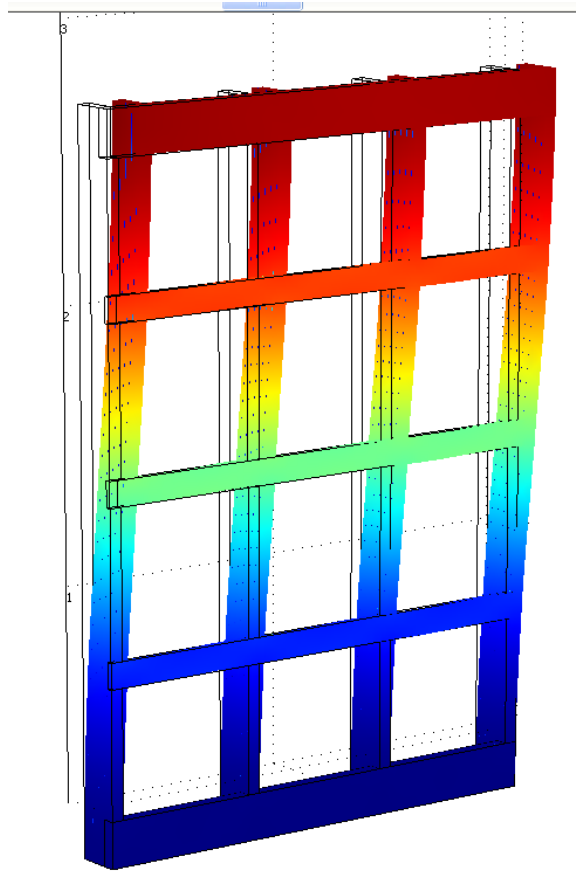
Kun tarkastellaan yksikerroksista rakennusta, laskevat pystysuuntaiset kuormat huomattavasti, kun esimerkiksi toisen kerroksen hyötykuorma jää kokonaan pois laskuista. Samoin vaakakuormat laskevat lähes kolmasosaan, koska pinta-ala, jolta tuulikuormaa kertyy, on huomattavasti pienempi. Kun aloitetaan laskenta yksikerroksisen rakennuksen kokonaisella elementillä, huomataan, että se kestää rasitukset erittäin hyvin. Tämän jälkeen lyhennetään elementtiä ja siirrytään tutkimaan, minkä pituinen elementin osuus on vielä tarpeeksi jäykkä ja kestävä.

Aluksi tarkastellaan vain kaksi pystytolppaa sisältävää elementin osaa, ja kasvatetaan osan pituutta lisäämällä yksi pystytolppa kerrallaan, kunnes se kestää rasitukset, ja muodonmuutokset pysyvät sallituissa rajoissa. Neljä pystytolppaa sisältävä elementin osa on lyhin mahdollinen, joka kestää, kun tutkitaan rakenneosien kestävyyttä sekä staattista tasapainoa maksimikuormituksilla. Vaakalaudalle tuleva rasitus, $15,1 \text{ N} / \text{mm}^2$, on pienempi kuin laudan vastaava kestävyys.



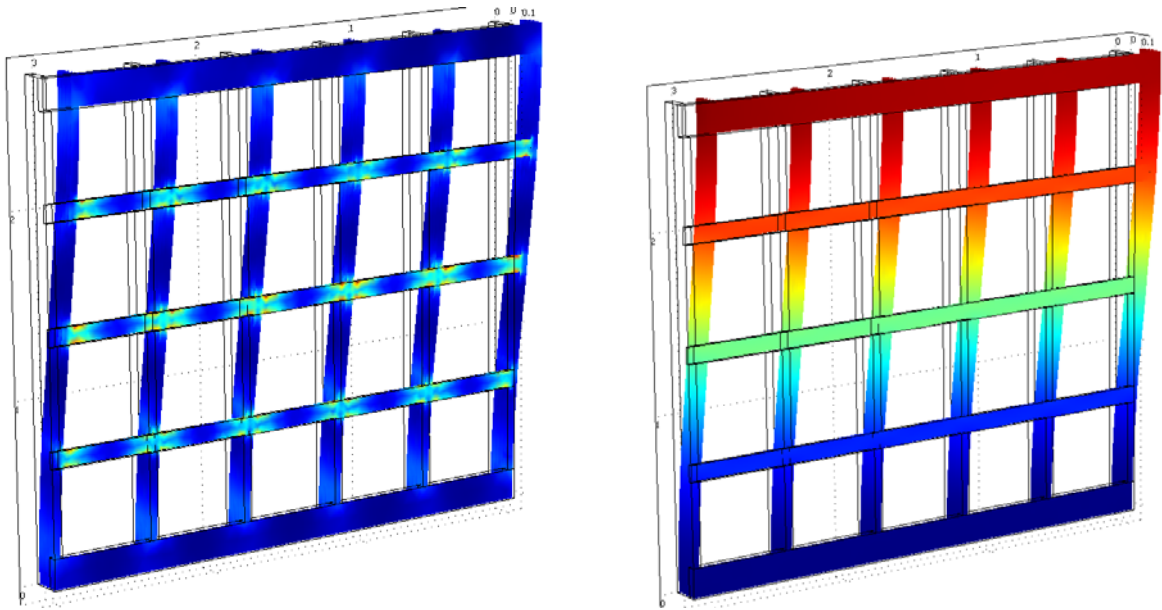
Kuvio 18: Neljä pystytolppaa sisältävän elementin rasitukset maksimikuormituksella, yksikkö N/mm^2

Muodonmuutoksetkin (Kuvio 19) pysyvät sallituissa rajoissa, siirtymä käyttörajatilan suurimmilla kuormilla on $8,6\text{ mm}$. Laskentaa jatketaan rakenneosien kestävyys- ja staattisen tasapainon kannalta käyttäen vuorostaan kuormitusyhdistelmää, jossa pystykuorma on minimissään ja vaakakuorma suurin mahdollinen. Tällöin huomataan, että elementin vaakalautojen kestävyys ylittyy, maksimiarvo on 25 N/mm^2 . Näinollen laskentaa on jatkettava lisäämällä elementtiin pystytolppia.



Kuvio 19: Neljä pystytolppaa sisältävän elementin muodonmuutokset

Vasta kun elementissä on 6 pystytolppaa, eli elementti on kolme metriä pitkä, se on riittävän jäykkä (Kuvio 20). Tällöin vaakalaudassa vaikuttava rasitus on $15,0 \text{ N/mm}^2$, kun vastaava kestävyys on $17,8 \text{ N/mm}^2$. Samoin muodonmuutokset pysyvät sallituissa rajoissa.



Kuvio 20: Kuusi tolppaa sisältävän elementin rasitus- ja siirtymäkuvaajat

Näiden laskelmien perusteella todetaan, että esimerkkilaskelman kuormilla yksikerroksisessa rakennuksessa ei saa käyttää alle kolme metriä pitkiä elementtejä ilman tarvittavaa jäykkyyden vahvistusta. Jos seinän osuus on alle kolme metriä pitkä, sitä ei voida ottaa huomioon jäykistävänä seinänä, ellei sitä vahvisteta esimerkiksi rakennuslevyillä asianmukaisesti. Samoin todetaan, että Suomen olosuhteissa voi olla alueita, joilla elementtejä ei tule käyttää ollenkaan ilman lisäjäykistystä, kun kyseessä on kaksikerroksinen rakennus.

6 Koko rakennuksen jäykistys

Tässä työssä keskitytään tutkimaan jäykistystä lähinnä elementin tasolla, koska koko rakennuksen jäykistäminen tulee suunnitella aina rakennuskohtaisesti. Kuormien lisäksi koko rakennuksen jäykistykseen vaikuttavat esimerkiksi rakennuksen mitat ja muoto, perustukset ja maan pohjapaine. Yhteneviä tekijöitä jäykistykseen suhteen kaikille rakennuksille on kuitenkin olemassa.

Rakennuksen ja kaikkien rakenneosien tulee kestää ulkoisten kuormien aiheuttamat rasitukset. Jäykistysjärjestelmä pitää suunnitella niin, että kuormat viedään rakenteita pitkin perustuksille. Yksittäisten rakennusosien, kuten elementin pystytolpan, tulee kestää ulkoisten kuormien lisäksi rakenteen sisäisistä voimista syntyvät rasitukset. Tällaisia rasituksia syntyy rakenteeseen esimerkiksi kuormien epäkeskisyydestä tai rakenneosan vinoudesta. Näitä voimia ei tarvitse siirtää perustuksille, vaan riittää, että ne otetaan vastaan esimerkiksi elementin sisällä. (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 5).

Koko rakennuksen jäykistys tehdään normaalisti tiettyjä periaatteita noudattaen. Jäykistyksessä siirretään pitkille seinille tuleva kuorma kattorakenteen kautta päätyseinille ja päätyyn tuleva kuorma kattorakenteen kautta pitkille seinille. Seinät jäykistetään tasojensa suunnassa kuormalle, joka koostuu seinän yläreunan yläpuolista vaakakuormasta ja puolesta seinään kohdistuvasta vaakakuormasta. Toinen puoli seinään kohdistuvasta vaakakuormasta suunnitellaan menevän suoraan perustuksille. Seinät ankkuroidaan perustuksiinsa niin, että ankkurivoimat estävät seinän irtoamisen alustastaan. Ankkurivoimaa määritettäessä seinään kohdistuvan pystykuorman osuus vähennetään kokonaiskuormasta. (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 5).

Metrirunko-elementti toimii jäykistysseinänä, jonka on tarkoitus kestää seinän tason suuntaiset vaakaleikkausvoimat. Jäykistysseinät tulee jäykistää tasossaan rakennuslevyjä, vinojäykistystä tai momenttia kestäviä liitoksia käyttäen. Lisäksi levyjäykistetyssä seinässä tulee ottaa huomioon, että levysaumoissa esiintyy leikkausvoimia, jotka syntyvät levyjen pyrkiessä siirtymään toistensa suhteen. (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 5.)

Kattorakenteen jäykistyksessä tulee ottaa monenlaisia asioita huomioon. Räystäskorkeudelle suunnitellaan jäykistävä vaakasuuntainen levyrakenne. Kattokannatteina olevien naulalevyristikoiden yläpaarteet jäykistetään yläpaarretasossa rakennuksen kummasakin päässä jäykistysristikoilla. Naulalevyristikoiden kaatuminen sivusuunnassa estetään ristikoiden välille suunnitelluilla pystysuuntaisilla jäykistysristikoilla. Lisäksi ristikoiden nurjahdussidontaa vaativat puristussauvat yhdistetään toisiinsa vaakasuuntaisella vetosauvalla. (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 5.)

Erityisesti koko rakennuksen jäykistyksessä on kiinnitettävä huomiota siihen, että liitokset eri rakennusosien välillä siirtävät niille suunnitellut voimat asianmukaisesti. Esimerkiksi seinäelementin yläosassa vaikuttava vaakasuuntainen tuulikuorman resultantti aiheuttaa elementin päätyihin nostavan tai puristavan voiman. Tällöin siirtymien estämiseksi seinäelementtien reunat kiinnitetään toisiinsa, sekä ala- ja välipohjaan tai perustuksiin. (Puurakenteiden jäykistysohje 2006, 23.)

Kaikki edellä mainitut seikat tulisi ottaa huomioon, kun rakennuksen jäykistystä suunnitellaan. Jäykistävät seinät ovat siis vain yksi osa koko jäykistysjärjestelmää. Seinien osuus jäykistyksessä on kuitenkin merkittävä, koska ne ottavat vastaan rakennukseen kohdistuvat vaakasuuntaiset voimat ja kuljettavat ne liitosten kautta rakennuksen perustuksille.

7 Tulokset ja niiden arviointi

Kuten jo työn alkuvaiheessa, esimerkkilaskelmaa tehdessä, oletettiin, ei rakenneosien kestävyys Metrirunko-elementissä välttämättä ole riittävä, kun tarkastellaan Suomen mittakaavassa suurimpia mahdollisia kuormia. Vaikka elementti on kokonainen, tulevat kuormitukset liian suuriksi varsinkin tarkasteltaessa kaksikerroksista rakennusta. Selvä ero huomataan kun rakennuksen kerrosluku pudotetaan yhteen. Tällöinkin on kuitenkin huomattava, että vaikka kokonainen elementti kestää hyvin, ei lyhennetyllä elementillä enää olekaan yhtä suurta jäykkyyttä vaan hyvin nopeasti tulee vastaan raja, jonka jälkeen elementti tarvitsee lisäjäykistystä toimiakseen rakennuksen jäykistävänä osana.

Tässä työssä keskityttiin tutkimaan ainoastaan elementin lyhentämisen vaikutusta sen kestävyteen ja jäykkyyteen. Esimerkki laskelmasta huomataan kuitenkin myös, että aukkojen kohdalla tulevat palkin taipuman ja taivutuskestävyyden rajat nopeasti vastaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että aukkojen kohdalla on elementissä käytettävä vahvistettua palkkia.

Laskemalla erikokoisia elementtejä eri kuormituksilla, huomataan, että suurin elementille tuleviin rasituksiin vaikuttava tekijä on tuulikuorman aiheuttama vaakavoima. Pystykuormat elementti kestää hyvin, ja niiden kannalta elementin pituus ei ole niinkään merkittävä. Myöskään pystykuormien vähentäminen tai lisääminen ei vaikuta kovinkaan paljon elementin heikoimpaa kohtaan, vaakalaudan liitokseen pystytolpan kanssa. Jos elementtiä halutaan vahvistaa ja jäykistää mahdollisimman pienillä muutoksilla, kannattaa vaakalaudan poikkileikkausta suurentaa. Tällöin se pystyisi ottamaan suurempia veto- ja puristurasituksia vastaan.

Tapauksissa, joissa kuormat muodostuvat liian suuriksi, helppo keino saada elementti riittävän jäykäksi, on käyttää seinissä rakennulevyjä. Käytännössä rakennuslevyt varmasti monesti asennetaankin joka tapauksessa seiniin, joten tarvittava lisäjäykkyys saavutetaan niillä kätevästi samalla. Vaikka tulokseksi saatiin, että jäykkyys ei kaikissa tapauksissa ole riittävä, Metrirunko-elementin jäykkyydestä on kuitenkin suuri käytännön hyöty esimerkiksi elementtien kuljetuksessa ja pystytyksessä.

8 Yhteenveto ja kokonaisuuden lopputarkastelu

Tällainen tutkimus on helppo toteuttaa, mutta tulosten esittäminen on hieman haastavaa. Tämä johtuu siitä, että tulokseen, eli toisin sanoen siihen, kestääkö elementti vai ei, vaikuttaa niin moni erillinen, toisistaan riippumaton tekijä. Tässä työssä yhtenä osana tehtyyn Excell-taulukoon (Liite 3) voidaan syöttää lähtötiedot, kuten kuormat ja rakennuksen mittoja, joiden pohjalta se arvioi elementin eri rakenneosien kestävyyttä. Tässä yksinkertaistetussa taulukossa ei kuitenkaan onnistu esimerkiksi elementin arviointi kokonaisuutena, eikä jäykkyyden laskenta. Vaatisi kovasti lisää kehitystyötä, jotta saataisiin yksiselitteinen ohjelma, joka laskisi suoraan annetuilla mitoilla ja kuormilla esimerkiksi elementin lyhimmän mahdollisen pituuden tai suurimman mahdollisen aukon koon eri tilanteissa.

Näillä laskelmilla saatiin kuitenkin hyvä kehys Metrirunko-elementin käytölle. Todettiin, että olosuhteista riippuen elementti voi olla riittävän jäykkä toimiakseen yksinään, ilman lisäjäykistystä, rakennuksen jäykistävänä osana. Toisaalta huomattiin, että olosuhteissa, joissa kuormat kasvavat suuremmiksi, ei pelkän elementin jäykkyys enää olekaan riittävä.

Tässä työssä tutkittiin Metrirunko-elementtiä laajasti ja puurakenteiden eurokoodia seuraten siitä laskettiin kaikki mahdollinen. Mitoitusohjelman avulla saatiin lisäksi selville elementin jäykkyyteen liittyviä asioita ja lyhentämisen vaikutus elementin kestävyyteen ja jäykkyyteen. Laaja tutkimisen kohde Metrirunko-elementillä lyhentämisen lisäksi olisivat vielä elementtiin tehtävät aukot ikkunoita ja ovia varten, sekä niiden vaikutus elementin jäykkyyteen. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että aukkojen vaikutuksen tutkiminen on vielä hankalampaa, kuin tässä työssä tehdyt laskelmat ja tutkimukset. Aukkojen kohdalla muuttujien määrä lisääntyy entisestään, kun mukaan tulevat aukon koko ja sijainti elementtiin nähden, puhumattakaan tilanteesta, jossa aukko osuu lyhennettyyn elementtiin. Kuten tässäkin työssä, mahdollisia tilanteita tulee lukemattomia, samoin vastauksia.

Lähteet

Eurokode. Rakenteiden suunnitteluperusteet, SFS-EN 1990, Suomen Standardisoimisliitto, 2002.

Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS-EN 1995-1-1, Suomen Standardisoimisliitto, 2004.

Keskustelut Tero Markkasen kanssa

Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje, Puuinfo, 2008.

Suomen rakentamismääräyskokoelma E1, Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet, Helsinki 12.3.2002.

Puurakenteiden jäykistysohje, VTT, 2006.

Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet puurakenteiden liitoksissa VTT 2005
Rainer Yli-Koski & Ari Kevarinmäki [www-sivu]. [viitattu 1.4.2009] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2279.pdf>

Väärin Puutavara Oy. [www-sivu]. [viitattu 6.1.2009]. Saatavissa: <http://www.vaarinpuutavara.fi/>

Liitteet

Liite 1: Esimerkkilaskelma

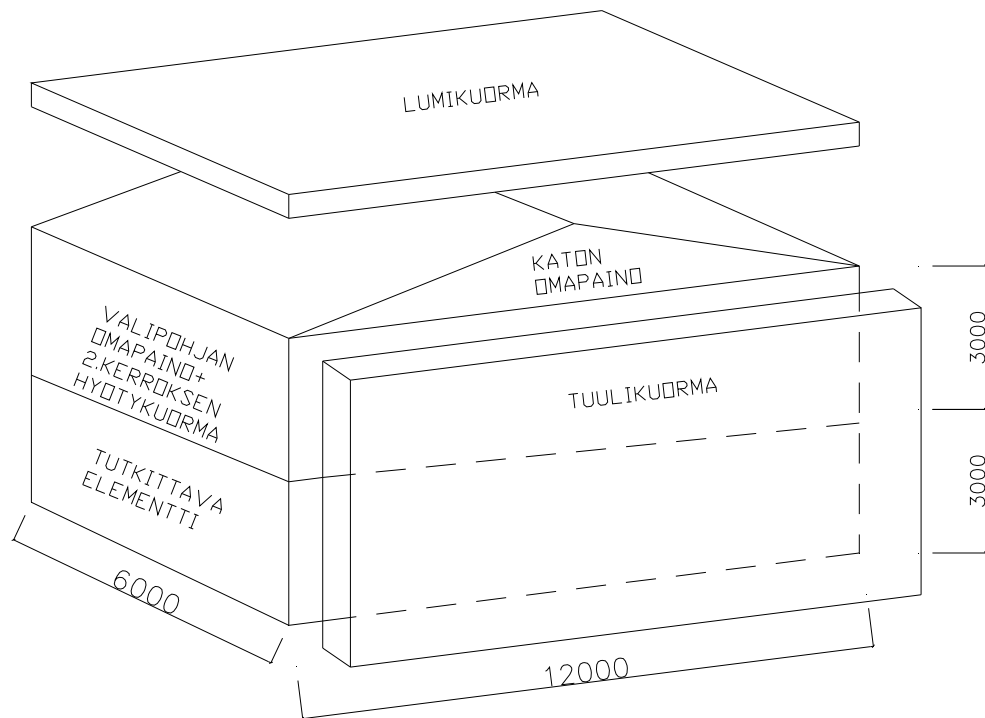
Laskennan lähtötietoja:

Puutavara: C24

Aikaluokka: keskipitkä tai hetkellinen, vaihtelee tapauksen mukaan.

Käyttöluokka: 2

Rakennus sijaitsee alueella missä lumikuorman arvo on maksimissaan Suomen olosuhteisiin nähden ($3,5 \text{ kN/m}^2$) ja maastoluokka on I. Kyseessä on yksinkertaistettu kaksikerroksinen omakotitalo. Tässä esimerkkilaskelmassa rakenneosia tarkasteltaessa käytetään kuormina suurimpia mahdollisia luonnonkuormia, sekä oletetaan rakenteiden omapainot mahdollisimman suuriksi pientaloissa käytettävistä materiaaleista.



Kuvio 21: Esimerkkirakennus

Ominaiskuormat:

Katon omapaino:

Tiilikate (45 kg/m²) 0,45 kN / m²Ruoteet 0,04 kN / m²Lämmöneriste (20 kg / m³) 0,1 kN / m²Kattoristikot 0,1 kN / m²Yhteensä 0,7 kN / m²

Metrikuorma 4,2 kN / m

Välipohjan omapaino:

0,25 kN / m²

Metrikuorma 1,5 kN / m

Lumikuorma:

 $3,5 \text{ kN} / \text{m}^2 \cdot 0,8 = 2,8 \text{ kN} / \text{m}^2$

Metrikuorma 16,8 kN / m

Yläkerran hyötykuorma:

2,0 kN / m²

Metrikuorma 12 kN / m

Seinän (3 m korkuisena) omapainoksi arvioidaan kaikkine kerroksineen 1,2 kN / m

Tuulikuorma:

$$1,3 \cdot 0,75 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1,0 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Tuulikuorman resultantti:

$$1,3 \cdot 0,75 \text{ kN} / \text{m}^2 \cdot 0,5 \cdot 12 \text{ m} \cdot 1,5 \cdot 3 \text{ m} = 26,3 \text{ kN}$$

Pystyrakenteiden vinoudesta aiheutuvat lisävaakavoimat tolppalle (Kaava 3):

$$\frac{12}{6} \cdot \frac{1,1 \cdot (4,2 + 1,5 + 1,2) \cdot 0,6 + 1,5 \cdot (16,8 + 0,7 \cdot 12) \cdot 0,6 \text{ kN}}{150} = 0,36 \text{ kN} \geq \frac{27,2 \text{ kN}}{250} = 0,11 \text{ kN}$$

Vaakavoimien resultantti yhteensä 26,45 kN.

Maksimi pystykuorma metriä kohti:

$$[1,1 \cdot (4,2 + 1,5 + 1,2) \cdot 1,5 \cdot (16,8 + 0,7 \cdot 12)] \cdot 0,6 = 45,39 \text{ kN} / \text{m}$$

Maksimi pystykuorma yhdelle tolppalle (k600):

$$[1,1 \cdot (4,2 + 1,5 + 1,2) \cdot 1,5 \cdot (16,8 + 0,7 \cdot 12)] \cdot 0,6 = 27,23 \text{ kN}$$

Pystytolpan syysuuntainen puristus:

Puristusta tolppalle aiheuttavat pystykuormat. Koska pystytolppa on lovettu vaakalautoja varten, käytetään tolpan poikkileikkauksena 48x152, josta lovetut osat on vähennetty.

Jotta tolppa kestäisi puristusrasituksen, tulee seuraavan ehdon toteutua (Kaava 4).

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} = \frac{0,8 \cdot 21 \text{ N} / \text{mm}^2}{1,3} = 12,92 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Kun tolppaväli on k600:

$$\sigma_{c,0,d} = [1,1 \cdot (4,2 + 1,5 + 1,2) + 1,5 \cdot (16,8 + 0,7 \cdot 12)] \text{ kN} / \text{m} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 10^3 / (48 \text{ mm} \cdot 152 \text{ mm}) = 4,2 \text{ N} / \text{mm}^2$$

käyttöaste 33 %

Käänteisesti ratkaistuna maksimi tolppaväli (ilman vahvistusta) puristuksen kannalta on:

$$\frac{12,92N/mm^2 \cdot 7296mm^2}{45300N} = 2,1m$$

Vaakapalkin kestävyys syysuuntaista puristusta vastaan:

$$f_{c,0,d} = \frac{1,1 \cdot 21N/mm^2}{1,3} = 17,77N/mm^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{1,5 \cdot 26450N}{48mm \cdot 172mm} = 4,8N/mm^2$$

käyttöaste 27 %

Samassa kuormitustapauksessa syysuuntaista puristusta aiheutuu myös vaakalaudoille:

$$f_{c,0,d} = \frac{1,1 \cdot 21N/mm^2}{1,3} = 17,77N/mm^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{1,5 \cdot 26450N}{20mm \cdot 97mm} = 20,5N/mm^2$$

käyttöaste 115 %, ylittää vaakalaudan kestävyvyn!

Syysuuntainen veto:

Kuormitustapauksessa, jossa elementin ylänurkkaan vaikuttava tuulikuorman resultantti on maksimissaan ja elementtiin vaikuttava pystykuorma minimissään, pyrkii elementti taipumaan salmiakin muotoon, jolloin pystytolpille aiheutuu syysuuntaista vetoa Kuvi-
on 10 mukaisesti.

Seuraava ehto tulee tarkastaa (Kaava 5):

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} = \frac{1,1 \cdot 14N / mm^2}{1,3} = 11,85N / mm^2$$

Tolpalle aiheutuva vetorasitus tarkastetaan mitoitusohjelmalla. Tässä tapauksessa tuulikuorman resultantin aiheuttama vetorasitus tolpassa on niin pieni, että pystykuormien aiheuttama puristus kumoaa sen.

Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus:

Syysuuntaa vastaan kohtisuoraa puristusta aiheutuu yläpalkille sekä alapalkille pystykuormista. Jotta palkki kestäisi rasitukset, tulee seuraavan ehdon täyttyä (Kaava 6):

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

$$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = 1 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,5N / mm^2}{1,3} = 1,54N / mm^2$$

Yläpalkille tuleva suurin mahdollinen puristus, kun välipohjan palkkijako k600:

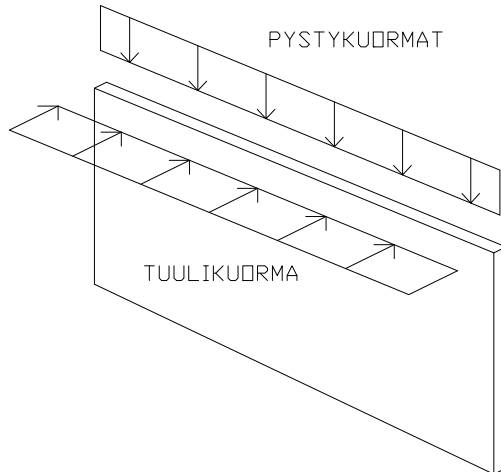
$$\sigma_{c,90,d} = \frac{1,1 \cdot (4,2 + 1,5 + 1,2) \cdot 0,6 + 1,5 \cdot (16,8 + 0,7 \cdot 12) \cdot 0,6kN}{48mm \cdot 600mm} = 0,95kN / mm^2$$

käyttöaste 62 %

(Huom: tässä käytetään yksinkertaistuksen vuoksi $k_{c,90} = 1$)

Taivutus:

Taivutusta yläpalkille z-suunnassa (Kuvio 22) aiheuttavat pystykuormat. Tuulikuorma tutkittavan elementin puoleiselle seinälle sensijaan aiheuttaa palkille y-suuntaista taivutusta. Seuraavien ehtojen tulee toteutua (Kaavat 7 ja 8).



Kuvio 22: Yläpalkin taivutus

$$\frac{0,001N/mm^2 \cdot 0,5 \cdot 3000mm \cdot (600mm)^2 / 8 + \frac{172 \cdot 48^2 mm^3}{6} N/mm^2}{(24N/mm^2 \cdot 1,1) / 1,3} +$$

$$0,7 \cdot \frac{45,3N/mm \cdot (600mm)^2 / 8 + \frac{48 \cdot 172^2 mm^3}{6} N/mm^2}{(24N/mm^2 \cdot 0,8) / 1,3} = 0,46 \leq 1 \rightarrow OK$$

$$0,7 \cdot \frac{0,001N/mm^2 \cdot 0,5 \cdot 3000mm \cdot (600mm)^2 / 8 + \frac{172 \cdot 48^2 mm^3}{6} N/mm^2}{(24N/mm^2 \cdot 1,1) / 1,3} +$$

$$\frac{45,3N/mm \cdot (600mm)^2 / 8 + \frac{48 \cdot 172^2 mm^3}{6} N/mm^2}{(24N/mm^2 \cdot 0,8) / 1,3} = 0,62 \leq 1 \rightarrow OK$$

käyttöaste 62 %

Leikkaus:

Leikkausvoimaa yläpalkille aiheuttavat pystykuormat. Seuraavan ehdon tulee toteutua (Kaava 9).

$$\tau_d \leq f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} = \frac{2,5 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,3} = 1,54 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot 45,3 \text{ N/mm} \cdot 600 \text{ mm}}{48 \cdot 172 \text{ mm}^2} = 4,94 \text{ N/mm}^2$$

Leikkausvoima on liian suuri leikkauskestävyyteen nähden, jos se tulisi kokonaan palkille. Todellisuudessa kuitenkin suuri osa pystykuormasta tukeutuu pystytolppiin.

Pystytolpan yhdistetyt jännitykset:

Yhdistettyjä jännityksiä muodostuu sekä yläpalkille, että pystytolpalle. Palkin kannalta pitää tarkastaa kestävyys yhtä aikaa pystykuormien aiheuttamalle taivutukselle, sekä tuulen aiheuttamalle syysuuntaiselle puristukselle. Tolpalle sensijaan puristusta aiheuttavat pystykuormat ja taivutusta tuulikuorma (**Kuvio X**).

Kuormien aiheuttamien jännitysten lisäksi tulee mitoituksessa ottaa huomioon ne jännitykset, jotka aiheuttavat pilarin alkukäyryydestä ja taipumista sekä kuorman epäkeskisyydestä.

Nurjahdus:

Tolpan nurjahdus otetaan huomioon pienentämällä puristuslujuutta nurjahduskertoimella. Ensin lasketaan pystytolpan suhteellinen hoikkuus, jonka avulla nurjahduskertoimet saadaan selville.

Hoikkuus y-akselin ympäri:

$$\lambda_y = \frac{1 \cdot 2700 \text{ mm}}{152 / \sqrt{12}} = 61,53$$

Suhteellinen hoikkuus (Kaava 13):

$$\lambda_{rel,y} = \frac{61,53}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{21 \text{ N/mm}^2}{7400 \text{ N/mm}^2}} = 1,043$$

Nurjahduskertoimet (Kaavat 15 ja 16):

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,043 - 0,3) + 1,043^2) = 1,118$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{1,118 + \sqrt{1,118^2 - 1,043^2}} = 0,657$$

Yhdistetyt kuormitukset ovat suurimmillaan, kun sekä pystykuorma, että vaakakuormat ovat suurimmillaan. Mitoitusehto (Kaava 11):

$$\frac{\frac{27230 \text{ N}}{48 \text{ mm} \cdot 152 \text{ mm}}}{0,657 \cdot (24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8) / 1,3} + \frac{\frac{600 \text{ mm} \cdot 0,001 \text{ N/mm}^2 \cdot (3000 \text{ mm})^2}{8} / \frac{48 \cdot 152^2 \text{ mm}^3}{6} \text{ N/mm}^2}{(24 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,1) / 1,3} = 0,619 \leq 1 \rightarrow OK$$

käyttöaste 62 %

Z-akselin ympäri yhdistettyjä kuormituksia ei tarvitse tolppalla tarkastaa, koska tuuli-kuorma ei pääse vaikuttamaan tolppaan kuin yhdestä suunnasta.

Palkin yhdistetyt jännitykset:

Samalla tavoin lasketaan palkille nurjahduskerroin $k_{c,z}$ ja kiepahduskerroin k_{crit} . (Kaavat 14, 17 ja 18)

$$\lambda_z = \frac{1 \cdot 600mm}{48/\sqrt{12}} = 43,30$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{43,30}{\pi} \sqrt{\frac{21N/mm^2}{7400N/mm^2}} = 0,734$$

$$k_z = 0,5(1 + 0,2 \cdot (0,734 - 0,3) + 0,734^2) = 0,813$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,813 + \sqrt{0,813^2 - 0,734^2}} = 0,861$$

Palkin kiepahduskerroin arvioidaan kuvaajalta (Kuvio 13).

Kun tolppaväli on k600 (Kaava 19):

$$l_{ef} = 600mm + 2 \cdot 172mm = 944mm$$

$$\frac{944mm}{48mm} = 19,7 \rightarrow k_{crit} = 1$$

Kun aukonleveys on esimerkiksi 2100mm:

$$l_{ef} = 2100mm + 2 \cdot 172mm = 2444mm$$

$$\frac{2444mm}{48mm} = 50,9 \rightarrow k_{crit} \approx 0,87$$

Mitoitusehdot, kun elementissä ei ole yli 600 mm:n levyistä aukkoa, eli tolppaväli k600 (Kaava 12 ja 10):

$$\frac{\frac{45,39 \text{ N/mm} \cdot (600 \text{ mm})^2}{8} / \frac{48 \text{ mm} \cdot (172 \text{ mm})^2}{6}}{(24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8) / 1,3} + \frac{26450 \text{ N} / (48 \text{ mm} \cdot 172 \text{ mm})}{0,861 \cdot \frac{21 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,1}{1,3}} = 0,794 \leq 1$$

käyttöaste 79 %

$$\left(\frac{\frac{45,39 \text{ N/mm} \cdot (600 \text{ mm})^2}{8} / \frac{48 \text{ mm} \cdot (175 \text{ mm})^2}{6}}{1 \cdot (24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8) / 1,3} \right)^2 + \frac{26450 \text{ N} / (48 \text{ mm} \cdot 172 \text{ mm})}{0,861 \cdot \frac{21 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,1}{1,3}} = 0,55 \leq 1$$

käyttöaste 55 %

Kun edellisistä käänteisesti ratkaistaan suurinta mahdollista palkin jänneväliä, saadaan jo 750 mm pitkällä jännevälillä käyttöasteeksi 98,5 %. Tämän pidemmissä jänneväleissä näillä kuormilla tulee siis käyttää jollain tavoin vahvistettua palkkia!

Liitokset:

Elementin liitoksissa olevien nauhojen oletetaan ottavan vastaan vain puuosien suuntaisia leikkausvoimia ja pitävän puuosat yhdessä. Nauhojen ei siis oleteta osallistuvan liitoksen jäykistykseen.

Sauvan reunapuristuslujuus:

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot 350 \cdot 3,1^{-0,3} = 20,44 \text{ N/mm}^2$$

Liittimien myötömometti ja ulosvetokestävyys:

$$M_{y,Rk} = 6094 \text{ Nmm} \text{ (Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet 2005, 66)}$$

$$F_{ax,Rk} = 6,31 \text{ N/mm}^2 \text{ (Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet 2005, 81)}$$

Kahden puuosan välisen naulaliitoksen kestävyuden ominaisarvo on pienin seuraavista (Kaava 20):

$$20,44 \cdot 20 \cdot 3,1 = 1267,3N$$

$$20,44 \cdot 40 \cdot 3,1 = 2534,6N$$

$$\frac{1267,3}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \left(1 + \frac{40}{20} + \left(\frac{40}{20} \right)^2 \right)} + 1^3 \cdot \left(\frac{40}{20} \right)^2 - 1 \cdot \left(1 + \frac{40}{20} \right) \right) + \frac{6,31}{4} = 862,7N$$

$$1,05 \cdot \frac{1267,3}{3} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot (1+1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2+1) \cdot 6094}{20,44 \cdot 3,1 \cdot 20^2}} - 1 \right) + \frac{6,31}{4} = 721,9N \rightarrow \text{PIENIN}$$

$$1,05 \cdot \frac{2534,6}{3} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1+1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2+1) \cdot 6094}{20,44 \cdot 3,1 \cdot 40^2}} - 1 \right) + \frac{6,31}{4} = 1042,0N$$

$$1,15 \cdot \sqrt{\frac{2}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot 6094 \cdot 20,44 \cdot 3,1} + \frac{6,31}{4} = 1012,2N$$

Sauvoihin tulevat voimat tarkastetaan mitoitusohjelmalla. Ne eivät saa ylittää 721,90 N.

Taipuma:

Kun tolpat ovat 600 mm:n välein, on taipuma pieni. Taipuma lasketaan erikseen eri tyyppisille kuormille seuraavasti (Kaava 22).

$$w_{inst,g} = \frac{(4,2 + 1,5 + 1,2)N / mm * (600mm)^4}{184,6 \cdot 11000N / mm^2 \cdot \frac{48mm \cdot (172mm)^3}{12}} = 0,02mm$$

$$w_{inst,lumi} = \frac{16,8N / mm * (600mm)^4}{184,6 \cdot 11000N / mm^2 \cdot \frac{48mm \cdot (172mm)^3}{12}} = 0,05mm$$

$$w_{inst,hyöty} = \frac{12N / mm * (600mm)^4}{184,6 \cdot 11000N / mm^2 \cdot \frac{48mm \cdot (172mm)^3}{12}} = 0,04mm$$

Jolloin kokonaistaipuma on (Kaava 21):

$$w_{fin} = (1 + 0,8) \cdot 0,02mm + (1 + 0,2 \cdot 0,8) \cdot 0,05mm + (0,7 + 0,3 \cdot 0,8) \cdot 0,04mm = 0,13mm$$

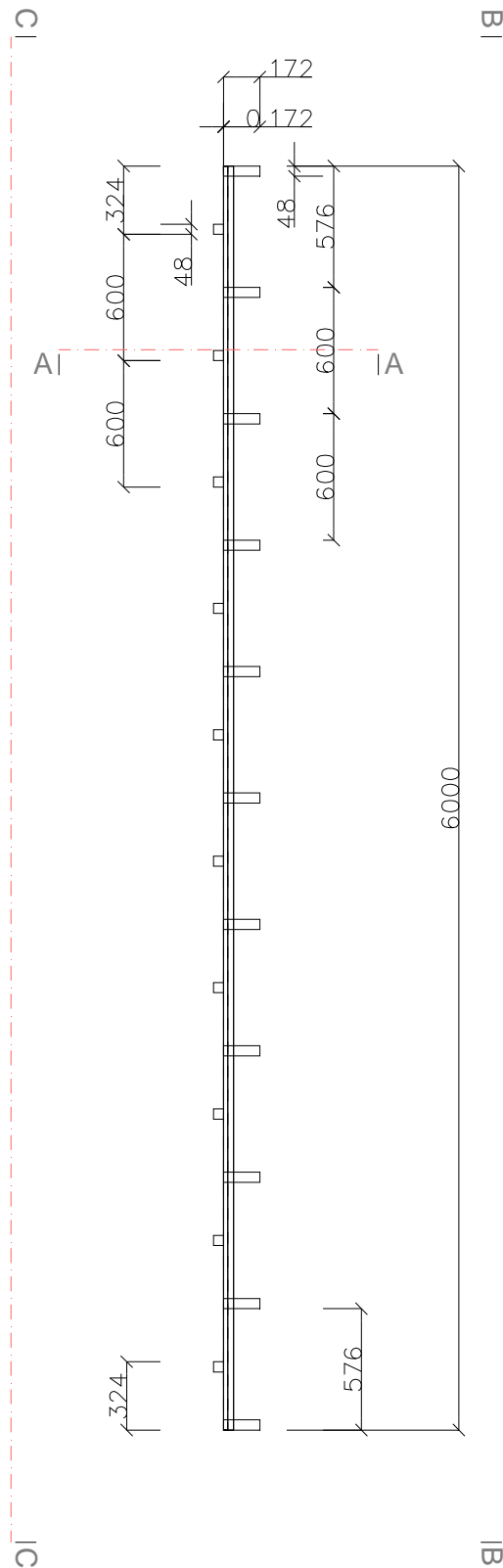
Kääntäen ratkaistuna saadaan taipuman kannalta suurimmaksi mahdolliseksi aukon jänneväliksi näillä kuormilla 1950 mm, jolloin taipuma on 6,2 mm. Taipumaraja on L/300, eli 1950mm/300=6,5 mm.

Siirtymä:

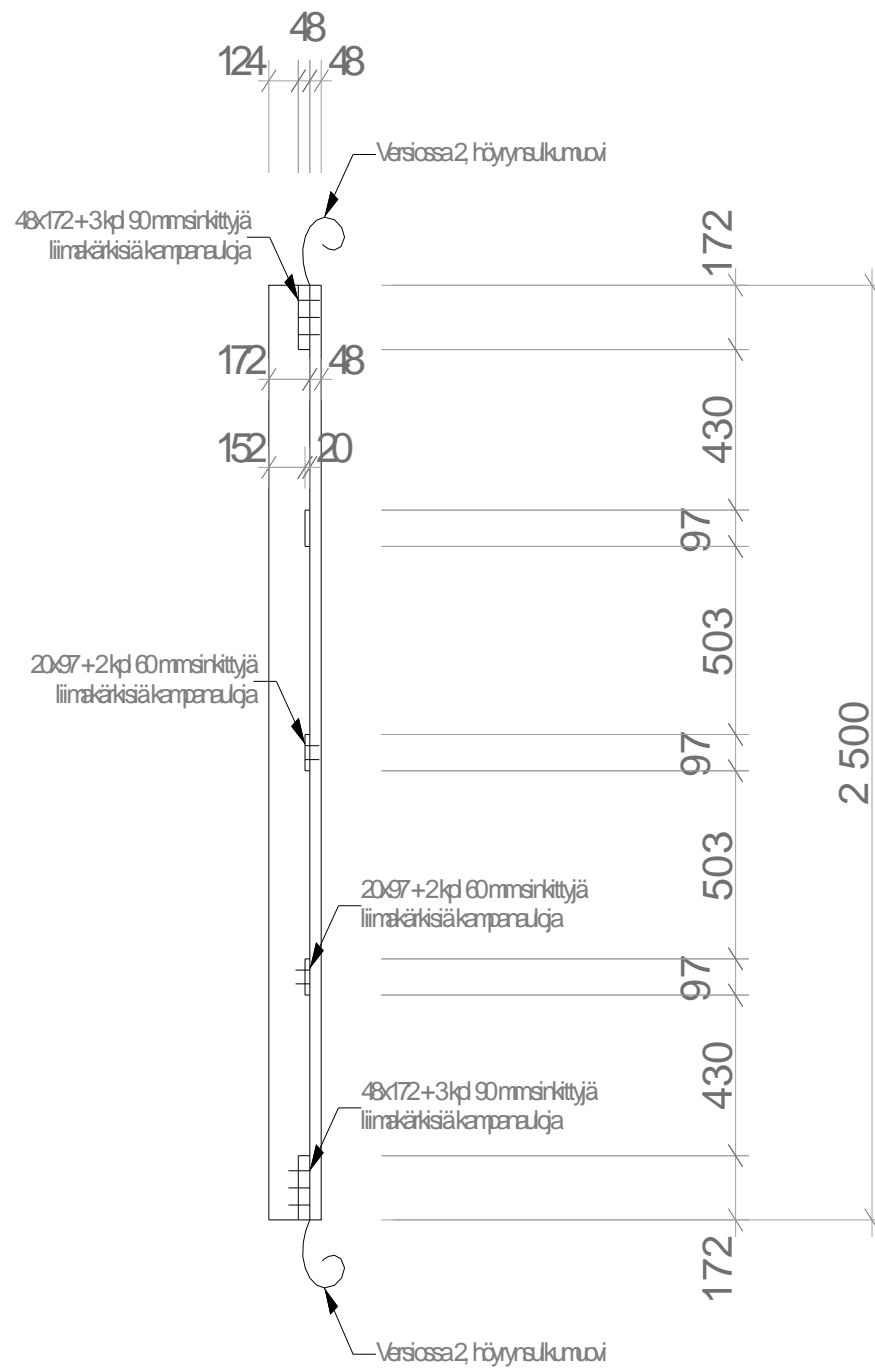
Elementin ylänurkan siirtymä lasketaan mitoitusohjelmalla, koska liitoksen jäykkyyden laskeminen on käsinlaskien työlästä.

Liite 2: Elementin piirrustukset

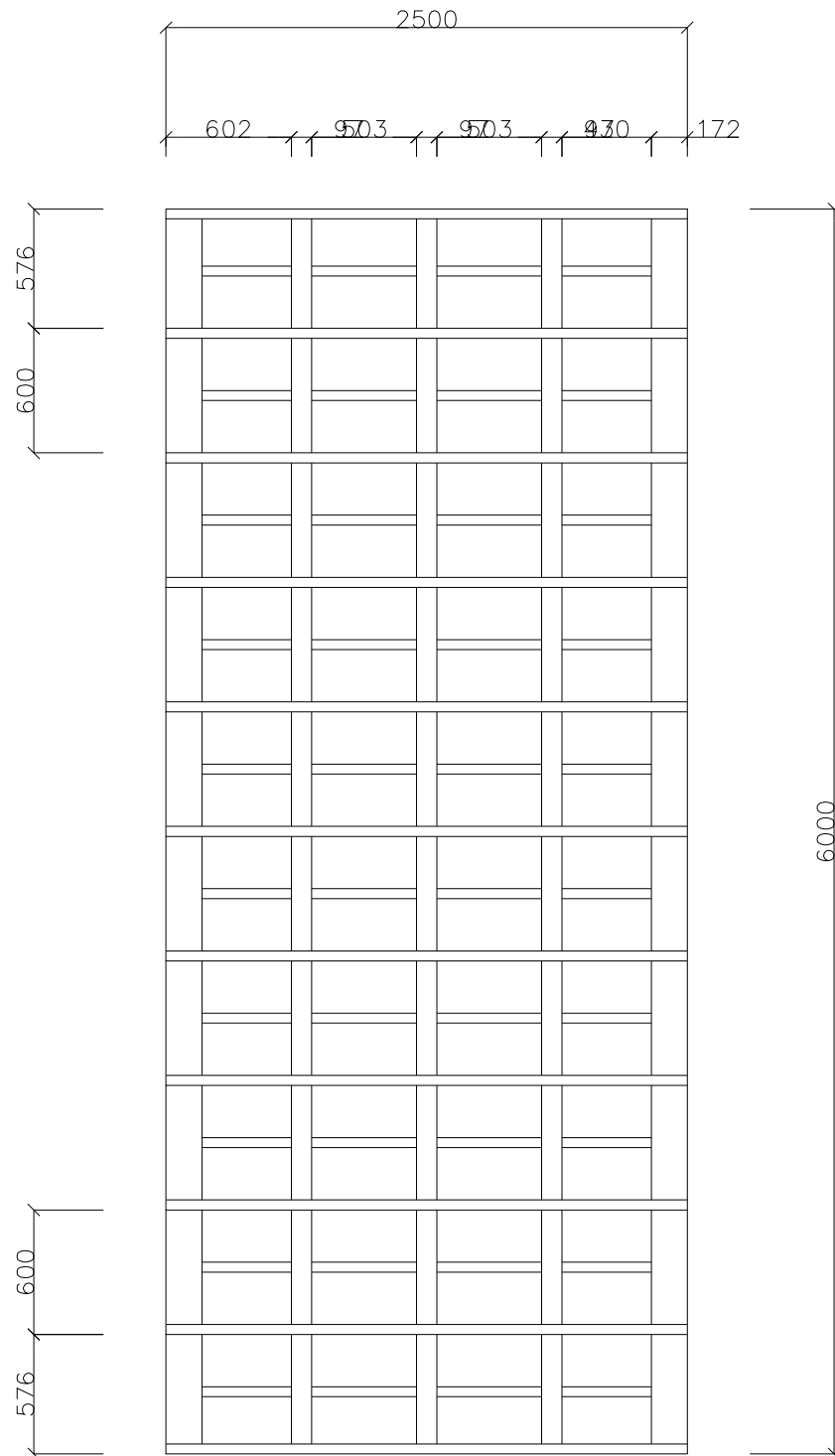
Vaakaleikkaus



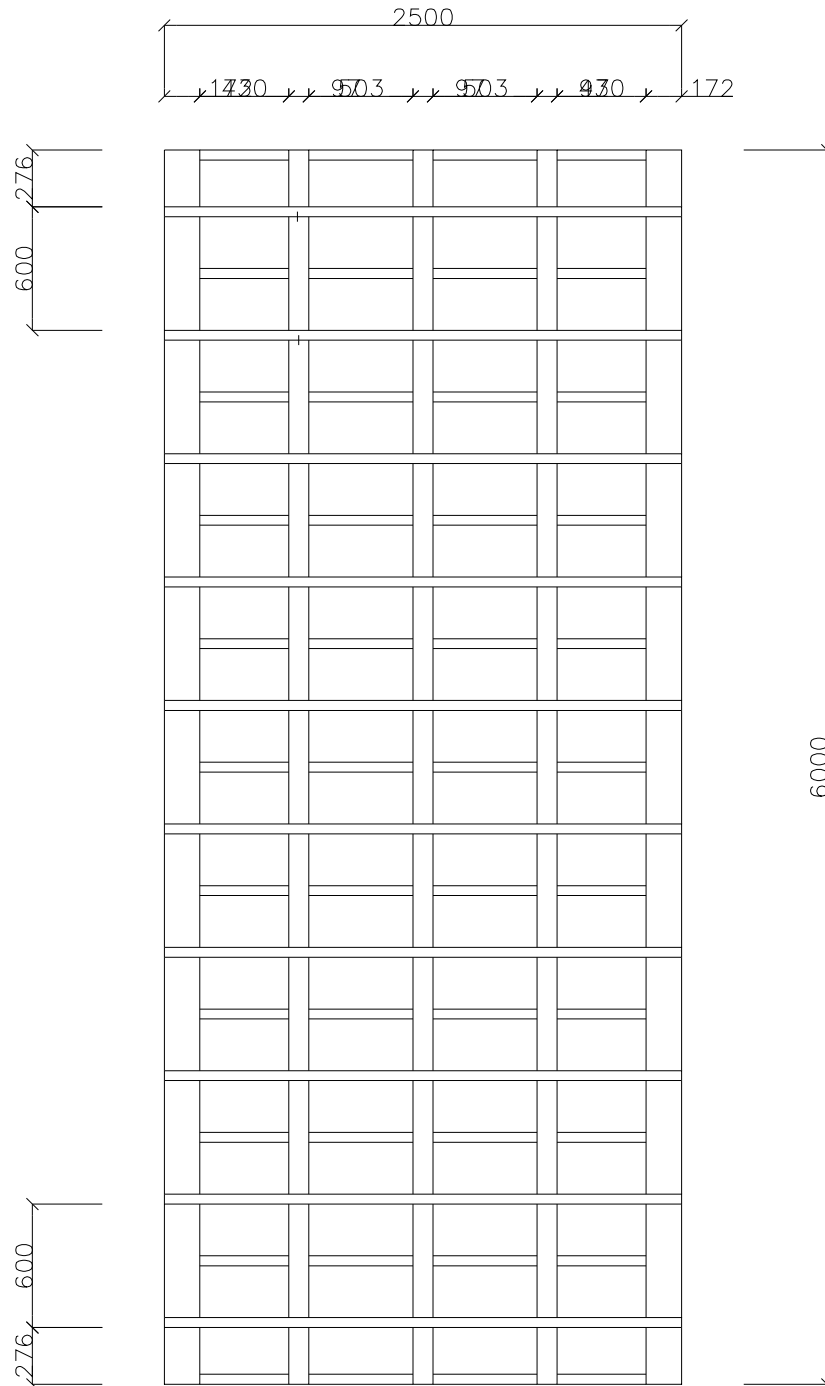
A – A pystyleikkaus



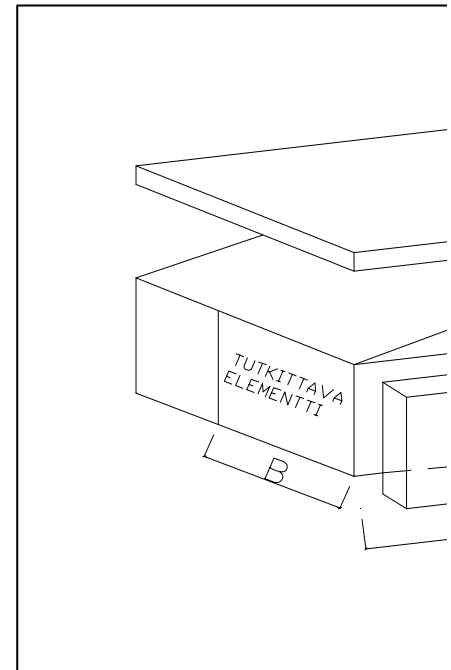
Julkisivu B



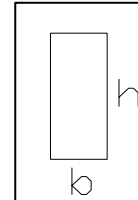
Julkisivu C



METRIRUNKO-elementti	
Puutavara	C24
Käyttöluokka	2
Ominaiskuormat	
Katon omapaino	0,7 kN / m^2
	0
	0
	0
Lumikuorma	2,8 kN / m^2
Tuulikuorma	1 kN / m^2



Mitat	
korkeus [H]	2700 mm
pituus [B]	6000 mm
leveys [A]	12000 mm
tolpan b	48 mm
tolpan h	152 mm
palkin b	48 mm
palkin h	172 mm
Suurin aukon leveys	1200 mm

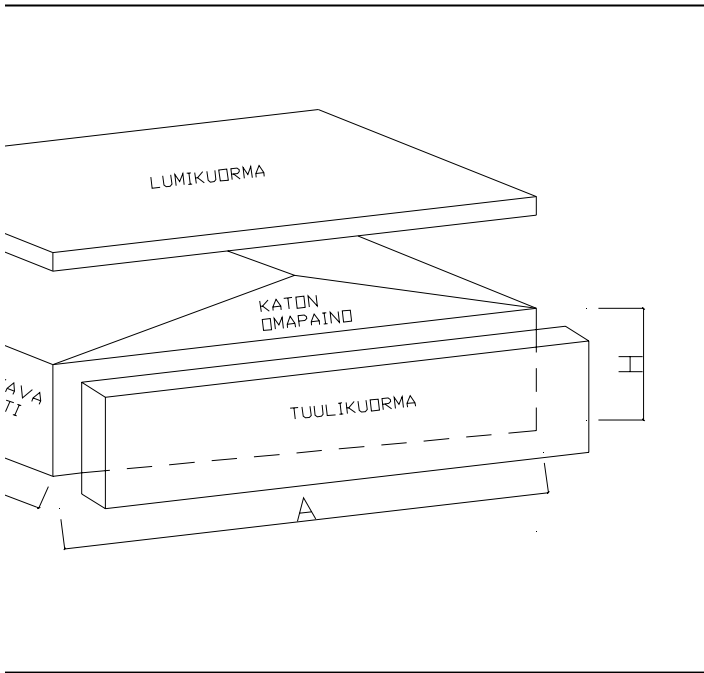


Ala
Wx
Wy
Ix
Iy
hoikkusuht.hoikkusuht
k
k c,
k crit (->168
k crit (->210

Murtorajatila:	Käyttöaste:
	%
Syysuuntainen puristuskestävyys, tolppa: f c,0,d	12,92307692
Pystytolpan syysuuntainen puristus:	
KT1	2,452302632
KT5	1,830592105
KT9	1,830592105
Pystytolpan syysuuntainen puristus aukon kohdalla:	
KT1	4,904605263
KT5	3,661184211
KT9	3,661184211

Syysuuntainen puristuskestävyys, palkki:		
f c,0,d	17,76923077	
Vaakapalkin syysuuntainen puristus:		
KT9	2,22565407	12,5
Vaakalaudan syysuuntainen puristus:		
KT9	9,471649485	53,3
Vaakapalkin puristuskestävyys:		
f c,90,d	1,538461538	
Syysuuntaa vastaan kohtisuora puristus, palkki:		
KT1	0,62125	40,4
KT5	0,46375	30,1
KT9	0,46375	30,1
Taivutus, palkki (tolpat k600):		
KT1	0,199774066	20,0
	0,255692601	25,6
KT5	0,159461458	15,9
	0,198103162	19,8
KT9	0,186636942	18,7
	0,082750643	8,3
Taivutus, palkki (aukon kohdalla):		
KT1	0,637845834	63,8
	0,254911217	25,5
KT5	0,261594833	26,2
	0,254911217	25,5
KT9	0,370296768	37,0
	0,868504002	86,9
Yhdistetyt jännitykset, tolppa (tolpat k600):		
KT1	0,330293318	33,0
KT5	0,266223209	26,6
KT9	0,317938099	31,8
Yhdistetyt jännitykset, tolppa (aukon kohdalla):		
KT1	0,495439977	49,5
KT5	0,399334814	39,9
KT9	0,476907148	47,7
Yhdistetyt jännitykset, palkki (tolpat k600):		
KT1	0,442431737	44,2
	0,205911505	20,6
KT5	0,345105586	34,5
	0,140657333	14,1
KT9	0,383600297	38,4
	0,179152044	17,9
Yhdistetyt jännitykset, palkki (aukon kohdalla):		
KT1	0,991796401	99,2

	1,113755324	111,4
KT5	0,77281256	77,3
	0,677305006	67,7
KT9	0,857008807	85,7
	0,761501253	76,2
Käyttörajatila:		
Taipuma yläpalkissa		
w inst,g	0,210719419	
w inst,lumi	0,842877677	
w inst,hyöty	0	
		Taipumaraja
		L/300:
Taipuma yhteensä	1,35703306	4



Tolppa:	Palkki:	Aukossa:	Vaakalauta:
7296	8256		1940 mm
184832	236672		31363,333 mm ³
58368	66048		6466,6667 mm ³
14047232	20353792		1521121,7 mm ⁴
1400832	1585152		64666,667 mm ⁴
61,53	43,3	86,6	
1,04	0,73	1,47	
1,12	0,81	1,69	
0,66	0,86	0,39	
80mm)	1		
100mm)	0,87		

HUOM:

Vertical line on the left side of the page.

Vertical line on the right side of the page.

Aukon kohdalla palkkia vahvistettava!

OK