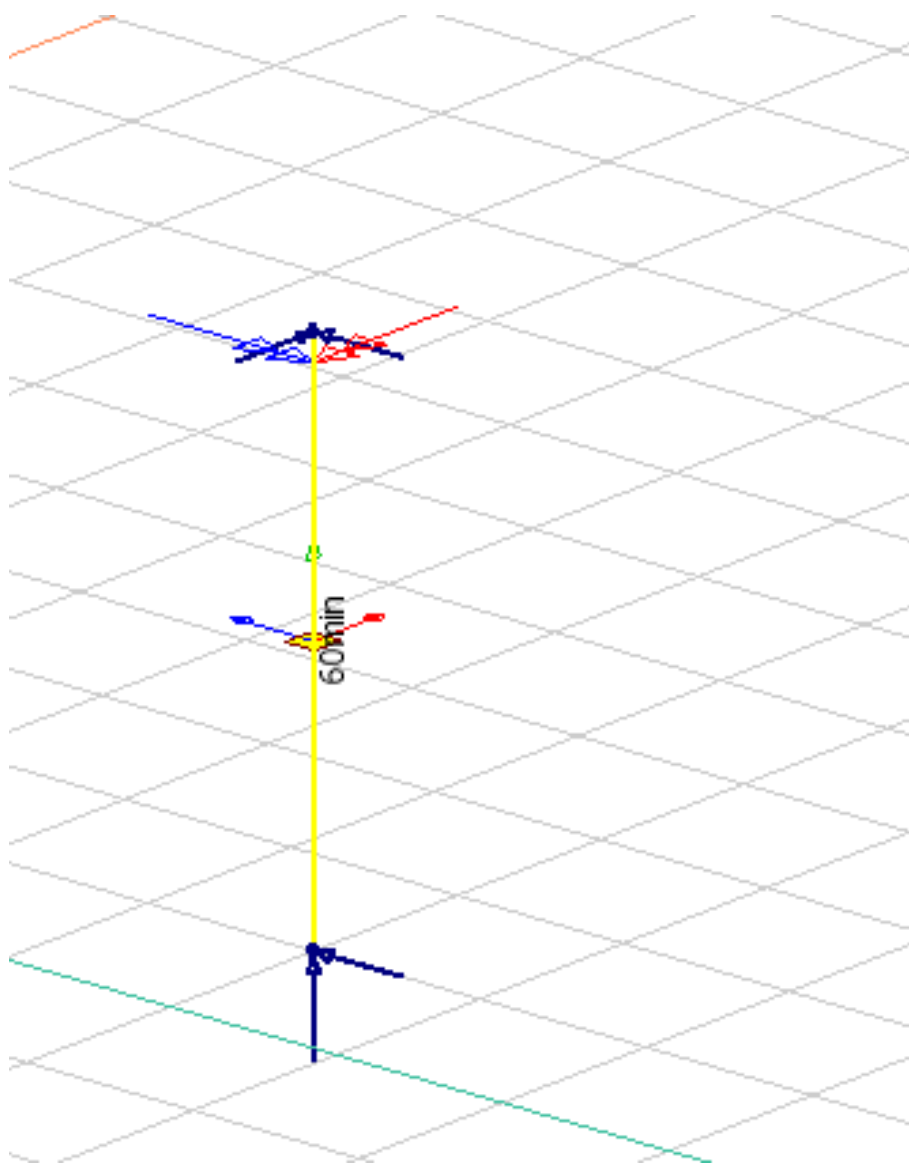


Pasi Huusko

# Palomääräysten vaikutus rakennesuunniteluun



Insinööri (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kevät 2024



KAMK • University  
of Applied Sciences

## Tiivistelmä

**Tekijä:** Huusko Pasi

**Työn nimi:** Palomääräysten vaikutus rakennesuunnitteluun

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), rakennustekniikka

**Asiasanat:** Rakennesuunnittelu, paloluokat, palo-osastointi, puurakenteet, palosuojaus, palomitoitus

Tämä insinöörityö tehtiin Insinööritoimisto Savolainen Oy:lle syksyn 2023 ja kevään 2024 aikana. Yritys tarjoaa asiakkailleen monipuolisia arkkitehti- ja rakennesuunnittelupalveluita, ja kehityskohteeksi valikoituivat paloasiat ja niiden vaikutusten huomioiminen rakennesuunnittelussa. Tavoitteena oli perehtyä palomääräyksiin ja palomitoituskannastoon ja toteuttaa laskentaesimerkki puurakenteiden palomitoituksesta. Lisäksi tavoitteena oli koota opinnäytetyössä käsitellyt asiat eräänlaiseksi rakennesuunnittelijan käsikirjaksi, johon listattiin kriittisiä kysymyksiä ja asioita, joihin rakennesuunnittelijan on kiinnitettävä huomiota erityisesti suunnitteluprosessin alkuvaiheissa.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin palomääräyksiä ja niiden asettamia vaatimuksia palo-osastointiin ja rakennusmateriaalien pinta-luokitukseen ympäristöministeriön asetuksen rakennusten paloturvallisuudesta ja Puuinfon ”Paloturvallinen puutalo” -kirjan avulla. Puurakenteiden palomitoituksen kulkua avattiin standardin EN 1995-1-2 ja RIL 205-2-2019 ”Puurakenteiden palomitoitus” -kirjan avulla. Näistä kirjallisista lähteistä käytiin läpi palomitoituksen tekemiseen tarvittavia kaavoja ja taulukoita.

Käytännön työtä varten laadittiin laskentaesimerkki puurakenteiden palomitoituksesta, joka toteutettiin FEM-Design laskentaohjelmalla ja tulosten vertailemista varten samainen laskelma toteutettiin myös käsin. Laskelmien tulokset löytyvät liitteistä. Laskelmien tulosten perusteella voitiin todeta, että laskentaesimerkin tapaisten yksinkertaisten rakenteiden palomitoituksen tekeminen onnistuu myös käsin, mutta ohjelmalla toteutettuna palomitoituksen tekeminen on todennäköisesti nopeampaa. Laskentaesimerkin avulla palomitoituksen tekemisestä laadittiin ohje käsikirjaan, jotta rakenteiden palomitoituksen tekeminen ohjelman avulla olisi tulevaisuudessa helpompaa ja nopeampaa. Kyseistä ohjeistusta voidaan myös soveltaa teräsrakenteiden palomitoituksen tekemiseen, koska kyseisellä laskentaohjelmistolla voidaan palomitoittaa myös teräsrakenteita.

Opinnäytetyötä tehtäessä havaittiin, että paloasioiden vaikutusten huomioiminen rakenteiden mitoituksessa on kohtalaisen helppoa, koska siinä käytettävä mitoituskannasto on varsin yksiselitteinen. Asioiden huomioimista suunnittelussa puolestaan todettiin haittaavan se, että asetuksissa ja laissa on sellaisia lauseita tai virkkeitä, joiden sanavalinnat voivat aiheuttaa tulkintaeroja suunnittelijoiden ja rakennusvalvonnan välillä.

## Abstract

**Author:** Huusko Pasi

**Title of the Publication:** The Effects of Fire Regulations in Structural Design

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Construction and Civil Engineering

**Keywords:** Structural engineering, fire grading, fire compartmentation, timber structures, fire protection, fire design

This thesis is commissioned by Insinööritoimisto Savolainen Oy. The company offers a diverse range of architectural and structural design services for its clients. The object of development is fire regulations and their effects in structural design. The aim was to examine fire regulations and fire rating standards and to execute example calculation of timber structure fire design. And further, to collect the issues studied into a manual for a structural designer. The manual includes critical questions and issues that are important for structural designer to concentrate on especially in the beginning of a design phase.

In the theory part of the thesis the fire regulations and the effects are examined from the perspective of the structural designer. Fire grading and fire compartmentation are explained accordingly to the decree of the Ministry of the Environment and Puuinfo's book "Fire-safe timber house". Fire protection and fire design of timber structures are the key parts of this thesis. The basis of fire design is explained and studied by the standard EN 1995-1-2 and the RIL book 205-2-2019 "Structural fire design". The formulas and tables for performing fire design were reviewed in the written sources.

For the empirical part of the thesis, an example of fire design of timber structures was created. The calculation example was produced with the FEM-Design calculation program. The calculation example was performed manually to compare the results. The results show that the fire design calculation can be calculated manually but a calculation program is less time consuming. Instructions for the fire design calculations with the FEM-Design calculation program were written in a manual. In the future the process is more effective and effortless to complete. Furthermore, the instructions are applicable to fire design of steel structures with FEM-Design calculation program.

It was found that the consideration of fire regulations in the design of structures is rather uncomplicated because the standard is relatively clear. A challenge is the form of words in the regulations' openness to interpretation. Possible differences in interpretation between the designers and the supervision of construction may occur.

## **Alkusanat**

Tahdon kiittää työnantajaani Insinööritoimisto Savolainen Oy:tä mahdollisuudesta tutustua pa-loasioihin ja sen avulla kehittää osaamistani itseäni kiinnostavan aiheen parissa.

Tahdon myös kiittää Kajaanin ammattikorkeakoulun opettajia ja erityisesti opinnäytetyöni oh-jaajaa Tarmo Lähdesmäkeä neuvoista ja kiperistä kysymyksistä opinnäytetyöprosessin aikana.

Lisäksi tahdon kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta opiskelujen aikana.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Palomääräysten vaatimukset ja sisältö .....	2
2.1	Paloluokat ja niiden määräytyminen.....	3
2.2	Rakennusosien paloluokat.....	6
2.3	Materiaalien pintaluokitukset.....	8
2.4	Puurakenteiden palosuojaus .....	10
2.5	Puurakenteiden mitoituksen periaatteet murtorajatilassa .....	12
2.6	Puurakenteiden palomitoitus .....	13
2.6.1	Puurakenteiden hiiltyminen.....	16
2.6.2	Puun mekaanisten ominaisuuksien pienentäminen .....	19
2.6.3	Liitosten palomitoitus.....	20
3	FEM-Design rakenteiden mitoitushjelma .....	23
4	Palomitoituslaskelma .....	24
5	Toimeksiantajalle laaditusta ohjeesta.....	28
6	Yhteenveto/pohdinta .....	29
	Lähteet .....	31

Liitteet

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Insinööritoimisto Savolainen Oy. Yritys on perustettu vuonna 1960. Insinööritoimisto Savolainen Oy on rakennusalan suunnittelu- ja konsultointipalveluja tarjoava perheyritys, jonka päätoimipaikka sijaitsee Iisalmessa ja yrityksen sivukonttorit sijaitsevat Kajaanissa ja Kuopiossa. Asiakkailleen yritys tarjoaa arkkitehti- ja rakennesuunnittelupalveluiden lisäksi rakennuttajatehtäviä ja työnvalvontaa. [1.]

Aika ajoin toimisto toteuttaa suunnittelua sellaisiin kohteisiin, joissa tulee ilmi kysymyksiä paloasioiden huomioimisesta suunnittelussa ja siitä, miten rakenteet kannattaa toteuttaa, jotta ne täyttäisivät kaikki niille asetetut palotekniset vaatimukset. Ennen kaikkea ongelmia tulee rakennetyyppien suunnittelussa ja siinä, millaisia materiaaleja rakenteissa on käytetty ja toteuttavatko ne materiaaleille asetetut pintaluokka- ja osastointivaatimukset. Työpaikalla käydyissä keskusteluissa tuli ilmi, että paloasioita olisi hyvä tutkia lisää, jotta mahdollisesti näihin ongelmiin osattaisiin varautua ennalta.

Opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena on perehtyä palomääräyksiin ja tutkia niiden vaikutusta rakenteiden suunnitteluun. Lisäksi tavoitteena oli perehtyä puurakenteiden palomitoitukseen eurokoodien avulla ja toteuttaa laskuesimerkki puurakenteiden palomitoituksesta Strusoftin kehittämää FEM-Design-laskentaohjelmistoa käyttäen. Toimeksiantajan näkökulmasta tarkasteltuna opinnäytetyön tavoitteena on koota opinnäytetyössä käsitellyt asiat käsikirjaksi/ohjeeksi, jonka avulla rakennesuunnittelijan olisi helpompi selvittää, millä tavoin palomääräykset vaikuttavat rakenteiden suunnitteluun. Toteutetusta laskuesimerkistä laaditaan ohje puurakenteiden palomitoituksen suorittamiseen FEM-Design-laskentaohjelmistoa käyttäen.

Tavoitteena oli myös perehtyä tärkeimpiin puurakenteiden suunnittelua ohjaaviin standardeihin ja opetella käyttämään FEM-Design-laskentaohjelmistoa ja näiden avulla kehittää taitojani rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa.

## 2 Palomääräysten vaatimukset ja sisältö

Luvussa käsitellään palomääräysten ja -asetusten vaatimuksia ja sisältöä sekä näiden vaikutuksia rakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen. 1.1.2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutossäädöksen 958/2012 117 b §:n mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla paloturvalliseksi [2]. Tätä täydentää 1.1.2018 voimaan tulleen ympäristöministeriön asetuksen 848/2017 § 3, jonka mukaan rakennus ja sen rakenteet tulee suunnitella ja toteuttaa siten, että rakennus täyttää paloturvallisuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset, jotka on esitetty taulukossa 1. Vaatimusten katsotaan täytyvän aina, kun rakennuksen suunnittelussa käytetään taulukkomitoitusta. [3.]

Taulukko 1. Olennaiset vaatimukset paloturvallisuuden suunnittelussa [4, s. 10].

<b>Olennainen vaatimus</b>	<b>Pääasiallisia tekijöitä paloturvallisuuden suunnittelussa</b>
Kantavilla rakenteilla tulee olla vaadittu palonkestävyys	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rakennuksen paloluokka</li> <li>• Palokuormaryhmä</li> <li>• Rakennusosien kantavuus</li> </ul>
Palon ja savun kehittyminen ja leviäminen tulee olla rajoitettua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rakennuksen paloluokka</li> <li>• Palo-osaston koko</li> <li>• Rakennusosien osastoivuus EI</li> <li>• Sisäpuolisten pintojen luokka</li> <li>• Julkisivun ja parvekkeiden pintojen luokka</li> <li>• Katteen luokka</li> <li>• Suojaverhous</li> <li>• Sprinklaus</li> </ul>
Palon leviäminen viereisiin rakennuksiin tulee rajoittaa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suojaetäisyys viereisiin rakennuksiin</li> <li>• Julkisivun ja parvekkeiden pintojen luokka</li> <li>• Katteen luokka</li> <li>• Palomuuri</li> <li>• Ulkovaipan osastoivuus EI</li> <li>• Sprinklaus</li> </ul>

<p>Palotilanteessa henkilöiden tulee voida poistua rakennuksesta tai heidät tulee voida pelastaa muiden avustuksella</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rakennuksen paloluokka</li> <li>• Henkilömäärä rakennuksessa</li> <li>• Rakennuksen pinta-ala</li> <li>• Rakennuksen korkeus</li> <li>• Poistumisteiden rakennusosien kantavuus R</li> <li>• Poistumisteiden rakennusosien osastoivuus EI</li> <li>• Poistumisteiden lukumäärä</li> <li>• Varapoistumistie</li> <li>• Poistumisteiden mitat</li> <li>• Poistumisteiden pintojen luokka</li> <li>• Poistumisteiden merkinnät ja valaistus</li> <li>• Palovaroittimet</li> <li>• Paloilmaisimet</li> <li>• Savunpoisto</li> <li>• Ovien avautumissuunnat</li> <li>• Sprinklaus</li> </ul>
<p>Pelastushenkilöiden turvallisuus tulee ottaa huomioon</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rakennuksen paloluokka</li> <li>• Rakennusosien kantavuus R</li> <li>• Rakennusosien osastoivuus EI</li> <li>• Pelastustiet</li> <li>• Sammutusreitit</li> <li>• Savunpoisto</li> <li>• Sprinklaus</li> </ul>

## 2.1 Paloluokat ja niiden määräytyminen

Suomessa rakennusten paloluokkia ovat P0, P1, P2 ja P3. Tässä opinnäytetyössä käsitellään paloluokkia P1, P2 ja P3, joita käytetään, kun rakennus suunnitellaan ympäristöministeriön asetuksen rakennusten paloturvallisuudesta mukaisten luokkien ja lukuarvojen perusteella. Paloluokkaa P0 käytetään, kun rakennus suunnitellaan kokonaan tai oleellisilta osiltaan käyttäen oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menettelyä. [3.]

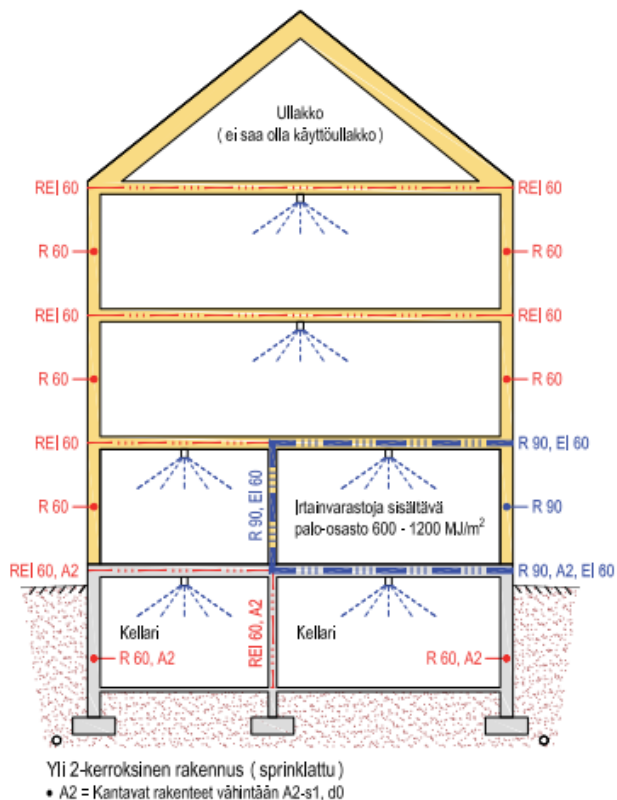


P1-paloluokkaan kuuluvia rakennuksia ovat esimerkiksi yli 28 metriä korkeat asuinkerrostalot, sairaalat ja hotellit. P2-paloluokkaan kuuluvia rakennuksia ovat esimerkiksi enintään 28 metriä korkeat asuinkerrostalot, sairaalat ja työpaikkarakennukset. P3-paloluokkaan kuuluvia rakennuksia ovat esimerkiksi 2-kerroksiset omakotitalot, 2-kerroksiset kokoontumis- ja liikerakennukset sekä enintään 14 metriä korkeat 1-kerroksiset tuotanto- ja varistorakennukset.

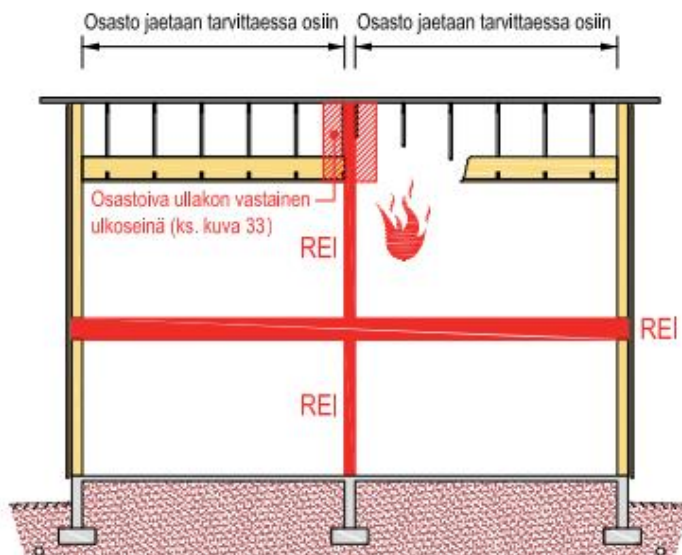
Rakennuksessa voi olla eri paloluokkiin kuuluvia osia, kunhan palon leviäminen osasta toiseen on estetty palomuurilla. Rakennuksen muutoksen tai laajennuksen yhteydessä palomuuria eri paloluokkia olevien rakennuksen osien välillä ei edellytetä, mikäli muutos tai laajennus toteutetaan P0-paloluokassa, kun olemassa oleva osa ja P0-paloluokassa toteutettu muutos tai laajennus tarkastellaan palonkehityksen ja kantavien rakenteiden kannalta tarkoituksenmukaisessa laajuudessa kokonaisuutena oletettuun palonkehitykseen perustuvalla menettelyllä. [5.]

Rakennus on jaettava palo-osastoihin palon ja savun leviämisen rajoittamiseksi, poistumisen turvaamiseksi sekä pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi, jos sen koko, kerroksisuus tai rakennuksessa olevan tilan käyttötarkoitus sitä edellyttää. Palo-osastoinnissa noudatetaan kolmea pääperiaatetta, jotka ovat kerrostaso-osastointi, pinta-alaosastointi ja käyttötarkoitus- tai käytötapaosastointi. [3.]

Kerrostaso-osastoinnilla tai kerrososastoinnilla tarkoitetaan sitä, että P1- ja P2-paloluokkien rakennuksissa kellarikerrokset, huoneistojen väliset väli- ja yläpohjat muodostavat omat palo-osastot. Lisäksi P3-paloluokan rakennuksissa kellarikerrokset, joita käyttää useampi kuin yksi asuinhuoneisto, on toteutettava omana palo-osastonaan [3]. Rakennesuunnittelun näkökulmasta ajateltuna yksi oleellisin huomioitava asia kerrososastoinnissa on se, toteutetaanko yläpohja osastoivana rakenteena. Tällä tarkoitetaan sitä, osastoidaanko ristikkotila ja huoneistokerros erillisiksi osastoiksi. P3-paloluokassa ristikkotilaa ja huoneistokerrosta ei tarvitse osastoida erillisiksi osastoiksi, kun taas P2-paloluokassa kyseinen osastointi on toteutettava. Osastointivaatimuksesta seuraa se, että ristikoiden tueksi on yleensä suunniteltava palopalkiksi kutsuttu rakenneratkaisu, joka sitten palotilanteessa kantaa sekä ristikon että yläpohjan osastoivan rakenteen ja estää palon leviämisen ristikkotilasta huonetilaan. Tämä on ”ongelma” vain ristikkorakenteisissa yläpohjissa. Tätä eroa paloluokista johtuvien osastointivaatimusten välillä on havainnollistettu kuvissa 1 ja 2. Kuvassa 1 on esitetty P2-paloluokan rakennus, jonka yläpohjassa on osastointivaatimus, minkä takia ristikkotila ja ylin huoneistokerros on osastoitu omiksi osastoikseen. Kuvassa 2 on esitetty P3-paloluokan rakennus, jossa kerrososastointia ei ole tarvinnut toteuttaa, vaan huonetila ja ristikkotila ovat samaa palo-osastoa. [4, s. 40, 41.]



Kuva 1. Palo-osastojen rakenteiden luokat P2-paloluokan puurunkoisessa rakennuksessa [4, s. 15].



Kuva 2. Kerrososastoinnin välttäminen P3-paloluokan rakennuksessa [4, s. 43].

Palo-osastoon ei voi kuulua useampia kerroksia, jos osastoon kuuluu majoitus- ja potilashuoneita. Palo-osastoon voi kuulua useampia kerroksia seuraavin rajoituksin: 1) Yli 28 metriä korkeassa rakennuksessa, 28 metrin yläpuolella kaksi kerrosta voivat porrashuonetta lukuun ottamatta kuulua

samaan palo-osastoon, mikäli palo-osaston koko ei ylitä 2400 neliömetriä. 2) Yli 56 metrin korkeudella palo-osaston on rajoitettava yhteen kerrokseen, lukuun ottamatta asuinhuoneistoja, joissa kahden kerroksen palo-osastot ja porrashuoneet ovat sallittuja. Tällöin molempien kerrosten asuinhuoneistoista on järjestettävä pääsy uloskäytävään. [3.]

Pinta-alaosastoinnissa kuten muissakin osastointitavoissa palo-osaston kokoa rajoitetaan siten, että osastossa syttyvä palo ei aiheuttaisi kohtuuttoman suuria vahinkoja [3]. Pinta-alaosastoinnilla tarkoitetaan tilojen jakamista tietyn kokosiin palo-osastoihin. Palo-osastojen kokoon liittyvät neliömääräiset vaatimukset löytyvät ympäristöministeriön asetuksesta rakennusten paloturvallisuudesta taulukosta 5.

Käyttötapaosastoinnilla tarkoitetaan käyttötavoiltaan tai palokuormaltaan oleellisesti toisistaan eroavien tilojen jakamista omiksi palo-osastoiksi. Kokoontumis- ja liiketilat, työpaikkatilat sekä majoitustilojen ja hoitolaitosten muut kuin yöpymistilat voidaan kuitenkin sijoittaa samaan palo-osastoon, mikäli tämä ei vaaranna henkilöturvallisuutta ja jos kaikkien samaan palo-osastoon sijoitettavien tilojen kaikki palotekniset vaatimukset täytetään. Tarvittaessa palo-osastot on jaettava osiin palon ja savun leviämisen rajoittamiseksi, poistumisen turvaamiseksi sekä pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi. [3.] Käyttötapaansa takia asuintiloista erillisiksi osastoiksi erotettavia tiloja ovat esimerkiksi autotallit ja iv-konehuoneet eli ilmanvaihtokonehuoneet.

## 2.2 Rakennusosien paloluokat

Rakennusosilla on rakennusten tapaan omat paloluokkansa. Rakennusosien paloluokittelussa käytetään REI-luokkavaatimuksia. REI-luokkavaatimuksen kirjaimet R, E ja I kuvaavat seuraavia asioita: R kuvaa rakennusosan kantavuutta, E kuvaa rakennusosan tiiviyttä ja I kuvaa rakennusosan eristävyttä. Näiden lisäksi luokituksessa käytetään ainakin seuraavia aikamääreitä 15, 30, 60, 90, 120, 180 ja 240, joilla tarkoitetaan vaadittua palonkestoaikaa minuuteissa, ja jonka aikana rakennusosan on säilytettävä luokituksen mukaiset ominaisuutensa. [4, s. 9, 11.] Eli jos, rakennusosan paloluokaksi on ilmoitettu REI60, niin silloin rakennusosan on säilytettävä kantavuutensa, savukaasu- ja lämpösäteilytiiviytensä sekä lämmöneristävyytensä 60 minuutin ajan palon alkamisesta.

Rakennusosilla on osastointivaatimukset ja kantavalla rungolla on palonkestovaatimukset. Puurungon palotilanteen mitoitus tehdään standardin EN 1995-1-2 mukaan. Standardissa EN 1990

käsitellään rakenteiden suunnitteluperusteita, kuten kuormitusyhdistelyjä, joiden mukaan puurakenteet mitoitetaan. Palotilanteessa rakenteet mitoitetaan onnettomuusrajatilassa. Näitä normeja käsitellään tässä opinnäytetyössä myöhemmin.

Rakennusosien palo-ominaisuudet voidaan todeta standardin EN 13501-1 mukaisilla polttokokeilla tai laskennallisesti standardissa EN 1995-1-2 esitetyillä laskentamenetelmillä. Rakennusosan osastoivuus joudutaan kuitenkin todennäköisesti osoittamaan polttokokeella, koska osastoivuuden osoittamiseen tarkoitettujen laskentamenetelmät ovat tällä hetkellä rajallisia ja koska polttokokeella päästään todennäköisesti tarkempiin ja taloudellisimpiin lopputuloksiin kuin laskentamenetelmiä hyödyntäen. [4, s. 9.]

Palomuurilla tarkoitetaan rakennetta yleensä seinää, joka määrätyn ajan estää palon leviämisen sen toiselle puolelle sekä kestää siihen liittyvän rakennuksen tai rakennukseen kuuluvan osan sortumisen tai sortumisesta johtuvat iskut. Tällaiseen rakenteeseen tulee osastoivuudesta kertovien merkintöjen lisäksi merkintä iskunkestävyydestä, jota kuvataan kirjaimella M = iskunkestävyys. Yleensä palomuri tehdään seuraavissa tapauksissa: 1) Kahdella eri tontilla tai rakennuspaikalla olevat rakennukset ovat tai tulevat olemaan niin lähellä toisiaan, että palon leviäminen on ilmeistä ja ettei palon leviämistä ole rajoitettu riittävästi osastoivia rakennusosia hyödyntämällä tai rakennusten välistä etäisyyttä kasvattamalla. 2) Rakennukset rakennetaan kiinni toisiinsa eri tonteilla tai samalla rakennuspaikalla. 3) Rakennuksen osat toteutetaan eri paloluokissa. 4) Rakennus tai rakennuskokonaisuus ylittää yhdelle rakennukselle sallitut kerrosala- ja henkilömäärärajoitukset. Tällaisissa tilanteissa riittää, että toinen rakennettavista rakennuksista varustetaan palomuurilla. Yksi palomuri eri kiinteistöjen väliin vaatii kuitenkin rakennusrasitesopimuksen. Tällöin eri tonteilla tai rakennuspaikoilla olevia rakennuksia voidaan paloteknisessä mielessä pitää myös yhtenä rakennuksena. Tämä on mahdollista vain, jos rakennukset kuuluvat samaan paloluokkaan ja niistä muodostuva kokonaisuus ei ylitä yhdelle rakennukselle sallittuja kerrosala- ja henkilömäärärajoituksia. Tällaisessa tilanteessa rakennusten välille ei tarvita palomuuria, mutta tarvittaessa rakennusten välillä käytetään osastoivia rakennusosia. [4, s. 6, 41.]

Palomuurina toimiva rakenne on toteutettava P1-paloluokan rakennuksessa ja yli 14 metriä korkeassa P2-paloluokan rakennuksessa A1-luokan rakennustarvikkeista [4, s. 41]. Palomuurissa olevat ovet on toteutettava vähintään luokan A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista ja palomuurissa olevien ovien palonkesto aika on oltava vähintään sama kuin palomuurilta vaadittu palonkesto aika [3]. Palomuurina toimiva rakenne voidaan toteuttaa betonista, harkoista muuraamalla tai pelti-villa-pelti-elementistä. Betonista toteutettaessa palomuurina toimivan seinän vähimmäispaksuusvaatimuksia ovat:

- 200 mm; raudoittamattomalle seinälle
- 140 mm; raudoitetulle kantavalle seinälle
- 120 mm; raudoitetulle ei-kantavalle seinälle [6, s. 72]

### 2.3 Materiaalien pintaluokitukset

Rakennusosissa ja rakennuksissa käytettävät tarvikkeet ja materiaalit eivät saa myötävaikuttaa palon kehittymiseen vaaraa aiheuttavalla tavalla. Tämän takia erilaisille materiaaleille on olemassa omat luokituksensa [3]. Rakennustarvikkeet ja rakennusmateriaalit jaetaan luokkiin palominaisuuksiensa perusteella ja ennen kaikkea sen perusteella, millä tavoin ne osallistuvat paloon. Luokituksessa tarkastellaan materiaalin syttymisherkkyttä, palon leviämiseen liittyviä ominaisuuksia sekä savun ja palavien pisaroiden tuottoa. Rakennustarvikkeiden luokat määritetään standardien mukaisilla polttokokeilla. Rakennustarvikkeen luokka tulee aina selvittää valmistajalta. Rakennustarvikkeen luokkamerkinnän muodostuminen yleisesti on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Rakennustarvikkeen luokkamerkinnän muodostuminen yleisesti. [4, s.23]

Osallistuminen paloon		Savun tuotto		Palavien pisaroiden ja osien tuotto	
Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä
Ei osallistu paloon	A1	Erittäin vähäinen	s1	Ei esiinny	d0
Osallistuu erittäin rajoitetusti	A2	Vähäinen	s2	Nopeasti sammuvia esiintyy	d1
Osallistuu hyvin rajoitetusti	B	Muu kuin s1 tai s2	s3	Muu kuin d0 tai d1	d2
Osallistuu rajoitetusti	C				

Osallistuminen hyväksyttävää	D				
Käyttäytyminen hyväksyttävää	E				
Käyttäytymistä ei ole määritetty	F				

Rakennustarvikkeiden luokitus perustuu tarvikkeen käyttäytymiseen palon alkuvaiheessa, joten vain luokkia A1 ja A2-s1, d0 voidaan pitää rakennustarvikkeiden palokäyttäytymistä kuvaavana luokkana, koska näiden luokkien tarvikkeet käyttäytyvät palon alussa ja myöhemmässä vaiheessa samalla tavalla. Muiden luokkien tarvikkeet voivat olla pinnoitettuja tuotteita, joiden pinta toimii palon alkuvaiheessa luokitukseen sopivalla tavalla, mutta myöhemmässä vaiheessa tuotteen ydin saattaa päästä osallistumaan paloon. Tästä syystä nykyisessä paloturvallisuutta käsittelevässä asetuksessa annetaan joihinkin tapauksiin luokkavaatimuksia myös rakennustarvikkeen ytimelle eli lämmöneristeen eristävälle osalle. Tällöin pelkän pinnan perusteella luokiteltu tuote ei sovellukaan käytettäväksi joissakin tapauksissa. A1-luokan materiaaleja ovat esimerkiksi betoni, teräs ja tiili. A2-luokan materiaaleja ovat esimerkiksi kipsilevyt ja sementtikuitulevyt. B-luokan materiaaleja ovat esimerkiksi jotkin kipsilevyt. Palosuojakäsitelty puu voi olla joko B-luokan materiaali tai C-luokan materiaali riippuen palosuojakäsittelystä. Puutuotteet yleisesti ottaen ovat D-luokan materiaaleja ja huokoiset puukuitulevyt ovat E-luokan materiaaleja. Testaamattomat tuotteet katsotaan olevan F-luokan materiaaleja. [4, s. 23, 25.]

Materiaalien pintaluokituksella pyritään siihen, että rakennusosia rakennettaisiin palo-ominaisuuksiltaan tietynlaisista rakennusmateriaaleista. Laissa asetetaan vaatimuksia ulkoseinän ulkopinnalle, tuuletusvälin ulko- ja sisäpinnalle sekä seinien ja kattojen sisäpuolisille pinnoille. Vaatimukset vaihtelevat rakennuksen paloluokan, korkeuden ja käyttötarkoituksen mukaisesti. Esimerkiksi P1-luokan rakennuksen, jonka korkeus on yli 56 metriä, rakennuksen rungon ja julkisivun tulee olla toteutettu vähintään A2-luokan materiaaleista. Jos samaisen rakennuksen korkeus olisi alle 56 metriä, tällöin rungon tulisi olla toteutettu A2-luokan materiaaleista, mutta julkisivussa voitaisiin käyttää B-luokan materiaalia eli vaikkapa palosuojakäsiteltyä paneelia. [5.] Rakennusuunnittelijan näkökulmasta asiaa tarkasteltuna tärkein asia edellä mainitusta esimerkistä on

se, että P1-luokan rakennuksen kantavassa rungossa ei voida puuta käyttää lainkaan. Huomioitava on myös se, että P1-luokassa rungon palonkestovaatimus voi rajoittaa teräksen käyttöä runkomateriaalina, mutta tälle ei kuitenkaan ole pintaluokan perusteella estettä. Rakennesuunnittelijan on otettava asetuksen pintaluokkavaatimukset huomioon rakennetyyppejä suunniteltaessa.

#### 2.4 Puurakenteiden palosuojaus

Niin puu-, teräs- kuin betonirakenteita voidaan palosuojata palotilanteiden varalta, jotta rakenteet säilyttäisivät ominaisuutensa palotilanteessa vaaditun palonkestoajan. Toisaalta betonirakenteita ei tarvitse yleensä palosuojata. Tässä opinnäytetyössä keskitytään käsittelemään puurakenteiden palosuojauksessa käytettäviä palonsuojausmenetelmiä.

Puu on palava materiaali, mutta samalla paloturvallinen materiaali, jonka palotekninen käyttäytyminen tunnetaan hyvin. Tämän takia puun kuormankestokyky ja sortuminen palotilanteessa voidaan ennakoida tarkastikin [7]. Nyrkkisääntönä puun hiiltymiseen palotilanteessa voidaan pitää ”milliä minuutissa”. Tarkemmat ohjeet puun hiiltymissyvyyden ja nopeuden laskemiseen löytyvät EN 1995-1-2:sta, joita käsitellään tässä opinnäytetyössä myöhemmin.

Puurakenteiden kantavuus palotilanteessa voidaan mitoittaa kolmea erilaista periaatetta käyttäen. Puurakenteet voidaan mitoittaa suojaamattomina rakenteina, suojaamalla puurakenteet koko palonkestoajaksi ja suojaamalla rakenteet osalle vaaditusta palonkestoajasta. Palosuojaamattomat puurakenteet pääsevät hiiltymään palon alusta lähtien. Esimerkiksi palosuojaamaton liimapuupalkki pääsee hiiltymään palolle altistuvilta sivuiltaan, jolloin sen dimensiot muuttuvat hiiltymisen seurauksena. Rakenteelta vaaditun palonkestoajan jälkeen hiiltyneestä puurakenteesta on jäljellä tehollinen poikkileikkaus, joka mitoitetaan palotilanteen rasituksille. Palosuojaamattomasta rakennetta suunniteltaessa voidaan tarpeen tullen rakenteiden kokoa suurentaa, jotta sen tehollinen poikkileikkaus kasvaa ja sen seurauksena rakenteen kantokyky palotilanteen rasituksille saadaan suuremmaksi. Hiiltymisnopeus määritetään laskennallisesti standardin EN 1995-1-2 luvun kolme mukaan. Puurakenne voi hiiltyä yhdestä suunnasta, jolloin kyseessä on yksidimensionaalinen hiiltymisen, tai useammasta suunnasta yhtä aikaa, jolloin kyseessä on nimellinen hiiltymisnopeus. Nimellisessä hiiltymisnopeudessa otetaan huomioon suorakaidepoikkileikkauksen kulmapyöritykset ja halkeamien vaikutukset. Massiiviset puurakenteet suunnitellaan yleensä palosuojaamattomina, koska palosuojaus on aina lisäkustannuksia aiheuttava toimenpide. [4, s. 83, 91.]

Puurakenteet voidaan palosuojata paloteknisesti kestävänsä koko vaaditun palonkestoajan. Puurakenteita voidaan esimerkiksi suojata paloa vastaan suojaverhouksen avulla, jolloin palolle alttiit osat verhoillaan kipsilevyillä, puulevyillä, tarkoitukseen soveltuvilla lämmöneristelevyillä tai näitä vaihtoehtoja yhdistelemällä. Puupanelointia voidaan myös käyttää palosuojauksen keinona. Tällöin palosuojauksessa käytetty tuote suojaa puurakennetta hiiltymiseltä koko palonkestoajan, mutta palosuojauksen alla oleva puurakenne pääsee lämpenemään palon aikana. Palosuojaverhoukseen käytettävää materiaalia valittaessa on tunnettava käytettävän materiaalin suojavaikutuksen kesto, rakenteen pintaluokka- ja suojaverhousvaatimukset, jotta samalla tuotteella saataisiin täytettyä kaikki rakenteelta vaaditut palotekniset vaatimukset. Esimerkiksi palosuojauksessa käytettäväksi valittu 13 mm paksu kipsikartonkilevy täyttää seuraavat vaatimukset: pintaluokkavaatimuksen A2-s1, d0 ja suojaverhousvaatimuksen K<sub>2</sub> 10, A2-s1, d0, koska 1x13 mm paksu kipsikartonkilevy suojaa rakennetta hiiltymiseltä 10 minuuttia ja se on pintaluokaltaan A2-s1, d0 -tuote. [4, s. 83, 84; 8, s. 290.]

Puurakenteet voidaan myös palosuojata paloteknisesti kestävänsä osan vaaditusta palonkestoajasta, jolloin rakenne puurakenne pääsee hiiltymään loppuajan. Esimerkiksi R30-rakenteessa palosuojauksessa käytettävä tuote voidaan suunnitella suojaamaan rakennetta 15 minuutin ajan ja jäljelle jäävän 15 minuutin aikana rakenteen annetaan hiiltä. Suojaustuotetta valittaessa tulee kiinnittää huomiota pinta- ja suojausverhousvaatimuksiin. Tällaista suojaustapaa käytettäessä on tiedettävä palosuojauksessa käytettävästä tuotteesta hiiltymisen alkamishetki ja suojauksen murtumishetki. Palosuojatuote suojaa puurakennetta hiiltymiseltä hiiltymisen alkamishetkeen asti. Palosuojauksen murtuessa sen alla oleva puurakenne paljastuu ja alkaa hiiltä. Toisaalta, jos suojauksessa käytetään kipsilevytystä, silloin puurakenne alkaa hiiltä jo aikaisemmin ja suojauksen murtuessa puutuotteissa alkaa tavallista nopeampi hiiltymisen, joka jatkuu siihen asti, kunnes hiiltymisen saavuttaa 25 mm hiiltymissyvyyden. Tämän jälkeen hiiltymisen jatkuu kyseisen puutuotteen ominaisella hiiltymisnopeudella. Rakenteiden palomitoituksessa on otettava huomioon puun hiiltymisnopeuden muutokset ja puun lujuuden aleneminen palon seurauksena. [4, s. 84.]

Puurakenteita voidaan myös käsitellä erilaisilla palosuoja-aineilla, jotta ne täyttäsivät pintaluokkavaatimukset ja jotta niiden ominaisuudet säilyisivät vaaditun palonkestoajan. Yleisesti ottaen tällä tarkoitetaan rakenteiden kantavuutta, mutta myös osastoivuutta eli lämmöneristävyttä ja tiiviyttä.



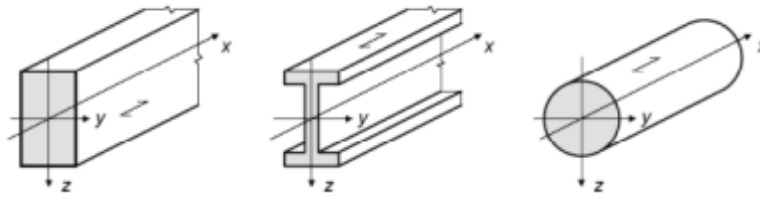
## 2.5 Puurakenteiden mitoituksen periaatteet murtorajatilassa

Puurakenteet suunnitellaan standardin SFS-EN 1995 ja sitä koskevan kansallisen liitteen mukaan. Standardin SFS-EN 1990 vaatimusten katsotaan puurakenteiden osalta täyttyvän, kun rakenteet suunnitellaan käyttäen rajatilamitoitusta ja osavarmuuslukumenetelmää standardin EN 1990 ja sen kansallisten liitteiden mukaisesti. Osavarmuuslukumenetelmällä tarkoitetaan menetelmää, jossa rakenteiden mitoituskuormia laskettaessa kuormitusten ominaisarvoja kerrotaan erilaisilla varmuuskertoimilla, joilla joko suurennetaan kuormia tai pienennetään niitä. Kuormat ja niiden yhdistelmät määritetään standardin SFS-EN 1991 ja sen kansallisten liitteiden mukaisesti. Kestävyyksien osalta noudatetaan standardia SFS-EN 1995 ja sen kansallista liitettä samoin kuin niissä esitettyjä, käyttökelpoisuutta ja säilyvyyttä koskevia sääntöjä. [9, s. 25.]

Rajatilat ovat tiloja, joiden ylittämisen jälkeen rakenne ei enää täytä asianomaista mitoituskriteeriä. Rajatiloja ovat murtorajatila, käyttörajatila ja onnettomuusrajatila. Murtorajatilalla tarkoitetaan sortumiseen tai muuhun samankaltaiseen rakenteen vaurioitumistapaan liittyvää tilaa. Käyttörajatilalla tarkoitetaan tilaa, jonka ylittämisen jälkeen rakenteelle tai rakenneosalle asetetut käyttökelpoisuusvaatimukset eivät enää täyty. [10, s. 28.] Onnettomuusrajatilalla tarkoitetaan onnettomuustilanteen tai muun samankaltaisen tilanteen aiheuttamaa vaaratilannetta rakenteiden kestävyydelle. Palomitoituksessa tehtävät tarkastelut tehdään onnettomuusrajatilan mukaisilla kuormitusyhdistelyillä.

Rajatilamitoituksessa on otettava huomioon seuraavia asioita: materiaalien erilaiset ominaisuudet, kuten lujuus ja jäykkyys; materiaalien erilainen ajasta riippuva toiminta, kuten kuorman vaikutusaika ja viruminen; erilaiset ilmasto-olosuhteet; lämpötilan ja kosteusolosuhteiden vaihtelut ja erilaiset mitoitusolot. [9, s. 26.]

Murtorajatilassa tarkastellaan poikkileikkauksen mitoitusta pääkselin suuntaisille jännityksille, niiden yhdistelmille sekä puristettujen ja taivutettujen sauvojen nurjahdus- ja kiepahduskestävyydelle. Puusta valmistettujen rakennetuotteiden vakiopoikkileikkausten pääsuuntien akselit on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Puupoikkileikkausten sauvojen pääakselit. [9, s. 71.]

Pääsuunnan jännityksiä ovat syysuuntainen veto- ja syysuuntaa vastaan kohtisuora vetojännitys, syysuuntainen puristus- ja syysuuntaa vastaan kohtisuora puristusjännitys, taivutus-, leikkaus- ja vääntöjännitys. Yhdistettyjä jännityksiä ovat puristus vinosti syysuuntaan, taivutuksen ja vedon yhteisvaikutus, taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutus sekä leikkaus- ja vääntöjännitysten yhteisvaikutus. [9, 71–85.] Ohjeet murtorajatilamitoitukseen löytyvät standardin EN 1995-1-1 luvusta 6.

Käyttörajatilamitoituksessa tarkastellaan kuormien vaikutuksesta syntyvien muodonmuutostilojen pysymistä riittävän pienenä ottaen huomioon mahdollisuus, että muodonmuutos voi aiheuttaa vaurioita pintamateriaaleille, katoille, lattioille, kevyille väliseinille tai pinnoitteille ja tuottaa näin haittaa rakenteen toiminnan tai ulkonäkövaatimusten kannalta. Kaikkien kuormien aiheuttamat välittömät taipumat otetaan huomioon käyttörajatilamitoituksessa. Käyttörajatilamitoituksessa tarkastellaan rakenteen lopputaipuman pysymistä taipumalle annettuja enimmäisarvoja pienempänä. Lopputaipumassa lasketaan välittömät taipumat ja viruman aiheuttamat taipumat yhteen. Lisäksi tarkastellaan, että rakenteen kuormat eivät aiheuta rakenteelle tai käyttäjille haitallista värähtelyä. [9, s. 30, 97, 99.] Ohjeet käyttörajatilamitoitukseen löytyvä standardin EN 1995-1-1 luvusta 7.

## 2.6 Puurakenteiden palomitoitus

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi puurakenteiden palomitoitusta, jossa käytetään onnettomuusrajatilan mukaisia kuormitusyhdistelyjä. Mikäli rakenteelta vaaditaan mekaanista kestävyyttä palotilanteessa, tulee rakenne suunnitella ja rakentaa siten, että rakenteen kantavuus säilyy asianomaisen palon kestoajan. Suunniteltaessa rakennetta on käytettävän mallin kuvastettava rakenteen toimintaa palotilanteessa. Lisäksi osoitettava, että kaavan (1) mukainen ehto täyttyy.

Kaava (1):

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

missä  $E_{d,fi}$  on palotilanteessa vallitsevan voimasuureen mitoitusarvo standardin EN 1991-1-2 mukaan ja  $R_{d,t,fi}$  on vastaava kestävyysmitoitussarvo palotilanteessa. [11, s. 28–34.]

Palotilanteessa lujuuden mitoitusarvot lasketaan kaavaa (2) käyttäen:

Kaava (2):

$$f_{d,fi} = k_{\text{mod},fi} \times \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

missä  $f_{d,fi}$  on lujuuden mitoitusarvo palotilanteessa,  $f_{20}$  on lujuusominaisuuden 20 % fraktiili normaalilämpötilassa ja se lasketaan kaavan (3) mukaan,  $\gamma_{M,fi}$  on puun osavarmuusluku palotilanteessa ja Suomessa  $\gamma_{M,fi}$  arvona käytetään 1,0 ja  $k_{\text{mod},fi}$  on palotilanteeseen liittyvä muunnoskerroin yleensä 1,0. [11, s. 30; 12, s. 16.]

Lujuusominaisuuden 20 % fraktiili lasketaan kaavalla (3):

Kaava (3):

$$f_{20} = k_{fi} \times f_k$$

missä  $k_{fi}$  on kerroin, jonka arvot on esitetty taulukossa 3 ja  $f_k$  on lujuuden ominaisarvo. Erilaisten puumateriaalien lujuuden ominaisarvot löytyvät RIL 205-1-2017 puurakenteiden suunnitteluohjeesta luvun 3 taulukoista 3.3S–3.13S. [11, s. 32; 12, s. 16.]

Taulukko 3. Kertoimen  $k_{fi}$  arvot. [11, s. 32].

	$k_{fi}$
Sahatavara	1,25
Liimapuu	1,15
Puulevyt	1,15
LVL	1,1

Leikkausliittimien avulla muodostettu liitos, jossa sivukappaleet ovat puuta tai puulevyä	1,15
Leikkausliittimien avulla muodostettu liitos, jossa sivukappaleet ovat terästä	1,05
Liitokset, joissa liittimet kuormittuvat pitkittäin	1,05

Palotilanteesta aiheutuvien pituuden ja muodon muuttumisen ja muutosten estymisen seurauksena syntyy kuormavaikutuksia eli pakkovoimia, jotka tulee ottaa huomioon. Pakkovoimia ei kuitenkaan tarvitse ottaa huomioon tapauksissa, joissa kuormavaikutusten voidaan todeta olevan merkityksettömiä tai edullisia rakenteen toimivuuden kannalta. Pakkovoimia ei tarvitse huomioida myöskään tilanteissa, joissa ne voidaan ottaa huomioon valitsemalla varmallalla puolella olevat tuentamallit ja reunaehdot tai jos pakkovoimat voidaan ottaa huomioon sisällyttämällä mahdollisuus konservatiivisesti asetettuihin paloturvallisuusvaatimuksiin. [13, s. 44.]

Palomitoituksessa käytetään onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyjä, jotka on esitetty kaavoissa (4) ja (5):

Kaava (4):

$$E_{d,fi} = G_k + \psi_{1,1}Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i}Q_{k,i}$$

Kaava (5):

$$E_{d,fi} = G_k + \psi_{2,1}Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i}Q_{k,i}$$

missä  $G_k$  on pysyvien kuormien ominaisarvo,  $Q_{k,1}$  on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo,  $Q_{k,i}$  on muuttuvan kuorman ominaisarvo,  $\psi_{1,1}$  on tavanomaisen kuormituksen keston yhdistelykerroin määrävälle muuttuvalle kuormalle EN 1990 kansallisen liitteen mukaan ja  $\psi_{2,i}$  on lyhytaikaisen kuormituksen keston yhdistelykerroin EN 1990 kansallisen liitteen mukaan. Kaavaa (4) käytetään, kun määrävänä muuttuvana kuormana on lumi- tai tuulikuorma. Kaavaa (5) käytetään, kun määrävänä muuttuvana kuormana on hyötykuorma. Muuttuvien kuormien yhdistelykertoimien arvot on esitetty taulukossa 4. [12, s. 18.]

Taulukko 4. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet  $\psi_{1,1}$  ja  $\psi_{2,i}$  EN 1990 kansallisen liitteen mukaan [12, s. 19].

Kuorma	$\psi_{1,1}$	$\psi_{2,i}$
Hyötykuormat rakennuksissa		
Luokka A: asuintilat		0,3
Luokka B: toimistotilat		0,3
Luokka C: kokoontumistilat		0,3
Luokka D: myymälätilat		0,6
Luokka E: varastotilat		0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, esim. autotallit		0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, esim. raskaat ajoneuvot		0,3
Luokka H: vesikatot		0
Lumikuorma, kun		
$s_k < 2,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	0,5	0,2
Jääkuorma	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,2	0

Taulukon perusteella voidaan huomata lumi-, tuuli- ja jääkuormien yhdistelykertoimen olevan välillä 0,2...0,5 eli tällöin muuttuvien kuormien ominaisarvoja pienennetään palotilanteessa huomattavasti. Toki huomioitava on myös se, että lumi-, tuuli- ja jääkuormien kertoimet ovat vieläkin pienempiä tilanteissa, joissa ne eivät ole määrääviä muuttuvia kuormia.

Palotilanteessa vallitseva voimasuure  $E_{d,fi}$  voidaan määrittää myös normaalilämpötilatarkastelun perusteella, jonka tekemiseen löytyy tarkemmat ohjeet standardin EN 1995-1-2 luvusta 2.4.2.

### 2.6.1 Puurakenteiden hiiltyminen

Palotilanteessa puu pääsee hiiltymään palolle altistuvien pintojensa osalta vapaasti, mutta myös sellaisten pintojen osalta, jotka olivat mahdollisesti alun perin palolta suojattuina, mutta joissa

puu pääsee hiiltymään palon aikana. Hiiltemissyvyydellä tarkoitetaan rakenneosan alkuperäisen ulkopinnan ja hiiltemisrajan välistä etäisyyttä, joka lasketaan palon keston ja kyseisen materiaalin hiiltemisnopeuden avulla. Hiiltemissyvyyttä laskettaessa on kuitenkin syytä ottaa huomioon se, että hiiltemisnopeus ei ole koko ajan samanlaista, vaan vaihtelee sen mukaan, onko rakenne suo- jattu vai suojaamaton koko paloaltistuksen ajan. [11, s. 38.]

Suojaamattomien pintojen hiiltemisen nopeus oletetaan ajasta riippumattomaksi vakioarvoksi, niin yksidimensionaalisen hiiltemisen kuin nimellisen hiiltemissyvyyden mitoitusarvojen lasken- nassa. Yksidimensionaalisella hiiltemisellä tarkoitetaan tasomaisen rakenteen hiiltemistä vain raken- teen toiselta puolelta. Nimellisellä hiiltemisellä useammalta sivulta palolle alttiina olevan suora- kaidepoikkileikkauksen hiiltemistä, joka huomioi poikkileikkauksen kulmapyörityksien ja hal- keamien vaikutuksen rakenteen hiiltemiseen. [11, s. 40; 12, s. 21, 22.]

Tasomaisten rakenteiden esimerkiksi massiivisen puulaatan tai seinän hiiltemissyvyyden mitoi- tusarvon laskemiseen käytetään yksidimensionaalista hiiltemisnopeutta. Yksidimensionaalisen hiiltemissyvyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan (6) mukaisesti:

Kaava (6):

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 t$$

missä  $d_{\text{char},0}$  on hiiltemissyvyyden mitoitusarvo yksidimensionaalisessa hiiltemisessä,  $\beta_0$  on yksidi- mensionaalisen hiiltemisnopeuden mitoitusarvo standardipalossa ja  $t$  on palon kesto. [11, s. 40; 12, s. 22, 23.]

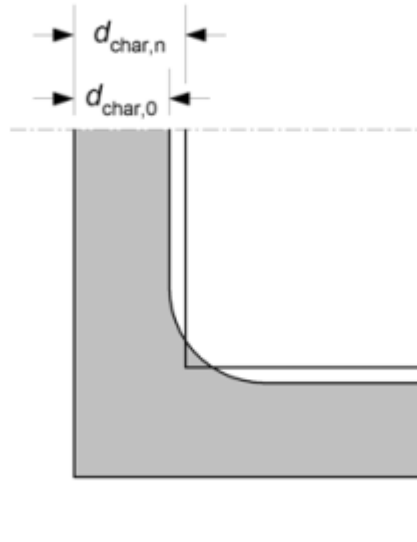
Useammalta sivultaan palolle alttiina olevan suorakaidepoikkileikkauksen esimerkiksi pilarin tai palkin hiiltemissyvyyden laskemiseen käytetään nimellistä hiiltemisnopeutta. Nimellisen hiilte- missyvyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan (7) mukaisesti:

Kaava (7):

$$d_{\text{char},n} = \beta_n t$$

missä  $d_{\text{char},n}$  on nimellisen hiiltemisen mitoitusarvo, johon sisältyy särmäpyöritysten vaikutus ja  $\beta_n$  on nimellisen hiiltemisnopeuden mitoitusarvo, jonka suuruuteen on sisällytetty särmäpyöris- tysten vaikutus ja halkeamien vaikutus. [11, s. 40; 12, s. 23.]

Yksidimensionaalisen hiiltymissyvyyden ja nimellisen hiiltymissyvyyden välistä eroa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Hiiltymissyvyys  $d_{char,0}$ , kun hiiltyminen on yksidimensionaalista, ja nimellinen hiiltymissyvyys  $d_{char,n}$  [12, s. 22].

Suorakaidepoikkileikkauksen hiiltymämitoituksessa voidaan käyttää yksidimensionaalisen hiiltymisnopeuden mitoitusarvoa, mikäli poikkileikkauksen alkuperäinen leveys  $b_{min}$  täyttää RIL 205-2-2019 puurakenteiden palomitoitus -kirjan luvun 3 taulukon 3.1S vaatimukset eri palonkestoluokissa. Käytettäessä yksidimensionaalisen hiiltymisnopeuden mitoitusarvoa kulmapyöristykset on otettava erikseen huomioon. Tällöin kulmapyöristyksen säteenä käytetään hiiltymissyvyyden mitoitusarvoa  $d_{char,0}$ . Poikkileikkauksen ollessa pyöreä tai jos suorakaidepoikkileikkauksen alkuperäinen leveys ei täytä ehtoja niin hiiltymissyvyyden laskemiseen käytetään nimellistä hiiltymisnopeutta. [12, s. 23.]

Koko palon ajan suojaamattomina olevien puupintojen hiiltymisnopeudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Puutavaran, LVL:n, lautaverhouksen ja puulevyjen hiiltymisnopeuden mitoitusarvot  $\beta_0$  ja  $\beta_n$  [11, s. 44].

	$\beta_0$ mm/min	$\beta_n$ mm/min
a) Havupuu ja pyökki		

Liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Sahatavara, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,80
<b>b) Lehtipuu</b>		
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys on $290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
<b>c) LVL</b> , jonka ominaistiheys on $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
<b>d) Levyt ja lautaverhoukset</b>		
Lautaverhoukset	0,9 <sup>a</sup>	-
Vaneri	1,0 <sup>a</sup>	-
Muut puulevyt kuin vaneri	0,9 <sup>a</sup>	-
<sup>a</sup> Arvot pätevät, kun ominaistiheys on $450 \text{ kg/m}^3$ ja levyn paksuus 20 mm		

Palolta suojattujen palkkien ja tolppien pintojen hiiltymissyvyyden laskemiseen ohjeet löytyvät standardin EN 1995-1-2 luvusta 3.4.3.

#### 2.6.2 Puun mekaanisten ominaisuuksien pienentäminen

Puun mekaanisia ominaisuuksia joudutaan palotilanteessa pienentämään ja standardissa EN 1995-1-2 tähän esitetään kaksi eri vaihtoehtoa. Pienennys voidaan toteuttaa tehollisen poikkileikkauksen menetelmällä tai tehollisten ominaisuuksien menetelmällä [11, s. 56, 58]. Standardin EN 1995-1-2 kansallisessa liitteessä ohjeistetaan, että Suomessa poikkileikkauks ominaisuuksien pienentämiseen käytetään tehollisen poikkileikkauksen menetelmää [14].

Tehollisen poikkileikkauksen menetelmässä rakenteen tehollinen poikkileikkaus lasketaan pienentämällä alkuperäistä poikkileikkausta tehollisen hiiltymissyvyyden  $d_{ef}$  verran, joka lasketaan kaavan (8) mukaan.

Kaava (8):

$$d_{ef} = d_{char, n} + k_0 d_0$$



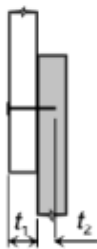
missä  $d_0 = 7 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{char},n}$  määritetään kaavan (7) mukaan ja  $k_0$  on kerroin, jonka määrittäminen on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Kertoimen  $k_0$  määrittäminen pinnan ollessa suojaamaton. [11, s. 56.]

	$k_0$
$t < 20$ minuuttia	$t/20$
$t \geq 20$ minuuttia	1,0

### 2.6.3 Liitosten palomitoitus

Liitosten palomitoituksen osalta tässä opinnäytetyössä keskitytään tarkastelemaan yksileikkeisen naulaliitoksen leikkauskestävyyden mitoitusta. Yksileikkeinen naulaliitos on esitetty kuvassa 5, tällä pyritään hahmottamaan, mitä tarkoitetaan yksileikkeisellä naulaliitoksella.



(a) Yksileikkeinen liitos

Kuva 5. Yksileikkeinen naulaliitos [15, s. 29].

Liitosten palomitoitus voidaan tehdä eri tavoilla ja se riippuu yleensä siitä, millainen liitos on kyseessä. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi pienennetyn kuormituksen menetelmä, jossa liitoksen palotilanteen leikkauskestävyyden ominaisarvo lasketaan kaavan (9) mukaisesti:

Kaava (9):

$$F_{v, Rk, fi} = \eta F_{v, Rk}$$

missä  $F_{v, Rk, fi}$  on liitoksen kestävyys ominaisarvo palotilanteessa ja  $F_{v, Rk}$  on liitoksen kestävyys ominaisarvo normaalilämpötilassa, joka lasketaan EN 1995-1-1 luvun 8 mukaan. Termi  $\eta$  on muuntokerroin, joka lasketaan kaavan (10) mukaan:

Kaava (10):

$$\eta = e^{-kt_{d, fi}}$$

missä  $k$  on taulukossa 7 esitetyn parametrin arvo,  $e$  on Neperin luku ja  $t_{d, fi}$  on suojaamattoman liitoksen palonkestävyyden mitoitusarvo minuutteina. Laskettaessa muuntokertoimen  $\eta$  arvoja havaitaan, että suuremmalla muuntokertoimen arvolla saadaan myös suurempi liitoksen kestävyysarvo. Palonkestävyyden mitoitusarvon  $t_{d, fi}$  arvot on esitetty taulukossa 8. [11, s. 72, 74.]

Taulukko 7. Parametri  $k$  [11, s. 74].

Liittimet ja liitettävät materiaalit	$k$	Suurin palonkestävyysaika, jolla parametri $k$ on käyttökelpoinen suojaamattomassa liitoksessa minuutteina
Naulat ja ruuvit	0,08	20
Pultit puisten liitososien välisessä liitoksessa, kun $d \geq 12$ mm	0,065	30
Pultit teräksen ja puun välisissä liitoksissa, kun $d \geq 12$ mm	0,085	30
Tappivaarnat puisten liitososien välisessä liitoksessa <sup>a</sup> , kun $d \geq 12$ mm	0,04	40
Tappivaarnat teräksen ja puun välisessä liitoksessa <sup>a</sup> , kun $d \geq 12$ mm	0,085	30
Standardin EN 912 mukaiset liittimet	0,065	30
<sup>a</sup> Tappivaarnojen arvot riippuvat siitä, onko joka neljättä vaarnaa kohti pultti.		

Taulukko 8. Suojaamattomien liitosten palonkestävyydet sivukappaleiden ollessa puuta [11, s. 66].

	Palon kestävyysaika $t_{d,fi}$ min	Edellytys <sup>a</sup>
Naulat	15	$d \geq 2,8$ mm
Ruuvit	15	$d \geq 3,5$ mm
Pultit	15	$t_1 \geq 45$ mm
Tappivaarnat	20	$t_1 \geq 45$ mm
Standardin EN 912 mukaiset liittimet	15	$t_1 \geq 45$ mm
<sup>a</sup> $d$ on liittimen paksuus tai halkaisija, ja $t_1$ on sivukappaleen paksuus		

### 3 FEM-Design rakenteiden mitoitusohjelma

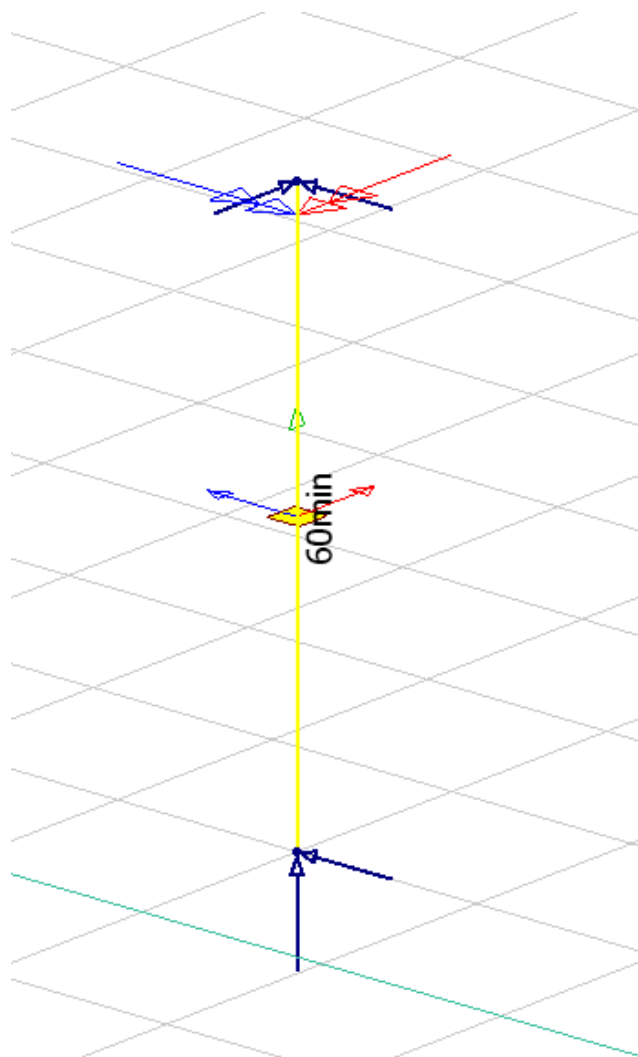
FEM-Design on Strusoftin kehittämä edistyksellinen ja intuitiivinen rakenteiden mitoitusohjelma. Ohjelmistoa voidaan käyttää kaikenlaisten rakennustehtävien suunnitteluun yksittäisistä elementeistä suurten rakennusten globaaliin stabiiliteettianalyysiin. Ohjelmasta löytyvät myös erittäin kattavat betoni-, puu- ja terässauvojen laskentaominaisuudet. Lisäksi ohjelmasta löytyvät suunnittelumoduulit betonirakenteiden-, teräsrakenteiden-, teräslitosten-, puurakenteiden-, CLT-rakenteiden-, perustusten-, maaperän-, muurattujen rakenteiden ja liittorakenteiden suunnitteluun. Teräs- ja puurakenteita on myös mahdollista mitoittaa palotilanteiden varalta ohjelman avulla. Ohjelmisto sopii kaikenkokoisille ja -tyyppisille rakenteille, joiden laskelmat suoritetaan Eurokoodi-standardien mukaisesti kansallisia liitteitä hyödyntäen. [16; 17.]

FEM-Designin laskentamoottori mahdollistaa sekä yksinkertaisten yksittäisten elementtien että monimutkaisempien kokonaisuuksien rakenneanalyysien tekemisen. FEM-Design-laskentaohjelmalla voidaan suorittaa staattinen ja stabiiliteettianalyysi, kuormitusyhdistelmät, rakennusvaiheet, plastinen analyysi ja dynaamiset analyysit, kuten seisminen ja värähtely- ja aikahistoria-analyysi. FEM-Designin ominaisuuksiin kuuluu myös kyky operoida saumattomasti yhteistyössä muiden suunnittelutyökalujen kanssa. FEM-Design tukee siis erilaisia 3D-tiedostomuotoja, mutta myös 2D-pohjaisia CAD-tiedostoja DWG ja DXF. Työympäristö perustuu tuttuihin CAD-työkaluihin, jotka helpottavat mallin luomista ja rakenteen muokkaamista. [17.]

Tässä opinnäytetyössä FEM-Design-laskentaohjelmaa käytetään suojaamattoman puisen ulkoseinäpilarin palomitoituslaskelman tekemiseen. Vertailun vuoksi samainen laskelma suoritetaan myös käsin, jotta voidaan vertailla mahdollisia eroavaisuuksia laskelmien lopputuloksissa. Laskelman suorittamista varten piti perehtyä FEM-Design-laskentaohjelmassa olevaan puurakenteiden suunnittelumoduuliin ja sen toimintaan.

#### 4 Palomitoituslaskelma

Ohjelmalla laadittiin todenmukainen, mutta kuviteltu laskuesimerkki, jonka avulla haluttiin selvittää, miten palotilanne vaikuttaa rakenteen kestävyyteen ja onko sillä mahdollisesti vaikutusta rakenteen poikkileikkauksen valintaan. Ohjelmalla suoritettiin rakenteen kestävyuden tarkastelut murtorajatilassa ja onnettomuusrajatilassa 15, 30 ja 60 minuutin paloajoille. Tarkasteltavana rakenteena oli kolme metriä korkea molemmista päistään nivelellisesti tuettu liimapuupilari. Laskelmassa käytetyn pilarin poikkileikkaus oli 180x180 mm. Kuva laaditusta laskentamallista on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kuva laskentamallista.

Laskelmassa käytetyt ominaiskuormat olivat seuraavanlaiset:

- pysyvän kuorman ominaisarvo  $N_{gk} = 20 \text{ kN}$

- lumikuorman ominaisarvo  $N_{qks} = 55 \text{ kN}$
- tuulikuorman ominaisarvo  $q_{wk} = 3,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ .

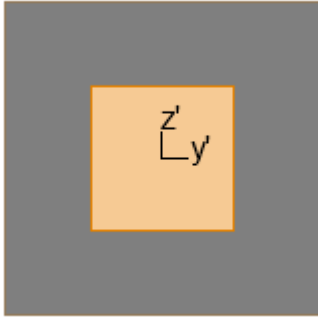
Murtorajatilassa käyttöasteeltaan vaarallisin kuormitusyhdistely oli seuraavanlainen: 1,15 x pysyvä kuorma + 1,50 x tuulikuorma + 1,50 x 0,70 x lumikuorma. Onnettomuusrajatilassa käyttöasteeltaan vaarallisin yhdistely oli seuraavanlainen: pysyvä kuorma + palo + 0,50 x lumikuorma.

Ohjelmalla laskettaessa murtorajatilassa pilarin käyttöasteeksi saatiin 34 %, kun taas käsin laskennassa pilarin käyttöasteeksi saatiin 35 %. Ohjelmalla laskettaessa onnettomuusrajatilassa pilarin käyttöasteeksi 15 minuutin paloajalla saatiin 11 %, 30 minuutin paloajalla 20 % ja 60 minuutin paloajalla 99 %. Käsin laskettu vertailulaskelma suoritettiin onnettomuusrajatilan määrävällä kuormitusyhdistelyllä 60 minuutin paloajalle ja pilarin käyttöasteeksi saatiin 96 %. FEM-Design-laskentaohjelmalla suoritettu laskelma löytyy liitteestä 1. Käsin tehty vertailulaskelma löytyy liitteestä 2. Laskelmien tulokset on esitetty myös taulukoituna taulukossa 9.

Taulukko 9. Palomitoituslaskelman tulokset taulukoituna.

	Käyttöaste FEM:llä laskettuna	Käyttöaste käsin laskennassa
Murtorajatilamitoitus	34 %	35 %
Onnettomuusrajatilamitoitus 15 minuutin paloajalla	11 %	Vertailulaskelmaa ei suoritettu.
Onnettomuusrajatilamitoitus 30 minuutin paloajalla	20 %	Vertailulaskelmaa ei suoritettu.
Onnettomuusrajatilamitoitus 60 minuutin paloajalla	99 %	96 %

Kuva FEM-Designilla 60 minuutin paloajalle mitoitetusta hiiltyneestä poikkileikkauksesta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kuva hiiltyneestä poikkileikkauksesta.

Tulosten perusteella voidaan sanoa kyseinen poikkileikkaus kestää sille tulevat kuormitukset niin murtorajatilan kuin onnettomuusrajatilan kuormitusyhdistelyillä, mutta palotilanteen pitkittyessä se menettää kantokykynsä. Tulosten perusteella voidaan myös todeta, että tällaisen yksinkertaisen rakenteen palomitoituslaskelma on mahdollista toteuttaa myös käsin. Ohjelmalla laskelman toteuttaminen on nopeampaa kuin käsin ja, sillä voidaan laatia monimutkaisia kuormitus-tilanteita, jotka saadaan tarkastettua kerralla. Toisaalta ohjelmalla virheen voi aiheuttaa väärin valittu asetus tai jokin vastaava pieni huolimattomuus, mutta on myös huomioitava se, että käsin laskemallakin on mahdollista tehdä virheitä. Tulosten pienien erojen takia voidaan olettaa, että laskelmat on toteutettu oikein.

Erot laskelmien tuloksissa selittyvät pienillä eroavaisuuksilla laskutavoissa ja välitulosten pyöristämisessä. Tuloksiin on myös vaikuttanut osaltaan se, että laskentaohjelmalla laskettaessa rakenteen oma paino on otettu huomioon, kun taas käsin laskennassa näin ei ole tehty, koska rakenteen oman painon vaikutuksen on ajateltu olevan laskennan kannalta minimaalinen. Tätä päätelmää myös laskelmien tulokset tukevat. Jos kyseessä olisi isompi kokonaisuus, niin rakenteiden oma paino olisi pitänyt ottaa huomioon myös käsin laskennassa, koska tällöin niiden vaikutus laskentaan olisi ollut merkittävämmässä roolissa kuin se nyt oli. Suurin eroavaisuus laskelmien välille on mahdollisesti syntynyt nurjahduskertoimen  $k_c$  määrittämisessä. Laskentaohjelmassa nurjahduskerroin lasketaan eurokoodin EN 1995-1-1 luvun 6.3.2 mukaan, kun taas käsin laskennassa on käytetty kyseisen eurokoodin pohjalta laaditun ”Puurakenteiden lyhennetyn suunnitteluohjeen” luvun 5.5 mukaista menettelytapaa. Erot kertoimen  $k_c$  arvoissa eivät ole suuret, mutta ero arvoissa olisi voinut olla myös isompi, sillä oletettavasti eurokoodin tavalla laskettuna kertoimen arvosta tulee tarkempi kuin lyhennetyn suunnitteluohjeen mukaisella tavalla laskettuna.

Palomitoitusta tehtäessä havaittiin, että FEM-Designissa rakenteet voidaan mitoittaa palolta suojaamattomina tai palolta suojattuina. Tällöin voidaan tehdä erilaisia valintoja suojauksen suhteen. Suojauksessa voidaan käyttää erilaisia valmiita levytysvaihtoehtoja tai käyttäjä voi itse määrittellä,

millaista suojausta rakenteessa käytetään. Ohjelmassa voidaan myös kokeilla miten pienempi tai suurempi hiililymisnopeuden mitoitusarvo vaikuttaa laskelman tuloksiin.



## 5 Toimeksiantajalle laaditusta ohjeesta

Opinnäytetyön pohjalta lähdettiin tekemään eräänlaisena rakennesuunnittelijan palokäsikirjana toimivaa ohjeistusta paloasioihin. Ohjeeseen lähdettiin kokoamaan erilaisia kriittisiä kysymyksiä, joiden pohjalta lähdettiin laatimaan toimintaohjeita siihen, mihin arkkitehtikuvissa kannattaa kiinnittää huomiota ja millaisia vaatimuksia laista ja muista paloasetuksista tulee esimerkiksi palo-osastointiin liittyen.

Teräsrakenteiden palosuojaukseen käsiteltiin ohjeessa hieman enemmän, koska toimeksiantajan pyyntönä oli myös perehtyä puurakenteiden palosuojauksen lisäksi hieman myös teräsrakenteiden palosuojaukseen, joten ohjeeseen koottiin erilaisia teräsrakenteiden palosuojauksessa käytettäviä suojaustapoja ja niiden toimintaperiaatteita. Puurakenteiden palosuojaukseen käsiteltiinkin enemmän tässä työssä, joten ohjeeseen etsittiin tietoa erilaisista netistä löytyvistä puurakenteiden palosuojausoppaista, joista aiheeseen on löydettävissä lisätietoa. Näiden asioiden lisäksi palosuojaukseen käsiteltäessä pohdittiin erilaisia kysymyksiä rakenteiden palosuojaukseen liittyen. Palosuojauksen kannalta merkittävä kysymys liittyy rakenteen toteutustapaan eli toteutetaanko palosuojaukseen ollenkaan ja mikäli palosuojaus päätetään toteuttaa, niin täytyy kiinnittää huomiota sopivien suojausmateriaalien valintaan, jotta suojauksen jälkeen rakenne täyttäisi kaikki rakenteelta vaaditut palotekniset vaatimukset.

Palomitoituksen tekemiseen FEM-Design-laskentaohjelmalla laadittiin ohje, jota seuraamalla laskelman tekemisen pitäisi onnistua ja helpottaa laskelman tekoa ensimmäisillä kerroilla.

Kuvassa 8 on esitetty toimeksiantajalle laaditun ohjeen sisällysluettelo.

### Sisällysluettelo

1	Paloasioihin liittyvät kriittiset kysymykset rakennesuunnittelun kannalta: .....	2
1.1	Tarkastuslista kriittisten kysymysten pohjalta .....	2
2	Rakenteiden palosuojaus .....	3
2.1	Toimintaohjeita rakenteiden palosuojaukseen .....	5
3	Puurakenteiden ja liitosten palomitoitus .....	6
3.1	Palomitoituksen kulku .....	7
3.2	Ohje palomitoituksen tekemiseen FEM-design ohjelmalla: .....	8

Kuva 8. Toimeksiantajalle laaditun ohjeen sisällysluettelo.

## 6 Yhteenveto/pohdinta

Opinnäytetyö prosessina oli haasteellinen, vaativa ja aikaa vievä projekti, mutta myös todella opettavainen, koska asiaa tutkiessa esille tuli jatkuvasti uusia mielenkiintoisia kysymyksiä, joihin piti etsiä vastauksia. Toisaalta aiheen laajuuden takia oli myös paljon sellaisia asioita ja kysymyksiä, joita ei voitu tässä opinnäytetyössä käsitellä, koska työ olisi paisunut liian isoksi ja aiheisiin perehtyminen olisi jäänyt vain pintaraapaisuksi. Aihe päätettiin rajata koskemaan puurakenteiden palomitoitusasioita, koska siinä ajateltiin olevan riittävästi tutkittavaa ja siitä ajateltiin olevan eniten hyötyä tulevaisuutta ajatellen. Tämän takia aihetta voitiin käsitellä melko tarkastikin, mutta toisaalta oli myös sellaisia kysymyksiä aiheeseen liittyen, joiden käsittely jouduttiin rajaamaan tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Paloasioiden vaikutuksien huomioiminen rakenteiden mitoituksessa on kohtalaisen helppoa, koska siinä käytettävä mitoitusnormi on varsin yksiselitteinen. Haastavan asioiden huomioimisesta tekee se, että asetuksissa ja laissa on sellaisia lauseita tai virkkeitä, joiden sanavalinnat voivat aiheuttaa haastavia tilanteita, koska niiden takia syntyy tilanteita, joissa rakennusvalvonta voi tulkita jotain asetuksen pykälää eri tavalla kuin suunnittelija. Tällaiset tilanteet olisivat tosin vältettävissä paremmalla yhteistyöllä suunnittelijoiden ja rakennusvalvonnan välillä, mutta myös laatimalla sellaisia pykäläiä, joilla tällaisia tulkintaeroja ei pääsisi syntymään. Tällaisia tilanteita voi syntyä osastointiin liittyvissä asioissa eli siinä millainen rakennetyyppi täyttää rakenteen osastoinnille asetetut vaatimukset ja millaisista materiaaleista se on toteutettava.

Opinnäytetyön tavoitteena toimeksiantajan näkökulmasta ajateltuna oli perehtyä palomääräyksiin, tutkia niiden vaikutusta rakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen ja koota tärkeimmät suunnitteluun vaikuttavat asiat yrityksen rakennesuunnittelujoille suunnattuun palokäsikirjaan. Tavoite saavutettiin, ja onnistuin kokoamaan opinnäytetyössä ilmi tulleet rakennesuunnittelijan kannalta tärkeimmät kysymykset ja havainnot palokäsikirjaan. Palokäsikirjaan laadittiin myös ohje palomitoituslaskelman suorittamiseen FEM-Design-laskentaohjelmistoa käyttäen. Palokäsikirjasta oli tarkoitus luoda sellainen työkalu, jota voidaan tarpeen vaatiessa täydentää kokemusten karttuessa ja erilaisten projektien yhteydessä ilmi tulleiden asioiden avulla. Lisäksi ohjetta voidaan laajentaa myöhemmin koskemaan myös arkkitehtisuunnittelua, jotta asiat voitaisiin ottaa huomioon jo arkkitehtisuunnittelussa. Tämän avulla mahdolliset ongelmatilanteet vähenisivät ja niihin voitaisiin kiinnittää huomiota jo aiemmin, jolloin mahdolliset lisäkustannukset ovat helpommin hallittavissa ja niiden synty voidaan mahdollisesti myös estää tai rajata hyvin pieniksi.

Kokonaisuudessaan opinnäytetyöprosessin myötä opin paljon uusia asioita, jotka lisäsivät ymmärrystäni paloasioiden vaikutuksista rakenteiden suunnitteluun ja suunnitteluun ylipäättänsä. Opinnäytetyöprosessin myötä uskon tietojeni ja taitojeni rakenteiden suunnittelussa kehittyneen ja uskon pystyväni jatkossa toteuttamaan puisten perusrakenteiden standardien mukaista suunnittelua ja huomioimaan paloasioiden vaikutukset niiden suunnittelussa. Lisäksi prosessin aikana opettelin käyttämään uutta rakenteiden mitoitusohjelmaa, jonka myötä pystyn jatkossa kehittämään taitojani kyseisen mitoitusohjelman käyttäjänä. Uskoisin myös, että pystyn oppimaan vielä lisää paloasioiden vaikutuksista ja ylipäättänsä erilaisista määräyksistä ja standardeista, joita noudattamalla voidaan suunnitella ja rakentaa paloturvallisia rakennuksia, joiden rakenteet täyttävät paloturvallisuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset. Näiden tietojen ja taitojen avulla pystyn mahdollisesti myös kehittämään ja täydentämään työn pohjalta laadittua ohjetta tulevaisuudessa.

## Lähteet

- (1.) Etusivu. Insinööritoimisto Savolainen. [Internet]. [viitattu 20.03.2024]. Saatavilla: <https://www.inststo-savolainen.fi/>
- (2.) MRL 1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki. 1999. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>
- (3.) YMA 2017/848. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. 2017. Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2017/20170848>
- (4.) Lahtela T. Paloturvallinen puutalo – Asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. 2021.
- (5.) YMA 2020/927. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta. 2020. Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200927>
- (6.) Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013: Osa 1. BY-koulutus. Suomen betoniyhdistys. 2013.
- (7.) Puuinfo.fi. [Internet]. [viitattu 3.1.2024]. Saatavilla: <https://puuinfo.fi/puutieto/kayttokohteet/paloturvallisuus/>
- (8.) Gyproc Käsikirja. Kevytrakennejärjestelmät. Saint-Gobain Finland oy / Gyproc. 2021
- (9.) RIL 205-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2019.
- (10.) SFS-EN 1990 + A1 + AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. 2010.
- (11.) SFS-EN 1995-1-2 + AC. Eurokoodi 5, puurakenteiden suunnittelu osa 1–2: Yleistä, puurakenteiden palomitoitus. 2015.
- (12.) RIL 205-2-2019. Puurakenteiden palomitoitus. Eurokoodi EN 1995-1-2. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2019.
- (13.) SFS-EN 1991-1-2 + AC. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. 2016.

(14.) Ympäristöministeriön kansallinen liite. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Puurakenteet. Ympäristöministeriö. 2016.

(15.) Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. Eurokoodi 5. Puuinfo Oy. 2020.

(16.) Lähdesmäki T. KAMK:in Reppu, Teräs- ja puurakenteet opintojakso. [viitattu 14.4.2024].

(17.) Strusoft. FEM-design. [Internet]. [viitattu 30.1.2024]. Saatavilla: <https://strusoft.com/software/3d-structural-analysis-software-fem-design/>

## Liitteet

Liite 1 Ohjelmalla suoritettun palomitoituslaskelman tulokset

Liite 2 Käsien laskettu vertailulaskelma

Liite 3 Savolaisen rakennesuunnittelijan palokäsikirja (salassa pidettävä)

Untitled		Contents
1	Murtorajatilamitoitus.....	2
1.1	Määräva kuormitusyhdistely.....	2
2	Onnettomuusrajatilamitoitus.....	4
2.1	Palomitoitus R15.....	4
2.1.1	Määräva kuormitusyhdistely.....	4
2.2	Palomitoitus R30.....	7
2.2.1	Määräva kuormitusyhdistely.....	7
2.3	Palomitoitus R60.....	9
2.3.1	Määräva kuormitusyhdistely.....	9

Eurocode (NA: Finnish) code: Timber bar, fire design - Utilization - Load combinations - Maximum of U<sub>fi</sub> - Colour palette - [%]

200.0
180.0
160.0
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0

Project: Opinnäytetyön palomitoituslaskelma	Company: ?
Description: Murto- ja onnettomuusrajatilamitoitus	FEM-Design © StruSoft
Designer: Pasi Huusko	Date: 28.4.2024
	Pages: 1 / 11

## 1 Murtorajatilamitoitus

### 1.1 Määrävä kuormitusyhdistely

#### C.1.1

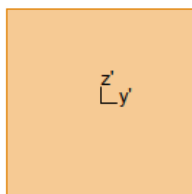
**Load combination: '1.15xPysyvä kuorma + 1.50xTuulikuorma + 1.50x0.70xLumikuorma'**

#### GL 30c

(Glued laminated), Service class 2

$E_{0,05}$	=	10800 N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,90,k}$	=	0.50 N/mm <sup>2</sup>
$G_{0,05}$	=	540 N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	=	24.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_M$	=	1.25	$f_{c,90,k}$	=	2.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M,acc/seis.}$	=	1.00	$f_{v,k}$	=	3.50 N/mm <sup>2</sup>
$k_{sys}$	=	1.00			

#### Glulam 180x180



$A$	=	32400 mm <sup>2</sup>	$f_{t,0,k}$	=	21.45 N/mm <sup>2</sup>
$W_1$	=	9.720e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,1,k}$	=	33.00 N/mm <sup>2</sup>
$W_2$	=	9.720e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,2,k}$	=	33.00 N/mm <sup>2</sup>
$i_1$	=	52 mm			
$i_2$	=	52 mm			
$I_2$	=	8.748e+07 mm <sup>4</sup>			
$I_1$	=	1.476e+08 mm <sup>4</sup>			

#### Combined bending and axial tension - 6.2.3

Not relevant

#### Combined bending and axial compression - 6.1.4, 6.2.4

$x = 1500.00$  mm

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2.50}{21.56} = 0.12 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2.50}{21.56} \right)^2 + \frac{6.08}{29.04} + 0.70 \frac{0.00}{29.04} = 0.22 \leq 1.00 \quad (6.19) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2.50}{21.56} \right)^2 + 0.70 \frac{6.08}{29.04} + \frac{0.00}{29.04} = 0.16 \leq 1.00 \quad (6.20) - \text{OK}$$

#### Combined shear and torsion - 6.1.7, 6.1.8

$x = 0.00$  mm

$$\tau_d = 0.54 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,d} = 3.08 \text{ N/mm}^2 \quad (6.13) - \text{OK}$$



**Flexural buckling around axis 1 - 6.3.2**

$$x = 1500.00 \text{ mm}$$

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_0}{i_1} = \frac{3000}{52} = 57.74$$

$$\lambda_{rel,1} = \frac{\lambda_1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{57.74}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 0.875 \quad (6.21)$$

$$k_1 = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,1} - 0.3) + \lambda_{rel,1}^2) = 0.5 (1 + 0.1 (0.875 - 0.3) + 0.875^2) = 0.912 \quad (6.27)$$

$$k_{c,1} = \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel,1}^2}} = \frac{1}{0.912 + \sqrt{0.912^2 - 0.875^2}} = 0.857 \quad (6.25)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,1} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2.50}{0.857 \cdot 21.56} + \frac{6.08}{29.04} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{29.04} = 0.34 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 2 - 6.3.2**

$$x = 1500.00 \text{ mm}$$

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_0}{i_2} = \frac{3000}{52} = 57.74$$

$$\lambda_{rel,2} = \frac{\lambda_2}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{57.74}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 0.875 \quad (6.22)$$

$$k_2 = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,2} - 0.3) + \lambda_{rel,2}^2) = 0.5 (1 + 0.1 (0.875 - 0.3) + 0.875^2) = 0.912 \quad (6.28)$$

$$k_{c,2} = \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel,2}^2}} = \frac{1}{0.912 + \sqrt{0.912^2 - 0.875^2}} = 0.857 \quad (6.26)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,2} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2.50}{0.857 \cdot 21.56} + 0.70 \cdot \frac{6.08}{29.04} + \frac{0.00}{29.04} = 0.28 \leq 1.00 \quad (6.24) - \text{OK}$$

**Lateral torsional buckling - 6.3.3**

$$x = 1500.00 \text{ mm}$$

$$l_{ef} = l / \frac{12.5 \cdot M_{max}}{2.5 \cdot M_{max} + 3 \cdot M_2 + 4 \cdot M_3 + 3 \cdot M_4} + 2 \cdot h = 3000 / \frac{12.5 \cdot 5.91}{2.5 \cdot 5.91 + 3 \cdot 4.27 + 4 \cdot 5.91 + 3 \cdot 4.27} + 2 \cdot 180 = 2960 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} \cdot I_2 \cdot G_{0,05} \cdot I_1}}{l_{ef} \cdot W_1} = \frac{\pi \sqrt{10800 \cdot 8.748e+07 \cdot 540 \cdot 1.476e+08}}{2960 \cdot 9.720e+05} = 299.61 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,1,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{30.00}{299.61}} = 0.316 \quad (6.30)$$

$$\lambda_{rel,m} = 0.316 \leq 0.75 \rightarrow k_{crit} = 1.000 \quad (6.34)$$

$$\frac{\sigma_{m,1,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,1,d}} = \frac{6.08}{1.000 \cdot 29.04} = 0.21 \leq 1.00 \quad (6.33) - \text{OK}$$

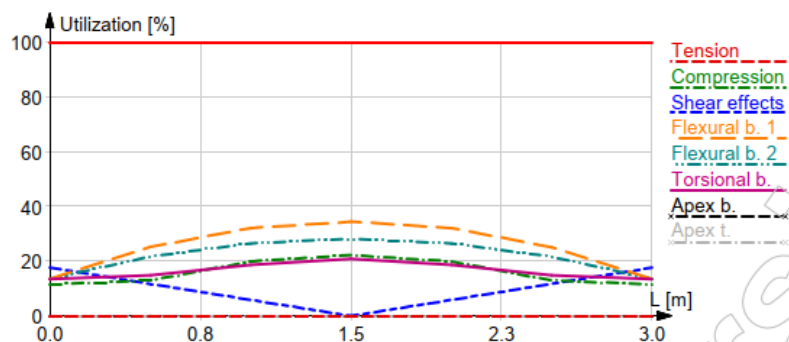
$$\left( \frac{\sigma_{m,1,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,1,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,2} \cdot f_{c,0,d}} = \left( \frac{6.08}{1.000 \cdot 29.04} \right)^2 + \frac{2.50}{0.86 \cdot 21.56} = 0.18 \leq 1.00 \quad (6.35) - \text{OK}$$

**Bending at apex - 6.4.3**

Not relevant

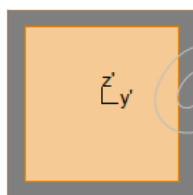
**Tension at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Summary****2 Onnettomuusrajatilamitoitus****2.1 Palomitoitus R15****2.1.1 Määrävä kuormitusyhdistely****C.1.1 for fire effect****Load combination: 'Pysyvä kuorma + Palo + 0.50xLumikuorma'****GL 30c**

(Glued laminated), Service class 2

$E_{0,05}$	=	10800 N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,90,k}$	=	0.50 N/mm <sup>2</sup>
$G_{0,05}$	=	540 N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	=	24.50 N/mm <sup>2</sup>
$Y_M$	=	1.25	$f_{c,90,k}$	=	2.50 N/mm <sup>2</sup>
$Y_{M,acc./seis.}$	=	1.00	$f_{v,k}$	=	3.50 N/mm <sup>2</sup>
$Y_{M,fi.}$	=	1.00	$k_{fi}$	=	1.15
$k_{sys}$	=	1.00			

**RECT 149x149 (Burned-in section of Glulam 180x180)**

$A$	=	22052 mm <sup>2</sup>	$f_{t,0,k}$	=	21.45 N/mm <sup>2</sup>
$W_1$	=	5.458e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,1,k}$	=	33.00 N/mm <sup>2</sup>
$W_2$	=	5.458e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,2,k}$	=	33.00 N/mm <sup>2</sup>
$i_1$	=	43 mm			
$i_2$	=	43 mm			
$I_2$	=	4.053e+07 mm <sup>4</sup>			
$I_t$	=	6.836e+07 mm <sup>4</sup>			

**Fire design data**t = 15 min,  $\beta_n = 0.70$  mm/min

Cladding protection: No

Side	Top (z'+)	Bottom (z'-)	Left (y'-)	Right (y'+)
Fire protection	No	No	No	No
t <sub>ch</sub> [min]	0.0	0.0	0.0	0.0
t <sub>f</sub> [min]	-	-	-	-
t <sub>a</sub> [min]	-	-	-	-
d <sub>char,n</sub> [mm]	10.50	10.50	10.50	10.50
d <sub>ef</sub> [mm]	15.75	15.75	15.75	15.75

**Combined bending and axial tension - 6.2.3**

Not relevant

**Combined bending and axial compression - 6.1.4, 6.2.4**

x = 0.00 mm

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2.17}{28.17} = 0.08 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2.17}{28.17} \right)^2 + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \frac{0.00}{37.95} = 0.01 \leq 1.00 \quad (6.19) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2.17}{28.17} \right)^2 + 0.70 \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.01 \leq 1.00 \quad (6.20) - \text{OK}$$

**Combined shear and torsion - 6.1.7, 6.1.8**

x = 0.00 mm

$$\tau_d = 0.00 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,d} = 4.02 \text{ N/mm}^2 \quad (6.13) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 1 - 6.3.2**

x = 0.00 mm

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_0}{i_1} = \frac{3000}{43} = 69.98$$

$$\lambda_{rel,1} = \frac{\lambda_1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{69.98}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.061 \quad (6.21)$$

$$k_1 = 0.5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,1} - 0.3) + \lambda_{rel,1}^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.1 (1.061 - 0.3) + 1.061^2 \right) = 1.101 \quad (6.27)$$

$$k_{c,1} = \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel,1}^2}} = \frac{1}{1.101 + \sqrt{1.101^2 - 1.061^2}} = 0.717 \quad (6.25)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,1} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2.17}{0.717 \cdot 28.17} + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} = 0.11 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 2 - 6.3.2**

$$x = 0.00 \text{ mm}$$

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_0}{i_2} = \frac{3000}{43} = 69.98$$

$$\lambda_{rel,2} = \frac{\lambda_2}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{69.98}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.061 \quad (6.22)$$

$$k_2 = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,2} - 0.3) + \lambda_{rel,2}^2) = 0.5 (1 + 0.1 (1.061 - 0.3) + 1.061^2) = 1.101 \quad (6.28)$$

$$k_{c,2} = \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel,2}^2}} = \frac{1}{1.101 + \sqrt{1.101^2 - 1.061^2}} = 0.717 \quad (6.26)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,2} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2.17}{0.717 \cdot 28.17} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.11 \leq 1.00 \quad (6.24) \text{ - OK}$$

**Lateral torsional buckling - 6.3.3**

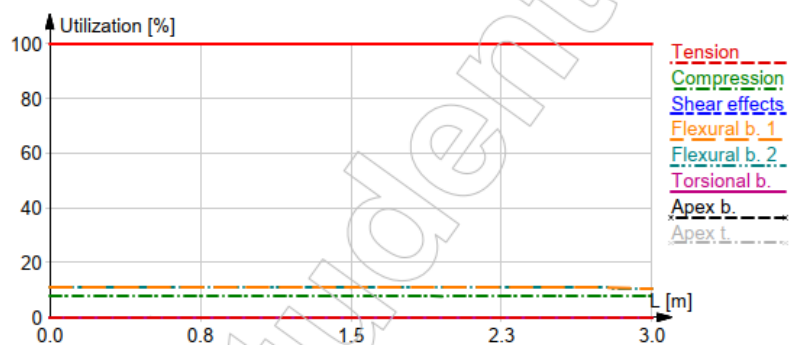
Not relevant

**Bending at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Tension at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Summary**

## 2.2 Palomitoitus R30

## 2.2.1 Määräävä kuormitusyhdistely

## C.2.1 for fire effect

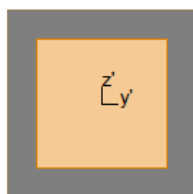
## Load combination: 'Pysyvä kuorma + Palo + 0.50xLumikuorma'

## GL 30c

(Glued laminated), Service class 2

$E_{0,05}$	= 10800 N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,90,k}$	= 0.50 N/mm <sup>2</sup>
$G_{0,05}$	= 540 N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	= 24.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_M$	= 1.25	$f_{c,90,k}$	= 2.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M,acc./seis.}$	= 1.00	$f_{v,k}$	= 3.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M,fi.}$	= 1.00	$k_{fi}$	= 1.15
$k_{sys}$	= 1.00		

## RECT 124x124 (Burned-in section of Glulam 180x180)



$A$	= 15376 mm <sup>2</sup>	$f_{t,0,k}$	= 21.45 N/mm <sup>2</sup>
$W_1$	= 3.178e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,1,k}$	= 33.00 N/mm <sup>2</sup>
$W_2$	= 3.178e+05 mm <sup>3</sup>	$f_{m,2,k}$	= 33.00 N/mm <sup>2</sup>
$i_1$	= 36 mm		
$i_2$	= 36 mm		
$I_2$	= 1.970e+07 mm <sup>4</sup>		
$I_t$	= 3.324e+07 mm <sup>4</sup>		

## Fire design data

 $t = 30$  min,  $\beta_n = 0.70$  mm/min

Cladding protection: No

Side	Top (z'+)	Bottom (z'-)	Left (y'-)	Right (y'+)
Fire protection	No	No	No	No
$t_{ch}$ [min]	0.0	0.0	0.0	0.0
$t_t$ [min]	-	-	-	-
$t_a$ [min]	-	-	-	-
$d_{char,n}$ [mm]	21.00	21.00	21.00	21.00
$d_{ef}$ [mm]	28.00	28.00	28.00	28.00

## Combined bending and axial tension - 6.2.3

Not relevant

**Combined bending and axial compression - 6.1.4, 6.2.4**

x = 0.00 mm

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{3.12}{28.17} = 0.11 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{3.12}{28.17} \right)^2 + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \frac{0.00}{37.95} = 0.01 \leq 1.00 \quad (6.19) - \text{OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{3.12}{28.17} \right)^2 + 0.70 \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.01 \leq 1.00 \quad (6.20) - \text{OK}$$

**Combined shear and torsion - 6.1.7, 6.1.8**

x = 0.00 mm

$$\tau_d = 0.00 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,d} = 4.02 \text{ N/mm}^2 \quad (6.13) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 1 - 6.3.2**

x = 0.00 mm

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_b}{i_1} = \frac{3000}{36} = 83.81$$

$$\lambda_{rel,1} = \frac{\lambda_1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{83.81}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.271 \quad (6.21)$$

$$k_1 = 0.5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,1} - 0.3) + \lambda_{rel,1}^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.1 (1.271 - 0.3) + 1.271^2 \right) = 1.356 \quad (6.27)$$

$$k_{c,1} = \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel,1}^2}} = \frac{1}{1.356 + \sqrt{1.356^2 - 1.271^2}} = 0.547 \quad (6.25)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,1} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{3.12}{0.547 \cdot 28.17} + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} = 0.20 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 2 - 6.3.2**

x = 0.00 mm

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_b}{i_2} = \frac{3000}{36} = 83.81$$

$$\lambda_{rel,2} = \frac{\lambda_2}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{83.81}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.271 \quad (6.22)$$

$$k_2 = 0.5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,2} - 0.3) + \lambda_{rel,2}^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.1 (1.271 - 0.3) + 1.271^2 \right) = 1.356 \quad (6.28)$$

$$k_{c,2} = \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel,2}^2}} = \frac{1}{1.356 + \sqrt{1.356^2 - 1.271^2}} = 0.547 \quad (6.26)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,2} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{3.12}{0.547 \cdot 28.17} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.20 \leq 1.00 \quad (6.24) - \text{OK}$$

**Lateral torsional buckling - 6.3.3**

Not relevant

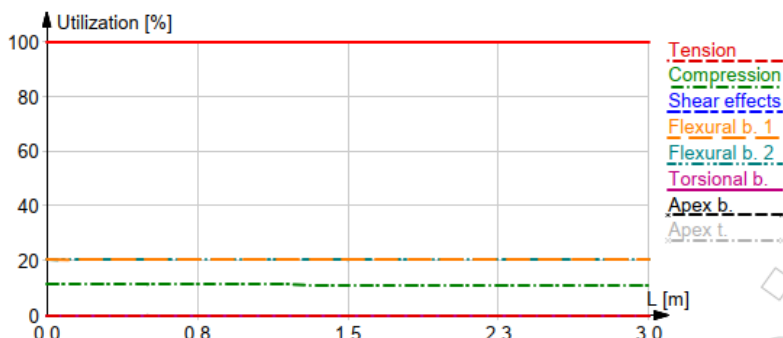
**Bending at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Tension at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Summary**



**2.3 Palomitoitus R60**

**2.3.1 Määrävä kuormitusyhdistely**

**C.3.1 for fire effect**

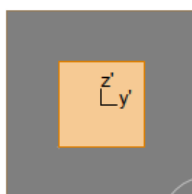
**Load combination: 'Pysyvä kuorma + Palo + 0.50xLumikuorma'**

**GL 30c**

(Glued laminated), Service class 2

$E_{0,05}$	= 10800 N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,90,k}$	= 0.50 N/mm <sup>2</sup>
$G_{0,05}$	= 540 N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	= 24.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_M$	= 1.25	$f_{c,90,k}$	= 2.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M,acc./seis.}$	= 1.00	$f_{v,k}$	= 3.50 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M,fi.}$	= 1.00	$k_{fi}$	= 1.15
$k_{sys}$	= 1.00		

**RECT 82x82 (Burned-in section of Glulam 180x180)**



$A$	= 6724 mm <sup>2</sup>	$f_{t,0,k}$	= 21.45 N/mm <sup>2</sup>
$W_1$	= 9.189e+04 mm <sup>3</sup>	$f_{m,1,k}$	= 33.00 N/mm <sup>2</sup>
$W_2$	= 9.189e+04 mm <sup>3</sup>	$f_{m,2,k}$	= 33.00 N/mm <sup>2</sup>
$i_1$	= 24 mm		
$i_2$	= 24 mm		
$I_2$	= 3.768e+06 mm <sup>4</sup>		
$I_t$	= 6.356e+06 mm <sup>4</sup>		

**Fire design data**

$t = 60$  min,  $\beta_n = 0.70$  mm/min

Cladding protection: No

Side	Top (z'+)	Bottom (z'-)	Left (y'-)	Right (y'+)
Fire protection	No	No	No	No
$t_{ch}$ [min]	0.0	0.0	0.0	0.0
$t_f$ [min]	-	-	-	-

Side	Top (z'+)	Bottom (z'-)	Left (y'-)	Right (y'+)
$t_a$ [min]	-	-	-	-
$d_{char,n}$ [mm]	42.00	42.00	42.00	42.00
$d_{ef}$ [mm]	49.00	49.00	49.00	49.00

**Combined bending and axial tension - 6.2.3**

Not relevant

**Combined bending and axial compression - 6.1.4, 6.2.4** $x = 0.00$  mm

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{7.13}{28.17} = 0.25 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left(\frac{7.13}{28.17}\right)^2 + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \frac{0.00}{37.95} = 0.06 \leq 1.00 \quad (6.19) - \text{OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left(\frac{7.13}{28.17}\right)^2 + 0.70 \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.06 \leq 1.00 \quad (6.20) - \text{OK}$$

**Combined shear and torsion - 6.1.7, 6.1.8** $x = 0.00$  mm

$$\tau_d = 0.00 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,d} = 4.02 \text{ N/mm}^2 \quad (6.13) - \text{OK}$$

**Flexural buckling around axis 1 - 6.3.2** $x = 0.00$  mm

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_b}{i_1} = \frac{3000}{24} = 126.74$$

$$\lambda_{rel,1} = \frac{\lambda_1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{126.74}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.921 \quad (6.21)$$

$$k_1 = 0.5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,1} - 0.3) + \lambda_{rel,1}^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.1 (1.921 - 0.3) + 1.921^2 \right) = 2.427 \quad (6.27)$$

$$k_{c,1} = \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel,1}^2}} = \frac{1}{2.427 + \sqrt{2.427^2 - 1.921^2}} = 0.256 \quad (6.25)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,1} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{7.13}{0.256 \cdot 28.17} + \frac{0.00}{37.95} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} = 0.99 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$



**Flexural buckling around axis 2 - 6.3.2**

$$x = 0.00 \text{ mm}$$

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_0}{i_2} = \frac{3000}{24} = 126.74$$

$$\lambda_{rel,2} = \frac{\lambda_2}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{126.74}{\pi} \sqrt{\frac{24.50}{10800}} = 1.921 \quad (6.22)$$

$$k_2 = 0.5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,2} - 0.3) + \lambda_{rel,2}^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.1 (1.921 - 0.3) + 1.921^2 \right) = 2.427 \quad (6.28)$$

$$k_{c,2} = \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel,2}^2}} = \frac{1}{2.427 + \sqrt{2.427^2 - 1.921^2}} = 0.256 \quad (6.26)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,2} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{7.13}{0.256 \cdot 28.17} + 0.70 \cdot \frac{0.00}{37.95} + \frac{0.00}{37.95} = 0.99 \leq 1.00 \quad (6.24) \text{ - OK}$$

**Lateral torsional buckling - 6.3.3**

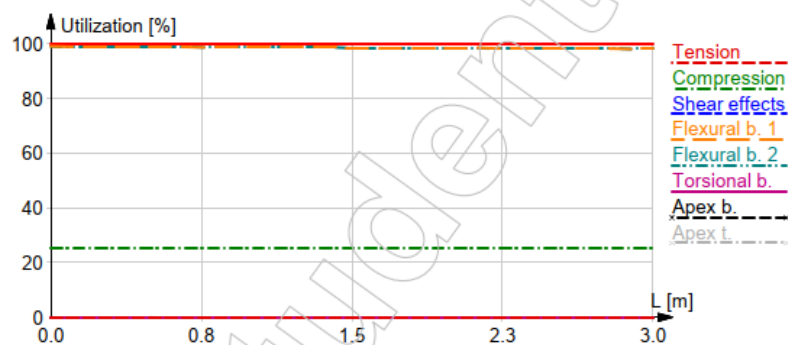
Not relevant

**Bending at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Tension at apex - 6.4.3**

Not relevant

**Summary**

## Opinnäytetyö palkkimitoituskalkelma

Rakennuskohteen tiedot

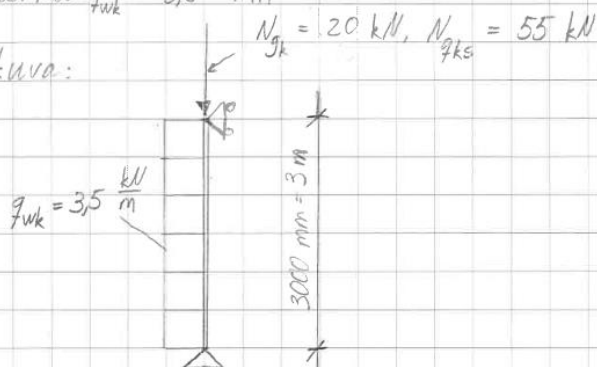
Työnumero

Pvm

## Lähtötiedot:

- pilarin korkeus 3 m ja se on nivelellisesti tuettu molemmista päistä
- poikkileikkaus liimapuusta 180 × 180 GL30c
- pilarille tulevat kuormat
  - lumikuorma:  $N_{qks} = 55 \text{ kN}$
  - pysyvä kuorma:  $N_{gk} = 20 \text{ kN}$
  - tuulikuorma  $q_{wk} = 3,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

## Vapaakappalekuva:



## Murtorajatilan määräävä kuormitusyhdistely:

$$1,15 \cdot N_{gk} + 1,50 \cdot q_{wk} + 1,50 \cdot 0,70 \cdot N_{qks}$$

## Normaalivoimat:

$$N_d = 1,15 \cdot N_{gk} + 1,50 \cdot 0,70 \cdot N_{qks} = 1,15 \cdot 20 \text{ kN} + 1,50 \cdot 0,70 \cdot 55 \text{ kN} = 80,75 \text{ kN}$$

## Vaakavoimat:

$$q_{wd} = 1,50 \cdot q_{wk} = 1,50 \cdot 3,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 5,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Taivutuksen mitoituslujuus: } f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 1,1 \cdot \frac{33 \text{ MPa}}{1,25} = 29,04 \text{ MPa}$$

$$k_{mod} = 1,1$$

$$f_{m,k} = 33 \text{ MPa}$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$\text{Puristuksen miteituslujuus: } f_{c,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} = 1,1 \cdot \frac{24,5 \text{ MPa}}{1,25} = 21,56 \text{ MPa}$$

$$f_{c,k} = 24,5 \text{ MPa}$$

Rakennuskohteen tiedot

Työnumero

Pvm

Taivutuksen mitoitusjännitys:

$$M_d = \frac{q_{wd} L^2}{8} = \frac{5,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 3^2 \text{m}^2}{8} = 5,91 \text{ kNm} = 5,91 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$W = \frac{a^3}{6} = \frac{180^3 \text{ mm}^3}{6} = 972 000 \text{ mm}^3 = 972 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{5,91 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{972 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} = 6,08 \text{ MPa}$$

Puristuksen mitoitusjännitys:

$$\sigma_{c,o,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{80 750 \text{ N}}{180 \cdot 180 \text{ mm}^2} = 2,49 \text{ MPa}$$

Taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutus:

ehdot:

$$\left( \frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2,49}{21,56} \right)^2 + \frac{6,08}{29,04} + 0,70 \cdot \frac{0,00}{29,04}$$

$$= 0,22 \leq 1,00 \quad \text{ok!}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \left( \frac{2,49}{21,56} \right)^2 + 0,70 \cdot \frac{6,08}{29,04} + \frac{0,00}{29,04} = 0,16 \leq 1,00$$

ok!

Nurjahduksen käyttöasteet:

$$\sigma_{c,o,d} \leq k_c \cdot f_{c,o,d} \Rightarrow \frac{\sigma_{c,o,d}}{k_c \cdot f_{c,o,d}} \leq 1,0$$

mitoituslujuus  $f_{c,o,d} = 21,56 \text{ MPa}$ mitoitusjännitys  $\sigma_{c,o,d} = 2,49 \text{ MPa}$ 

Nurjahduskertoimen molempien akselien suhteen sama

$$\lambda = L_c \cdot \frac{\sqrt{12}}{h} = \frac{3000 \text{ mm} \cdot \sqrt{12}}{180 \text{ mm}} = 58 \Rightarrow k_c = 0,84$$

Rakennuskohteen tiedot

Työnumero

Pvm

Käyttöasteet:

$$\frac{\beta_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\beta_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + k_m \cdot \frac{\beta_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2,49}{0,84 \cdot 21,56} + \frac{6,08}{29,04} + 0,70 \cdot \frac{0,00}{29,04}$$

$$= 0,35 \leq 1,00 \quad \text{ok!}$$

$$\frac{\beta_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\beta_{m,1,d}}{f_{m,1,d}} + \frac{\beta_{m,2,d}}{f_{m,2,d}} = \frac{2,49}{0,84 \cdot 21,56} + 0,70 \cdot \frac{6,08}{29,04} + \frac{0,00}{29,04}$$

$$= 0,28 \leq 1,00 \quad \text{ok!}$$

Murtorajatilassa pilarin käyttöaste on 35 %.

INSINÖÖRITOIMISTO  
SAVOLAINEN OY

Rakennuskohteen tiedot

Työnumero

Pvm

Onnettomuusrajatilan määräävä kuormitusyhdistely 60 minuutin palojälle:

$$N_{gk} + 0,50 \cdot N_{gks}$$

Normaalivoimat:

$$N_d = N_{gk} + 0,50 \cdot N_{gks} = 20 \text{ kN} + 0,50 \cdot 55 \text{ kN} = 47,5 \text{ kN}$$

Vaakavoimia ei palotilanteessa tässä tapauksessa ole  $\Rightarrow$  taivutusjännitystä ei kohdistu rakenteeseen lainkaan, jolloin taivutuksen osalta käyttöaste on 0.

Tehollisen poikkileikkauksen laskeminen:

Hiiltymissyvyyden laskeminen:  $\beta_n = 0,70 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ,  $t = 60 \text{ min}$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,70 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 60 \text{ min} = 42 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 = 42 \text{ mm} + 1,0 \cdot 7 \text{ mm} = 49 \text{ mm}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$k_0 = 1,0, t \geq 20 \text{ min}$$

$$d_{char,n} = 42 \text{ mm}$$

Palo 4 sivulla

$$A_{ef} = (h - 2d_{ef})(b - 2d_{ef}) = (180 - 2 \cdot 49)^2 \text{ mm}^2 = 6724 \text{ mm}^2$$

mitat hiiltymisen jälkeen

$$180 \text{ mm} - 2 \cdot 49 \text{ mm} = 82 \text{ mm}$$

Puristuksen mitoituslujuus:

$$f_{c,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_m} = 1,0 \cdot \frac{24,5 \text{ MPa} \cdot 1,15}{1,0} = 28,18 \text{ MPa}$$

$$k_{mod} = 1,0$$

$$\gamma_m = 1,0$$

$$f_{20} = k_{ff} \cdot f_k$$

$$k_{ff} = 1,15, f_k = 24,5 \text{ MPa}$$

Rakennuskohteen tiedot

Työnumero

Pvm

Puristuksen mitoitusjännitys:

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{47\,500\text{ N}}{82 \cdot 52\text{ mm}^2} = 7,06\text{ MPa}$$

Käyttöasteet:

$$\frac{(\sigma_{c,d})^2}{f_{c,d}} + \frac{\sigma_{m1,d}}{f_{m1,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m2,d}}{f_{m2,d}} = \left(\frac{7,06}{28,18}\right)^2 + 0 + 0,7 \cdot 0$$

$$= 0,06\text{ ok!}$$

Käyttöaste sama toisen akselin suhteen.

Nurjahduksen käyttöasteet:

Nurjahdusterroin molempien akselien suhteen sama

$$\lambda = L_c \cdot \frac{\sqrt{12}}{h} = \frac{3000\text{ mm} \cdot \sqrt{12}}{82\text{ mm}} = 127 \Rightarrow k_c = 0,26$$

Käyttöasteet:

$$\frac{\sigma_{c,d}}{k_c \cdot f_{c,d}} + \frac{\sigma_{m1,d}}{f_{m1,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m2,d}}{f_{m2,d}} = \frac{7,06}{0,26 \cdot 28,18} + 0 + 0$$

$$= 0,96 \leq 1,00\text{ ok}$$

Käyttöaste on sama toisen akselin suhteen.

Pnnettomuusrajatilassa pilarin käyttöaste 60 minuutin paloajalle on 96 %.