

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma (Insinööri)

Talonrakennustekniikka

2020

Uula Koivula

OMAKOTITALON PUISEN YLÄPOHJAN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Case: Talo Englund

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka | Talonrakennustekniikka

Ohjaaja DI Joni Lähde

2020 | 27 sivua, 13 liitesivua

Uula Koivula

OMAKOTITALON PUISEN YLÄPOHJAN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Case: Talo Englund

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia puuinfon esimerkkilaskujen riittävyyttä yläpohjan kantavien rakenteiden mitoituksessa. Työ tehtiin osana laajempaa kokonaisuutta, jossa suunniteltiin kaikki rakentamista varten tarpeelliset rakennesuunnitelmat oikean elämän kohteeseen.

Ensin työssä käsiteltiin kuormiin liittyvää aineistoa, ja laskennassa käytettävien kuormien laskemista. Toisena kokonaisuutena käsiteltiin kantavien rakenneosien mitoitusta puuinfon esimerkkilaskujen pohjalta. Liitteenä on esitetty kaikki työhön liittyvät laskelmat ja mitoitukset, jotka on tehty MATHCAD-ohjelmistoa käyttäen.

ASIASANAT:

puurakenne, mitoitus, pientalo, rakennesuunnittelu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering I structural Engineering

2020 | number of pages 27, number of pages in appendices 13

Uula Koivula

STRUCTURAL DESIGNING OF A WOODEN ROOF FOR A DETACHED HOUSE

Case: House Englund

The subject of this thesis was to design bearing wood structures of a roof using Puuinfos examples as a basis. The aim was to gather all the missing information not provided in the examples. The thesis was conducted within a larger project aimed to design all necessary documents to build a small residential building in Raisio.

The first chapter gathers all necessary material about loads affecting the roof and how to calculate them. The second chapter is about dimensioning all the bearing structures following Puuinfo examples and finding all the missing material. All the necessary calculations and dimensioning data can be found in the appendices of the thesis. They were all completed with MATHCAD. All structural designs are also attached with this thesis.

KEYWORDS:

wooden structures, dimensioning, small residential building, structural desing

SISÄLTÖ

| | |
|---------------------------------|-----------|
| KÄYTETYT LYHENTEET | 6 |
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 2 LÄHTÖTIEDOT | 8 |
| 3 KUORMITUKSET | 9 |
| 3.1 Tuulikuorma | 9 |
| 3.2 Lumikuorma | 13 |
| 3.3 Omat kuormat | 14 |
| 4 RAKENNESUUNNITTELU | 16 |
| 4.1 Ristikoiden kannatuspalkki | 16 |
| 4.2 Ristikkoyläpohjan jäykistys | 22 |
| 4.3 NR-ristikot | 26 |
| 5 LOPUKSI | 27 |
| LÄHTEET | 28 |

LIITTEET

- Liite 1. Asemakuva
- Liite 2. Pohjakuva
- Liite 3. Leikkaukset
- Liite 4. Julkisivut
- Liite 5. Perustus
- Liite 6. Lattiantaso
- Liite 7. Vesikatto
- Liite 8. Kattoristikon tilauskaavio
- Liite 9. Kuormien laskeminen
- Liite 10. Ristikon kannatinpalkki
- Liite 11. Yläpohjan jäykistys

KUVAT

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Tuulen nopeuspaineen ominaisarvo maastoluokan perusteella [kN/m ²]. | 9 |
| Kuva 2. Yksipuolisen maastonkohouman aiheuttama kerroin. | 10 |
| Kuva 3. Kaksipuolisen kohouman aiheuttama kerroin. | 11 |

| | |
|--|----|
| Kuva 4. Tuulenpainekorkeuden määritteleminen. | 12 |
| Kuva 5. Ominaislumikuorma maassa s_k [kN/m^2]. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. | 13 |
| Kuva 6. Lumikuorman muotokerroin μ_i . | 14 |
| Kuva 7. Rakennukset omat kuormat g_k . | 15 |
| Kuva 8. Kattokannattimien kannatinpalkin sijoittelu runkoon. | 16 |
| Kuva 9. Esimerkkilaskun palkin vapaakappalekuva. | 17 |
| Kuva 10. k_{mod} taulukko. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje) | 19 |
| Kuva 11. $k_{c,90}$ taulukko. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje.) | 21 |
| Kuva 12. Yläohjauspuun mitoituksessa käytettävät kuormitusyhdistelmät. | 24 |

KÄYTETYT LYHENTEET

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| E_{mean} | kimmomoduuli |
| $f_{c,90,\text{edge},k}$ | puristus poikittain syrjällään |
| $f_{m,k}$ | taivutus syrjällään |
| $f_{v,k}$ | leikkaus syrjällään |
| g_k | omapaino |
| q_k | hyötykuorma |
| γ_M | materiaalin osavarmuusluku |
| KRT | käyttörajatila |
| MRT | murtorajatila |
| s | kokonaisvaikutuseksponentti |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on Raisioon rakennettavan omakotitalon rakennesuunnitelmat. Työn tilaaja oli tilannut rakennesuunnitelmat Insinööritoimisto Helminen Oy:ltä. Suunnitelmien tekeminen oli yksi ensimmäisistä työtehtävistäni kyseisessä firmassa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia yläpohjan puurakenteiden mitoitusta ja jäykistystä. Ovatko puuinfon esimerkkilaskut riittävä aineisto mitoitukselle? Jollei ole, niin mitä muuta aineistoa mitoitukseen tarvitaan. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on nopeuttaa mitoituksen laskemista vastaisuudessa.

Rakennesuunnitelmien pohjana on arkkitehdin luomat rakennussuunnitelmat. Rakennuksen kokonaisala on noin 160 m². Lisäksi päärakennuksen seinään kiinni rakennetaan autotalli. Rakennus on yksikerroksinen, puurunkoinen ja paaluperusteinen. Alapohja tehdään ontelolaatoista. Rakennuksen katon muoto on harjakatto, joka kannatetaan naulalevyristikoilla.

2 LÄHTÖTIEDOT

Kohteen rakennuslupapiirustukset on tehnyt arkkitehti jo ennen tämän opinnäytetyön aloittamista. Rakennuspiirustukset tehdään kyseisten piirustusten pohjalta. Rakennuspiirustuksiin kuuluu asemakuva, julkisivupiirustukset, leikkauskuvat sekä pohjakuva. Rakennuspiirustukset on esitetty liitteissä 1–4.

Yläpohjan mitoitukseen saadaan riittävät pohjatiedot arkkitehdin rakennepiirustuksista. Rakennus on puurunkoinen, joten kantavat rakenteet tehdään ensisijaisesti myös puusta. Katon muoto ja kaltevuus vaikuttavat kuormien laskemiseen. Kohteen kattokaltevuus on 1:3.

Rakennus on tarkoitettu ympärivuotiseen asumiseen, mikä täytyy ottaa huomioon lämmöneristämisessä. Tällä on yläpohjan mitoituksessa merkitystä, sillä runkosyvyys rajoittaa kannatinpalkkien leveyksiä, ja kattokannattimien tukipintojen pituutta. Lämmöneristevaatimukset täytyy huomioida yläpohjan paksuutta päätettäessä. Kohteen harjakorkeutta saatetaan joutua korottamaan, jotta saadaan ulkoseinien päälle tarpeeksi tilaa kattokannattimille ja lämmöneristeelle.

Rakennuksen ulkomitat ja huonekorkeudet määrittelevät pinta-alan, johon tuulikuorma pääsee vaikuttamaan. Arkkitehti on myös määritellyt tarpeelliset aukot oville ja ikkunoille. Rakennesuunnittelija mitoittaa yläpohjan kannatuspalkin näiden aukkomittojen perusteella.

3 KUORMITUKSET

3.1 Tuulikuorma

Tärkeä osa minkä tahansa kantavan rakenteen mitoitus on selvittää kyseiseen rakennemaan vaikuttavat voimasuureet. Puuinfon esimerkkilaskut eivät ota kantaa näiden voimien laskemiseen, vaan voimat täytyy laskea jotain muuta lähdeaineistoa käyttäen.

Tässä luvussa käsitellään tuulikuorman laskemista Eurokoodien mukaisesti niiltä osin kuin se on tarpeellista mitoittaessa yläpohjan kantavia rakenteita. (RIL 201-1-2011)

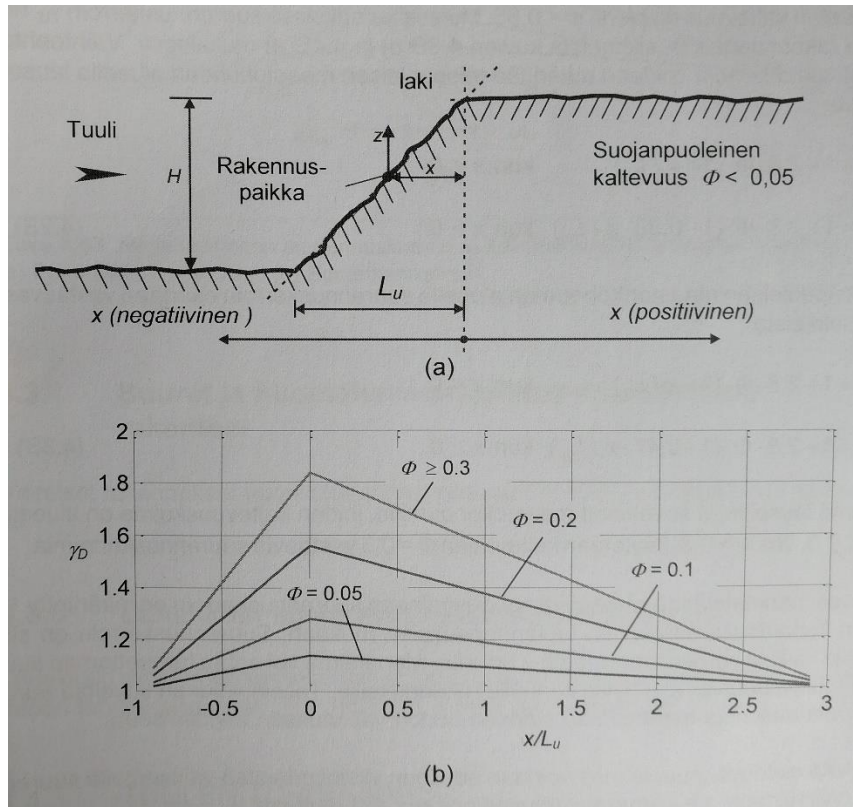
Tuulikuorman ajatellaan olevan yksikertaistettu paineiden ja voimien joukko, joka vaikuttaa kohtisuorasti tarkasteltavaa pintaa kohden. Tuulikuorma luokitellaan muuttuvaksi kuormaksi. Mitoituksen kannalta voi laskea kaksi erilaista tuulikuormaa: kokonaistuuli-voima ja tuulipaine. Kokonaistuulivoimaa käytetään mitoittaessa rakennuksen jäykistystä tai perustusta. Tuulipainetta käytetään mitoittaessa yksittäisiä rakenneosia.

Mitoitus aloitetaan valitsemalla rakennuksen maastoluokka. Maastoluokat ovat asteikolla 0–5, jossa 0 on avoimen meren äärellä oleva rannikkoalue, ja 5 on alue joka on vähintään 15 % rakennusten peitossa. Rakennusten keskimääräinen korkeus tulee olla vähintään 15 m. Maastoluokan perusteella saadaan tuulen nopeuspaineelle ominaisarvo (q_{p0}) kuvan 1 taulukosta.

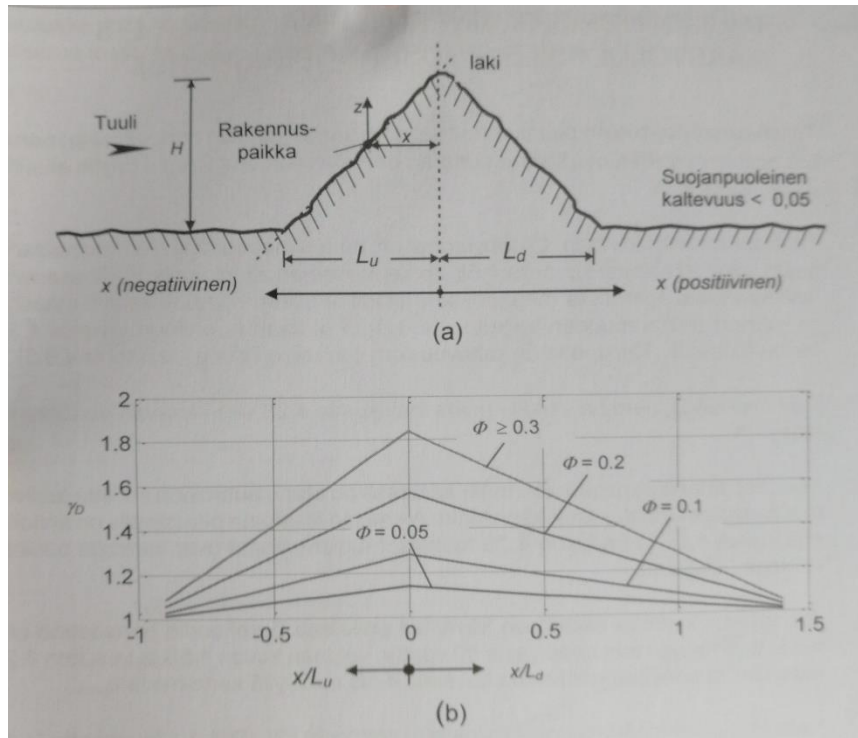
| z (m) | Maastoluokka | | | | |
|-------|--------------|------|------|------|------|
| | 0 | I | II | III | IV |
| 0 | 0,66 | 0,42 | 0,39 | 0,35 | 0,32 |
| 1 | 0,66 | 0,42 | 0,39 | 0,35 | 0,32 |
| 2 | 0,78 | 0,52 | 0,39 | 0,35 | 0,32 |
| 5 | 0,96 | 0,65 | 0,53 | 0,35 | 0,32 |
| 8 | 1,05 | 0,73 | 0,61 | 0,43 | 0,32 |
| 10 | 1,09 | 0,76 | 0,65 | 0,47 | 0,32 |
| 15 | 1,18 | 0,83 | 0,72 | 0,55 | 0,40 |
| 20 | 1,24 | 0,88 | 0,77 | 0,60 | 0,45 |
| 25 | 1,29 | 0,92 | 0,82 | 0,65 | 0,50 |
| 30 | 1,33 | 0,95 | 0,85 | 0,68 | 0,54 |
| 35 | 1,37 | 0,98 | 0,88 | 0,72 | 0,57 |
| 40 | 1,40 | 1,01 | 0,91 | 0,74 | 0,60 |

Kuva 1. Tuulen nopeuspaineen ominaisarvo maastoluokan perusteella [kN/m^2].

Rakennuspaikan paikalliset pinnanmuodot otetaan huomioon nopeuspaineen suurenuskertoimella (γ_D). Kertoimen määrittäminen riippuu siitä, onko maaston kohouma yksipuolinen (kts. kuva 2) tai kaksipuolinen (kts. kuva 3).



Kuva 2. Yksipuolisen maastonkohouman aiheuttama kerroin.



Kuva 3. Kaksipuolisen kohouman aiheuttama kerroin.

Kuvien merkkien selitykset:

ϕ on kaltevuus H/L_u tuulenpuolella, tuulen suunnassa (rad)

L_u on tuulenpuoleisen rinteän pituus

L_d on suojanpuoleisen rinteän pituus

H on maasomuodon tehollinen korkeus

x on rakennuspaikan vaakasuora etäisyys maastomuodon harjasta

z on korkeusasema laskettuna maanpinnasta rakennuksen paikalla

Jos kaltevuus on $< 0,05$, niin kertoimeksi tulee 1.

Rakennuksen yksittäiseen ulkopintaan vaikuttava tuulenpaine lasketaan kaavasta

$$w_e = q_p \cdot (z_e) \cdot c_{pe} \quad (3.1) \text{ (RIL 201-1-2011)}$$

jossa

$q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine, laskettu edellä

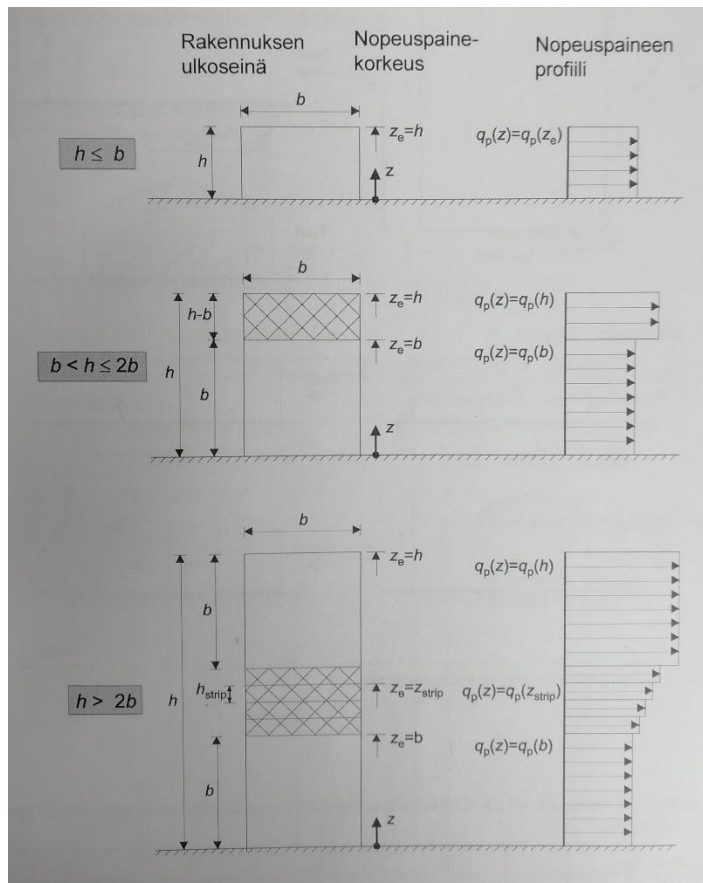
c_{pe} on ulkoisen paineen painekerroin

z_e on ulkoisen paineen nopeuspaine korkeus

Jos rakennuksessa olisi aukkoja, jotka olisivat oletusarvoisesti auki kovalla tuulella, laskettaisiin myös pintojen sisäpuolelle aiheutuva paine. Ikkunat, jotka ovat oletusarvoisesti kiinni, otetaan huomioon aukinaisena onnettomuustilanteessa.

Ulkoisen paineen painekerroin ottaa huomioon tarkasteltavan alueen koon. RIL-laskentataulukkoissa (201-1-2011, luku 7.2) annetaan painekertoimen arvot yhden ja kymmenen neliömetrin suuruisille alueille, ja väliarvot interpoloidaan.

Nopeuspainekorkeus on riippuvainen rakennuksen korkeudesta suhteessa sen leveyteen. Jos rakennus on tarkastelusuunnassa korkeampi kuin mitä se on syvä, lasketaan tuulenpaine osissa (Kuva 4.) mukaisesti. Normaalitapaus, jossa rakennuksen korkeus ei ylitä sen syvyyttä, lasketaan tuulenpaine saman suuruisena koko seinälle.



Kuva 4. Tuulenpainekorkeuden määrittäminen.

3.2 Lumikuorma

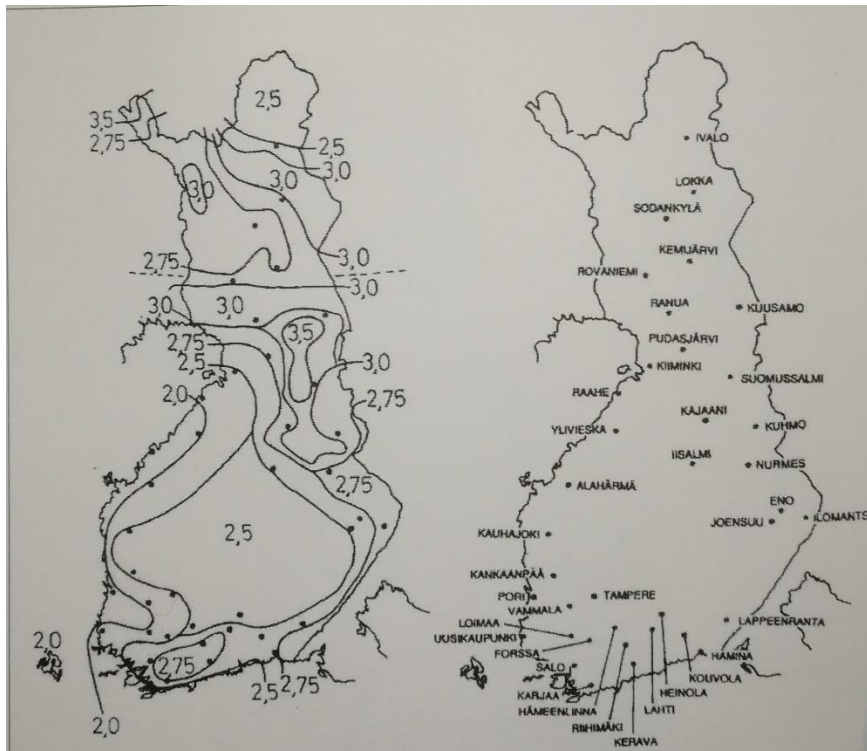
Lumikuorma luokitellaan muuttuvaksi kiinteäksi kuormaksi. Yläpohjan puurakenteiden mitoitus varten täytyy laskea lumikuorman laskea lumikuorman arvo katolla. Eurokoodien mukaisesti mitoitus aloitetaan määrittelemällä ominaislumikuorma maassa. Tätä arvoa muutetaan erilaisilla kertoimilla eri kattokaltevuuksille, ja muille katon muodoille sopivaksi. Katon lumikuorma lasketaan kaavasta

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3.2)$$

jossa

| | |
|---------|-----------------------------------|
| μ_i | on lumikuorman muotokerroin |
| s_k | on lumikuorman ominaisarvo maassa |
| C_e | on tuulensuojaisuuskerroin |
| C_t | lämpökerroin |

Lumikuorman ominaisarvo s_k määräytyy Suomessa rakennuspaikan sijainnista Suomen kartalla. Arvot vaihtelevat 2 kN/m^2 :n ja $3,5 \text{ kN/m}^2$:n välillä. Kuvassa 5 esitetyt arvot ovat minimiarvoja, ja riippuen tapauksesta voidaan käyttää korkeampiakin arvoja.



Kuva 5. Ominaislumikuorma maassa s_k [kN/m^2]. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.

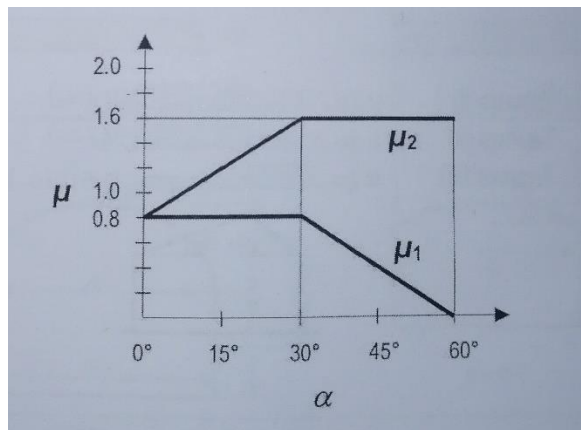
Tuulensuojaisuuskertoimena C_e käytetään normaalisti arvoa 1. Jos maasto on laakea, esteetön ja joka puolelle avoin, eikä maasto, korkeat rakennukset tai puut suojaa rakennusta tuulelta, voidaan tuulensuojaukserkertoimena käyttää arvoa 0,8.

Lämpökertoimella C_t voidaan ottaa yläpohjan lämmöneristyksen vähyys huomioon tarkemman selvityksen perusteella. Lumikuorman s on aina oltava kuitenkin vähintään $0,5 \text{ kN/m}^2$.

Näin ollen lumikuorman kaava pelkistyy usein muotoon

$$s = \mu_i \cdot s_k \quad (3.3)$$

Lumikuorman muotokerroin μ_i huomioi kattokulman. Kuvassa 6 μ_1 esittää tavanomaista pois päin kallistunutta kattoa, ja μ_2 esimerkiksi sahalaitakaton sisäänpäin kallistunutta kattoa, joka aiheuttaa lumen kinostumista.



Kuva 6. Lumikuorman muotokerroin μ_i .

Kuvan arvot ovat käyttökelpoisia, kun lumen liukumista katolta ei ole estetty. Jos katolla on esimerkiksi liukueste tai alaräystäällä kaide, käytetään muotokerrotimeksi aina vähintään arvoa 0,8. (RIL-201-1-2011.)

3.3 Omat kuormat

Rakennusosien mitoituksessa on hyötykuormien lisäksi otettava huomioon rakennusosien oma paino ja sen aiheuttama kuorma. Oma paino on pysyvä ja kiinteä kuorma.

Jos omapaino on jostain syystä liikkuvaa, esimerkiksi liikkuvat väliseinät, se käsitellään hyötykuormana. (RIL 201-1-2011.)

Rakenneosien oman painon laskemisessa voidaan käyttää valmistajan ilmoittamaa painoa, tai muuta yleisesti käytettyä tilavuuspainoa. Kuvassa 7 on esitetty opinnäytetyön kohteen rakennetyyppien painot neliömetriä kohden. Myös vesikatolla olevat maakuorimat lasketaan pysyvänä kuormana. Esimerkiksi viherkaton mahdolliset maa-aineksen siirtymät tulee ottaa huomioon, kuten myös maan kosteuspitoisuuden vaihtelut. (RIL 201-1-2011.)

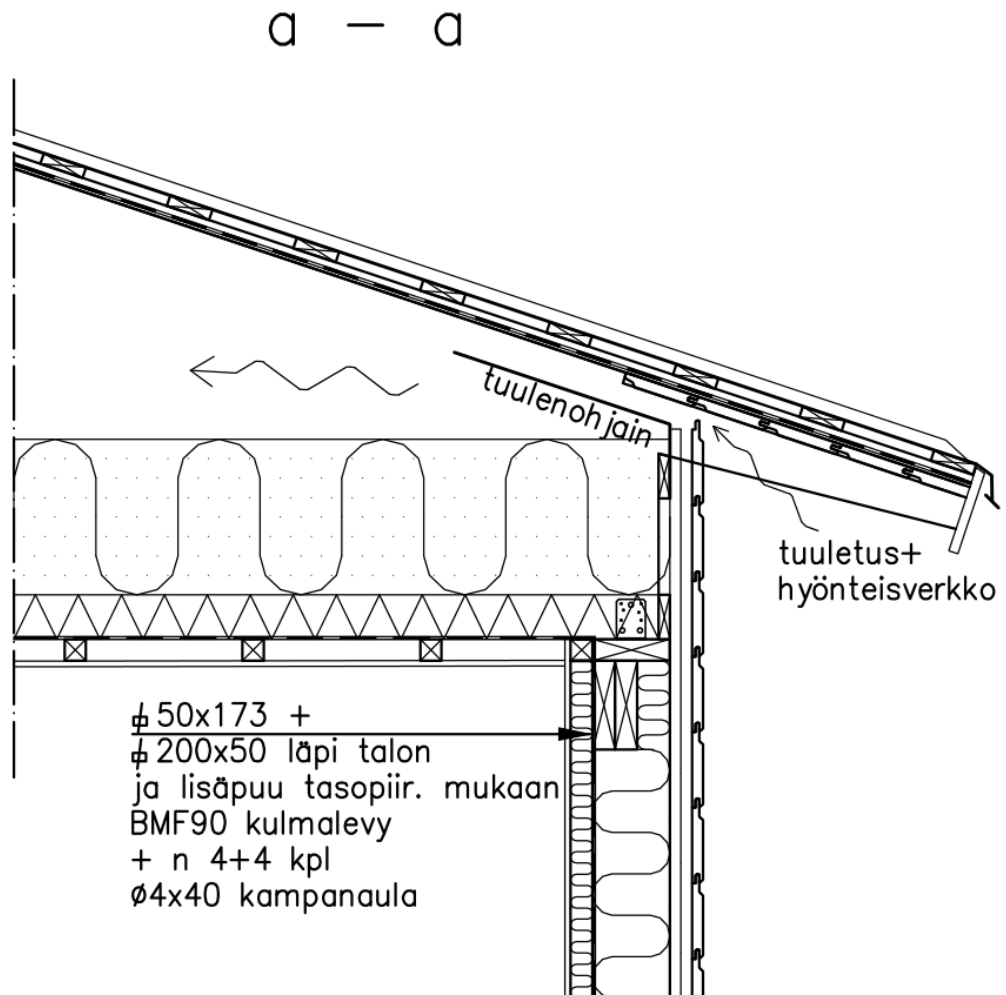
| Alapohja | vahvuus | massa | | paino [kN] |
|------------------------|----------------|-------------------------|------|------------------------|
| teräsbetoni | 80mm | 2600 kg/m ³ | | 2 |
| lämmöneriste | 200mm | 20 kg/m ³ | | 0,04 |
| ontelolaatasto | 200mm | 1300 kg/m ³ | | 2,6 |
| | | | yht. | 4,64 kN/m ² |
| Yläpohja | | | | |
| profiilipelti | | 4 kg/m ² | | 0,06 |
| kattoruoteet | 25mmx100mmk300 | 350 kg/m ³ | | 0,03 |
| kattorimat | 22mmx50mmxk900 | 350 kg/m ³ | | 0,01 |
| aluskate | | 0,17 kg/m ² | | 0,17 |
| naulalevyristikot | | 30-40 kg/m ² | | 0,4 |
| puhallusmineraalivilla | 350mm | 10 kg/m ³ | | 0,04 |
| mineraalivillalevy | 100mm | 50 kg/m ³ | | 0,05 |
| höyrysulkumuovi | | 0,05 kg/m ² | | 0 |
| koolaus | 50mmx50mmk400 | 350 kg/m ³ | | 0,02 |
| kipsilevy | 13mm | 8,6 kg/m ² | | 0,09 |
| | | | yht. | 0,87 kN/m ² |
| Ulkoseinä | | | | |
| julkisivuverhouslautat | 28mm | 350 kg/m ³ | | 0,1 |
| koolaus | 23mmx95mmk600 | 350 kg/m ³ | | 0,02 |
| tuulensuojalevy | 12mm | 8,6 kg/m ² | | 0,09 |
| pystyrunko | 200mmx50xxk600 | 350 kg/m ³ | | 0,07 |
| mineraalivillalevy | 200mm | 50 kg/m ³ | | 0,1 |
| kipsilevy | 13mm | 8,4 kg/m ² | | 0,09 |
| | | | yht. | 0,47 kN/m ² |

Kuva 7. Rakennukset omat kuormat g_k .

4 RAKENNESUUNNITTELU

4.1 Ristikoiden kannatuspalkki

Kattokannattajat tuetaan päistään ulkoseinän rungon yläjuoksuun. Yläjuoksun alle asennetaan kannatuspalkki, joka ottaa vastaan kattokannattimien tukireaktiot.

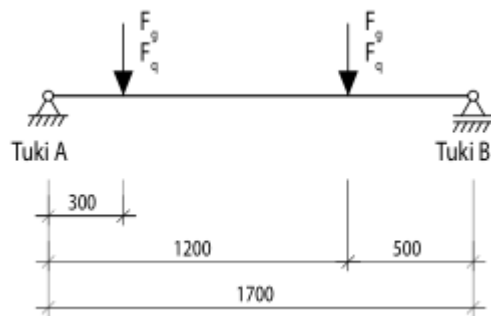


Kuva 8. Kattokannattimien kannatinpalkin sijoittelu runkoon.

Kohteessa ei ole sellaisia ikkunoita, jotka estäisivät palkin sijoittamisen yläjuoksun alle. Jos sellaisia olisi, palkki laitettaisiin yläjuoksun päälle. (Kuva 8.) esitetyllä ratkaisulla saadaan kattokannattajalle paksumpi tukikorkeus, jolloin kannattajaa ei tarvitse suurentaa tarpeettomasti leikkausta vastaan.

Kustannustehokkuuden vuoksi mitoitus tehdään kahdelle eri tilanteelle. Umpiseinän kohdalle riittää pienempi palkki kuin aukon kohdalle. Liitteessä 9 esitetään aukon kohdalle sijoitettava palkki.

Puuinfon esimerkkilaskussa (Puuinfon sovelluslaskelmat 2009) lasketaan palkki, jota kuormittaa kaksi naulalevyristikkoa.



Kuva 9. Esimerkkilaskun palkin vapaakappalekuva.

Puuinfon esimerkkilaskua seuraten mitoitus aloitetaan laskemalla ominaiskuormien aiheuttamat voimasuureet.

Ristikön tukireaktio yläpohjan omapainosta lasketaan kaavalla

$$F_{g,k} = \frac{L}{2} \cdot s \cdot g_{k1} + k \cdot s \cdot g_{k2} \quad (4.1)$$

jossa

- L on ristikon jänneväli
- s on ristikkojako
- g_{k1} on yläpohjan omapaino
- g_{k2} on yläpohjan omapaino räystäällä

Ristikön tukireaktio lumikuormasta lasketaan kaavalla

$$F_{q,k} = \left(\frac{L}{2} + k \right) \cdot s \cdot q_k \quad (4.2)$$

jossa

- k on räystään kuormitusleveys
- q_k on lumikuorma katolla

Palkin tukireaktiot yläpohjan omapainosta

$$B_{g,k} = \frac{F_{g,k} \cdot s_1 + F_{g,k} \cdot s_2}{L_1} \quad (4.3)$$

jossa

s_1 on pistekuorman etäisyys tuelta A

s_2 on pistekuorman etäisyys tuelta A

s_3 on pistekuorman etäisyys tuelta B

L_1 on kannatinpalkin jänneväli

Palkin tukireaktiot lumikuormasta

$$B_{q,k} = \frac{F_{q,k} \cdot s_1 + F_{q,k} \cdot s_2}{L_1} \quad (4.4)$$

Maksimimomentti yläpohjan omasta painosta

$$M_{g,k} = B_{g,k} \cdot s_3 \quad (4.5)$$

Maksimimomentti lumikuormasta

$$M_{q,k} = B_{q,k} \cdot s_3 \quad (4.6)$$

Maksimi leikkausvoima yläpohjan omapainosta

$$V_{g,k} = A_{g,k} \quad (4.7)$$

Maksimi leikkausvoima lumikuormasta

$$V_{q,k} = A_{q,k} \quad (4.8)$$

Palkki täytyy mitoittaa sekä pysyvässä että keskipitkässä aikaluokassa. Pysyvässä aikaluokassa palkkia kuormittaa ainoastaan yläpohjan omapaino. Keskipitkässä aikaluokassa myös lumikuorma otetaan huomioon.

Puurakenteisessa yläpohjassa keskipitkä aikaluokka on usein mitoittava, koska omapaino on verrattaen pieni. KRT-mitoituksessa kuormana käytetään omapainon ominaiskuormaa, ja MRT-mitoituksessa omapainoa kertoimella 1,35. KRT mitoituksessa käytetään omapainon ja lumikuorman ominaiskuormaa, ja MRT mitoituksessa omapainon kerroin on 1,15 ja lumikuorman 1,5. (RIL 205-1-2009.) Seuraavassa on esitetty KY2-mitointus.

Taivutuskestävyys

Maksimi taivutusmomentti

$$M_d = 1,15 \cdot M_{g,k} + 1,5 \cdot M_{q,k} \quad (4.9)$$

Taivutustännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (4.10)$$

jossa

b on ennalta arvatun palkin leveys

h on palkin korkeus

Taivutuslujuus

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.11)$$

jossa

k_{mod} katsotaan taulukosta

| Materiaali | Käyttöluokka | Kuorman aikaluokka | | |
|--|--------------|--------------------|------------|-------------|
| | | Pysyvä | Keskipitkä | Hetkellinen |
| Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT | 1 | 0,60 | 0,80 | 1,10 |
| | 2 | 0,60 | 0,80 | 1,10 |
| | 3 | 0,50 | 0,65 | 0,90 |
| Lastulevy P4 ¹⁾ , OSB/2 ¹⁾ , Kova kultulevy | 1 | 0,30 | 0,65 | 1,10 |
| | 2 | 0,20 | 0,45 | 0,80 |
| Lastulevy P6 ¹⁾ , OSB/3 ja OSB/4 | 1 | 0,40 | 0,70 | 1,10 |
| | 2 | 0,30 | 0,55 | 0,90 |
| Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA ¹⁾ , MBH.HLS, MDF.LA ¹⁾ ja MDF.HLS | 1 | 0,20 | 0,60 | 1,10 |
| | 2 | - | - | 0,80 |

Kuva 10. k_{mod} taulukko. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje)

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.12)$$

Jos käytetään kertopuupalkkia, jonka korkeus h on suurempi tai yhtä suuri kuin 300 mm, täytyy käyttää pienennyskerrointa k_h , joka lasketaan kaavalla

$$k_h = \left(\frac{300}{h} \right)^s \leq 1,2 \quad (4.13)$$

Leikkausvoimakkestävyys

Maksimi leikkausvoima

$$V_d = 1,15 \cdot V_{g,k} + 1,5 \cdot V_{q,k} \quad (4.14)$$

Leikkausjännitys

Leikkausjännitystä varten täytyy selvittää palkin tehollinen leveys b_f . Sahatavarapalkkien leveyttä pienennetään kertoimella 0,67, kun palkki kuuluu käyttöluokkaan 1. Muuten palkin tehollinen leveys on sama kuin sen leveys. (Puurakenteiden lyhennetty suunniteluohje)

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_f \cdot h} \quad (4.15)$$

Leikkauslujuus

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.16)$$

Tukipainekestävyys

Tukireaktio

$$F_d = 1,15 \cdot F_{g,k} + 1,5 \cdot F_{q,k} \quad (4.17)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_d}{b \cdot l} \quad (4.18)$$

Puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$$f_{c,90,edge,d} = \frac{f_{c,90,edge,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.19)$$

jossa

$f_{c,90,edge,k}$ on puristus poikittain syrjällä

Tehollinen kosketuspinnan pituus

Kosketuspinnan pituuteen lisätään molemmin puolin 30 mm, paitsi jos kyseessä on Kerto-LVL, jolloin lisätään 15 mm molemmin puolin. $l_{c,90,ef}$ ottaa huomioon voimine ja kaantumisen palkissa.

Tukipaine kerroin

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad (4.20)$$

jossa

$k_{c,90}$ on kerroin joka katsotaan taulukosta, kts. kuva 11.

Mitoitusehto

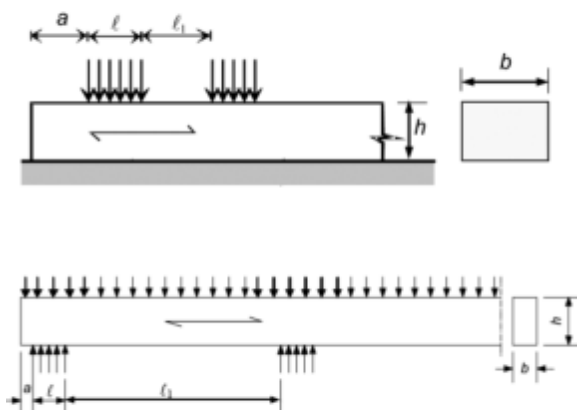
$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} \quad (4.21)$$

Kertoimelle $k_{c,90}$ käytetään arvoa 1,0, paitsi seuraavissa tapauksissa edellyttäen, että kuvan 5.2 mukainen puristuspuoleiden välinen etäisyys $\ell_1 \geq 2h$:

- $k_{c,90} = 1,25$ havupuisella sahatavaralla ja CLT:n lapepinnalla
- $k_{c,90} = 1,5$ havupuisella liimapuulla
- $k_{c,90} = 1,4$ Kerto-LVL:n lapepinnalla

Kuvan 5.2 tapauksessa 2) kertoimelle $k_{c,90}$ voidaan käyttää seuraavia korotettuja arvoja edellyttäen, että palkilla on tasan jakautunut kuormitus tai pistekuormia, joiden etäisyys tuen reunasta $\geq 2h$:

- $k_{c,90} = 1,5$ havupuisella sahatavaralla
- $k_{c,90} = 1,75$ havupuisella liimapuulla edellyttäen, että tukipituus $l \leq 400$ mm
- $k_{c,90} = 1,6$ Kerto-LVL:n lapepinnalla



Kuva 5.2 – Kiskopaine 1) jatkuvalla tuella lepävään sauvan kuormituspuoleissa ja 2) palkin tukipinnoilla tai kuormituspuoleissa. Tapauksessa 2) palkin epätaisesti jakautunut kuormitus tai esim. tukipisteiden kohdalla vaikuttavat pistekuormat eivät aseta rajoituksia tehollisen tukipinnan pituudelle tai $k_{c,90}$ kertoimen käyttöä.

Kuva 11. $k_{c,90}$ taulukko. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje.)

Omakotitalokohteissa tyypilliset ikkuna-aukon ylityspalkit ovat sahatavaraa, ja palkin korkeus ei ole yli 450 mm, jolloin kertoimen arvo on 1,25. Toinen tyypillinen tapaus isommilla aukoilla on kertopuupalkki, jolloin kerroin on 1.

Mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d} \quad (4.21)$$

4.2 Ristikkoyläpohjan jäykistys

Kohteen yläpohja kannatetaan naulalevyristikoilla. Ristikkotoimittajan suunnittelemat ristikot on mitoitettu vesikaton omakuormalle ja lumikuormalle. Rakennesuunnittelijan kontolle jää ristikoiden tuenta sivuttaissuunnassa. Puuinfon esimerkkilasku esittää jäykistyksen, jossa yläpohjan vaakakuormat siirretään jäykistelinjojen avulla päätyseinälle. esimerkissä mitoitetaan päätyseinän yläohjauspuu, joka toimii jäykistävänä rakenteena jäykistyslinjojen välissä.

Esimerkissä jäykistelinjoja on yhteensä viisi, joista kaksi on ulkoseinien päällä. Tällöin yläohjauspuun jänneväli jaetaan kahteen osaan, ja mitoitus tehdään yksiaukkoisena palkkina käyttäen suurempaa jänneväliä.

Kohteen yläpohjan jäykistys toteutetaan käyttämällä kolmea jäykistyslinjaa, jolloin mitoitettavan palkin jänneväli on ulkoseinältä harjalle. Liitteessä 10 esitettävässä laskelmassa mitoitus on tehty suurimmalla jännevälillä.

Esimerkin (Puuinfon sovelluslaskelmat 2009) mukaisesti mitoitus aloitetaan laskemalla palkkia rasittavat voimasuureet:

Sisäinen jäykistyskuorma rakenteen omapainosta

Maksimimomentti

$$M_{g,k} = \frac{k \cdot g_k \cdot L^2}{8} \quad (4.22)$$

jossa

k on ristikoiden keskeltä keskelle jako

L on ristikon jänneväli

Yläpaarteen puristusvoima

$$N_{g,k} = \frac{M_{g,k}}{H} \quad (4.23)$$

jossa

H on ristikon keskimääräinen korkeus

Sisäinen jäykistyskuorma

$$g_{k,j} = \frac{n \cdot N_{g,k}}{50 \cdot l} \quad (4.24)$$

jossa

l on yläohjauspuun pituus ulkoseinältä harjalle

n on NR-ristikoiden lukumäärä

Sisäinen jäykistyskuorma lumikuormasta

Maksimimomentti

$$M_{q,k} = \frac{k \cdot q_{k1} \cdot L^2}{8} \quad (4.25)$$

Yläpaarteen puristusvoima

$$N_{q,k} = \frac{M_{q,k}}{H} \quad (4.26)$$

Sisäinen jäykistyskuorma

$$q_{k,j} = \frac{n \cdot N_{q,k}}{50 \cdot l} \quad (4.24)$$

Tuulikuorma yläpaarteelle

$$q_{w,yp} = q_{w,k} \cdot \frac{H}{2} \quad (4.25)$$

jossa

$q_{w,k}$ on tuulikuorma [kN/m²]

Kuormitusyhdistelmät

Päätyseinän yläpaarre mitoitetaan pysyvässä, keskipitkässä ja hetkellisessä aikaluokassa.

KY1:

Kuormitusyhdistelmä murtojatilassa (pysyvä aikaluokka)

$$1,35 \cdot G_{kj}(\text{omapaino})$$

KY2:

Kuormitusyhdistelmä murtojatilassa (keskipitkä aikaluokka)

$$1,15 \cdot G_{kj}(\text{omapaino}) + 1,5 \cdot Q_{k,l}(\text{lumi})$$

KY3:

Kuormitusyhdistelmä murtojatilassa (hetkellinen aikaluokka)

$$1,15 \cdot G_{kj}(\text{omapaino}) + 1,5 \cdot Q_{k,l}(\text{lumi}) + 0,9 \cdot Q_{k,l}(\text{tuuli})$$

KY4:

Kuormitusyhdistelmä murtojatilassa (hetkellinen aikaluokka)

$$1,15 \cdot G_{kj}(\text{omapaino}) + 1,5 \cdot Q_{k,l}(\text{tuuli}) + 1,05 \cdot Q_{k,l}(\text{lumi})$$

Kuva 12. Yläohjauspuun mitoituksessa käytettävät kuormitusyhdistelmät.

Kuvassa 12 esitetyt kuormitusyhdistelmät pätevät, kun kattoa kuormittaa omakuorman lisäksi ainoastaan lumi- ja tuulikuorma. Jos katolle on suunniteltu esimerkiksi oleskelutila tai muu vastaava, niin siitä aiheutuva hyötykuorma täytyy ottaa huomioon kuormitusyhdistelmissä.

Seuraavassa on esitetty mitoitus KY4 mukaan. Liitteessä 10 on mitoitettu kohteen yläohjauspuu, ja laskelmassa on esitetty kaikki kuormitusyhdistelmät.

Taivutuskestävyys

Maksimi taivutusmomentti

$$M_d = \frac{(1,15 \cdot g_{k,j} + 1,5 \cdot q_{w,yp} + 1,05 \cdot q_{k,j}) \cdot l_p^2}{8} \quad (4.26)$$

jossa

l_p on yläohjauspuun pituus jäykistyslinjalta jäykistyslinjalle

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (4.27)$$

jossa

b on ennalta arvattu palkin leveys

h on ennalta arvattu palkin korkeus

Taivutuslujuus

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.28)$$

jossa

k_{mod} on kerroin joka ottaa huomioon kuorman aikaluoka, materiaalin ja käyttöluokan, katso kuva 4.

Leikkauskestävyys

Maksimileikkausvoima

Puuinfon esimerkkilasku neuvoo katsomaan leikkausvoiman statiikkaohjelmasta, sillä esimerkin mitoitus tehdään kaksiaukkoiselle palkille. Kohteen yläohjauspuu on yksiaukkoisen.

$$V_d = \frac{(1,15 \cdot g_{k,j} + 1,5 \cdot q_{w,yp} + 1,05 \cdot q_{k,j}) \cdot l}{2} \quad (4.29) \text{ (Rakentajain kalenteri 1999.)}$$

Leikkausjännitys

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_f \cdot h} \quad (4.30)$$

jossa

b_f on palkin tehollinen leveys

Leikkauslujuus

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (4.31)$$

Taipuma

Yläohjauspuun taipuma mitoitetaan murtorajatilán kuormalla kuormitusyhdistelmälle 4. Hetkellisen taipuman pitää täyttää ehto $<L/500$.

Palkin jäyhyysmomentti

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.32)$$

Hetkellinen taipuma

$$w_{inst} = \frac{5 \cdot (1,15 \cdot g_{k,j} + 1,5 \cdot q_{w,yp} + 1,05 \cdot q_{k,j}) \cdot l^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} \quad (4.33)$$

4.3 NR-ristikot

Naulalevyristikko on rakennesuunnittelijalle helppo vaihtoehto suunnitellessa yläpohjan kannatusta. Rakennesuunnittelija tekee ristikoista tilauskaaviot, joihin on ilmoitettu ristikkoon vaikuttavat kuormat, ja ristikon mittatiedot. Ristikkovalmistaja mitoittaa ristikot tietokoneavusteisesti. Tehdasvalmisteiset naulalevyristikot ovat mittatarkkoja, ja niiden taipumat ovat hyvin pienet.

Asiakkaan näkökulmasta niiden keveys helpottaa asentamista. Myös yläpohjan eristystyö on helppoa käytettäessä naulalevyristikoita.

Rakennesuunnittelijan mitoitettavaksi jää vain ristikoiden jäykistäminen, sekä niiden kiinnitys ja ankkurointisuunnitelmat. Liitteessä 8 on esitetty yksi kohteen naulalevyristikon tilauskaavio. (RT 85-10495, 1993)

5 LOPUKSI

Tämä opinnäytetyö toteutettiin osana laajempaa kokonaisuutta, jonka tuloksena syntyivät kaikki kohteen rakentamiseen tarvittavat rakennekuvat. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää puuinfon esimerkkilaskujen riittävyys mitoituksen pohjana.

Kohteen yläpohjaan liittyviä rakennesuunnitelmia, ja rakenneosien mitoituksia tehdessä tuli hyvin ilmi tarvittavan aineiston määrä. Puuinfon mallilaskut ovat kelpo pohja mitoitukselle, mutta todellisen tarvittavan aineiston määrä on huomattavasti suurempi. Kuormien laskemista ei esimerkeissä käsitellä ollenkaan. Muuten mitoituksen laskentakaavat on esitetty riittävällä tarkkuudella joihinkin kohteisiin, mutta yleispätevät ohjeet ne eivät ole. Materiaalien ominaisuudet ja monet varmuuskertoimet täytyy etsiä esimerkiksi eurokoodistosta tai niiden sovellusohjeistoista.

Toissijainen tavoite puurakenteiden mitoitukseen liittyvän yleisen ymmärryksen kasvattaminen onnistui myös hienosti. Työtä varten tehty aineiston kerääminen ja tarkastelu kirkastivat yläpohjan mitoituksen kokonais kuvaa.

LÄHTEET

Puuinforin sovelluslaskelmat 2010. EC5 Sovelluslaskelmat – Asuinrakennus. NR-ristikoiden kannatuspalkki. Saatavilla <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus/1%20NR-ristikoiden%20kannatuspalkki%283%29.pdf>.

Puuinforin sovelluslaskelmat 2010. EC5 Sovelluslaskelmat – Asuinrakennus. Ristikkoyläpohjan jäykistys. Saatavilla <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus/7%20NR-ristikkoy%20C3%A4pohjan%20j%C3%A4ykistys.pdf>.

Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. Neljäs painos. Eurokoodi 5.

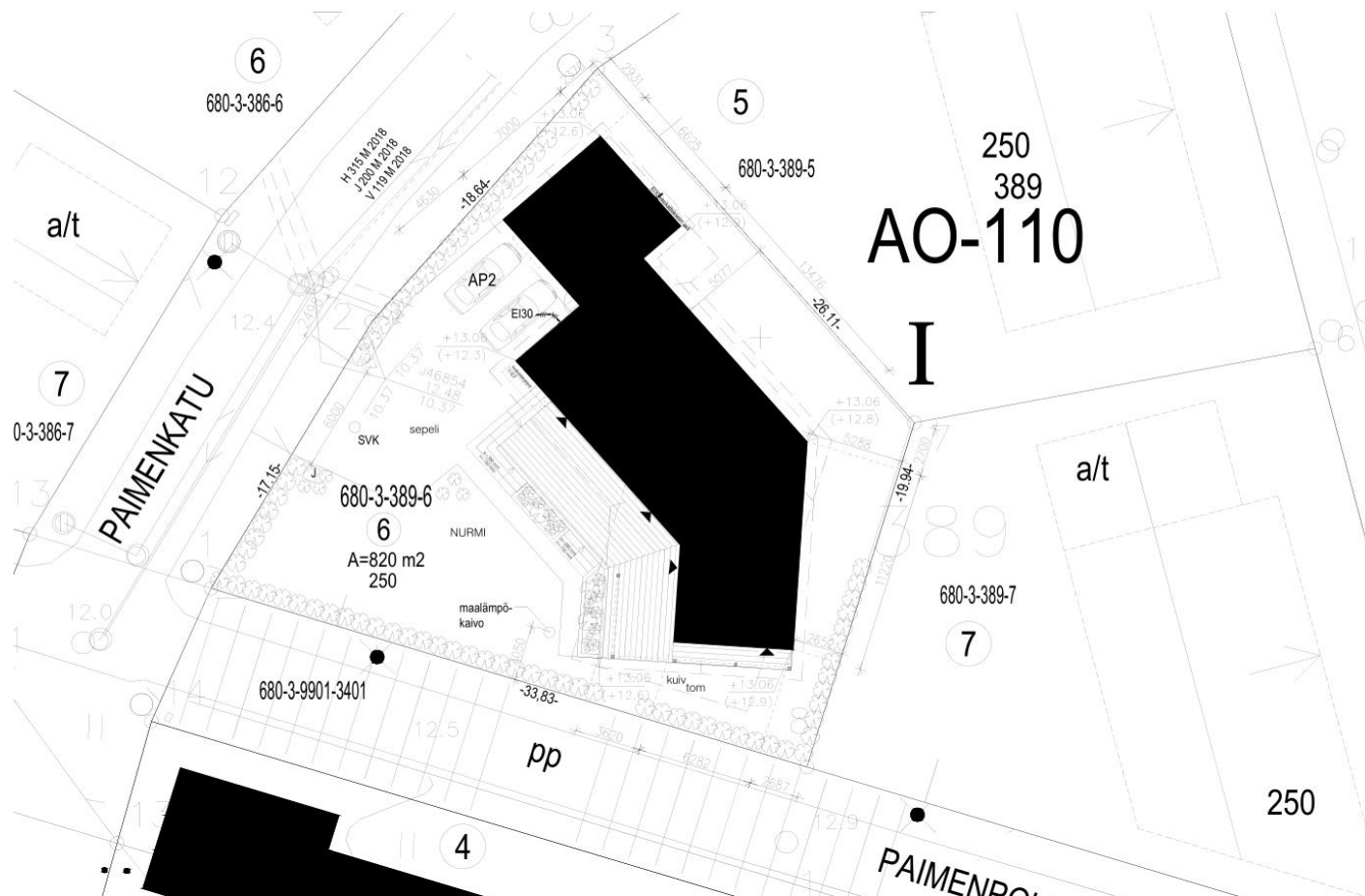
RIL 205-1-2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

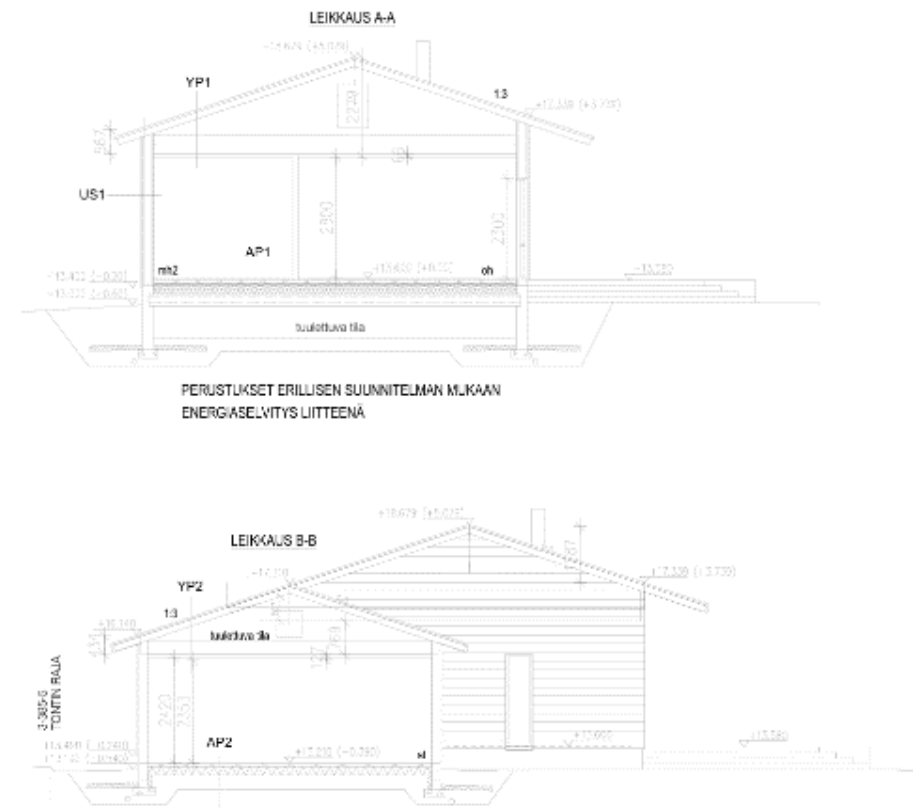
RT 85-10495. 1993. Puuristikot ja kehät. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017. Annettu Helsingissä 28.11.2017. Saatavilla https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus.

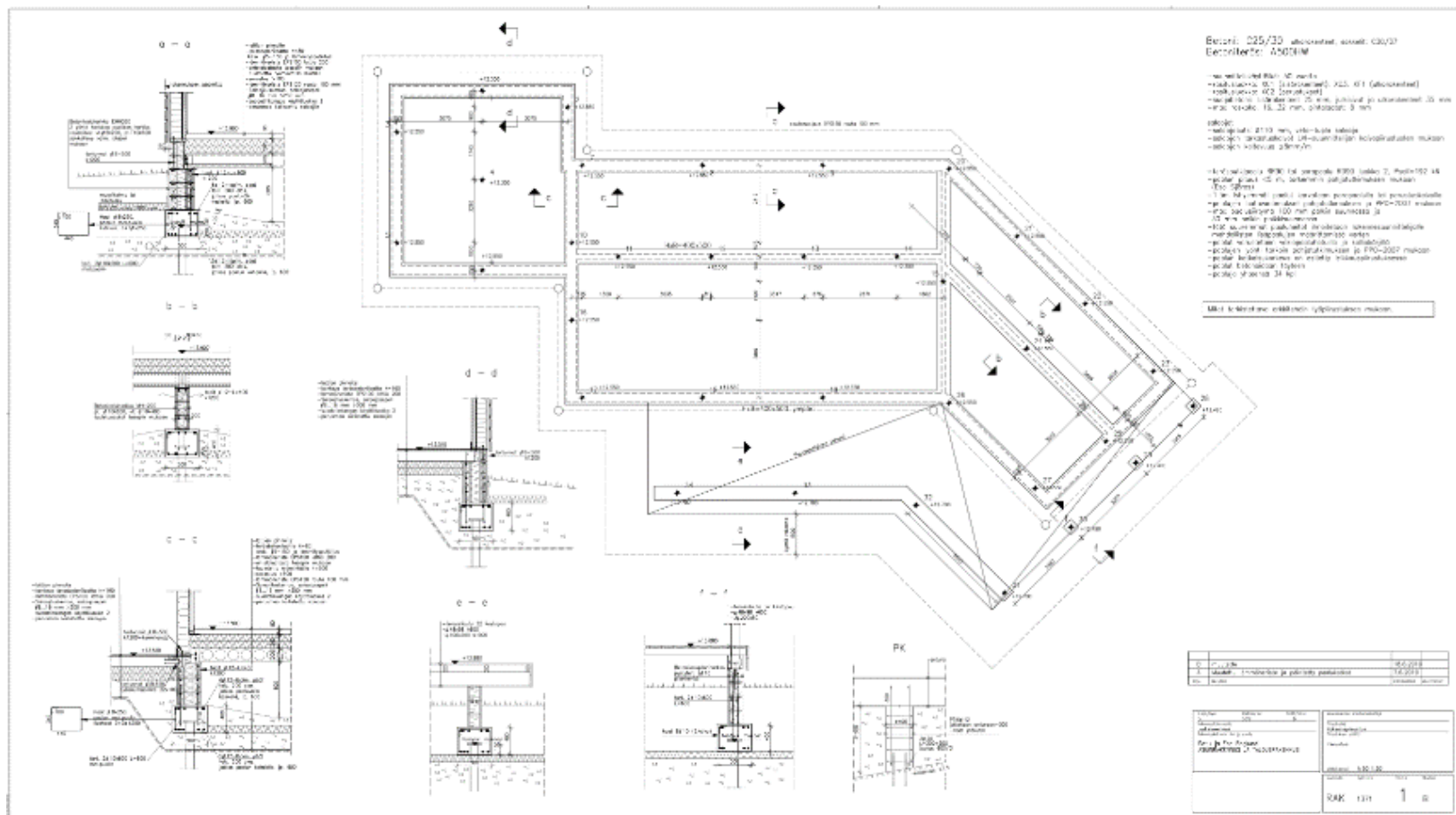
Liite 1. Asemakuva.



Liite 3. Leikkaukset.

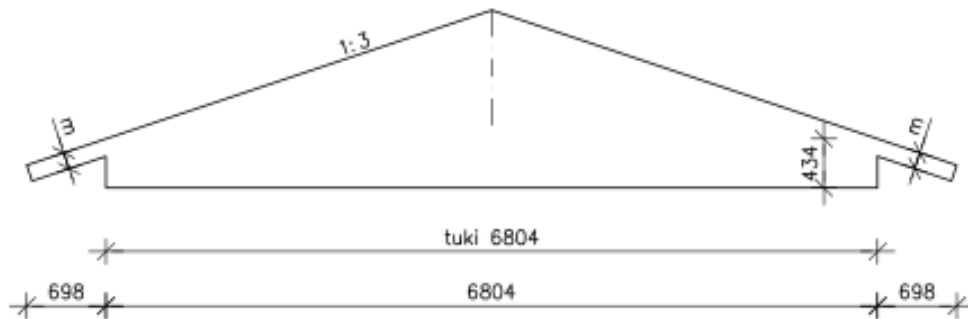


Liite 5. Perustus.



Liite 8. Kattoristikon tilauskaavio.

kattoristikko KR17, k900, 1 kpl



- peruslumikuorma $q_k=2.0 \text{ kN/m}^2$
- kinoslumikuorma tasopiir. mukaan
- omapaino yläpaarteelle $g_k=0.60 \text{ kN/m}^2$
- omapaino alapaarteelle $g_k=0.30 \text{ kN/m}^2$

m =mitta ristikkosuunnittelijan mukaan

Asennusvaatimukset :

- Pystysuorassa $\leq 200:1$
- Yläpaarten suoruus välillä räystäs-harja $\pm 10 \text{ mm}$
- Alapaarten suoruus välillä räystäs-räystäs $\pm 15 \text{ mm}$
- Ristikön tuet ristikkopiirustuksissa esitetyissä kohdissa
- Ristikön pystysauvojen nurjahdustuenta ristikkopiir. mukaan

Liite 9. Kuormien laskeminen.

Tuulikuorma

$z := 0.53 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ 5 m korkeudessa,
maastoluokka 3

$\gamma_D := 1$

$q_p := z \cdot \gamma_D = 0.53 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $z_e := 5 \text{ m}$ koko seinän alueella

$c_{pe} := 1.6$

$w_e := q_p \cdot c_{pe} = 0.848 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Lumikuorma

$s_k := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$C_e := 1$

$C_t := 1$

$\mu_i := 0.8$

$s := \mu_i \cdot s_k \cdot C_e \cdot C_t = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Liite 10. Ristikon kannatinpalkki.

Ristikon kannatinpalkki

$L := 1800 \text{ mm}$
 $s := 900 \text{ mm}$
 $k := 500 \text{ mm}$
 $g_{k1} := 0,87 \frac{kN}{m^2}$
 $g_{k2} := 0,5 \frac{kN}{m^2}$


$F_{g,k} := \frac{L}{2} \cdot s \cdot g_{k1} + k \cdot s \cdot g_{k2} = 0,93 \text{ kN}$
 $q_k := 2 \frac{kN}{m^2}$
 $F_{q,k} := \left(\frac{L}{2} + k \right) \cdot s \cdot q_k = 2,52 \text{ kN}$

$s_1 := 271 \text{ mm}$
 $s_2 := 1171 \text{ mm}$
 $s_3 := 1529 \text{ mm}$
 $L_1 := 1800 \text{ mm}$

$B_{g,k} := \frac{F_{g,k} \cdot s_1 + F_{g,k} \cdot s_2}{L_1} = 0,745 \text{ kN}$
 $B_{q,k} := \frac{F_{q,k} \cdot s_1 + F_{q,k} \cdot s_2}{L_1} = 2,019 \text{ kN}$

$M_{g,k} := B_{g,k} \cdot s_3 = 1,139 \text{ kN} \cdot m$
 $M_{q,k} := B_{q,k} \cdot s_3 = 3,087 \text{ kN} \cdot m$

$V_{g,k} := B_{g,k} = 0,745 \text{ kN}$
 $V_{q,k} := B_{q,k} = 2,019 \text{ kN}$



Ristikon tukireaktio
omapainosta

Ristikon tukireaktio
lumikuormasta

Palkin tukireaktiot yläpohjan
omapainosta

Palkin tukireaktiot
lumikuormasta

Maksimimomentti
omapainosta

Maksimimomentti
lumikuormasta

Taivutuskestävyys

$$M_d := 1.15 \cdot M_{g,k} + 1.5 \cdot M_{q,k} = 5.94 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 8.91 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} := \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 13.714 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.65 \quad OK$$

Arvattu palkki

$$b := 100 \text{ mm} \quad h := 200 \text{ mm}$$

$$f_{v,k} := 4 \text{ MPa} \quad \gamma_M := 1.4$$

$$f_{m,k} := 24 \text{ MPa} \quad k_{mod} := 0.8$$

$$f_{c,90,edge,k} := 2.5 \text{ MPa}$$

Leikkausvoimakestävyys

$$V_d := 1.15 \cdot V_{g,k} + 1.5 \cdot V_{q,k} = 3.885 \text{ kN}$$

$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} = 0.291 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} := \frac{f_{v,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 2.286 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0.127 \quad OK$$

Tukipainekestävyys

$$F_d := 1.15 \cdot F_{g,k} + 1.5 \cdot F_{q,k} = 4.849 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,90,d} := \frac{F_d}{b \cdot L} = 0.027 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,edge,d} := \frac{f_{c,90,edge,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 1.429 \text{ MPa}$$

$$k_{c,90} := 1$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,edge,d} \cdot k_{c,90}} = 0.019 \quad OK$$

Liite 11. Yläpohjan jäykistys.

Ristikkoyläpohjan jäykistys

Omapaino

$g_k := 0.87 \frac{kN}{m^2}$ $k := 900 \text{ mm}$ $L := 8700 \text{ mm}$ $H := 1600 \text{ mm}$

$M_{g,k} := \frac{k \cdot g_k \cdot L^2}{8} = 7.408 \text{ kN} \cdot m$ $l := 3900 \text{ mm}$ $n := 13$

$N_{g,k} := \frac{M_{g,k}}{H} = 4.63 \text{ kN}$

$g_{k,j} := \frac{n \cdot N_{g,k}}{50 \cdot l} = 0.309 \frac{kN}{m}$

Lumikuorma

Yläohjauspuu C30

$q_k := 2 \frac{kN}{m^2}$ $h := 200 \text{ mm}$ $b := 100 \text{ mm}$

$M_{q,k} := \frac{k \cdot q_k \cdot L^2}{8} = 17.03 \text{ kN} \cdot m$ $f_{v,k} := 4 \text{ MPa}$ $\gamma_M := 1.4$

$N_{q,k} := \frac{M_{q,k}}{H} = 10.644 \text{ kN}$ $f_{m,k} := 30 \text{ MPa}$ $k_{mod} := 0.8$

$q_{k,j} := \frac{n \cdot N_{q,k}}{50 \cdot l} = 0.71 \frac{kN}{m}$ $E_{0,mean} := 12000 \frac{N}{mm^2}$

Tuulikuorma

$q_{w,k} := 0.848 \frac{kN}{m^2}$ $h_w := 2500 \text{ mm}$

$q_{w,yp} := q_{w,k} \cdot h_w = 2.12 \frac{kN}{m}$

Taivutuskestävyys

$M_{d,1} := 1.35 \cdot \frac{g_{k,j} \cdot l^2}{8} = 0.792 \text{ kN} \cdot m$

$M_{d,2} := \frac{(1.15 \cdot g_{k,j} + 1.5 \cdot q_{k,j}) \cdot l^2}{8} = 2.699 \text{ kN} \cdot m$

$$M_{d.3} := \frac{(1.15 \cdot g_{k.j} + 1.5 \cdot q_{k.j} + 0.9 \cdot q_{w.ypp}) \cdot l^2}{8} = 6.326 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_{d.4} := \frac{(1.15 \cdot g_{k.j} + 1.5 \cdot q_{w.ypp} + 1.05 \cdot q_{k.j}) \cdot l^2}{8} = 8.137 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_d := \max(M_{d.1}, M_{d.2}, M_{d.3}, M_{d.4}) = 8.137 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$\sigma_{m.y.d.1} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} = 12.206 \text{ MPa}$$
$$f_{m.d} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 17.143 \text{ MPa}$$
$$\frac{\sigma_{m.y.d.1}}{f_{m.d}} = 0.712$$

Leikkausvoimakestävyys

$$V_d := \frac{(1.15 \cdot g_{k.j} + 1.5 \cdot q_{w.ypp} + 1.05 \cdot q_{k.j}) \cdot l}{2} = 8.346 \text{ kN}$$
$$\tau_d := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} = 0.626 \text{ MPa}$$
$$f_{v.d} := \frac{f_{v.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 2.286 \text{ MPa}$$
$$\frac{\tau_d}{f_{v.d}} = 0.274$$

Taipuma

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = (6.667 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$
$$w_{inst} := \frac{5 \cdot (1.15 \cdot g_{k.j} + 1.5 \cdot q_{w.ypp} + 1.05 \cdot q_{k.j}) \cdot l^4}{384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_y} = 16.116 \text{ mm}$$
$$\frac{L}{500} = 17.4 \text{ mm} \quad \blacksquare > \blacksquare \quad w_{inst} = 16.116 \text{ mm}$$

Created with Mathcad Express. See www.mathcad.com for more information.