

Juha Kurkela, Tapani Kivinen, Veli-Matti Westman  
& Ari Kevarinmäki

## Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut

Esivalmistetut rakennejärjestelmät

# **Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut Esivalmistetut rakennejärjestelmät**

Juha Kurkela

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Tapani Kivinen

MTT Maatalousteknologian tutkimus

Veli-Matti Westman & Ari Kevarinmäki

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6137-6 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6138-4 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1235-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2003

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Bygg och transport, Träkarlsgränden 2 A, PB 1806, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building and Transport, Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2003

Kurkela, Juha, Kivinen, Tapani, Westman, Veli-Matti & Kevarinmäki, Ari. Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut. Esivalmistetut rakennejärjestelmät [Wooden frame solutions of wide span agriculture buildings. Prefabricated structure systems]. Espoo 2003. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Research Notes 2194. 116 s. + liitt. 39 s.

**Avainsanat** timber construction, building frame, wooden structures, nail plate structures, glulam, agricultural buildings, steel sheet bracing, machine halls, dairy barns, prefabrication, structural systems

## Tiivistelmä

VTT on tehnyt tutkimuksen yhteistyössä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuk-  
sen kanssa. Tutkimuksessa selvitettiin yhdeksän lypsykarjapihatton ja kolmen sikalara-  
kennuksen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita vuoden kestäneellä mittauksella. Olosuhde-  
selvityksen tarkoituksena oli saada tietoa siitä, millaisiin sisäilmastorasituksiin uusien  
suurten kotieläinrakennusten rakenteet ja pintamateriaalit joutuvat. Sisäolosuhteiden  
erot näyttivät korreloivan kunkin kohteen ilmanvaihtojärjestelmän tekniseen toimivuu-  
teen ja toimintaperiaatteeseen. Ilmanvaihdon määrässä oli tuntuvia puutteita. Kotieläin-  
rakennusten ullakko-onteloiden tuulettumisessa oli puutteita. Tutkimuksen perusteella  
voidaan sanoa, että etenkin talviolosuhteissa suhteelliset sisäkosteudet olivat niin kor-  
keita, että homeen synty ja esiintyminen oli todennäköistä. Lahovaurioiden syntyriski  
oli kuitenkin vähäinen.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa konehalleille, lypsykarjapihatolle ja sikaloille kehitet-  
tiin toiminnalliset pohjaratkaisumallit, jotka vastaavat kotieläintilojen lähitulevaisuuden  
rakennustarpeisiin. Pohjaratkaisuihin sovellettiin uusia puumateriaaleihin perustuvia  
runkorakennemalleja. Konehalleihin suositeltiin naulalevyrakenteista kolminivelristik-  
kokehää sekä amerikkalaisperäistä Post-Frame-runkoa. Pihattoihin ja sikaloihin suosi-  
teltiin kerto- tai liimapuista kolminivelkehää, vetotangollista ansaristikkoa sekä liima-  
puista kolmiaukkoista pilari-palkkirunkoa. Kehitetyt runkorakennejärjestelmät ovat  
teollisesti esivalmistettavia tyyppiratkaisuja, jotka voidaan tarvittaessa toimittaa tuote-  
osatoimituksena valmiiksi asennettuna. Kaikki kehitetyt runkotyypit ovat itsensä  
jäykistäviä, jolloin niitä voidaan käyttää pitkissä rakennuksissa ilman poikittaisia väli-  
seiniä tai jäykistereivauksia.

Runkorakennemalleille selvitettiin rakenneratkaisut ja mitoitusmenetelmät. Jäykistys-  
menetelmät ja rakennemalleihin soveltuvat vaipparakenteet esiteltiin. Uutena jäykiste-  
menetelmänä tarkasteltiin seinä- ja kattopeltien hyödyntämistä yhdessä mastopilarijäy-  
kistyksen kanssa. Tälle jäykistysmenetelmälle laadittiin suunnitteluohjeet ja mitoitus-  
ohjelma. Uusien runkorakennemallien kustannuksia verrattiin perinteisiin rakenteisiin.  
Uudet rakennemallit olivat tutkimuksen perusteella taloudellisesti kilpailukykyisiä.

Kurkela, Juha, Kivinen, Tapani, Westman, Veli-Matti & Kevarinmäki, Ari. Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut. Esivalmistetut rakennejärjestelmät [Wooden frame solutions of wide span agriculture buildings. Prefabricated structure systems]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2194. 116 p. + app. 39 p.

**Keywords** timber construction, building frame, wooden structures, nail plate structures, glulam, agricultural buildings, steel sheet bracing, machine halls, dairy barns, prefabrication, structural systems

## Abstract

VTT Technical Research Centre of Finland has done this study in cooperation with Agrifood Research Finland. In the first phase the indoor climate conditions, relative humidity and temperature, carbon dioxide and ammonia emissions were studied in nine dairy barns and swineries. Conditions seemed to correlate strongly with the ventilation system and its functionality. The ventilation rate was considerably low in most barns. A one year long measurement revealed that the indoor humidity was between 80–100 % for long periods especially during the wintertime. The humidity seemed to enable the mould growth on wall and ceiling surfaces. The risk of wood decay was not obvious.

In the second phase new functional wide span lay-outs were designed for machine halls, swineries and dairy barns. The lay-outs were constructed with new wooden load bearing building frames. These new constructions were three hinge glulam, LVL or nail plate truss frames, tension bar frames and post and beam frame systems. Characteristic for these frames is also the industrial production line before site operations. A new wooden solutions for a self made builder is a post frame system for simple uninsulated machine halls.

The detailed structures and design methods were studied for the developed timber structure systems. Bracing methods and wall and ceiling surfaces of the frames were introduced. The costs of the new frame systems were compared to traditional structures. The new timber frame systems were economically competitive.

## Alkusanat

Maa- ja metsätalousministeriö rahoitti vuosina 2000–2002 maatilatalouden kehittämisrahastosta (Makerasta) maatalousrakentamiseen kohdentuvaa rakennustutkimusta, joka nimettiin Laturi-ohjelmaksi. Siihen sisältyi yhteensä seitsemän eri tutkimushanketta, joista nyt käsillä oleva tutkimuskokonaisuus keskittyi laajarunkoisten maatalousrakennusten runkokonsepteihin. Tutkimuksen on tehnyt VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka yhteistyönä MTT maatalousteknologian tutkimuksen (Vakola) kanssa.

Tutkimustulokset on julkaistu sekä VTT:n että MTT:n julkaisusarjoissa yhteisellä otsikolla Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut. Tämän julkaisun alaotsikkona on Esivalmistetut runkojärjestelmät ja MTT:n julkaisun alaotsikko Olosuhdemittaukset ja toiminnalliset mallit. MTT:n julkaisussa on keskitytty valittujen pihattojen ja sikaloiden olosuhdemittausten tuloksiin sekä uusien konehallien, lypsykarjapihattojen ja sikaloiden pohjaratkaisuihin ja niiden runkorakennemalleihin yleisellä tasolla. MTT:n julkaisu on tarkoitettu kaikille uusista puurunkoratkaisuista kiinnostuneille rakentajille ja suunnittelijoille. Tässä VTT:n julkaisussa esitetään yksityiskohtaisesti valittujen runkojärjestelmien rakenneratkaisut ja mitoitusohjeet. VTT:n julkaisu on tarkoitettu ensisijaisesti rakennus- ja rakennesuunnittelijoille.

Maatalouden rakennemuutoksen myötä yksikkökoko on kasvanut sellaisiin mittoihin, että maatalousrakennuksia voidaan hyvällä syyllä kutsua teollisuusrakennuksiksi. Teollisuusrakennusten kriteerit täyttyvät monella tavalla: kohteet ovat leveitä halliratkaisuja, joihin teollisesti esivalmistetut runko- ja vaippajärjestelmät soveltuvat hyvin. Koska markkinoilta on puuttunut maatalousrakennuksiin kehitettyjen puurunkoratkaisujen esimerkkejä, niitä ei juurikaan ole käytetty käytännön rakentamisessa. Tämä tutkimusaineisto pyrkii paikkaamaan tilannetta ja voimistamaan puuratkaisujen yleistymistä.

VTT:n tutkimusraportin laatimiseen ovat osallistuneet diplomi-insinööri Juha Kurkela ja rakennusinsinööri Veli-Matti Westman VTT:stä sekä arkkitehti Tapani Kivinen MTT:ltä. Tekniikan tohtori Ari Kevarinmäki VTT:stä on ollut projektin johtajana.

Espoossa 27.1.2003

Juha Kurkela

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract.....	4
Alkusanat .....	5
Symboliluettelo.....	8
1. Johdanto .....	11
2. Olosuhdeselvitykset .....	13
2.1 Mittauskohteet .....	13
2.2 Mittaustulokset ja havainnot .....	14
2.3 Päätelmät olosuhdeselvityksistä .....	18
3. Toiminnalliset pohjaratkaisumallit .....	24
3.1 Konehallien pohjaratkaisut .....	24
3.2 Sikaloiden pohjaratkaisut .....	24
3.3 Lypsykarjapihattojen pohjaratkaisut .....	27
4. Maatalousrakennusten tyyppirakenteet.....	29
4.1 Nykyisin käytetyt rakennetyypit ja niiden kehitystarpeet .....	29
4.1.1 Konesuojahalli.....	29
4.1.2 Lypsykarjapihattojen ja sikaloiden rakenteet.....	30
4.2 Uudet konesuojahallien tyyppirakenteet .....	32
4.2.1 Uusien rakennetyyppien tavoitteet .....	32
4.2.2 NR-kehähalli .....	32
4.2.3 Post-Frame-halli .....	35
4.3 Uudet lypsykarjapihatoiden ja sikaloiden tyyppirakenteet.....	39
4.3.1 Uusien rakennetyyppien tavoitteet .....	39
4.3.2 Kolmilaivainen liimapuupalkkihalli.....	40
4.3.3 Kolminivelkehähalli .....	42
4.3.4 Vetotangollinen liimapuukehä .....	45
4.3.5 Vinon sisäkaton vaikutus sikaloiden energiankulutukseen.....	47
5. Tyyppirakenteiden mitoitusperiaatteet.....	51
5.1 NR-kehähalli.....	51
5.2 Post-Frame-halli .....	53
5.3 Kolmilaivainen liimapuupalkkihalli .....	57
5.4 Kolminivelkehä .....	66
5.5 Vetotangollinen liimapuukehä.....	72

6. Hallien jäykistäminen .....	75
6.1 Jäykistysjärjestelmät .....	75
6.2 Profiilipeltikatteiden hyödyntäminen jäykistämässä .....	77
6.2.1 Yleistä mitoituksista .....	77
6.2.2 Levykentän ja keuhon jousitus.....	78
6.2.3 Levykentän kestävyys .....	89
6.2.4 Levykentän osien kestävyys.....	91
6.2.5 Laskentaesimerkki.....	93
7. Vaipparakenteet .....	103
7.1 Kantavat sekundaarirakenteet.....	103
7.2 Elementit .....	103
7.3 Paikallarakennettavat.....	105
8. Kilpailukykyvertailut .....	107
8.1 Tyyppirakenteiden kustannukset.....	107
8.2 Tyyppirakenteiden vertailu muihin rakenteisiin.....	110
8.3 Sekundaarirakenteiden kustannukset.....	111
9. Yhteenveto ja päätelmät.....	113
Lähdeluettelo .....	115

## Liitteet

Liite A: Post-Frame-hallin mitoitus-esimerkki

Liite B: Kolmilaivaisen liimapuuhallin mitoitus-esimerkki

Liite C: Kolminivelkehän mitoitus-esimerkki

Liite D: Vetotangollisen liimapuukehän mitoitus-esimerkki



# Symboliluettelo

$b$	palkin tai pilarin leveys
$C_{pe}, C_{pi}, C_{net}$	tuulenpaineen kertoimia
$d$	liittimen läpimitta
$E$	kimmokerroin yleensä
$E_{mean}$	kimmomoduulin keskiarvo
$E_{0,05}$	kimmomoduulin karakteristinen arvo
$f_{h,d}$	reunapuristuksen mitoituslujuus
$f_{c,0,d}$	puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{m,z,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo z-akselin suhteen
$f_{t,0,d}$	vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{v,d}$	leikkauslujuuden mitoitusarvo
$f_{c,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden mitoitusarvo
$H$	korkeus, vaakavoima
$h$	palkin tai pilarin korkeus
$I$	palkin tai pilarin jäyhyysmomentti
$KRT$	käyttörajatila
$K_r$	liitoksen kiertymäjäykkyys
$K_{ser}, K_u$	liittimen siirtymäkerroin
$k$	palkkien, pilarien tai kehien keskinäinen väli
$k_c$	nurjahduskerroin
$L$	pituus, jänneväli
$L_c$	nurjahduspituus

$MRT$	murtorajatila
$M$	taivutusmomentti
$N$	normaalivoima
$Q$	leikkausvoima
$q$	jakautunut kuorma
$R$	tukireaktio tai voima
$t$	puun tai teräslevyn paksuus
$V$	leikkausvoima tai pystysuuntainen voima
$\alpha$	kulma
$\beta$	reunapuristuslujuuksien suhde
$\rho_k$	puun tiheyden karakteristinen arvo
$\sigma_{c,0,d}$	puristuksen laskentajännitys
$\sigma_{m,z,d}$	taivutuksen laskentajännitys z-akselin suhteen
$\sigma_{t,0,d}$	vedon laskentajännitys
$\sigma_{c,90,d}$	syitä vastaan kohtisuora puristuksen laskentajännitys
$\tau_d$	leikkauksen laskentajännitys



# 1. Johdanto

Suomalaisen karjatalouden kehityskuva on johtanut karjakokojen jatkuvaan kasvuun. Nykyisestä noin 15 lehmän karjasta ollaan siirtymässä 30–50 lehmän karjoihin. Sika-loissa kehitys on jo johtanut suurten yksiköiden yleistymiseen, lihasikaloissa 1 000-paikkaiset rakennukset ovat arkipäivää. Konehallien koko kasvaa koneiden kasvamisen myötä.

Laajenevat kotieläintilat ja rakennusten suunnittelijat elävät muutoksen tilassa, jossa uusille rakennuksille haetaan jatkuvasti optimikokoa ja muotoa. Suunnittelijoiden ta-holta on selkeästi ilmaistu hyvien, tutkittujen esimerkkien puutteen aiheuttavan epävar-muutta rakenneratkaisujen valinnassa. Tilanne on synnyttänyt eri materiaalitoimittajien ja niistä syntyvien konstruktio mallien vapaan kilpailun. Näiden rakenneratkaisujen toi-minnasta rakennuksen rasittavissa ympäristöolosuhteissa elinkaaren ajalta ei ole varmaa tietoa.



*Kuva 1. Tyypillinen sikalatyömaa. Sikalan kantavat seinät ovat betonielementtejä ja kattorakenteet naulalevyristikkoja.*

Viimeaikaisissa suurissa rakennuskohteissa kattokannattimina on käytetty pääasiallisesti naulalevyristikkoja kuvan 1 mukaisesti. Tästä rakennusratkaisusta syntyy tilavuudeltaan muhkeita ullakko-ontelotiloja, jotka suurissa rakennuksissa tulee paloteknisesti osastoi-da 400 m<sup>2</sup>:n osiin. Suurissa rakennuksissa myös rakennuksen jäykistäminen on ongel-mallista.

Puutteellisesti tuuletettujen yläpohjien tai vuotavien höyrynsulkujen takia navetoissa ja sikaloissa on ilmennyt naulalevyjen ruostumista. Laajat ullakkotilat aiheuttavat myös rakennuksen ulkonäköhaittoja. Leveärunkoisten tuotantorakennusten ullakkotilojen viisuaalinen volyyymi muodostuu suuremmaksi kuin itse käyttötilan, mikä luo arkkitehtonista epäsuhtaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää uusia toiminnallisia pohjaratkaisuja ja tyyppirakenteita, joita suunnittelijat voivat helposti käyttää. Kehitettävät pohjaratkaisut ja tyyppirakenteet ovat konehalleja, lypsykarjapihattoja ja sikaloita. Toiminnalliset pohjaratkaisut kehitetään uusille isommille yksiköille.

Tyyppirakenteille esitellään niiden käyttöalueet, mitoitusmenetelmät laskentaesimerkeineen ja kilpailukykyvertailut. Rakennusten jäykistämiseen esitellään uusi jäykistystapa mitoitusmenetelmineen. Tyyppirakenteisiin sopivat vaipparakenteet selvitetään.

## 2. Olosuhdeselvitykset

### 2.1 Mittauskohteet

Olosuhdeselvityksessä oli mukana yhdeksän kohdetta: kuusi lypsykarjapihatatorakennusta, yksi emakkosikala ja kaksi täytepohjaista lihasikalaa. Kohteet olivat Lounais-Suomen ja Pirkanmaan alueilta. Olosuhdeselvityksessä kohteissa seurattiin noin vuoden ajan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Lisäksi mitattiin hetkelliset ilman ammoniakki- ja hiilidioksidipitoisuudet.

Mittauspisteinä olivat: sisätila, ulkotila ja yläpohjan ontelotila. Kohteissa käytiin kolme kertaa: viikolla 32 vuonna 2000 (mittauksen aloitus), viikolla 50 vuonna 2000 (välitulokset) ja viikolla 32 vuonna 2001 (mittauksen lopetus). Lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin pääosin Tinytag Ultra TGU 1500 -tiedonkeruuloggereilla ja hiilidioksidia ja ammoniakkipitoisuuksien mittaus Dräger-diffuusioputkella.

Käyntikerroilla tehtiin myös havaintoja rakenteiden kunnosta. Mittauskohteet esitellään pääpiirteittäin taulukossa 1. Tarkempi kuvaus kohteista ja mittausmateriaalista löytyy MTT Vakolan julkaisusta [1].

*Taulukko 1. Olosuhdeselvityksiin osallistuneiden kohteiden tiedot.*

Kohde	Rak.-v.	Koko	Ilmanvaihtojärjestelmä <sup>1)</sup>	Rakenne <sup>2)</sup>
Pihatto 1	2000	600	Alipaine/HI+AP	NR + bet.elem.
Pihatto 2	1988	430	Alipaine/ P/HI(kesä)	NR + harkko / ST
Pihatto 3	1999	970	Alip./HI+AP	NR + bet.elem.
Pihatto 4	1991	540	Alipaine/AP/HI(kesä)	Pilari-palkki
Pihatto 5	1999	800	Alipaine/HI+AP	NR + bet.elem.
Pihatto 6	2000		Harja-ilmanvaihto	NR + bet.elem.
Täytepohjasikala 7	1996	750	Alipaine/HI	NR + bet.elem.
Täytepohjasikala 8	1998	750	Alipaine/HI+itkupelti	NR + bet.elem.
Emakkosikala 9	1990		Alipaine/HI	PR + ST

1) HI = huippumuri (pääpoisto), AP = alapoisto lietekanavien kautta (osa poistosta, n. 10–20 %).

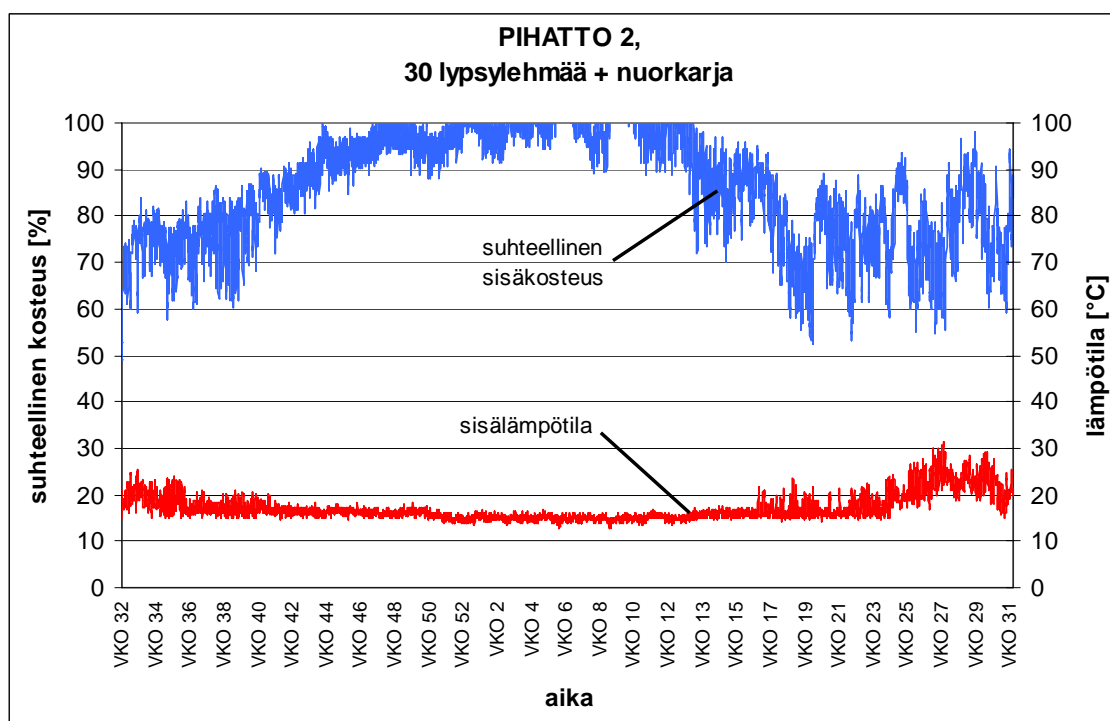
2) Rakenne-sarakkeessa esitetään kattokannatintyyppi ja seinärakenne (NR = naulalevyristikko, PR = naulattu ristikko ja ST = sahatavarakko).

Kohteen 6 painovoimaiseen ilmanvaihtoon perustuvaa järjestelmää lukuun ottamatta kaikki muut rakennukset olivat koneellisesti alipaineistettuja. Kohteissa 2 ja 4 pääpoisto on lietekanavien kautta ja huippumuria käytetään vain kesäolosuhteissa.

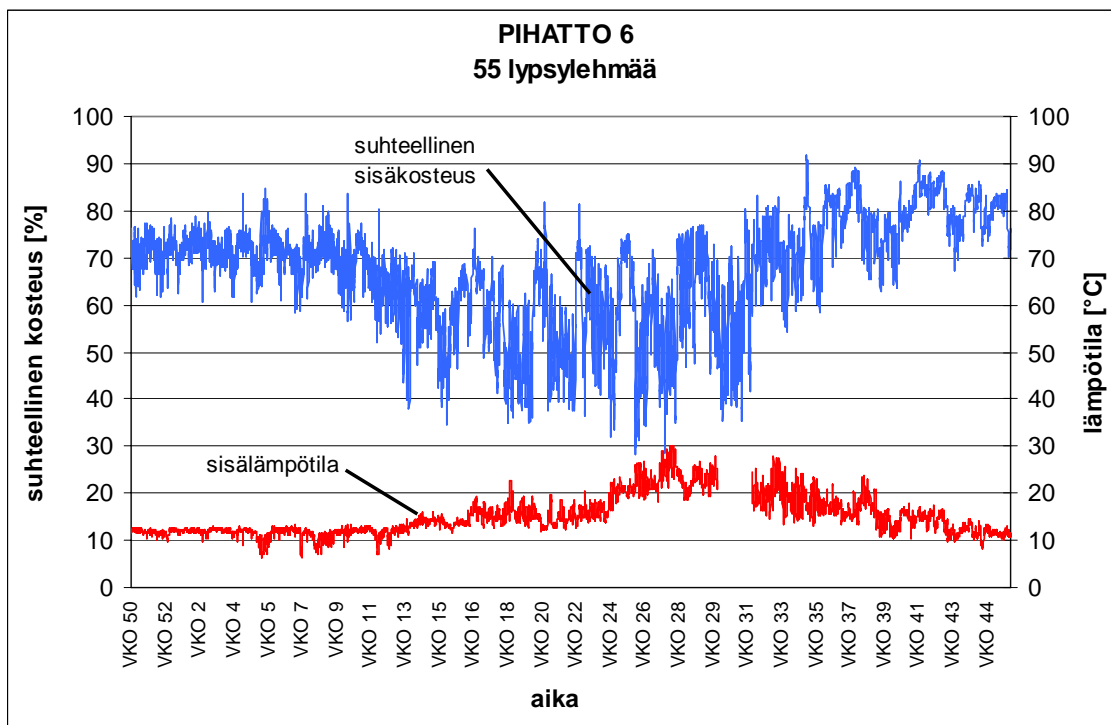
Suurin osa kohteista oli välikatollisia ja sisätiloiltaan matalia eli sisäkorkeus oli noin 2,5–3 metriä. Poikkeuksena kohteet 4 ja 6, joissa sisäkatto oli lappeen suuntainen ja täten sisätila oli avara. Täytepohjasikaloissa 7 ja 8 sisäkorkeus oli 4,5 m.

## 2.2 Mittaustulokset ja havainnot

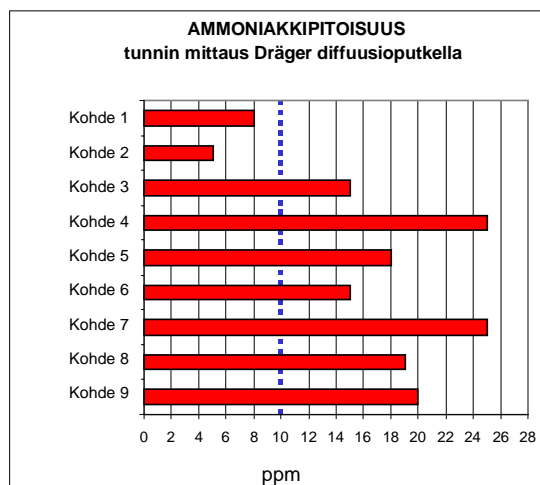
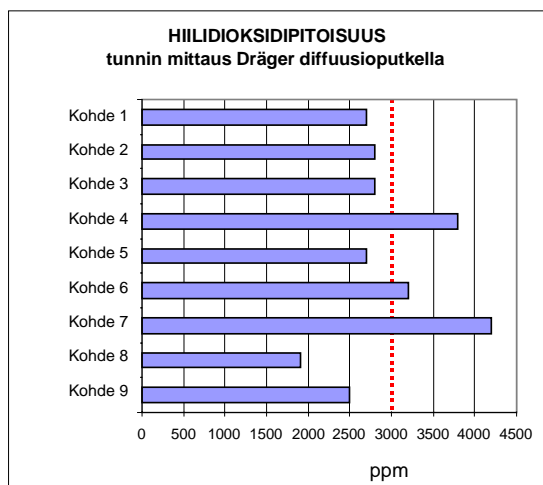
Kuvissa 2 ja 3 esitetään kohteiden 2 ja 6 vuoden aikana saadut sisätilan olosuhdemittauksen tulokset. Kohteet edustavat seurantakohteiden ääripäitä sisäolosuhteiden kannalta. Kohteessa 2 suhteellinen kosteus oli koko kesän yli 90 %. Kohteessa 6 suhteellinen kosteus oli lähes kaiken aikaa alle 80 %. Kuvassa 4 esitetään tutkimuskohteiden mitatut hiilidioksidi- ja ammoniakkipitoisuudet.



Kuva 2. Kohteen 2 sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus mittaussajankohtana. Mittaus tunnin välein. Lämpötilan yksikkö [°C].



Kuva 3. Kohteen 6 sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus mittausajankohtana. Mittaus tunnin välein. Lämpötilan yksikkö [°C].



Kuva 4. Tutkimuskohteiden hiilidioksidi ja ammoniakkipitoisuudet tammikuussa 2001. Pistekatkoviiva esittää suositeltua pitoisuutta.

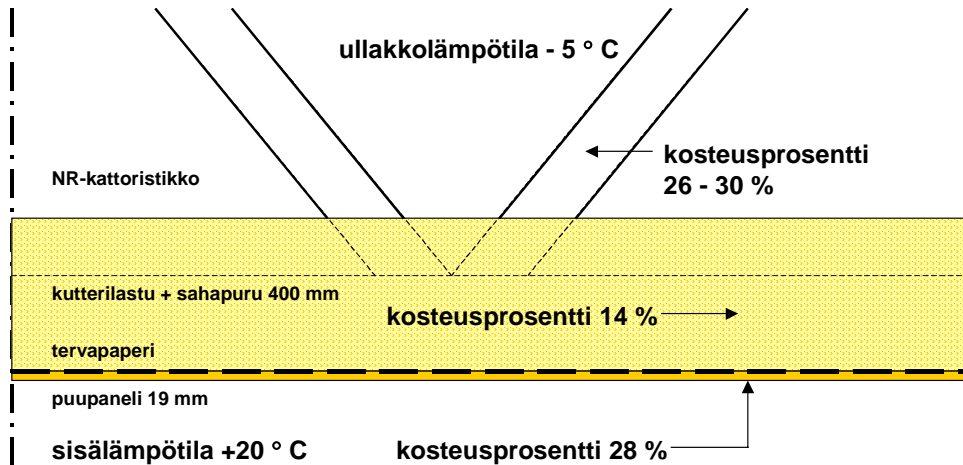
Taulukkoon 2 on koottu rakenteista tehdyt havainnot. Niitä ovat lähinnä suuren kosteuden ja puutteellisen ilmanvaihdon aiheuttamat jäljet rakenteiden pinnoilla.



*Taulukko 2. Tarkastuskäynneillä kohteiden rakenteista tehdyt havainnot.*

Kohde	Rakenteista tehdyt havainnot
Pihatto 1	Ei havaintoja
Pihatto 2	NR-ristikoiden naulalevyissä vähäisissä määrin valkoruostetta. Sisätilan pinnoilla havaittavissa kondensoitumista.
Pihatto 3	Ei havaintoja
Pihatto 4	Pihatton toisessa päässä olevan rehun käsittelytilan katossa havaittavissa homepilkustoa (kuva 7).
Pihatto 5	NR-ristikoiden naulalevyissä vähäisissä määrin valkoruostetta. Sisäkatossa rakennuksen päädyssä (maalattu vaneri) silminhavaittavaa homepilkustoa. Ulko-ovien sisäpinnoissa (filmi-vaneri) kondensoitumista sekä homepilkustoa.
Pihatto 6	NR-ristikoiden naulalevyissä runsaasti valkoruostetta jo rakennusvaiheessa (kuva 6). Yläpohjan ontelotila on lähes tuuletumaton.
Täytepohjasikala 7	NR-ristikoiden harja-alueen naulalevyissä runsaasti valkoruostetta. Ontelotilan tuuletus puutteellinen. Ullakkotilan puuosissa suuri kosteuspitoisuus (kuva 5).
Täytepohjasikala 8	NR-ristikoiden naulalevyissä paljon valkoruostetta. Eristekerroksen pinnalla näkyvissä katapultista valuvan kondenssiveden tippumisjäljet. Ontelotilan tuuletus puutteellinen.
Emakkosikala 9	Yläpohjan ontelon tuuletus hyvin järjestetty. Tuuletusrako räystäällä noin 100 mm.

Kuvassa 5 esitetään leikkaus lihasikala 7:n ullakko-ontelosta ja mitatut puurakenteiden kosteudet. Kuvassa 6 on esimerkki naulalevyjen valkoruosteesta pihatosta 6, ja kuvassa on 7 on sisäkaton pinnan homekasvua pihatossa 4.



Kuva 5. Leikkaus lisäsikala 7:n ullakko-ontelosta. Kuvassa on piikkikosteusmittarilla puusta mitatut puun kosteuspitoisuudet. Viisi vuotta käytössä olleen rakennuksen sahapuru-kutterilastueriste näytti puhtaalta. Eristekerroksen sisässä olevat ristikoiden alapaarteet, vinosauvojen osat ja naulalevyt olivat kuin uusia. Eristekerroksen yläpuolella naulalevyissä oli lievää valkoruostetta ja meistopinnoilla esiintyi paikoin ruostetta. Eläintilan kattopaneloinnin kosteus oli korkea.



Kuva 6. Naulalevyssä olevaa valkoruostetta – rakennus on työmaavaiheessa (Pihatto 6).



*Kuva 7. Hometta katon sisäpinnassa (Pihatto 4).*

### **2.3 Päätelmät olosuhdeselvityksistä**

NR-ristikoiden naulalevyissä havaittu ns. valkoruoste on valkeaa sinkkihydroksidia  $Zn(OH)_2$ . Sinkkioksidi-hydroksidikerros on tilava, huokoinen ja huonosti kiinni sinkin pinnassa. Näin ollen se ei kykene suojaamaan sinkin pintaa vedessä olevan hapen vaikutukselta. Siksi korroosioprosessi voi jatkua niin kauan kuin pinnoilla on kosteutta. Kun pinnat pääsevät kuivumaan, syöpyminen lakkaa ja ilman päästessä vapaasti sinkin pinnalle muodostuu korroosiotuotteista normaali suojakerros [11].

Valkoruostetta syntyy naulalevyn pinnalle, jos naulalevy on kosteissa, tuulettomatoissa olosuhteissa. Käytännössä valkoruostetta voi syntyä levyihin jo ristikoiden varastointivaiheessa, mikäli ristikot ovat tiiviissä nipussa ja kosteudelle alttiina. Toinen mahdollinen syy valkoruosteen syntymiselle on tuulettumaton ja kostea yläpohjan ontelotila. Olosuhdeselvityskohteissa ainakin pihatto 6:n tapauksessa valkoruoste (kuva 6) on muodostunut ristikoiden varastointivaiheessa, sillä kyseinen pihatto oli mittauksien

alkaessa vielä rakennusvaiheessa. Muissa kohteissa ei voida olla varmoja siitä, missä vaiheessa valkoruoste on syntynyt levyn pinnoille.

Voidaan kuitenkin todeta, että ontelotilojen huono tuulettuminen ja mahdollinen sisätilan kosteuden kulkeutuminen ontelotilaan luovat suotuisat olosuhteet valkoruosteen syntymiselle. Toisissa kohteissa oli valkoruostetta havaittavissa myös katon sekundäärien kiinnityksessä käytetyissä sinkityissä lankanauloissa. Tämä on merkki ontelotilan huonosta tuuletuksesta. Kohteessa täytepohjasikala 8 korvausilma otetaan ontelotilasta ja tietyissä olosuhteissa (esimerkiksi silloin, kun ovet ovat auki täytenpurun vaihdon tai lisäämisen vuoksi) ilman kulkusuunta kääntyy päinvastaiseksi eli sisätilasta virtaa kostea ilma ontelotilaan.

Tehdyistä havainnoista voidaan vetää sellainen johtopäätös, että ontelotilan tuulettumiseen ja höyrönsulkuun ei kiinnitetä riittävästi huomiota suunnitteluvaiheessa. Muut merkittävät havainnot eli homepilkut ja kondensoituminen taas kertovat sisätilan liian korkeasta suhteellisesta kosteudesta. Havainnot tukevat mittaustuloksia. Runsaimmin homepilkustoa esiintyi kohteessa pihatto 5, jossa katon sisäpintana oli maalattu vaneri. Vaneri oli valittu sisäpinnan materiaaliksi rakenteellisista syistä, sillä vanerilevykenttä toimii rakennuksen jäykistävänä osana. Muissa kohteissa katon sisäpinnan materiaali oli joko ALU-peltiä tai lautaverhousa.

Kun sisätilan olosuhteiden merkitystä tarkastellaan rakenteiden kestävyuden kannalta, voidaan esittää raja-arvot, joissa sisäilman lämpötilan ja kosteuden kuuluisi olla, jotta puurakenteisiin ei syntyisi laho- tai homevaurioita. Lähteessä [12] esitetään homeen ja lahon syntymiselle taulukon 3 mukaiset edellytykset.

*Taulukko 3. Homeen ja lahon syntymisen edellytykset [12].*

	Home	Laho
RH (%)	> 75–95	> 90–95
C (°)	0–55	5–50
T (vaikutusaika)	vrk – vko – kk	vko – kk – v

Ongelmien kehittymiseen ja puun säilyvyyteen vaikuttavat olennaisesti sekä kosteus ja lämpötila että niiden vaikutusaika. Homeen kehittymiseen tarvittava ilman suhteellinen kosteus on alempi ja vaikutusaika huomattavasti lyhyempi kuin vastaava lahon kehittymiseen tarvittava aika. Laho kehittyy lähinnä vain silloin, kun ilman suhteellinen kosteus on hyvin pitkään yli 95 % ja puun kosteus lähellä puun syiden kyllästymispistettä (puun kosteus 25–30 %). Ilman alle 90–92 %:n suhteellisessa kosteudessa lahon kehittä-

tymistä ei ole havaittu otollisissakaan lämpötiloissa. Olosuhteiden vaihtelevuudella on merkittävä vaikutus homesienien kehittymiselle [12].

Taulukkoon 4 on koottu eri kohteiden vuotuisia olosuhdetietoja. Erilaisten olosuhteiden kesto esitetään prosentteina vuotuisesta ajasta. Eri olosuhteet on jaoteltu seuraavasti :

Olosuhde	RH (%)	t (°C)	Huom.
A	≥ 90	≥ 20	Vastaa olosuhteita, jotka hyvin pitkään jatkuessaan mahdollistavat lahon synnyn.
B	≥ 90	≥ 15	
C	≥ 80	≥ 20	Vastaa olosuhteita, jotka jatkuessaan mahdollistavat homeen synnyn.
D	≥ 80	≥ 15	

*Taulukko 4. Tutkittujen kohteiden olosuhteiden jakaantuminen erilaisiin olosuhdeluokkiin ajan perusteella. Taulukon luku kertoo prosentteina, kuinka suuri osuus ajasta kuuluu kyseiseen olosuhdeluokkaan. Taulukon olosuhdeluokat: A (RH ≥ 90 % ja t ≥ 20 °C), B (RH ≥ 90 % ja t ≥ 15 °C), C (RH ≥ 80 % ja t ≥ 20 °C) ja D (RH ≥ 80 % ja t ≥ 15 °C). Taulukossa n (kpl) on mittaushavaintojen lukumäärä ja t (vrk) mittauksen kestoai-ka. Tummennetut arvot edustavat vaativimpia olosuhteita.*

Kohde	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	n (kpl)	t (vrk)
Pihatto 1	2,4	9,5	11,7	<b>52,8</b>	8748	365
Pihatto 2	0,9	<b>31,1</b>	4,1	<b>52,2</b>	8712	363
Pihatto 3	0,5	0,6	14,4	<b>60,7</b>	8721	364
Pihatto 4	0,1	0,2	3,1	15,8	3279	342
Pihatto 5	0,7	3,5	2,2	21,1	7757	323
Pihatto 6	0,0	0,1	0,3	6,2	7616	317
Täytepohjasikala 7	<b>6,8</b>	<b>15,5</b>	<b>29,2</b>	<b>63,0</b>	8689	362
Täytepohjasikala 8	0,2	1,3	5,9	22,0	8689	362
Emakkosikala 9	0,0	0,0	0,0	0,0	8689	362

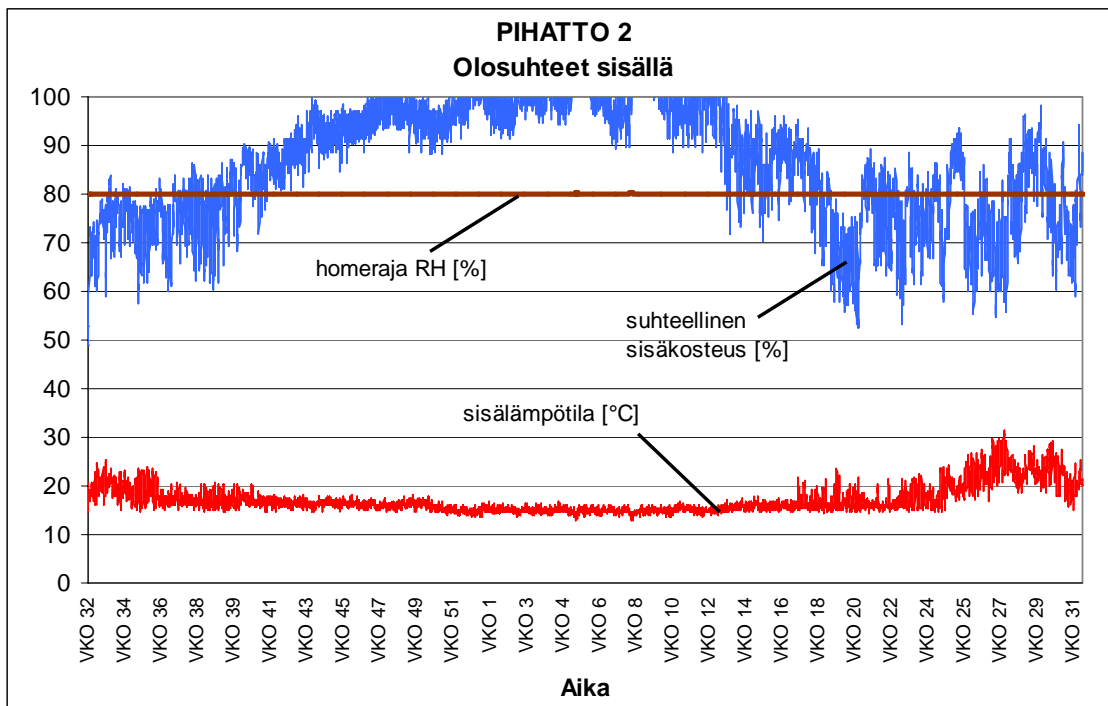
Emakkosikalan olosuhteet poikkeavat muista seurantakohteista selvästi. Taulukon tummennetut arvot edustavat puurakenteiden säilyvyyden kannalta kriittisiä olosuhteita. Taulukosta voidaan vetää mm. seuraavat johtopäätökset:

- Lahoriskiä ei ole missään seurantakohteessa, jos luetaan pois paikalliset lahovauriot, jotka aiheutuvat esimerkiksi väärästä rakenteiden detaljisuunnittelusta.

- Homeriski on mahdollinen vähintään puolessa kohteissa (tummennetut arvot).

Homeen synnylle on olennaista myös kasvualusta, esimerkiksi kohteessa pihatto 5 rakenteissa (maalattu vaneri) havaittiin homepilkkuja ja vastaavasti muissa kohteissa ei tehty merkittäviä homehavaintoja. Kuitenkaan taulukon 4 perusteella pihatto 5 ei kuuluisi riskiryhmään.

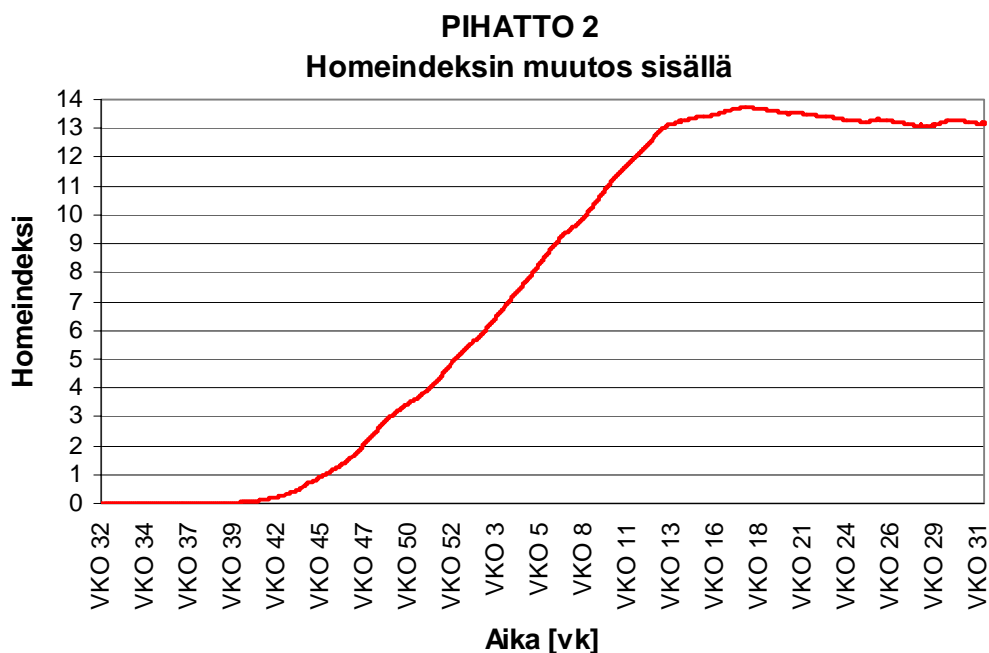
Lähteessä [12] on esitetty malli ja rajaolosuhteet homeen kasvuun muuttuvissa olosuhteissa. Kuvassa 8 esitetään kohteen 2 suhteellisen kosteuden homekasvun raja. Kuvan tapauksessa homeraja on kaiken aikaa noin 80 %, koska lämpötila pysyttelee korkeana.



Kuva 8. Pihaton 2 sisäilman olosuhteet ja suhteellisen kosteuden raja, jonka yläpuolella homekasvu on mahdollista.

Lähteen [12] mallissa homeen määrää kuvataan homeindeksillä  $M$ . Suosiolliset homeolosuhteet kasvattavat indeksiä ja kuivat jaksot pienentävät indeksiä. Menetelmässä homeindeksin mukainen homeen määrä on seuraava: 0 = ei kasvua, 1 = mikroskoopilla havaittavaa kasvua, 2 = selvä mikroskoopilla havaittava kasvu, 3 = ensimmäiset visuaaliset havainnot, 4 = selvä silmin havaittava kasvu, 5 = runsas silmin havaittava kasvu, 6 = erittäin runsas kasvu.

Kuvassa 9 esitetään homeindeksin  $M$  muutos lähteen [12] mukaisella menetelmällä laskettuna. Lähtötilanteena laskelmassa on käytetty homeetonta ( $M = 0$ ) tilannetta. Laskelman mukaan kyseisissä olosuhteissa (pihatto 2) on erittäin runsasta homeen kasvua. Homeindeksi ylittää nopeasti erittäin runsaan kasvun rajan (= 6).



Kuva 9. Pihaton 2 sisäilman homeindeksin  $M$  ( $3 =$  silmin havaittavaa kasvua,  $6 \geq$  erittäin runsasta kasvua) kehittyminen mittausaikana.

Ilmanvaihdon toimivuudella on suurin merkitys sisätilan olosuhteisiin. Merkittävä havainto ovat täytepohjasikaloiden 7 ja 8 erot sisätilan olosuhteissa. Näissä kohteissa ilmanvaihtojärjestelmät vastaavat muutoin toisiaan, paitsi kohteessa 8 on lisäksi ns. itkupintajärjestelmä, jolla saadaan sisätilan kosteutta pienemmäksi. Erot mittaustuloksissa ovat huomattavat.

Mittauksien perusteella parhaimmat olosuhteet sisätiloissa ovat kohteissa pihatoissa 4 ja 6. Molemmissa kohteissa sisäkatto on lappeen suuntainen ja pihatot ovat sisätiloiltaan korkeita ja avaria. Näin tehtynä saadaan rakennuksen sisätilavuus huomattavasti suuremmaksi kuin tavanomaisissa vaakasuoran sisäkaton ratkaisuissa. Koska tilaan mahtuva eläinmäärä on riippuvainen vain lattiapinta-alasta, korkean sisätilan rakennuksissa yhtä eläintä kohti oleva ilmatilavuus on huomattavasti suurempi kuin tasaisen sisäkaton rakennuksissa. Tällä on edullinen vaikutus sisätilan olosuhteisiin.

Kohde pihatto 6 poikkeaa myös ilmanvaihtojärjestelmän kannalta muista kohteista. Pihatossa on ns. harjailmanvaihto, jossa tuloilma otetaan rakennuksen seinälinjojen yläreunoissa olevien aukkojen kautta ja ilma poistuu harjalla olevien aukkojen kautta. Aukkojen kokoa säädellään tuuliolosuhteiden mukaan. Erillistä koneellista ilmanvaihtoa ei ole. Kohteessa on ns. kuiva lannankeräysjärjestelmä, jolla on myös alentava vaikutus sisätilan ilman kosteuteen.

Olosuhdeselvityksistä ja tarkastuksista voidaan vetää seuraavat johtopäätökset:

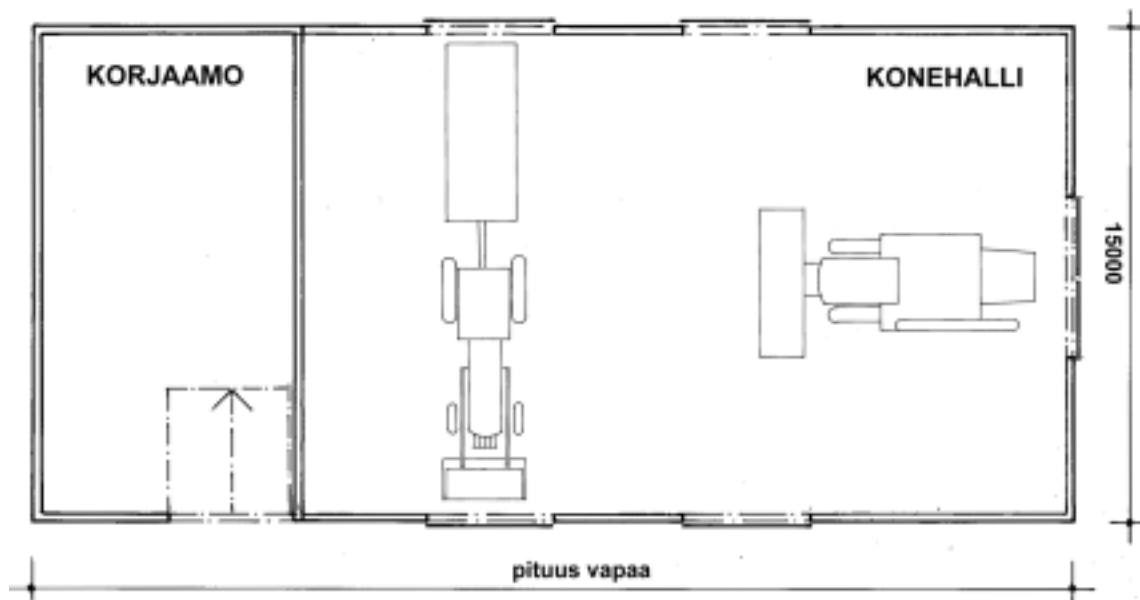
- Sisäilmaolosuhteet eivät aiheuta puurakenteiden lahoriskiä.
- Navetoissa ja sikaloissa, joissa on kostea ja riittävän lämmin sisäilma, on merkittävä homeriski. Hometta ei ole kuitenkaan aina havaittavissa, koska se sekoittuu pölyyn ja likaan.
- Homehtumisherkkyyteen vaikuttavat osittain sisäpintojen materiaalit. Pinnan materiaalit on valittava olosuhteiden perusteella. Vähän orgaanista materiaalia ja siten huonoimman kasvualustan sisältävät pinnat homehtuvat huonoimmin. Tällainen pinta on esimerkiksi pelti. Kuitenkin kaikki pintamateriaalit ovat sopivia, jos olosuhteet ovat riittävät kuivat ( $RH < 85 \%$ ).
- Ullakkotilojen tuuletuksessa ja höyrynsuluissa on usein puutteita. Huono tuuletus saa aikaan kondensoitumista, homekasvua ja sinkittyjen teräsosien valkoruostetta. Jos ullakon ontelotilojen tuuletus on riittävä, ullakossa ei ole kosteusongelmia.
- Hyvällä ilmanvaihdolla saadaan kaikissa tapauksissa ilman kosteus pienemmäksi ja olosuhteet paremmiksi. Ilmanvaihdon puutteellisuus on merkittävin syy sisäilman kosteuteen ja kosteusvaurioihin. Myös erilaiset ilman kosteutta alentavat järjestelmät, esimerkiksi itkupintajärjestelmä, ovat hyödyllisiä.
- Korkea sisätila parantaa mahdollisesti sisäilman olosuhteita. Tutkituissa kohteissa sisäilman kosteus-, lämpö- ja kaasukonsentraatioarvot olivat parhaimmat korkean sisätilan pihatoissa. Tämä tutkimus ei kuitenkaan selitä tarkemmin sitä, mistä tämä johtuu. Asian selvittämiseksi tarvitaan lisätutkimuksia laajemmasta otannasta.
- Puurakenteille optimaaliset olosuhteet ovat likimain samoja kuin työntekijöille ja eläimille. Laho-, home- ja korroosio-ongelmia ei synny, jos ilman suhteellinen kosteus on suurimman osan vuodesta alle 80 %.



## 3. Toiminnalliset pohjaratkaisumallit

### 3.1 Konehallien pohjaratkaisut

Konehallien uuden puurunkokonseptin lähtökohdaksi on otettu 15 m:n jännevälivaatimus. Sen mitoituksellisena perusteena on suuri traktori ja siihen kytketty kauhakuormaaja sekä peräkärri, joiden tulee yhtäaikaaisesti mahtua halliin. Kuvassa 10 on periaatepiirustus konehallista. Ovien leveyden tulee olla 3,6–4 m sekä korkeuden vähintään 4 m. Päädyissä voidaan tarvita ovikokoa 5 x 5 m suurimpia leikkuupuimureita varten.



Kuva 10. Konehallin pohjaratkaisumalli.

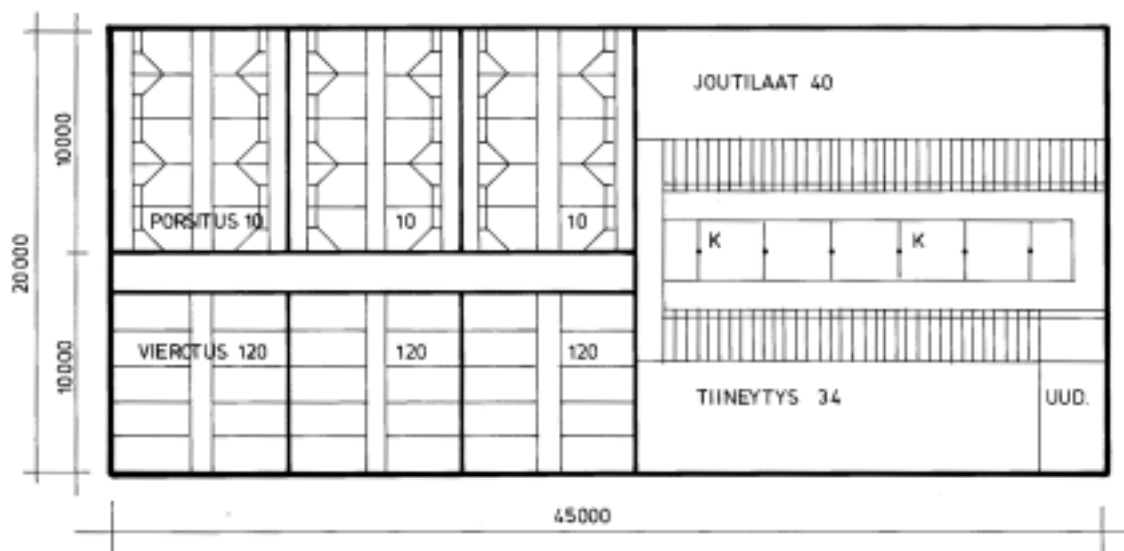
Konehallin toiminnallisuuden kannalta suunnittelussa pitää varautua siihen, että oviaukkoja voidaan tehdä vapaasti haluttuihin seinän kohtiin. Rakennusratkaisuissa on varauduttava myös siihen, että osa hallia voidaan lämpöeristää esimerkiksi koneiden huolto- ja korjaustilaksi. Käyttötarpeiden muuttuessa on varauduttava myös koko hallin lämpöeristämiseen.

### 3.2 Sikaloiden pohjaratkaisut

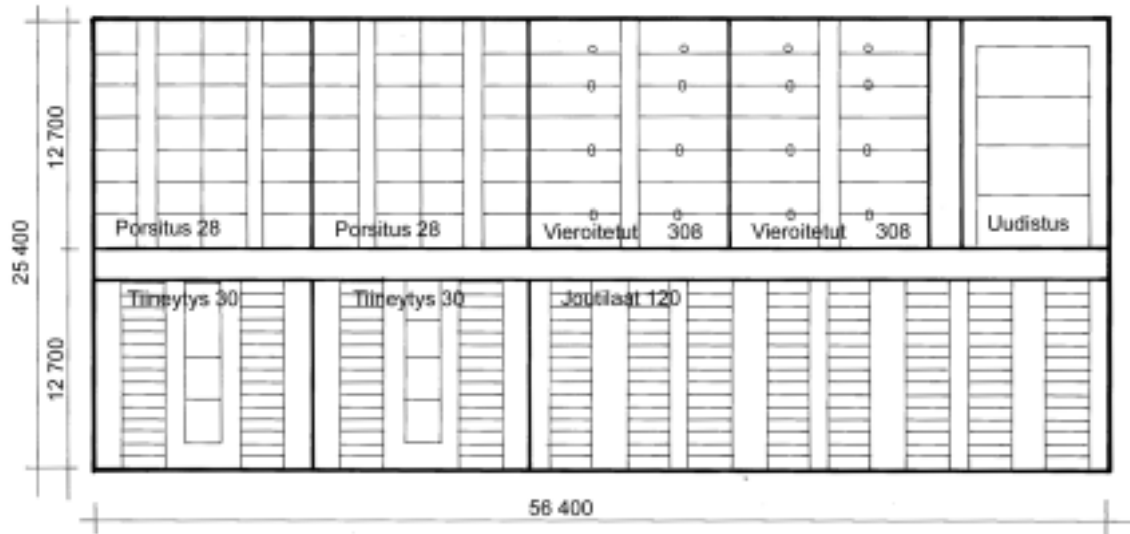
Sikaloiden toiminnalliset mallit hahmotettiin perheviljelmän kokoluokkiin, joissa porssasikala on 100- tai 200-paikkainen ja lihasikala noin 1 000-paikkainen. Sikalamalleissa haluttiin keskittyä monistettavaan ja modulaarisesti – vaiheittain tai yksiköittäin – laajennettavaan rakennustyyppiin.

Sikaloiden pohjamalleissa on keskitytty suurten linjojen ratkaisuihin, jotta rakennukseen soveltuva, toistuva rakennejärjestelmä saataisiin esiin. Pohjamalleissa ei ole menty detaljitasolle, ja esimerkiksi aputilojen, kuten toimisto- ja pukutilojen sekä rehu- ja teknisten tilojen, sijoittelu on ajateltu tapahtuvaksi päämassan sivuun tai päätyyn siten, että sen sijoittelu ei estä päärakenteen laajentamista pituussuuntaan.

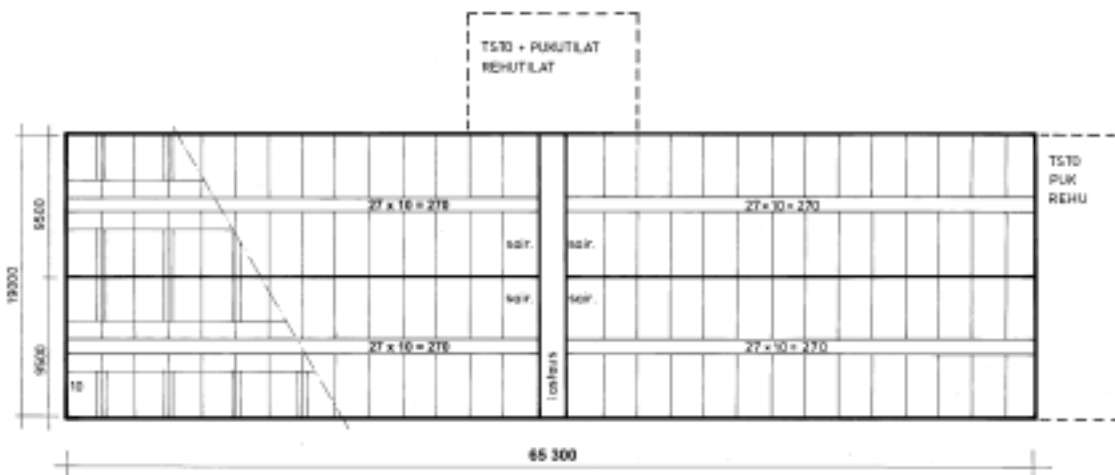
Kuvissa 11 ja 12 esitetään 100- ja 200-paikkaisten emakkosikaloiden pohjaratkaisut sekä kantaville ja jäykistäville pystyrakenteille mahdolliset paikat. Kuvissa 13 ja 14 ovat vastaavat ratkaisut 1 000-paikkaisille lihasikaloille.



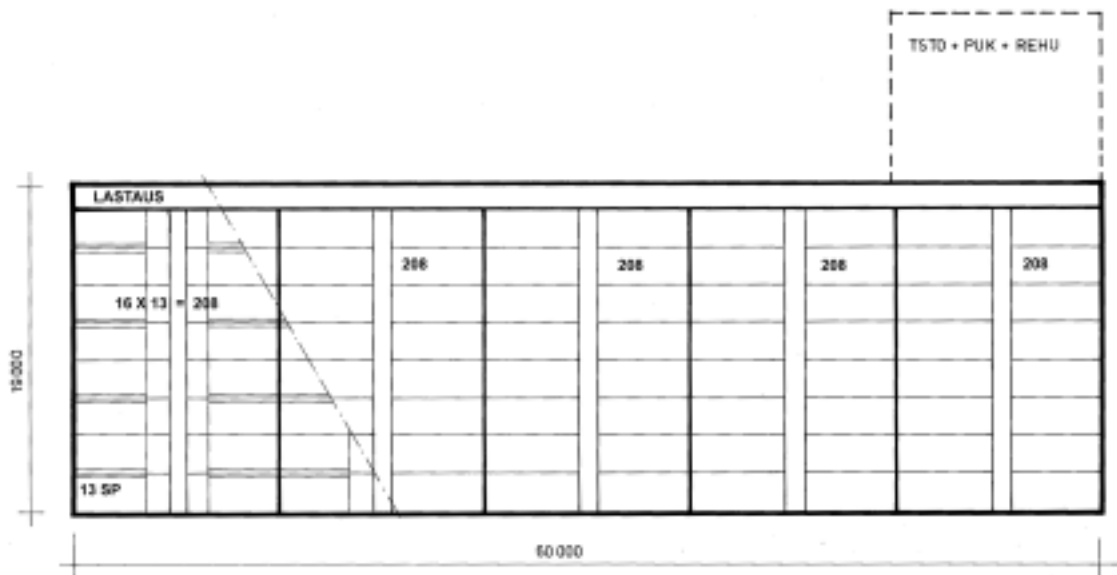
Kuva 11. 100-paikkainen emakkosikala; rakennuksen leveys on 20 m ja kerrosala 900 krs-m<sup>2</sup>. Eläinryhmät on osastoitu kiintein väliseinin. Tässä mallissa joutilaat ja tiineytys on sijoitettu pihattoon, jonka rakenteena on kolminivelkehä (sisätila korkea). Sama rakenne voi jatkua porsitus- ja vieroitusosastolla, mutta jos sisäkatto halutaan tehdä vaakasuorana, on eriste sijoitettava lasketun katon tasoon.



Kuva 12. 200-paikkainen emakkosikala; rakennuksen leveys on 25,4 m ja kerrosala 1 432 krs-m<sup>2</sup>. Eläinryhmät on osastoitu kiintein väliseinin. Rakennuksen pituussuuntainen keskiseinä voi olla kantava ja samalla palo-osastoiva seinä. Kantavana rakenteena käytetään välituellista kolminivelkehää, jossa välitukena on kantava seinä. Pelkästään toisen puolen sisäkaton ollessa kalteva voidaan käyttää palkki+ristikko-rakennetta.



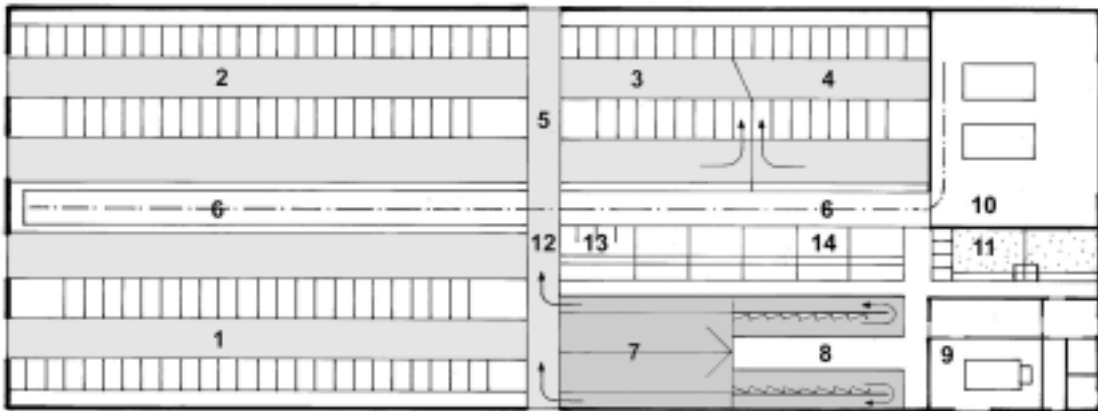
Kuva 13. 1 080-paikkainen lihasikala ja kerrosala 1 240 krs-m<sup>2</sup>. Toiminnallisuus perustuu keskikäytäväratkaisuun, jolloin rakennuksen keskilinjan pituussuuntainen seinä voi toimia kantavana seinänä tai linjana. Poikittainen keskiseinä voi toimia palo-osastoivana seinänä. Rakenteena voidaan käyttää kolminivelkehää joko korkeana sisätilana tai vaakasuoralla alakatolla. Toinen rakennukseen sopiva rakenne on puisella vetotangolla varustettu ansarakenne, jossa vaakasuora ja samalla eristetty katto syntyy luontevasti alapaarteena toimivan vetotangon tasoon. Lietelantaratkaisussa lietekanavat ovat rakennuksen pituussuunnassa, jolloin alapohjan raudoitus kolminivelkehän perustusten vaakakuormia varten on hankala kanavien vuoksi.



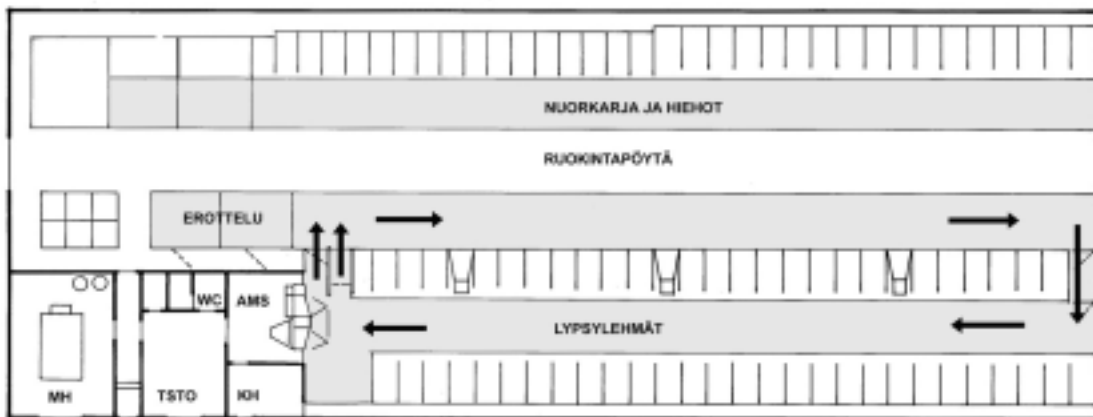
Kuva 14. 1 040-paikkainen lihasikala; rakennuksen leveys 19 m ja kerrosala 1 140 krs-  
m<sup>2</sup>. Toiminnallisuus perustuu nk. sivikäytäväratkaisuun, jolloin rakennuksen keskilin-  
jalla ei ole pituussuuntaista seinää. Rakenteena voidaan käyttää kolminivelkehää kor-  
keana sisätilana tai vaakasuoralla alakatolla. Toinen rakennukseen sopiva rakenne on  
puisella vetotangolla varustettu ansarakenne, jossa vaakasuora ja samalla eristetty  
katto syntyy luontevasti alapaarteena toimivan vetotangon tasoon. Lietelantaratkaisus-  
sa lietekanavat ovat rakennuksen poikittaissuunnassa, jolloin alapohja voidaan helposti  
raudoittaa kolminivelkehän perustusten vaakakuormia varten.

### 3.3 Lypsykarjapihattojen pohjaratkaisut

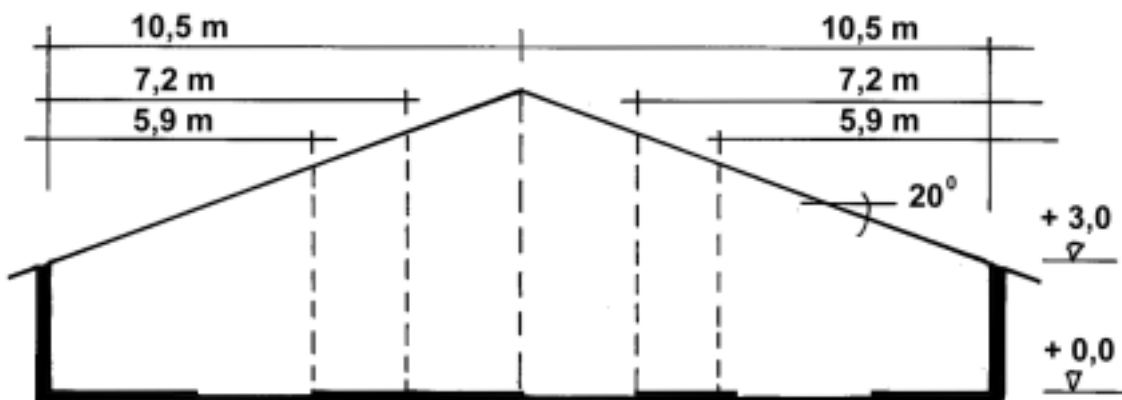
Kuvissa 15 ja 16 esitetään 2+2- ja 2+1-rivisten pihattojen pohjaratkaisut. Kantavana  
rakenteena voidaan käyttää kolminivelkehää, vetotangollista liimapuukehää tai kolmi-  
laivaista liimapuupalkkihallia. Kolmilaivaista liimapuupalkkihallia käytettäessä välipila-  
rit voidaan sijoittaa kuvan 17 mukaisiin kohtiin.



Kuva 15. 2+2-rivinen pihatto 84 lypsylehmälle sekä nuorkarjalle. Rakennuksen leveys on 21–23 m, kun ruokinta tapahtuu jakosukkulalla kapealle pöydälle.



Kuva 16. 2+1-rivinen pihatto 60 lypsylehmälle sekä nuorkarjalle. Rakennuksen leveys on 19 m, kun ruokinta tapahtuu apevaunulla leveälle ruokintapöydälle.

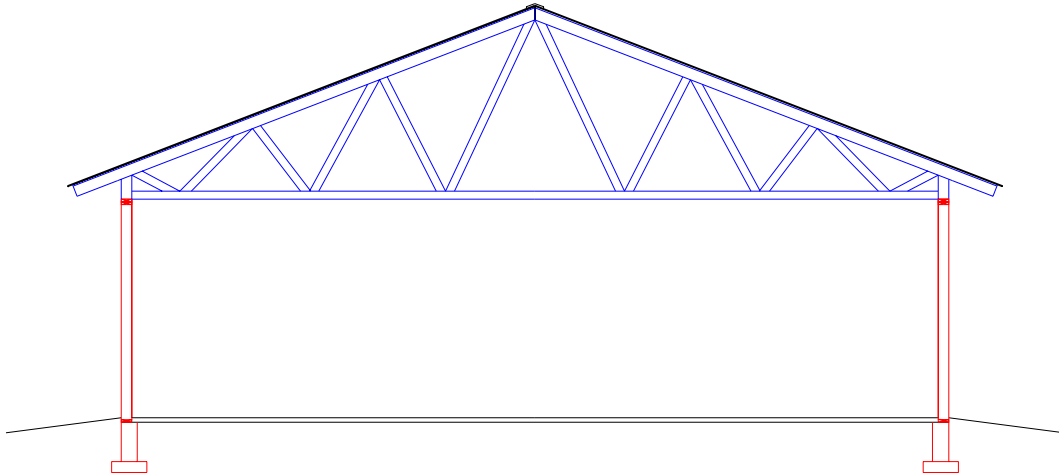


Kuva 17. Lypsykarjapihatossa pilareiden sijoitukselle on useita vaihtoehtoja kehän suunnassa. Rakennuksen pituussuuntainen moduuli on tyypillisesti 1,2 m:n kerrannainen.

## 4. Maatalousrakennusten tyyppirakenteet

### 4.1 Nykyisin käytetyt rakennetyypit ja niiden kehitystarpeet

#### 4.1.1 Konesuojahalli



*Kuva 18. Konesuojahallin poikkileikkaus.*

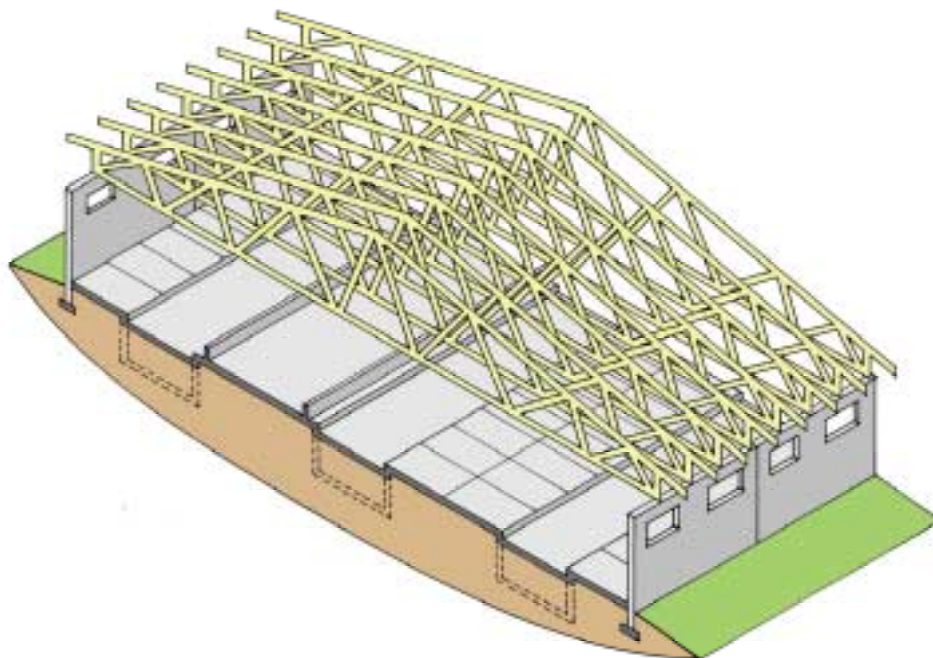
Nykyään yleisesti käytettävä konehallikonsepti (kuva 18) on seuraavanlainen:

- kantava rankaseinä, k-jako 600 mm
- yläpohjassa naulalevyristikot, k-jako 900–1 200 mm
- tavallinen jänneväli noin 12 m, mitta vaihtelee tarpeen mukaan
- korkeus määrittyy yleensä oviaukon mukaan, ovikorkeus 3,5–4 m
- ovien ja ikkunoiden sijoittelu on vapaa, kantavalla seinällä aukon päällä palkit, isojen ovien leveys 3–4 m
- yleensä hallin toinen pää on tehty (eristetty) konekorjaamoksi
- kattokulma vapaasti valittavissa, yleensä 14–22 astetta
- taloudellinen tapa tässä kokoluokassa.

Käytetyn rakennustyyppin haittapuolia ovat:

- Koneiden koon kasvamisen myötä on tarvetta leveämmälle rakennukselle.
- Sivuseinien ovi- ja ikkuna-aukkojen päällä pitää olla palkki.
- Jäykistys on ongelmallista, varsinkin pitkissä halleissa.
- Jatkaminen on vaikeaa, jos päätyseinä on jäykisteseinä.
- Asennusaikainen rungon ja NR-ristikoiden tuenta ja jäykistäminen ovat vaativia ja aikaa vieviä työvaiheita.

#### 4.1.2 Lypsykarjapihattojen ja sikaloiden rakenteet



*Kuva 19. Yleisesti käytetty lypsykarjapihatoiden ja sikaloiden rakennuskonsepti.*

Kuvassa 19 on yleisesti käytetty lypsykarjapihatoiden ja sikaloiden rakennuskonsepti. Siinä katon kantavana rakenteena on naulalevyristikko, joka tukeutuu kantaviin seiniin. Kantavat seinät ovat betonielementtejä tai puurakenteisia. Yläpohjan eristeenä on yleensä puhallusvilla tai mineraalivilla ja vesikatteenä tavallisesti värillinen profiilipelti.

Sikaloissa voi olla myös yksi tai useampi väliseinä. Tällöin ne ovat kantavia ja ristikon jännevälit ovat lyhyempiä.

Käytetyn rakennuskonseptin haittapuolia ovat:

- Kyseistä rakennuskonseptia on käytetty aikaisemmin pienemmissä rakennuksissa. Rakennusten koko on kuitenkin viime vuosina kasvanut. Suuremmissa rakennuksissa ei voida kuitenkaan käyttää sellaisenaan samanlaisia rakenneratkaisuja – jäykistevoimat kasvavat toisessa potenssissa.
- Pitkät jännevälit vaativat kestävyuden takia korkean ristikon. Tästä rakennusratkaisusta syntyy tilavuudeltaan muhkeita ullakko-ontelotiloja, jotka suurissa rakennuksissa tulee paloteknisesti osastoida 400 m<sup>2</sup>:n osiin.
- Pitkissä rakennuksissa rakennuksen poikittainen jäykistys kaatavaa tuulikuormaa vastaan on ongelmallista.
- Jäykistävät päätyseinät hankaloittavat myöhempää laajentamista.
- Kattorakenteissa on stabiiliteettiongelmia. Isot ristikot vaativat kunnolliset koko ristikon ja puristussauvojen tuennat. Ristikot ja niiden yläpaarteet on asennettava aivan suoraan.
- Asennusaikainen rungon ja NR-ristikoiden tuenta ja jäykistäminen ovat vaativa ja aikaavievä työvaihe. Erillinen asennussuunnitelma tulee laatia aina, jos NR-ristikon jänneväli on yli 12 m. Pitkien ristikoiden nostaminen on vaikeaa; ne eivät saa vääntyä nostoissa. Erillistä nostopalkkia on käytettävä aina, jos ristikon pituus on yli 18 m.
- Naulalevyristikoilla ei ole palonkestävyyttä. Mahdollisessa ullakkopalossa katto sortuu 5–10 minuutin kuluttua siitä, kun palo on alkanut.
- Vaakasuora sisäkatto ei ole kaikissa tapauksissa ilmanvaihdon kannalta paras mahdollinen, varsinkin kun rakennuksen leveys on suuri.
- Puutteellisesti tuuletettujen yläpohjien ja/tai vuotavien höyrynsulkujen tapauksissa naulalevyt ruostuvat.
- Laajat ullakkotilat aiheuttavat myös rakennuksen ulkonäköhaittoja.
- Rakenne on mielikuvitukseton ja rakenteen soveltaminen erilaisiin tapauksiin ja vaatimuksiin on vaikeaa.



## 4.2 Uudet konesuojahallien tyyppirakenteet

### 4.2.1 Uusien rakennetyyppien tavoitteet

Uusien konesuojahallien puurakenteille asetetut vaatimukset:

- jänneväli noin 15 m, pituus vaihtelee tarpeen mukaan
- korkeus määrittyy yleensä ovien mukaan, ovikorkeus oltava vähintään 4 m
- ovien ja ikkunoiden sijoittelu rakenteiden ehdoilla, ovileveys vähintään 4 m, päädyssä 4–5 m
- kattokulma vapaasti valittavissa, yleensä 14–25 astetta.
- rakenteiden sopivuus teolliseen esivalmistukseen
- nopeasti koottava
- teknisiltä ominaisuuksiltaan toimivia ja turvallisia
- edullisempia kuin kilpailevat teräs- ja betonirakenteet.

Tutkimuksessa kehitettiin seuraavat uudet konehallien rakennetyypit:

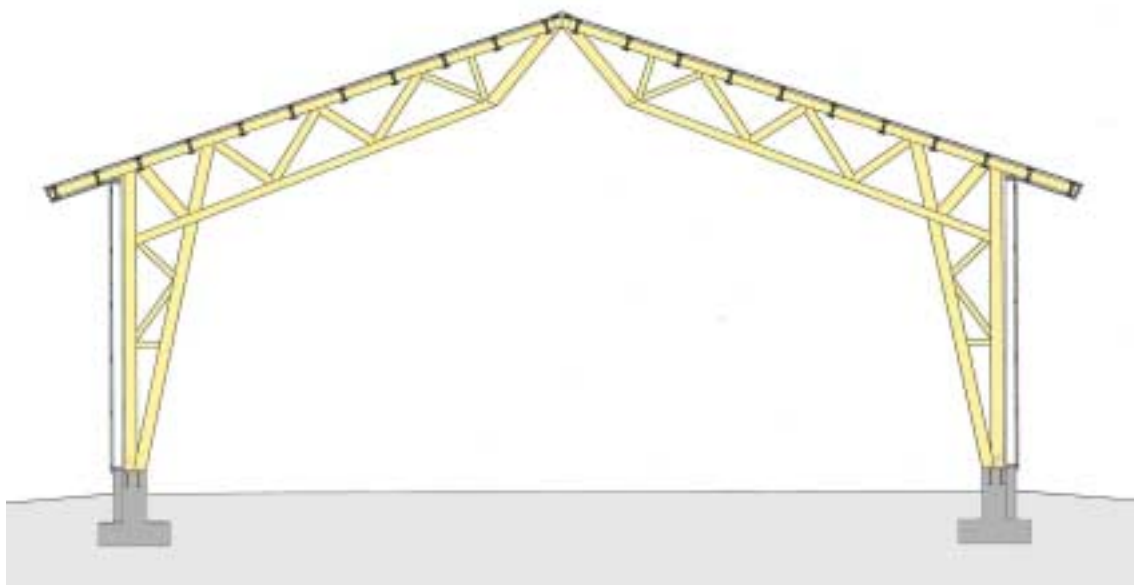
- NR-kehähalli
- Post-Frame-kehä.

### 4.2.2 NR-kehähalli

Rakenne on kolminivelkehä, joka koostuu 2–4:stä rinnakkaisesta yhteen naulatusta tai ruuvatusta 42–48 mm paksusta naulalevyristikosta. Pääkannatin tuodaan kahdessa osassa työmaalle ja asennetaan paikalleen. Hallin pääkannattimen puoliskot voidaan myös tuoda useampina osina työmaalle. Tällöin kehän puoliskot kootaan valmiiksi työmaalla ja asennetaan paikalleen. Tyypillinen kehän k-väli on 4 800 mm. Kehän k-välin pitää olla niin suuri, että ovi mahtuu kehien väliin.

Pääkannattimen mitoituksen tekee NR-suunnittelija annettujen lähtötietojen perusteella. NR-suunnittelija vastaa rakenteen tason suuntaisesta stabiliteetista ja määrittelee rakenteen vaatimat poikittaistuennat. Kuvassa 20 esitetään NR-kehähallin rakenneperiaate, ja kuvassa 21 valmis halli.

Poikittaistuentoja vaativat rakenteen ylä- ja alapaarteiden puristetut osat sekä mahdollisesti puristetut uumasauvat. NR-kehien mitoituksessa pyritään kuitenkin siihen, että uumasauvat eivät vaatisi nurjahdustukia.



*Kuva 20. NR-kehähallin rakenneperiaate.*

Kattosekundääreinä voivat toimia liimapuu-, kertopuu- tai PI-palkit [18]. Vesikatteena on profiilipelti. Mahdollinen lämmöneristys voidaan sijoittaa sekundääripalkkien uumutilaan. Seinät ovat sahatavararunkoisia, paikalla tehtyjä tai elementtejä.

Rakennuksen pituussuuntainen jäykistys hoidetaan yläpohjan profiilipellillä ja ulkoseinälinjojen (nurkka-alueiden) vinoreivauksilla.

Hallissa on yleensä maanvarainen teräsbetoni-laatta. Kehärakenteen vaakatuivoimat voidaan siirtää tarvittaessa lattiarakenteelle.



*Kuva 21. Valmis NR-kehähalli.*

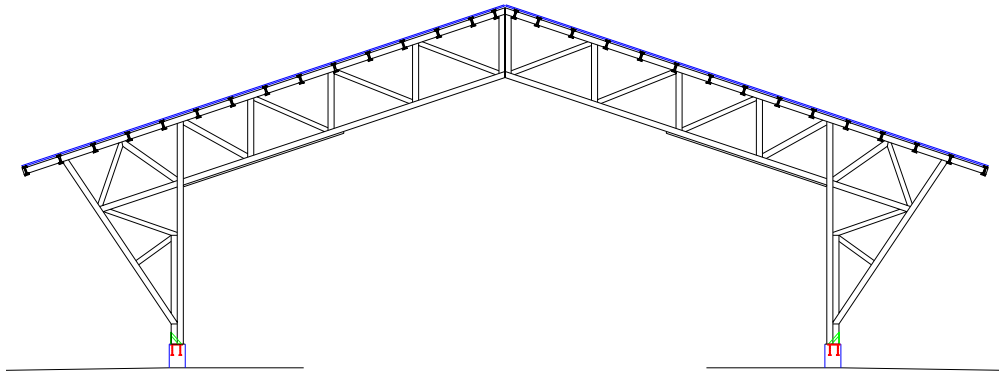
Rakenteen edut verrattuna perinteisiin rakenteisiin:

- suurempi hyödynnettävä korkeus; tila on avarampi
- oviaukkojen vapaa sijoittelu kehien väliin; erillisiä aukkopalkkeja ei tarvita
- hallin poikittainen jäykistys hoituu itse rakenteella
- rakennuksen jatkamisen helppous; päätyseinässä ei tarvita jäykisteitä

Rakenteen huonot puolet:

- Kehän kohdalle ei voi tehdä oviaukkoa; siihen ei ole kuitenkaan yleensä tarvetta.
- Seinäpinta ei ole suora. Tämä vähentää hyötypinta-alaa ja lisäksi kaltevaan kehän paarteeseen saattaa törmätä työkoneella.
- Perustukset tai lattiarakenteen raudoitus pitää mitoittaa vaakavoimille.

Kuvassa 22 on vaihtoehtoinen kehämalli, jossa seinän sisäpinta on suora. Tämä malli edellyttää sitä, että seinä ulkopinta on vastaavasti ylöspäin levenevä, jolloin rakennuksen sivulle saadaan 3–4 m leveät sadesuojakatokset.



*Kuva 22. Esimerkki vaihtoehtoisesta NR-kehästä.*

### 4.2.3 Post-Frame-halli

Post-Frame-rakennuksen runkojärjestelmä on pilaripalkkisysteemi. Tämä maatalousrakentamiseen kehitetty rakentamistapa on peräisin Pohjois-Amerikasta. Post-Frame-rakennuksen perusosat ovat mastopilari, ristikkokannatin ja jäykistävä kate.

Pilari, joka lähtee maan alta anturan päältä, on koottu kyllästetyistä soiroista. Pääkannattimena käytetään NR-ristikkoja, ja jäykistävä rakenne on katon profiilipelti. Pilari on kiinnitetty jäykästi perutuksiin. Kuvassa 23 esimerkki Post-Frame-rakennuksesta.



*Kuva 23. Post-Frame-rakentamista Yhdysvalloissa.*

Perustus tehdään kaivamalla maahan routarajan alapuolelle kaivanto, jonka pohjalle pilariantura valetaan. Puupilari valetaan betonianturan sisään. Mikäli maaperä ei ole kivistä, kannattaa käyttää maakairaa. Näin täyttö jää mahdollisimman pieneksi ja samalla perusmaan häiriintyminen minimoidaan. Peruskaivanto tai reikä täytetään ja tiivistetään huolellisesti.

Täyttömateriaalina voidaan käyttää betonia, sepeliä, soraa, hiekkaa tai kaivettua perusmaa-ainesta, mikäli se tiivistetään vähintään alkuperäiseen tilavuuteen ja se on routimatonta sekä siitä on poistettu kaikki orgaaninen aines. Siitä, että täyttömateriaalina käytetään betonia, on etua pilarin kantavuutta tarkasteltaessa, mutta toisaalta kustannukseltaan betoni on kallein täyttöaines. Jos maa-aines on routivaa, routa myös tarttuu betonipintaan. Täyttömateriaalin laatuun ja tiivistämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä sen toiminnalla on huomattava vaikutus pilarin vakavuuteen.

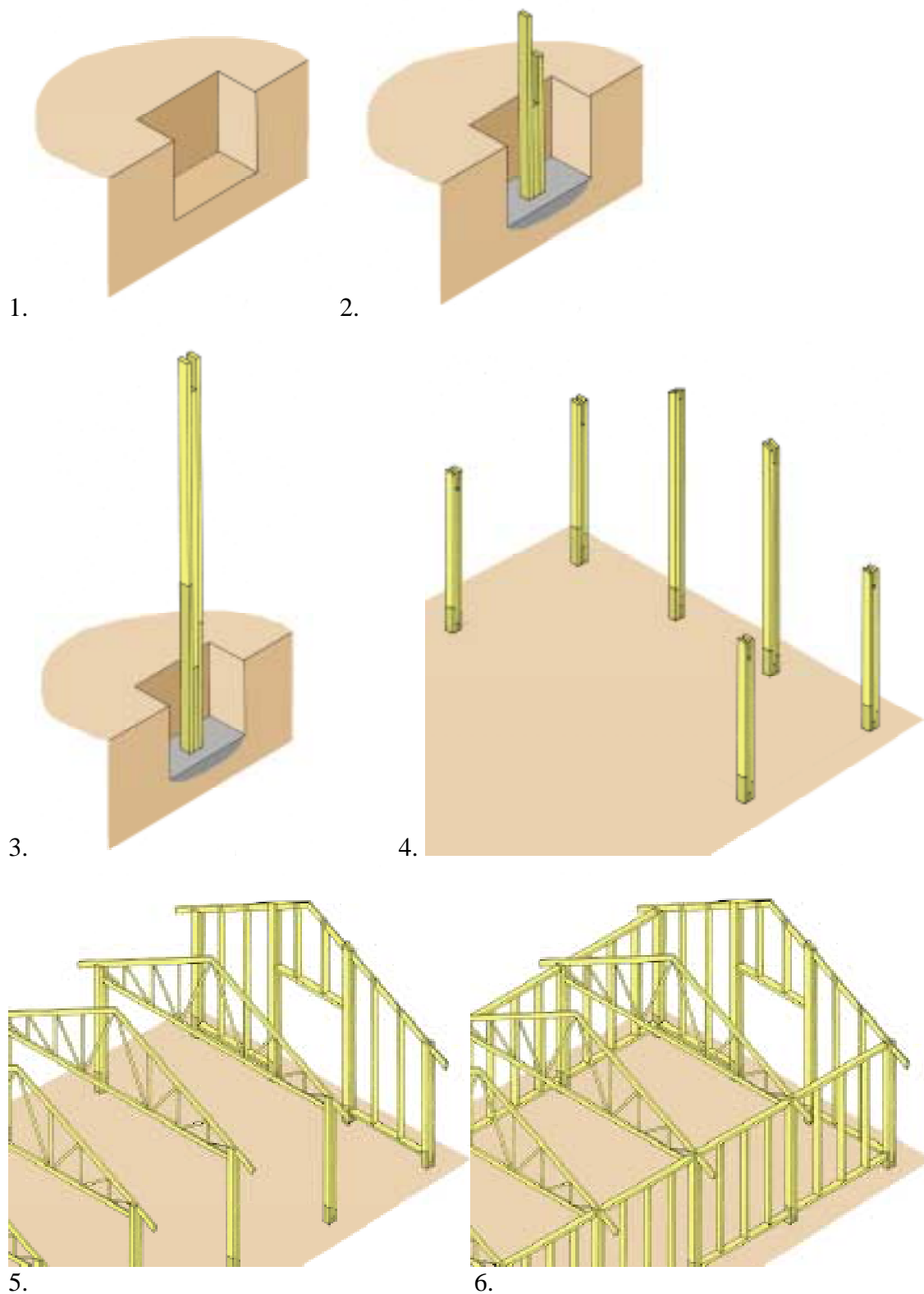
Pilari joutuu maakosketuksen vuoksi ankariin olosuhteisiin. Tämän vuoksi joudutaan käyttämään kyllästeitä. Riittävä kestävyys saadaan käyttämällä M-luokan painekyllästystä. Paras tulos saadaan käyttämällä männyn pintapuuta, jolloin läpikyllästyminen on mahdollista. Konehallien aukkomittoitus määräytyy työkoneiden mukaan (aukon leveys väh. 4,5 m ja korkeus väh. 4 m), mikä taas määrää pilareiden k-jaon. Normaalisti pila-reilla käytetään 2,4 m:n k-jakoa, jolloin oviaukkojen kohdalla jätetään yksi pilari pois ja käytetään aukkopalkkia.

Pilarin lamellit voivat olla limittäin jatkettuja, jolloin pilarin alaosa tehdään kyllästetystä ja yläosa kyllästämättömästä puutavarasta. Jatkokset ja lamellien toisiinsa kiinnittäminen tehdään naulaamalla. Kyllästetyllä osalla käytetään ruostumattomasta teräksestä tehtyjä nauloja. Toinen vaihtoehto on käyttää kyllästettyjä yksimittaisia lamelleja. Lamellien jatkaminen ja siitä aiheutuva kustannustekijä jäävät pois, mutta toisaalta materiaalikulut kasvavat, kun lamellit ovat kokonaan kyllästettyä puutavaraa.

Mahdollisia muita pilarivaihtoehtoja ovat massiivipuu, liimapuu ja kertopuu. Massiivipuun etuja on edullisuus, yksimittaisuus ja hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet. Toisaalta massiivipuun läpikyllästäminen ei ole mahdollista. Kyllästetyt liima- ja kertopuupilarit ovat kustannuksiltaan selvästi kalliimpia eivätkä niiden edut riittävästi kompensoi korkeampaa hintaa.

Yleisin pääkannatintyyppi Post-Frame-rakennuksissa on tehdasvalmisteinen naulalevyristikko. Tarvittaessa käytetään kahta NR-ristikkoa rinnakkain. Tällöin myös orsien kiinnitys on helpompaa. NR-ristikoiden yläpaarteet sidotaan toisiinsa niiden päälle kiinnitettävällä soirolla. Pilarin lamelleista yksi tai kaksi lamellia jätetään muita lyhyemmiksi; näin syntyneeseen hahloon NR-ristikot on helppo asentaa sekä kiinnittää (ks. kuva 24).

Sekundääreinä käytetään jatkuvia sahatavaraorsia, joiden k-jako määräytyy kantavuuden ja profiilipellin vaatimuksien mukaan. Profiilipelti mitoitetaan toimimaan rakennuksen jäykistävänä osana. Kuvassa 24 esitetään Post-Frame-rakennuksen rakentamisjärjestys.



Kuva 24. Kuvasarja Post-Frame-hallin rungon rakentamisesta. 1. Kuoppa pilaria varten. 2. Pilarikanta painekyllästetystä sahatavarasta valettu betoniin. 3. Pilarijatko normaalista sahatavarasta. 4. Pilarijako 2,4 m:n välein. 5. Naulalevyristikot pujotetaan pilarien haarukkaan. 6. Rakennetaan ulkoseinien runko.

Rakennesysteemin edut verrattuna perinteisiin rakenteisiin:

- Jatkuvia perustuksia tai routasuojauksia ei tarvita. Sopii erityisesti kylmiin halleihin.
- Kantavia pystyrakenteita on vähemmän.
- Mastojäykistykseen toteutus on helppoa ja edullista.
- Rakentamistapa on järjestelmällinen.
- Rakennuksen poikittainen jäykistys toteutuu mastopilareilla ja levyjäykistyksellä.

Rakenteen huonot puolet:

- Maahan upotettaville pilareille vaaditaan erikoisluokan kyllästys.
- Sivuseinien suurten ovien kohdalla tarvitaan aukkopalkit.
- Levyjäykistykseen käyttö aiheuttaa hiukan lisäkustannuksia, mikä johtuu tiheämmästä ruuvauksesta ja mahdollisesta tiheämmästä orsituksesta.

## 4.3 Uudet lypsykarjapihatoiden ja sikaloiden tyyppirakenteet

### 4.3.1 Uusien rakennetyyppien tavoitteet

Lypsykarjapihatoiden ja sikaloiden rakenteille asetettiin seuraavat tavoitteet:

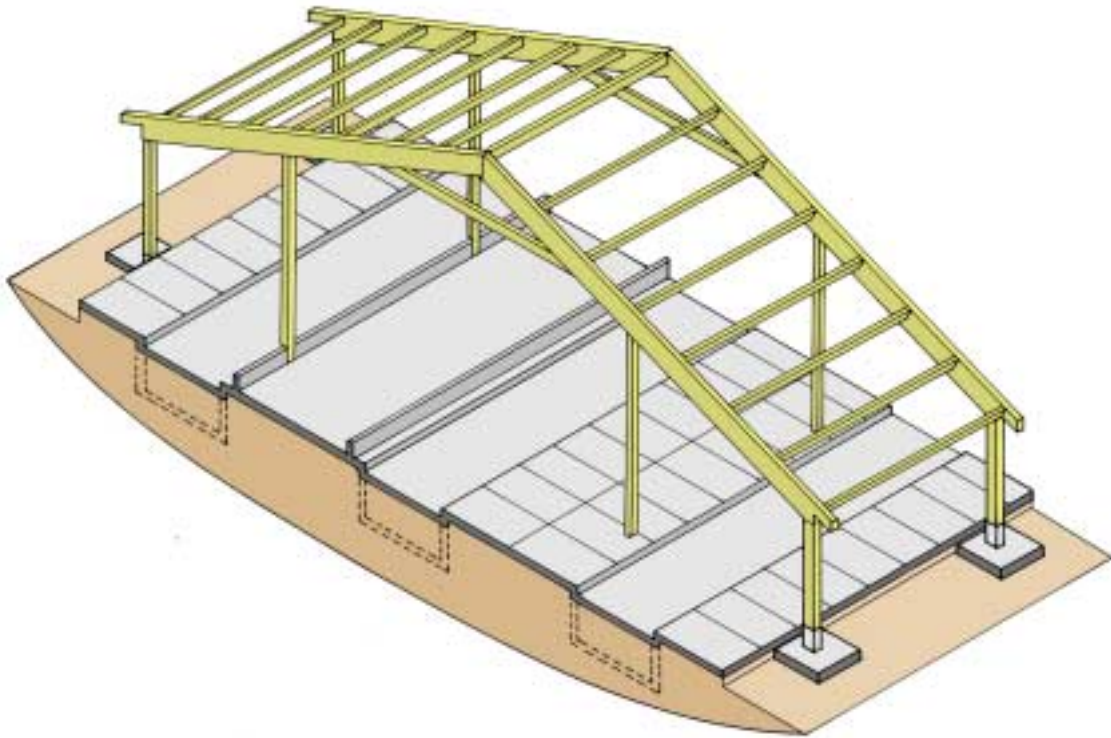
- Rakenteen leveys vähintään 19 m ja sopivuus käytettyyn pohjaratkaisuun.
- Poikittainen jäykistys itse rakenteella. Käytettäessä ainoastaan jäykistäviä päätyseinä, jäykistysvoimat tulevat isoissa rakennuksissa suuriksi ja tämä aiheuttaa ongelmia.
- Kalteva yläpohja ja tästä syntyvä suuri tilan korkeus lisää tilan avaruutta, valoisuutta ja ilman laatua.
- Helposti asennettavat sekundääri- ja vaipparakenteet. Tällöin voidaan käyttää tarvittaessa elementtejä.
- Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan on oltava moitteetonta.
- Rakennus on helposti laajennettavissa pituussuunnassa.
- Rakenteiden sopivuus teolliseen esivalmistukseen. Rakenneosat tuodaan työmaalle ja kootaan paikalleen; tämän jälkeen voidaan tehdä helpoimmat työt paikalla rakentaen.

Tutkimuksessa kehitettiin seuraavat uudet tyyppirakenteet:

- kolmilaivainen liimapuupalkkihalli, leveys 33,6 m
- kolminivelkehähalli, leveys 22 m
- vetotangollinen liimapuukehä, leveys 19,5 m.



### 4.3.2 Kolmilaivainen liimapuupalkkihalli



*Kuva 25. Kolmilaivaisen liimapuupalkkihallin rakenneperiaate.*

Kolmilaivainen liimapuinen pilaripalkkiratkaisu sopii hyvin leveisiin navettoihin, joissa pohjaratkaisu sallii pilarilinjat kahdessa kohdassa. Rakenteessa keskimmäinen aukko on yleensä suurempi kuin reunimmaisat. Keskipilarilinjojen paikka voidaan valita melko vapaasti. Kuvassa 25 on periaatekuva liimapuupalkkihallista. Rakennuksen leveys on 10–35 m. Kehäjako on tyypillisesti 3 600–7 200 mm, yleensä optimaalinen k-väli on 4 800 mm ja katon kaltevuus 15–20°.

Mastopilarit jäykistävät rakennuksen kehän suunnassa. Kehässä on neljä pilaria, joista kaksi on mastopilaria ja kaksi vastaavasti nivelpilareita. Vaakasiirtymien ja voimasuureiden kannalta edullisin tapa on tehdä reunapilarit mastojäykiksi ja keskipilarit niveliinnityksin.

Leveässä hallissa (33 m) lapepalkkien tyypillinen dimensio on kokoluokkaa 165 x 570 mm<sup>2</sup>. Lapepalkit yhdistetään keskiaukossa toisiinsa kahdella liimapuisella vetotangolla, joiden dimensiot ovat noin 42 x 225 mm<sup>2</sup>. Mastopilareiden tyypillinen dimensio on 165 x 315 mm<sup>2</sup> ja keskilinjojen nivelpilareiden 165 x 350 mm<sup>2</sup>.

Kehän liitokset toteutetaan kuumasinkityillä naulauslevyillä. Jäykät perustusliitokset voidaan tehdä puuhun liimatuilla vinotankoliitoksilla. Käytettäessä rakennetta sikaloissa on huomioitava teräsosien korroosionkestävyys.

Yläpohjan sekundäärirakenteena voidaan käyttää jatkuvia sahatavaraorsia, liimapuu- tai kertopuupalkkeja tai erilaisia kantavia elementtejä.

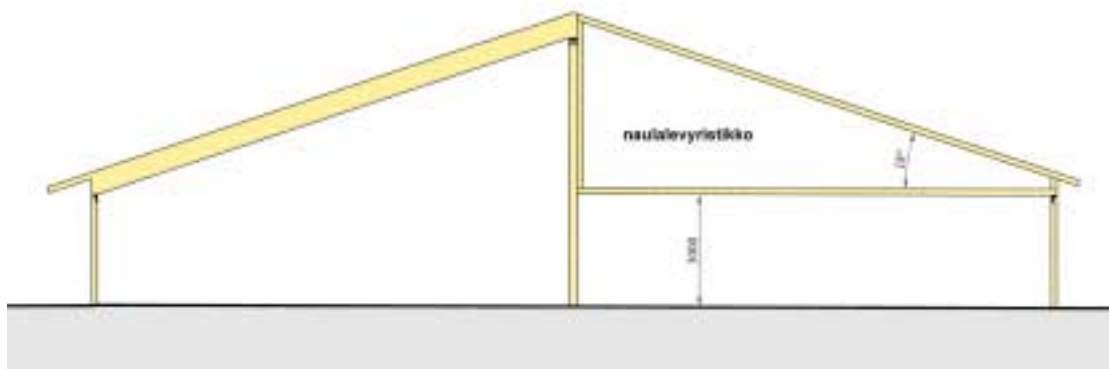
Rakenteen edut:

- Sopii hyvin leveisiin navettoihin.
- Avara tila.
- Sivusuuntainen jäykistys helposti.

Rakenteen heikkoudet:

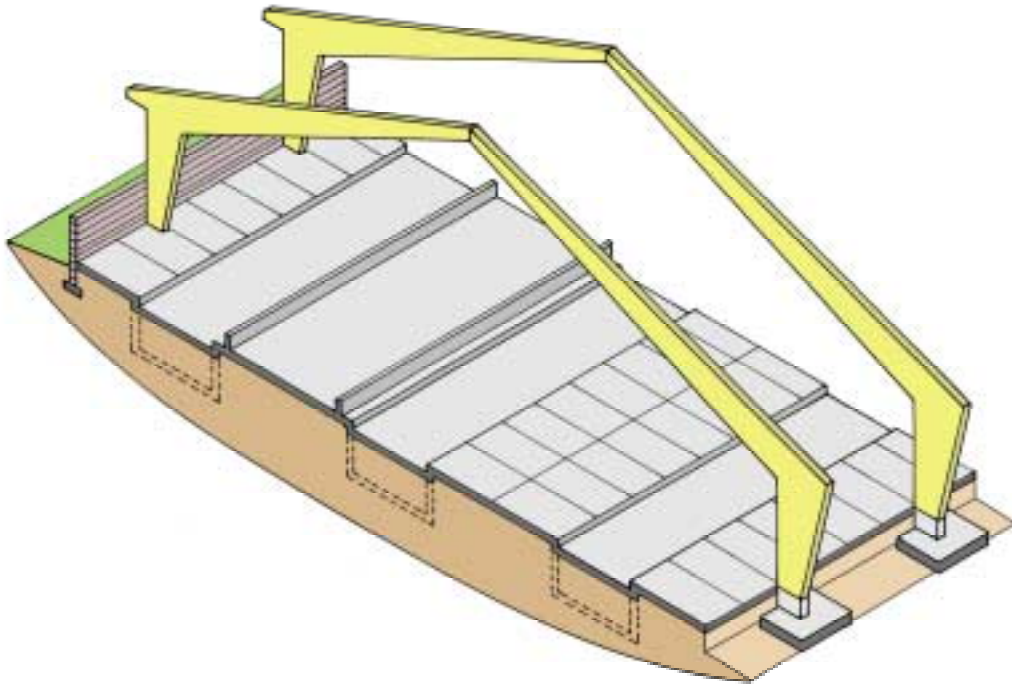
- Ei sovellu hyvin sikaloihin (tarpeeton väliseinä).
- Välipilarit.

Liimapuupalkkihallista voidaan tehdä erilaisia sovellutuksia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Kuvassa 26 on eräs sovellus.



*Kuva 26. Liimapuupalkkihallin sovellus, jossa kantava pilarilinja on keskellä rakennusta ja rakennuksen toinen puoli on matala. Matalassa osassa käytetään kantavana rakenteena naulalevyristikkoa ja korkeassa osassa liimapuupalkkia.*

### 4.3.3 Kolminivelkehähalli



*Kuva 27. Kolminivelkehän rakenneperiaate.*

Kertopuinen kolminivelkehä sopii hyvin navettarakennuksiin. Kehä koostuu palkki-osasta ja kaksiosaisesta jalkaosasta, jotka on yhdistetty työmaalla toisiinsa tappivaarnaliitoksilla. Kuvassa 27 on periaatekuva kolminivelkehästä. Rakennuksen leveys on 22 m. Kehäjako on tyypillisesti 3 600–7 200 mm, yleensä 4 800 mm, ja katon kaltevuus 15–20°. Kuvassa 28 on esimerkki kolminivelkehähallista.

Kehien muotoilulla voidaan vaikuttaa siihen, miten paljon kehärakenne vie sisätilan tehollista käyttöalaa. Kehän jalka voidaan tehdä joko sisäreuna tai ulkoreuna pystysuorana kuvan 27 mukaisesti (vasen tai oikea pää). Seinä sijoitetaan tällöin joko kehän ulko- tai sisäpuolelle. Tehokkain tilakäyttö saadaan aikaan rakenteella, jossa kehäjalan sisälinja on pystysuora ja nurkkaliitos julkisivulinjan ulkopuolella. Rakenne muodostaa julkisivuun voimakkaan toistuvan elementin, joka samalla toimii osana rakennuksen kokonaisarkkitehtuuria.

Jos kehä jää seinän ulkopuolelle, se on suojattava hyvin kosteudelta ja kuivumismahdollisuus on varmistettava. Puutteellisesti suojatuissa kehien päissä on havaittu paljon laho- ja homevaurioita.

Kehäpalkkien dimensio on tyypillisesti 1 375–500 x 75 mm<sup>2</sup> ja kehäpilarin 1 375–430 x 63 x 2 mm<sup>2</sup>. Pilarina käytetään laatua Kerto-Q ja palkeissa Kerto-S. Kehäpalkin ja kehäpilarin nurkkaliitos tehdään tappivaarnoilla (tai pulteilla). Liitosalueet voidaan myös vahvistaa jatkuvilla naulalevynauhoilla. Tällöin liitoskapasiteetti on 2–3-kertainen pelkkiin tappivaarnoihin verrattuna ja tarvittavat liitinmäärät ovat pienemmät. Naulalevyt myös vähentävät kertopuun kosteusmuodonmuutoksia (pulttireiät, liitosalueen halkeilu).

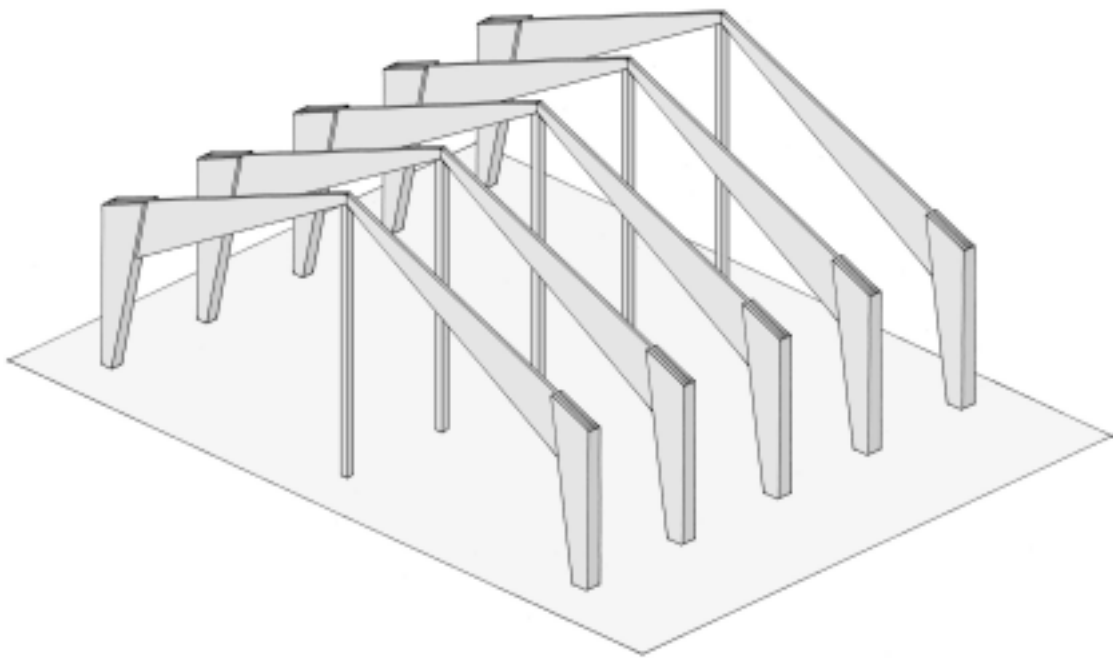


*Kuva 28. Esimerkki saksalaisesta lypsykarjapihatosta, jossa on kantavana rakenteena kolminivelkehä.*

Kehän materiaali voi olla myös liimapuuta. Paineekyllästetty kertopuu (kerto-Q) ja ruostumattomat naulalevyt ovat myös mahdollisia.

Kolminivelkehä jäykistää rakennuksen kehän suunnassa. Yläpohjan sekundäärirakenteena voidaan käyttää jatkuvia sahatavaraorsia, liimapuu- tai kertopuupalkkeja tai erilaisia kantavia elementtejä.

Kuvassa 29 on kertopuinen kolminivelkehä, jonka keskilinjaan on sijoitettu välipilari. Pilarin sijoitus on mahdollinen vain, jos pohjaratkaisun toiminnallisuus sen sallii. Rakenne sopii joihinkin pihattoihin. Apupilarin vaikutuksesta kehärakennetta voidaan tuntuvasti hoikentaa, jolloin rakenne tulee huomattavasti edullisemmaksi.



*Kuva 29. Välituellinen kolminivelkehä.*

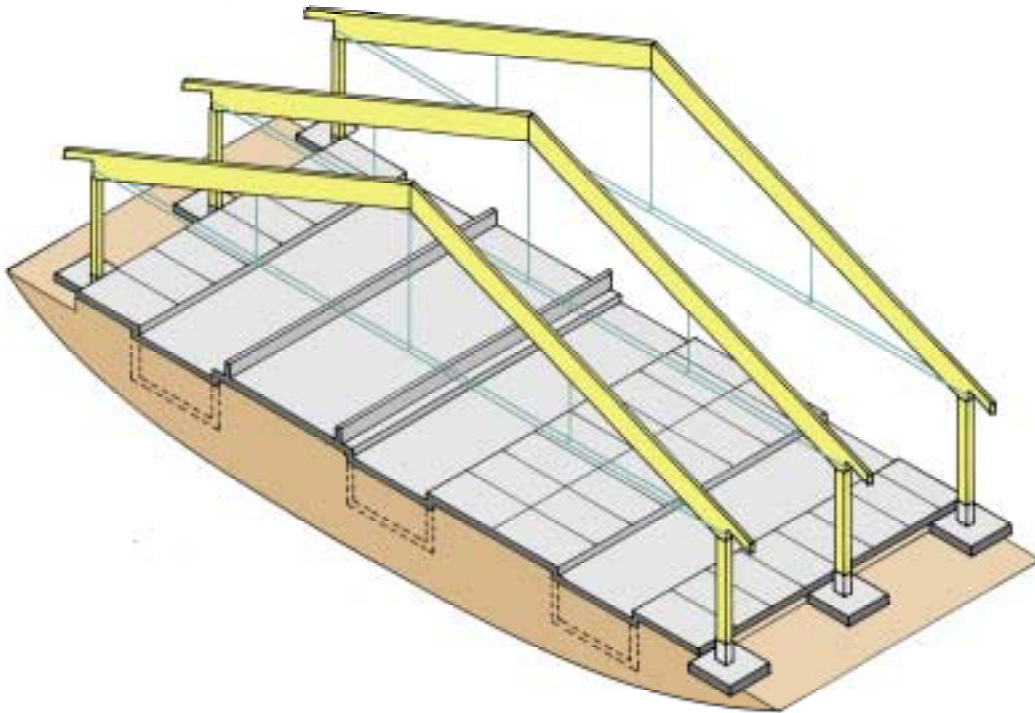
Kolminivelkehrakenteen etuja:

- Suuri hyödynnettävä korkeus.
- Avara tila.
- Välitukia ei tarvita.
- Kasataan osissa tarvittaessa työmaalla.
- Sivusuuntainen jäykistys helposti.

Rakenteen heikkoudet:

- Ei sovellu hyvin sikaloihin.

#### 4.3.4 Vetotangollinen liimapuukehä



*Kuva 30. Vetotangollisen liimapuukehän rakenneperiaate.*

Teräsvetotangoilla toteutettu liimapuukehä tukeutuu seinälinjoilla mastojäykkiin pilareihin. Kuvassa 30 on periaatekuva vetotangollisesta liimapuukehästä. Rakennuksen leveys on 20 m. Kehäjako on 3 600–7 200 mm, yleensä 4 800 mm, ja katon kaltevuus 15–20°.

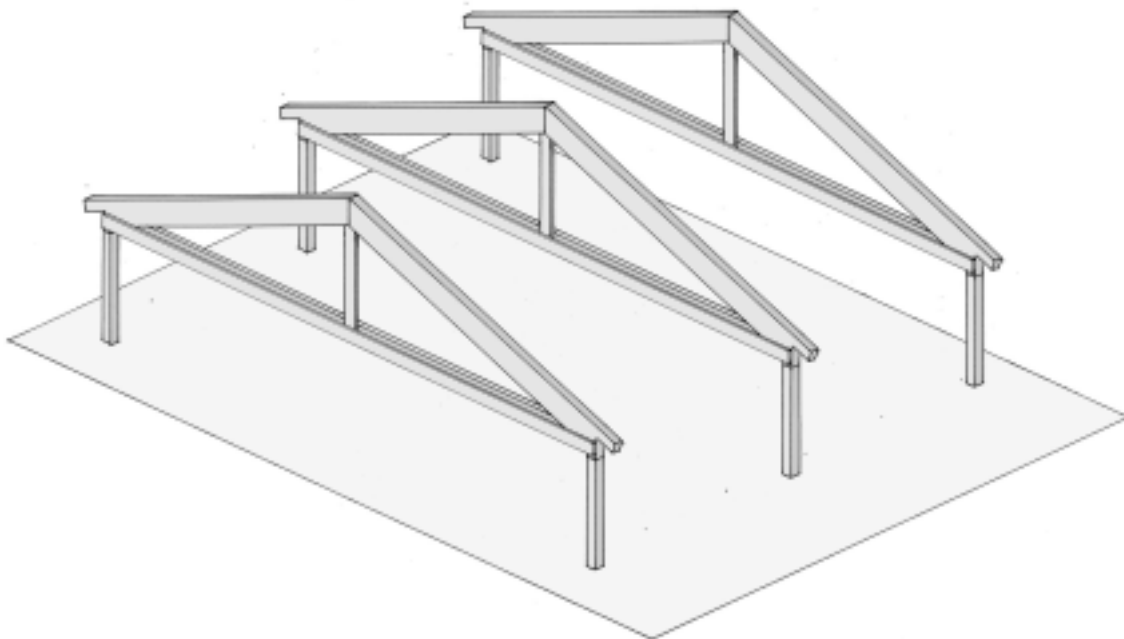
Rakenne sopii sikaloihin ja navettoihin. Sikaloissa käyttöä rajoittavat vetotangot, jotka hankaloittavat väliseinien tekoa. Navettoihin korkea ja avara tila sopii hyvin.

Palkkiosien dimensio on kokoluokkaa 165 x 675 mm<sup>2</sup> ja pilareiden 165 x 315 mm<sup>2</sup>. Liimapuuosien liitokset toteutetaan esimerkiksi vinotankoliitoksilla. Kaikki teräsosat ovat kuumasinkittyjä. Liitososat mitoitetaan valmistajan tuoteselosteen perusteella. Vetotankoina voidaan käyttää harjaterästä (A500HW), johon on saatavissa täyden kapasiteetin jatkos- ja kiristysliitokset.

Rakenne voidaan toteuttaa myös kertopuisena, jolloin myös vetotangot ovat kertopuuta (ansaspalkki). Kertopuinen vetotanko kiinnitetään tappivaarnaliitoksilla palkin kylkeen. Kuvassa 31 on periaatekuva kertopuuansaspalkkikehästä. Rakennetta voidaan käyttää, jos halutaan vaakasuora lämmöneristetty yläpohja.



Mastopilarit jäykistävät rakennuksen kehän suunnassa. Yläpohjan sekundäärirakenteena voidaan käyttää jatkuvia sahatavaraorsia, liimapuu- tai kertosuupalkkeja tai erilaisia kantavia elementtejä, esimerkiksi SPU-elementtiä. Sekundäärirakenne asennetaan kehän päälle.



*Kuva 31. Vetotangollinen kertosuupukehä, jossa vetotanko on kertosuupuuta.*

Rakenteen edut:

- Rakennuksen muuntojoustavuus.
- Korkea, avara ja valoisa tila.
- Vetotangollisella kertosuupukehällä voidaan tehdä vaakasuora yläpohja.

Rakenteen heikkoudet:

- Väliseinien teko hankalaa
- Sikaloissa teräsvetotanko täytyy suojata ruostumista vastaan.

#### 4.3.5 Vinon sisäkaton vaikutus sikaloiden energiankulutukseen

Vinon sisäkaton käyttö lisää tilan keskimääräistä korkeutta, sisätilavuutta ja kattovaipan pinta-alaa. Suurempi kattovaipan pinta-ala lisää energian kulutusta, ellei eristyspak-suutta lisätä. Suuremman sisätilavuuden ilman lämmittäminen sitoo myös suuremman energiamäärän kuin pienen sisätilavuuden. Tällä ei ole kuitenkaan vaikutusta ilmanvaihdon aiheuttamaan energiankulutukseen, koska ilmanvaihto mitoitetaan muilla pe-rusteilla. Sen sijaan ilmanlaatuun suuremmalla sisätilavuudella on vaikutusta.

Taulukoissa 5 ja 6 esitetään liha- ja emakkosikaloille tehdyt laskelmat katon kaltevuuden vaikutuksesta energiankulutukseen. Laskelmissa ovat mukana lisääntyvä vaippa-pinta-ala, syntyvä lisäenergiankulutus, mahdollinen lisäeristystarve ja ilmatilavuuden lämmittämiseen tarvittava energimäärä. Laskelmat on tehty tyypillisille isoille sikaloille, emakkosikalalle, jonka koko on  $24 \times 45 \text{ m}^2$  ja kattokaltevuus  $18^\circ$ , ja lihasikala, jonka koko on  $19 \times 60 \text{ m}^2$  ja kattokaltevuus  $5\text{--}21^\circ$ .

Laskelma on laadittu Jyväskylän olosuhteisiin, jossa mitoituslämpötilan minimi on  $-37,6^\circ\text{C}$  ja kuukausien keskilämpötilat taulukon 5 mukaisia. Jyväskylän lämpötilatiedot perustuvat lähteeseen [7].

Lihasicalan sisälämpötila on  $15^\circ\text{C}$ , emakkosikalan  $12^\circ\text{C}$  joutilasosastolla ja  $18^\circ\text{C}$  porsitusosastolla. Lihasicalassa tasapainolämpötila on  $-12^\circ\text{C}$ , joka on pienempi lämpö-tila kuin kylmimmän kuukauden keskilämpötila . Siksi Jyväskylässä ei ole jatkuvaa lämmitystarvetta kuukausitasolla. Emakkosikalassa tasapainolämpötila on  $4,0^\circ\text{C}$  jouti-lasosastolla ja  $0^\circ\text{C}$  porsitusosastolla. Sisäilman suhteellinen kosteus oli  $70\%$  ja ulkoil-man  $90\%$ .

Laskelmissa on energian hintana  $0,05 \text{ €/kWh}$ , eristeen hintana  $50 \text{ €/m}^3$  ja lamda-arvona  $0,05 \text{ W/mK}$ . Katon k-arvoksi on oletettu  $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Vino katto lisää vaipan pinta-alaa kasvavasti suhteessa kattokaltevuuteen. Kuvassa 32 esitetään kattokaltevuuden vaikutus vaipan pinta-alan kasvuun. Jos kattokaltevuus on alle  $20^\circ$ , lisääntyvä vaippapinta-ala on enintään  $5\%$  koko rakennuksen vaipasta. Vaipan rakennuskustannusten voidaan olettaa kasvavan samassa suhteessa.



Taulukko 5. Emakkosikalan 100 vinon sisäkaton energialaskelmat. Puolet rakennuksesta on joutilasosastoa ja puolet porsitusosastoa.

<b>Emakkosikala 100</b>			
Leveys	20	m	
Pituus	45	m	
Katon kaltevuus	<b>18,0</b>	°	
Lisääntyvä pinta-ala	<b>111,3</b>	m <sup>2</sup>	
	12,4	% katosta	
	5,1	% koko rakennuksesta	
Sisälämpötila, joutilas	12,0	°C	Tasapainolämpötila, joutilas 4,0 °C
Sisälämpötila, porsitus	18,0	°C	Tasapainolämpötila, porsitus 0,0 °C
Ulkolämpötila, minimi	-37,6	°C	
Katon k-arvo	0,30	W/m <sup>2</sup> K	
Energian hinta	0,050	€/kWh	
Eristeen hinta	0,05	€/m <sup>2</sup> /mm	
Eristeen lamda	0,05	W/mK	
Katon pinta-alan kasvusta aiheutuva lisäenergiankulutus:			
		Joutilas	Porsitus
Kuukausi	t [°C]	kWh	kWh
loka	3,8	2,5	0,0
marras	-0,8	57,7	9,6
joulu	-5,0	111,8	62,1
tammi	-8,8	159,0	109,3
helmi	-8,7	142,5	97,6
maalis	-4,8	109,3	59,6
huhti	2,0	24,0	0,0
summa		606,8	338,3
Lisäenergian hinta €	<b>30,34</b>	<b>16,91</b>	= Yhteensä <b>47,3</b> €/vuosi
Lisäeriste (kattoon), jolla energiankulutus pysyy vakiona:			
Lisäeristeen paksuus	<b>20,6</b>	mm	
Lisäeristeen kok. hinta	<b>1042,2</b>	€	takaisinmaksuaika= 22,06 vuotta
Kaltevuuden aiheuttama lisätilavuus:			
- sitoutuva energia	<b>34,9</b>	kWh	
- ed. energian hinta	<b>1,7</b>	€	

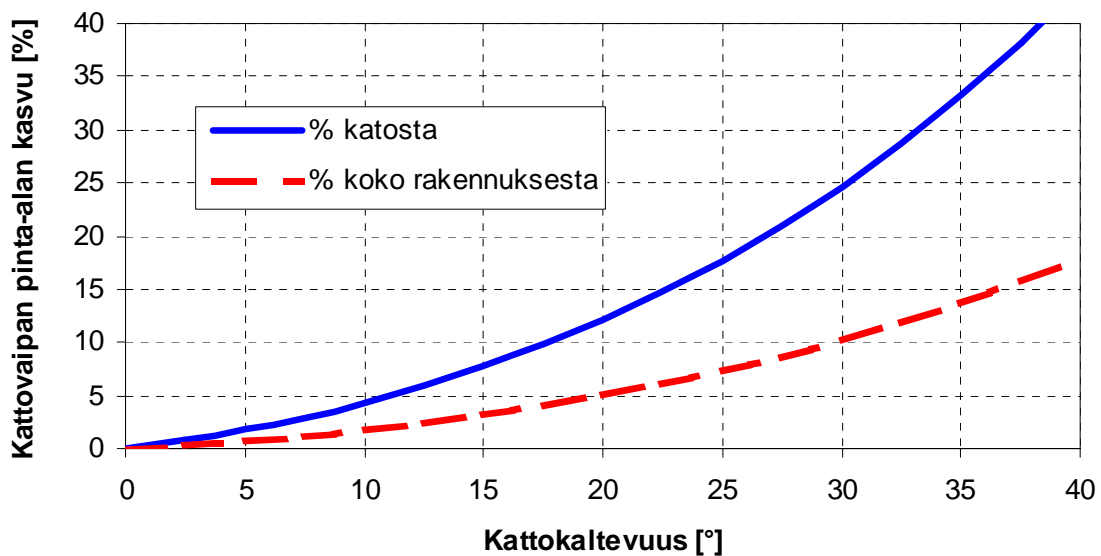
Taulukko 6. Lihasikalan 1040 vinon sisäkaton energialaskelmat eri kattokaltevuuksilla. Sikalan tasapainolämpötila on -12 °C.

<b>Lihasikala 1040</b>					
Leveys	19,0	19,0	19,0	19,0	m
Pituus	60,0	60,0	60,0	60,0	m
Katon kaltevuus	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>15,0</b>	<b>21,0</b>	°
Lisääntyvä pinta-ala	<b>20,1</b>	<b>49,4</b>	<b>88,6</b>	<b>150,4</b>	m <sup>2</sup>
katosta	1,8	4,3	7,8	13,2	%
koko rakennuksesta	0,7	1,8	3,2	5,5	%
Katon k-arvo	0,30	0,30	0,30	0,30	W/m <sup>2</sup> K
Sisälämpötila	15,0	15,0	15,0	15,0	°C
Ulkolämpötila min	-37,6	-37,6	-37,6	-37,6	°C
Energian hinta	0,050	0,050	0,050	0,050	€/kWh
Eristeen hinta	0,05	0,05	0,05	0,05	€/m <sup>2</sup> /mm
Eristeen lamda	0,050	0,050	0,050	0,050	W/mK
Lisäeriste (kattoon), jolla energiankulutus pysyy vakiona:					
Lisäeristeen paksuus	<b>2,9</b>	<b>7,2</b>	<b>13,0</b>	<b>22,0</b>	mm
Lisäeristeen kok. hinta	<b>170,9</b>	<b>429,6</b>	<b>795,5</b>	<b>1418,6</b>	€
Kaltevuuden aiheuttama lisätilavuus:					
- sitoutuva energia	<b>11,3</b>	<b>22,7</b>	<b>34,5</b>	<b>49,4</b>	kWh
- edell. energian hinta	<b>0,6</b>	<b>1,1</b>	<b>1,7</b>	<b>2,5</b>	€

Emakkosikalalle on laskettu kuukausittaisen keskilämpötilan perusteella energian kulutus, joka näkyy taulukossa 5. Kattokaltevuus 18° aiheuttaa koko rakennukseen 945 kWh:n lisäenergiankulutuksen, joka vastaa oletetuilla energian hinnoilla 47 €n vuosikustannuksia.

Jos halutaan, ettei energiankulutus kyseisessä tapauksessa kasva, on kattoon asennettava 20,6 mm:n lisäeriste. Kustannukset lisäeristämisestä ovat 1 042 € ja takaisinmaksuaika 22,1 vuotta.

Lihasikalalle ei voida kyseisellä menetelmällä laskea keskimääräistä energiankulutuksen lisäystä, koska tasapainolämpötila on kaikkien kuukausien keskilämpötilojen alapuolella. Sen sijaan tarvittava lisäeristys saadaan laskettua suoraan pinta-alan kasvun perusteella.



Kuva 32. Kattokaltevuuden vaikutus kattovaipan pinta-alan kasvuun. Lisääntyvää pinta-alaa on verrattu vaakasuoran katon alaan (ylempi viiva) tai koko rakennuksen alaan (alempi viiva).

Lihaskalaan, jonka katon kaltevuus on  $21^\circ$ , vaaditaan 22 mm:n lisäeristys, josta aiheutuu kustannuksia 1 419 € Tarkemmat laskelmat ovat taulukossa 6.

Suuremman sisätilavuuden ilman lämmittämiseen (minimiulkolämpötilasta normaali-lämpötilaan) tarvittava energia on kaikissa sekä emakko- että lihasikaloissa alle 50 kWh. Tämä vastaa alle 2,5 €n kustannuksia. Ilman lämmittämiseen tarvittava energia ja sen kustannukset ovat täten täysin mitättömät.

Sikaloiden energiankulutuslaskelmista voidaan vetää seuraavat johtopäätökset:

- Jos kattokaltevuus on alle 20 astetta, lisääntyvä vaippapinta-ala on alle 5 % koko rakennuksen vaippapinta-alasta.
- Lisääntyvä katon pinta-ala aiheuttaa 100-paikkaisilla emakkosikaloilla (kaltevuus  $18^\circ$ ) noin 945 kWh:n lisäenergiankulutuksen, josta syntyy noin 47 €n kustannukset.
- Kun kattoon lisätään noin 20 mm:n lisäeriste, energian kulutus ei kasva. Asennus aiheuttaa noin 1 000 €n rakennuskustannukset 1 000 m<sup>2</sup>:n sikaloilla, kun kattokaltevuus on noin  $20^\circ$ .
- Ilmatilan lämmittämiseen tarvittava energia ja sen kustannukset ovat pieniä.

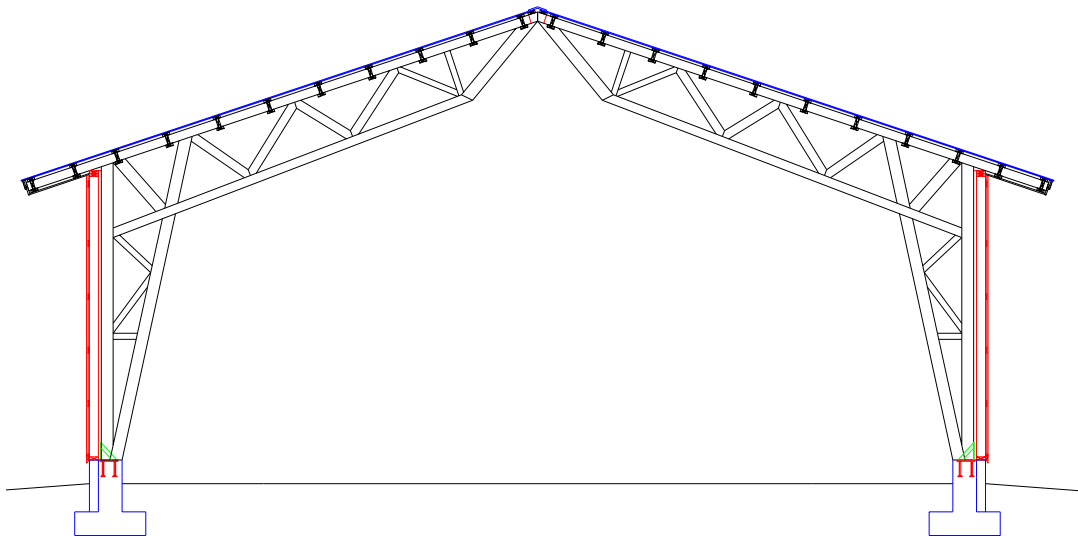
# 5. Tyypirakenteiden mitoitusperiaatteet

## 5.1 NR-kehähalli

Hallin pääkannatin on kolminivelinen naulalevyrakenne. Kuvassa 33 on konehallin leikkauskuva. Pääkannattimen mitoituksen tekee NR-suunnittelija annettujen lähtötietojen perusteella. NR-suunnittelija vastaa rakenteen tason suuntaisesta stabiiliteetista ja määrittelee rakenteen vaatimat poikittaistuennat.

NR-suunnittelijan tarvitsemat lähtötiedot NR-kehähallista ovat:

- kehän mitat ja tarvittava sisätilan korkeus
- kuormitukset todellisina kuormina, omapaino, lumi- ja tuulikuormat
- kehän k-jako
- kehää tukevien sekundäärien k-jako
- tukidetallit.



*Kuva 33. Konehallin leikkauskuva.*

Rakenteen ylä- ja alapaarteiden puristetut osat sekä mahdollisesti puristetut uumasauvat vaativat poikittaistuentoja. Käytännössä pyritään kuitenkin siihen, että uumasauvat eivät vaatisi nurjahdustukia. Yläpaarteiden poikittaistuenta syntyy luontevasti katon ja seinän sekundäärirakenteilla. Alapaarteiden poikittaistuennalle on kaksi erilaista ratkaisutapaa: pääkannattimien liittäminen toisiinsa mekaanisilla liittimillä ja soiron liittäminen

pääkannattimien alapintaan. Molemmat tavat mahdollistavat poikittaistukien harventamisen. NR-suunnittelija päättää, millä tavalla poikittaistuennat tehdään.

Kehä jäykistää rakennuksen kehän suunnassa. Rakennuksen pituussuuntainen jäykistys voidaan toteuttaa yläpohjan profiilipellillä sekä ulkoseinälinjojen nurkka-alueiden vino-reivauksilla.

Perustukset mitoitetaan kehärakenteelta tulevien voimien perusteella. Taulukossa 7 on NR-suunnitelmista saatavia jatkomitoituksessa tarvittavia tietoja.

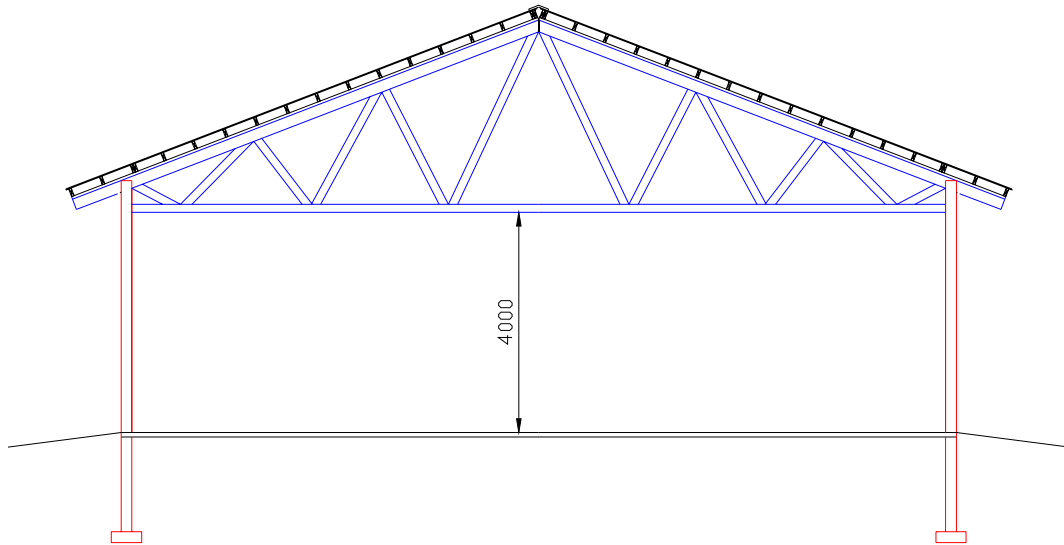
Kehältä tulee pilarianturaan pysty- ja vaakavoimia. Kehärakenteen vaakatukivoimat voidaan siirtää lattiarakenteelle tai pilariantura mitoitetaan myös vaakavoimille. Vaakavoimien siirtäminen lattiarakenteelle edellyttäisitä, että hallissa on maanvarainen teräsbetonilaatta. Teräsbetonilaatta on tällöin mitoitettava vetovoimille. Jos pilariantura mitoitetaan vaakavoimille, tarvittava anturan koko kasvaa.

*Taulukko 7. NR-suunnitelmista saatavia tietoja.*

$R_{y,max}$ (kN)	suurin pystytukireaktio
$R_{y,min}$ (kN)	suurin noste
$R_{x,max}$ (kN)	suurin vaakatukireaktio sisäänpäin
$R_{x,min}$ (kN)	suurin vaakatukireaktio ulospäin
Harjaliitoksen leikkausvoima (kN)	
Harjaliitoksen normaalivoima (kN)	
YP: n poikittaistukiväli (mm)	
AP: n poikittaistukiväli (mm)	
AP: n palkkiosan normaalivoima (kN)	
AP: n pilariosan normaalivoima (kN)	

## 5.2 Post-Frame-halli

Post-Frame-rakennuksen perusosat ovat pilari, pääkannatin ja jäykistävä kate. Pilari, joka lähtee anturan päältä, kootaan kyllästetyistä sahatavarasoiroista, pääkannattimena on NR-ristikko ja jäykistävä rakenteena katon profiilipelti. Kuvassa 34 on Post-Frame-hallin leikkaus.



*Kuva 34. Post-Frame-hallin leikkauskuva ja tyypillinen vapaa korkeus.*

Pilarin staattisen toiminnan mukaan voidaan perustukset jakaa kahteen ryhmään:

a) Vaakatuellinen

Pilari tukeutuu vaakasuunnassa jäykkään rakenteeseen. Tyypillinen vaakatuki on maanvarainen teräsbetoni-laatta. Siinä pilari kiinnitetään maanvaraiseen teräsbetoni-laattaan teräsosalla.

b) Vaakatueton

Pilarilla ei ole vaakatukea eli kaikki vaakavoimat johdetaan täyttömaalle ja sen kautta perusmaahan.

Näiden lisäksi pilarin toimintaan voidaan vaikuttaa seuraavilla seikoilla:

- Pilarin ympärille valetaan kaulus, jolla kasvatetaan pinta-alaa, joka ottaa vastaan vaakavoimia. Kauluksella voidaan ottaa vastaan myös nostevoimia, mikäli kaulus kiinnitetään riittävästi pilariin. Kaulus voi sijaita joko maanpinnan tasolla tai anturan

päällä. Yleensä kaulus sijaitsee anturan päällä, sillä mikäli kaulus on maanpinnan tasolla, riskinä on sen liikkuminen roudan vaikutuksesta.

- Pilari upotetaan tuoreeseen betonivaluun. Tällä on sama vaikutus kuin kaulukselle.

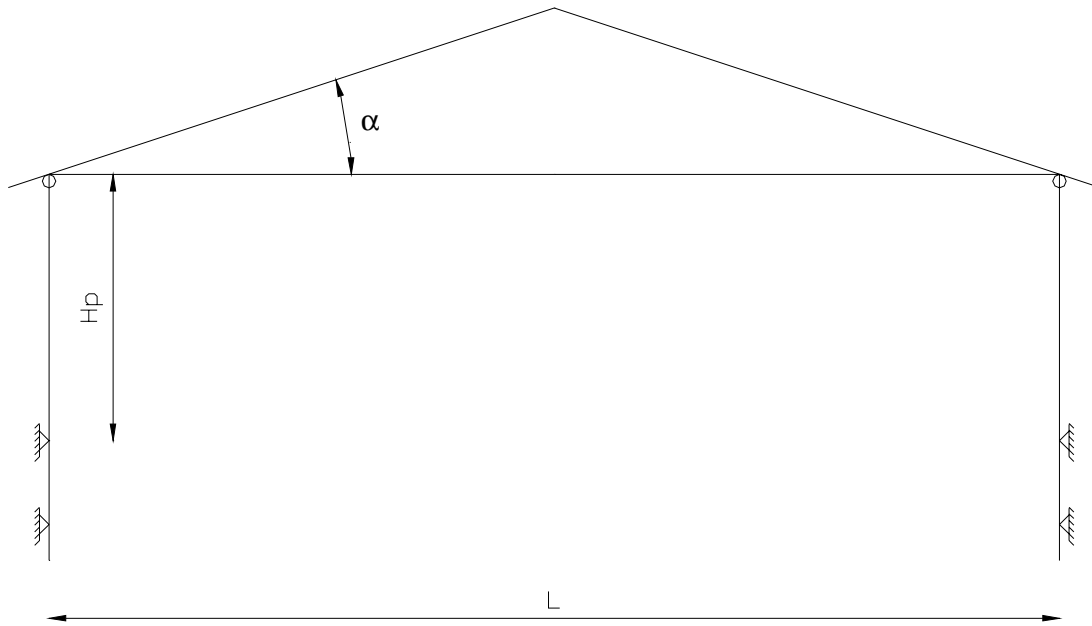
Konehallien aukkomitoitus määräytyy työkoneiden mukaan (aukon leveys vähintään 4,5 m ja korkeus vähintään 4 m), ja tämä taas määrää pilareiden k-jaon. Tällä mitoitusella ratkaisu on se, että valitaan k-jaoksi 2,4 m ja ovien kohdalla käytetään aukkopalkkeja. Suhteellisen suuri k-jako ja pilarin pituus johtavat sahatavaraa käytettäessä monilamellisiin pilareihin.

Pilarin lamellit voivat olla limittäin jatkettuja, jolloin pilarin alaosa tehdään kyllästetystä ja yläosa kyllästämättömästä puutavarasta. Jatkokset ja lamellien toisiinsa kiinnittäminen tehdään naulaamalla. Kyllästetyllä osalla käytetään ruostumattomasta teräksestä tehtyjä nauloja. Jatkos pienentää pilarin taivutuskapasiteettia sekä jäykkyyttä. Amerikkalaisissa puunormeissa on annettu koetuloksiin perustuvat taivutuskapasiteetin ja jäykkyyden redusointikertoimet. Kertoimet ovat riippuvaisia mm. limityspituuksista, lamellien lukumäärästä ja mahdollisista liitosvahvikkeista. Taivutuskapasiteetin pienennyskerroin on noin 0,4–0,55 ja jäykkyyden pienennyskerroin 0,4–0,75.

Paras lopputulos saadaan käyttämällä pitkiä limityspituuksia sekä ohuita metallilevyjä liitosvahvikkeina. Toinen vaihtoehto on käyttää kyllästettyjä yksimittaisia lamelleja. Mahdollisia muita pilarivaihtoehtoja ovat massiivipuu, liimapuu ja kertopuu. Kyllästetty massiivipuu on edullinen ratkaisu, mikäli sitä on saatavana täyspituisena. NR-ristikot asennetaan pilarin hahloon ja kiinnitetään pilariin. Tyypillinen pilarin perustus 2,4 m:n ristikkojaolla on neliöantura, jonka koko on 400 x 400 x 250 mm<sup>3</sup>.

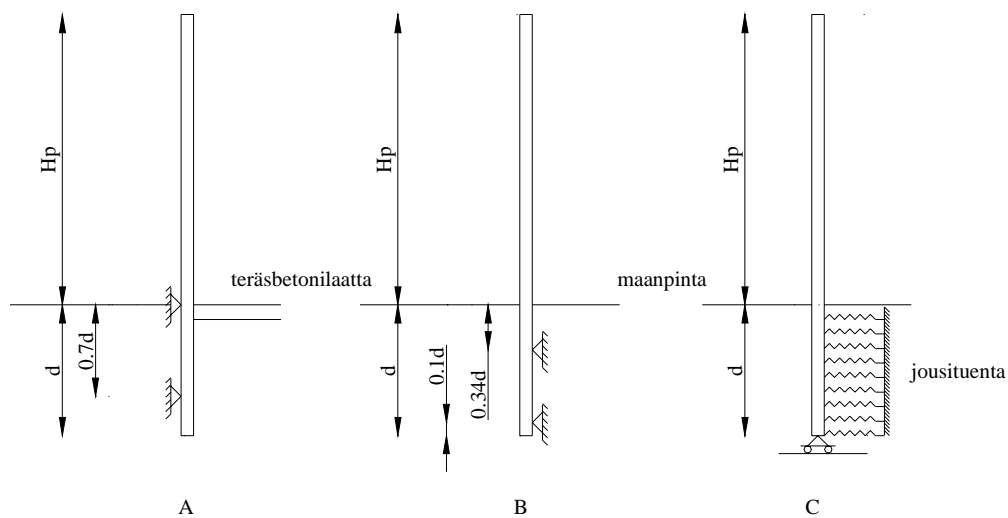
Sekundääreinä käytetään jatkuvia sahatavaraorsia, joiden k-jako määräytyy kantavuuden ja profiilipellin vaatimuksien mukaan. Tyypillinen sekundäärin koko on 2,4 m:n ristikkojaolla 50 x 100–150 mm<sup>2</sup> lumikuormasta riippuen, katossa k-jaolla 600 mm ja seinissä k-jaolla 900 mm. Profiilipelti mitoitetaan toimimaan rakennuksen jäykistävänä osana. Sillä, että profiilipelti huomioidaan voimia siirtävänä rakenneseosana, on merkittävä vaikutus laskennallisiin pilarin voimasuureisiin sekä rakennuksen vaakasiirtymiin. Siksi profiilipelti vaatii tiheämmän kiinnityksen ruoteisiin.

Hallin staattinen malli on sivusiirtyvä kehä, jossa on mastopilarit. Kuvassa 35 esitetään staattinen malli. Pilarin ja NR-ristikon liitoksen oletetaan toimivan täysin nivelellisesti. Liitos siirtää leikkaus- ja normaalivoimaa. Kuvan 35 mukaisessa staattisessa mallissa ei ole huomitu levykentän vaikutusta. Levykentän vaikutus pilarin voimasuureisiin voidaan huomioida esimerkiksi erityisellä mitoitusohjelmalla, normaalilla tasokehähajelmalla mallintamalla levykenttä jatkuvaksi palkiksi ja pilarit joustaviksi tuiksi tai laskentataulukoiden avulla. Kohdassa 4.2 on esitetty levykentän laskentamenetelmät.



Kuva 35. Post-Frame-kehän staattinen malli.

Maahan upotettu pilari anturoineen ei ole täysin jäykkä. Tämä joustavuus on huomioitava voimasuureiden laskennassa. Kuvassa 36 esitetään pilarin erilaisia mallinnusvaihtoehtoja.



Kuva 36. Pilarin mallinnustavat. Kuvissa  $Hp$  on pilarin maanpäällinen pituus ja  $d$  pilarin upotussyvyys.

Kuvassa 36 on kolme erilaista pilarin mallinnustapaa: A-tapa vastaa tilannetta, jossa pilari tukeutuu jäykkään vaakarakenteeseen, B-tapa vastaa tilannetta, jossa pilarilla ei ole erillistä vaakatukeyä, ja C-tapa on tapauksen B tarkempi mallinnusvaihtoehto.



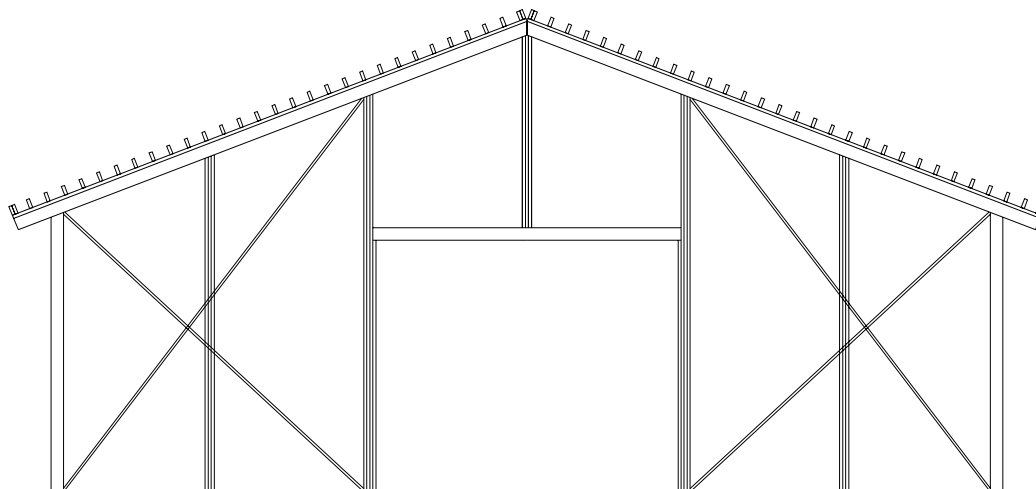
C-tavassa maan joustavuus mallinnetaan jousituennalla, jonka jäykkyys vastaa maan aineksen jäykkyyttä.

Post-Frame-hallin yleisimmät kuormitustapaukset ovat taulukossa 8. Koska pysyvän kuorman osuus on pieni, lumikuorman osalta yleensä tarkastellaan vain lyhytaikaista lumikuormaa.

*Taulukko 8. Post-Frame-hallin yleisimmät kuormitustapaukset ja kuorman osavaruuskertoimet Eurocode-mitoituksessa.*

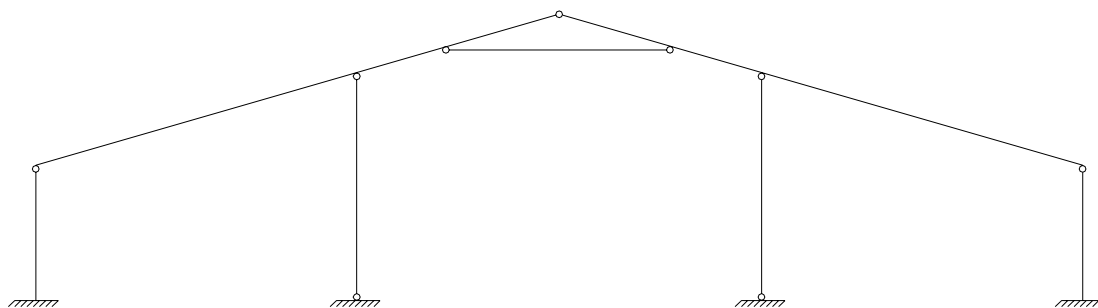
Kuormitustapaus	Kuormatyyppi			Huom.
	Pysyvä	Lumi	Tuuli	
1	1,2	1,5		
2	0,9		1,5	suurin noste
3	1,2	1,5 x 0,5	1,5	suurin vaakavoima
4	1,0		1,0	KRT

Jos hallin jäykistämisessä käytetään levyjäykistystä, päätyseinistä tehdään jäykistysseinät. Seinän jäykistys voidaan tehdä esimerkiksi vetotangoilla tai levyjäykistysenä. Kuvassa 37 esitetään päätyseinän jäykistäminen vetotangoilla.



*Kuva 37. Esimerkki päädyn jäykistämisestä vetotangoilla, kun päädyssä ovi.*

### 5.3 Kolmilaivainen liimapuupalkkihalli



Kuva 38. Kolmilaivaisen liimapuuhallin laskentamalli.

Pääkannatin on kolmilaivainen liimapuinen pilaripalkkiratkaisu. Lapepalkit tukevat rakennuksen keskialueella nivelpilareihin ja seinälinjoilla mastopilareihin. Lapepalkit yhdistetään keskiaukossa toisiinsa kahdella liimapuisille vetotangolla. Kuvassa 38 esitetään voimasuureiden laskennassa käytettävä laskentamalli. Jäykkiä liitoksia ovat ainoastaan reunapilareiden kiinnitys perustuksiin, muut liitokset ovat nivelellisiä.

Kolmilaivaisen liimapuuhallin yleisimmät kuormitustapaukset ovat taulukossa 9. Koska pysyvän kuorman osuus on pieni, lumikuorman osalta tarkastellaan yleensä vain lyhyt-aikaista lumikuormaa.

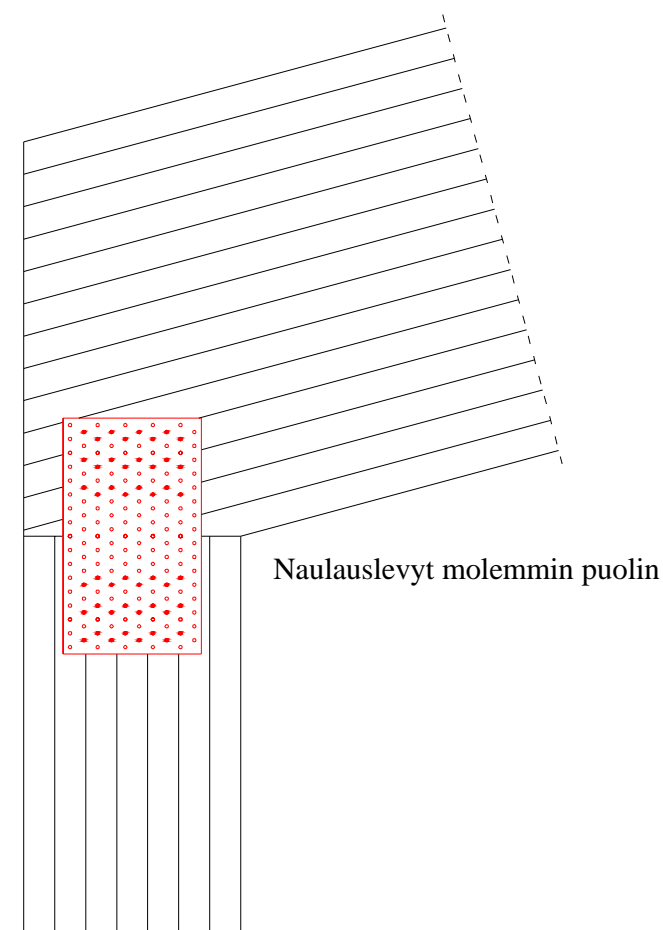
Taulukko 9. Kolmilaivaisen liimapuuhallin tyypilliset kuormitustapaukset ja kuorman osavarmuuskertoimet Eurocode-mitoituksessa.

Kuormitustapaus	Kuormatyyppi/varmuuskertoimet			Huom.
	Pysyvä	Lumi	Tuuli	
1	1,2	1,5		
2	0,9		1,5	Suurin noste
3	1,2	1,5 x 0,5	1,5	Suurin vaakavoima
4	1,2	1,5		Toispuolinen lumi
5	1,2	1,5	1,5 x 0,5	Toispuolinen lumi + tuuli
6	1,0	1,0		KRT, palkin taipuma
7	1,0		1,0	KRT, pilarin vaakasiirtymä

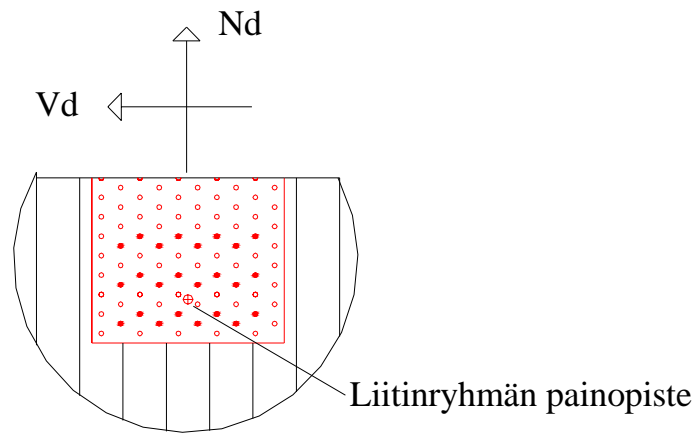
Mastopilarin kantaliitos tehdään jäykkänä liitoksena. Se voidaan tehdä seuraavilla tavoilla: upottamalla betoniin, muototeräsholkeilla, lattateräskiinnityksellä, sisäänliimatuilla ankkuriteräksillä tai vinotankoliitoksilla.

Vinotankoliitoksilla voidaan tehdä helposti mastopilarin kantaliitos. Vinotankoliitoksen mitoitusperusteet esitetään kohdassa 5.5. Yleensä kuormitustapaus KT 2 tuottaa suurimman vedon ja kuormitustapaus KT 5 suurimman momentin ja puristuksen.

Mastopilarin yläpäähän liitos palkkiin voidaan tehdä naulauslevyillä kuvan 39 mukaisesti. Puristava normaalivoima siirretään kontaktilla, joten palkin poikittaisen puristuksen kestävyys on tarkistettava. Mitoittava kuormitustapaus on yleensä KT 5. Naulauslevyn kautta siirretään leikkausvoima sekä vetävä normaalivoima; liitoksen kestävyys tarkistetaan kuormitustapauksien KT 2 ja KT 3 suhteen. Esimerkki liittimien sijoituksesta pilarin päässä ja naulauslevyyn vaikuttavista voimista on kuvassa 40. Liittimien pääty- ja reunaetäisyydet on huomioitava.



*Kuva 39. Reunapilarin yläpäähän liitos.*



Kuva 40. Detalji kuvasta 39, naulojen sijoitus pilarin päässä.

Kuvan 40 mukaiselle liitinryhmälle tulee normaali- ja leikkausvoimaa sekä taivutusmomenttia epäkeskisyydestä johtuen. Liitinryhmä mitoitetaan siihen aiheutuville voimille. Teräslevy mitoitetaan teräsrakenteiden moituskaavojen perusteella.

Liitinryhmän polaarinen jäyhyys lasketaan kaavasta

$$I_p = \sum (x_i^2 + y_i^2) \quad (1)$$

ja liittimeen  $i$  aiheutuvat voimat

$$q_{ix} = \frac{H}{mn} + \frac{My_i}{mI_p} \quad (2)$$

$$q_{iy} = \frac{V}{mn} + \frac{Mx_i}{mI_p}$$

missä  $x_i$  on liittimen  $i$  etäisyys painopisteestä x-suunnassa  
 $y_i$  on liittimen  $i$  etäisyys painopisteestä y-suunnassa  
 $H$  on x-akselin suuntainen voima  
 $V$  on y-akselin suuntainen voima  
 $M$  on liitinryhmän epäkeskisyydestä syntyvä taivutusmomentti  
 $m$  on leikkaustasojen lukumäärä (= 2)  
 $n$  on nauhojen lukumäärä liitinryhmässä.

Nivelpilareiden (keskipilarit) alapäiden liitokset tehdään pultti-teräslevyliitoksin. Teräslevyt ankkuroidaan pilarivaluun ja kiinnitetään pilariin sen läpi menevällä pultilla. Teräslevyn lujuusluokka on tyypillisesti S235 (Fe360) ja pultti 8.8. Pilarin ja betonin väliin asennetaan 10 mm:n neopreenikumi.

Nivelpilarin kantaliitoksen mitoittava kuormitustapaus on yleensä KT 2. Kaksileikkeisen teräs-puu-teräslitoksen kestävyys  $R_d$  lasketaan lausekkeella

$$R_d = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,d} t_2 d \\ 1,1 \sqrt{2 M_{y,d} f_{h,2,d} d} \end{cases} \quad (3)$$

Vetotangot kiinnitetään lapepalkkeihin läpipulttauksella kuvan 41 mukaisesti. Mitoittava kuormitustapaus on yleensä KT 1. Kaksileikkeisin pulttiliitoksen kestävyys  $R_d$  lasketaan lausekkeella

$$R_d = \min \begin{cases} f_{h,1,d} t_1 d \\ 0,5 f_{h,1,d} t_2 d \beta \\ 1,1 \frac{f_{h,1,d} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,d}}{f_{h,1,d} d t_1^2}} - \beta \right] \\ 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,d} f_{h,1,d} d} \end{cases} \quad (4)$$

Edellisissä kaavoissa:

$f_{h,1,d}$  ( $f_{h,2,d}$ ) on reunapuristuksen mitoituslujuus liittyen  $t_1$ : een ( $t_2$ : een)

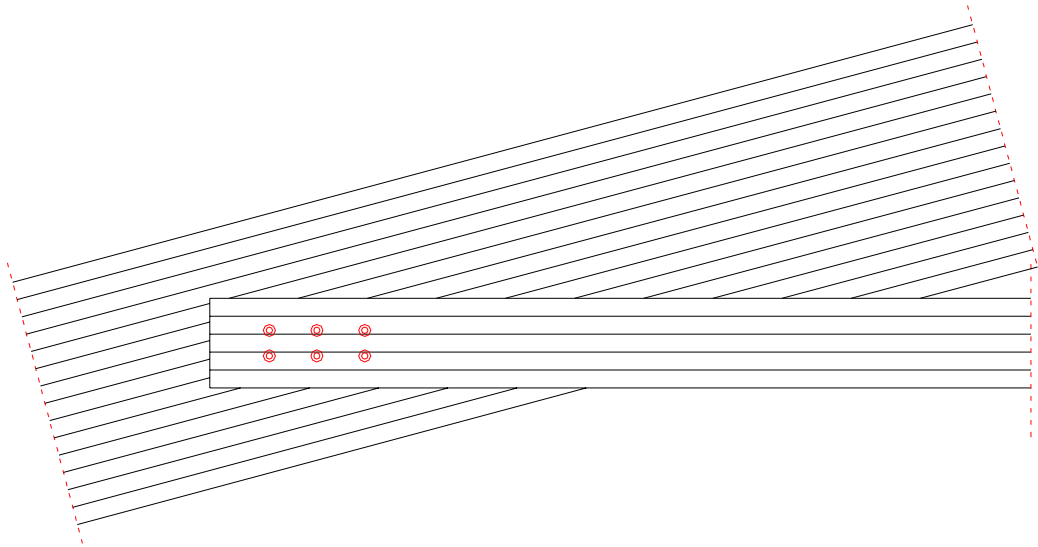
$t_1$  ja  $t_2$  on puun tai levyn paksuus tai tunkeuma

$\beta = f_{h,2,d} / f_{h,1,d}$

$d$  on pultin paksuus

$M_{y,d}$  on liittimen mitoitusmyötömomentti.

Vetotangon kiinnitys aiheuttaa poikittaista vetoa palkkiin. Poikittaisen vedon kestävyys tarkistetaan kaavoilla 5.



*Kuva 41. Vetotangon liitos lapepalkkiin.*

Nivelpilarin yläpään liitos palkkiin voidaan tehdä kolmella vaihtoehtoisella tavalla:

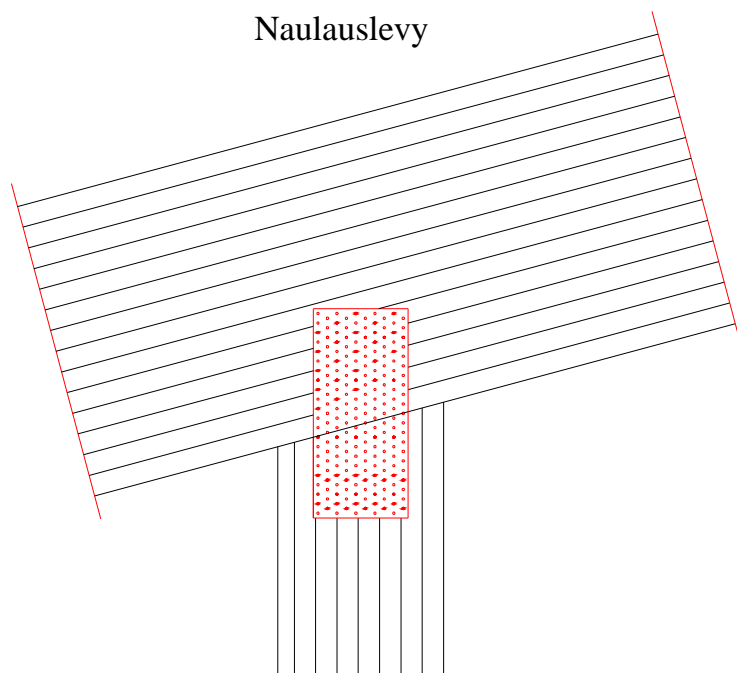
- naulauslevyt
- naulauslevyt + liimapuinen apupala
- liimattu terästanko.

Eri liitostavat on esitetty kuvissa 42–44. Pelkkää naulauslevyä voidaan käyttää, kun saumassa vaikuttava vaakavoima on pieni. Suuremmilla pilarin puristusvoimilla palkin suuntainen vaakavoima kasvaa niin suureksi, että naulauslevyn kapasiteetti ei riitä. Yleensä liitoksen kitkaa ei voida hyödyntää mitoituksessa.

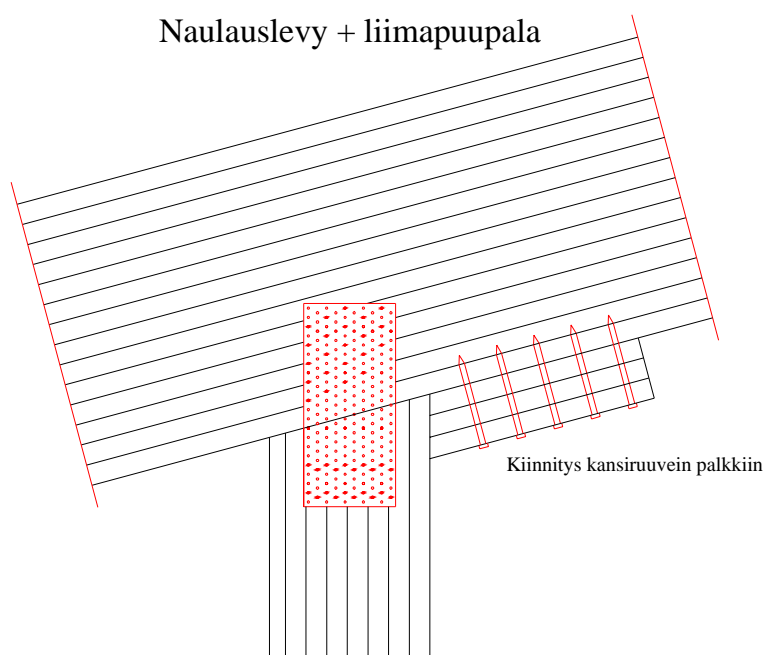
Suurempien vaakavoimien tapauksessa liitos voidaan tehdä naulauslevyillä ja liimapuisella apupalalla, joka kiinnitetään ruuvaamalla lapepalkin alapintaan. Puristava normaaliavoima siirretään kontaktilla ja palkin poikittaisen puristuksen kestävyys tarkistetaan. Sauman suuntainen komponentti siirretään kontaktilla pilarilta apupalalle, josta voima siirretään ruuveilla lapepalkille kuvan 43 mukaisesti. Apupala kiinnitetään lapepalkkiin kansiruuveilla.

Liitos voidaan myös tehdä liimatulla terästangolla, kuva 44. Tämä edellyttää sitä, että tanko liimataan valmiiksi tehtaalla pilarin päähän ja palkkiin tehdään reikä valmiiksi oikeaan kohtaan. Työmaalla palkki pudotetaan paikalleen ja reikä liimataan täyteen.

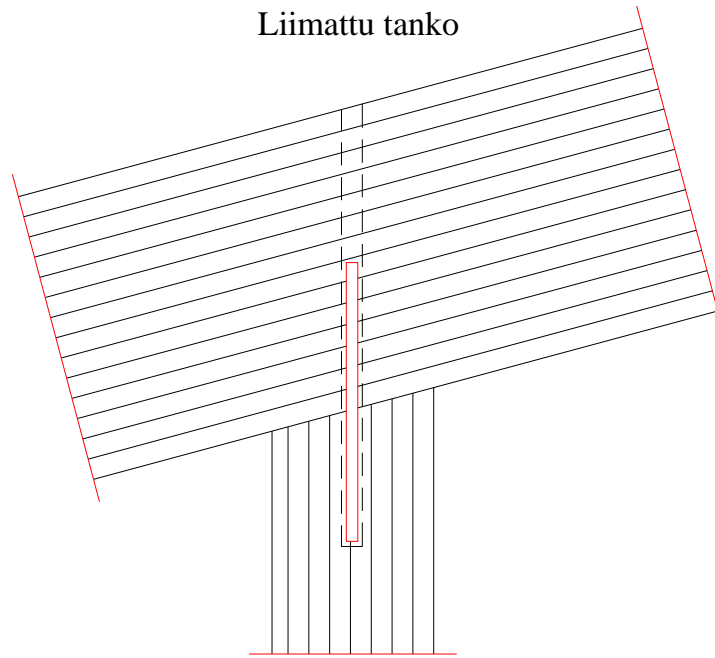
Naulauslevy kiinnitetään pilariin ja palkkiin nauloilla. Yleensä mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Naulauslevy mitoitetaan vetävälle normaalivoimalle, liitoksen kestävyys tarkistetaan kuormitustapausten KT 2 suhteen.



*Kuva 42. Nivelpilarin yläpään liitos, kiinnitys naulauslevyllä.*



*Kuva 43. Nivelpilarin yläpään liitos, kiinnitys naulauslevyllä ja liimapuisella apupalalla.*



Kuva 44. Nivelpilarin yläpään liitos, kiinnitys liimatulla tangolla.

Vetävä normaalivoima aiheuttaa lapepalkkiin poikittaista vetoa. Poikittaisen vedon kestävyys tarkistetaan kaavoilla

$$\sigma_{t,90,d} = \eta k_r \frac{F_{90,d}}{A_{ef}} \leq 13 A_{ef}^{-0,2} f_{t,90,d} \quad (5)$$

missä

$$\eta = 1 - 3 \left( \frac{b_e}{h} \right)^2 + 2 \left( \frac{b_e}{h} \right)^3$$

$$k_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i}{h} \right)^2$$

$$A_{ef} = l_{r,ef} t_{ef}$$

$$l_{r,ef} = \sqrt{l_r^2 + (ch)^2}$$

$$c = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{b_e}{h} \left( 1 - \frac{b_e}{h} \right)^3}$$

joissa  $h$  on palkin korkeus

$b_e$  on kuormitetun reunan etäisyys kauimmaiseen liittimeen

$h_i$  on liitinrivin etäisyys kuormittamattomasta reunasta

$n$  on liitinrivien lukumäärä



$l_r$  on kauimmaisten liittimien välisen etäisyyden kohtisuora projektio liittossaumalle

$t_{ef}$  on rakenneosan tehollinen paksuus = liittimien tunkeumien summa

$f_{t,90,d}$  on liimapuun poikittainen vetolujuus

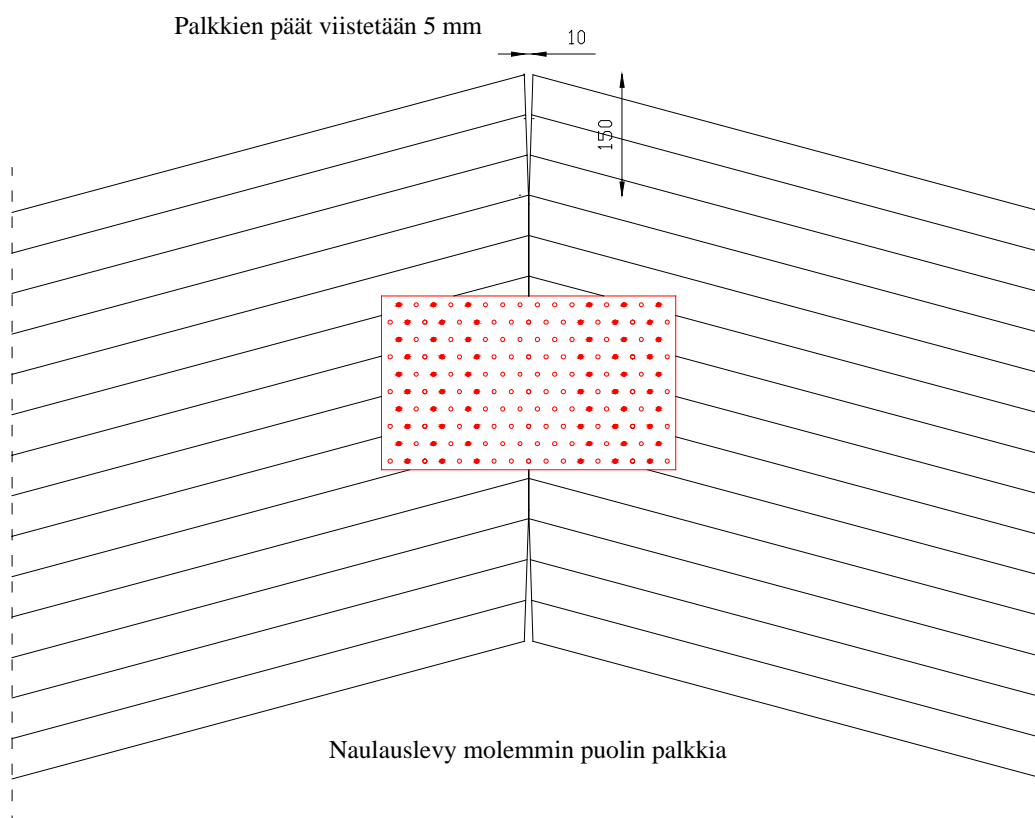
$F_{90,d}$  on poikittainen vetovoima.

Harjaliitos tehdään naulauslevyillä. Naulauslevyt sijoitetaan ja palkin reunat viistetään kuvan 45 mukaisesti. Yleensä tarkistetaan kuormitustapaukset KT 1, KT 2, KT 3 ja KT 5. Liitoksen puristavasta vaakavoimasta 2/3 siirretään kontaktilla sauman yli. Liitosvoiman pysty- ja vaakakomponentit (kuva 46) lasketaan palkin normaali- ja leikkausvoimista kaavoilla:

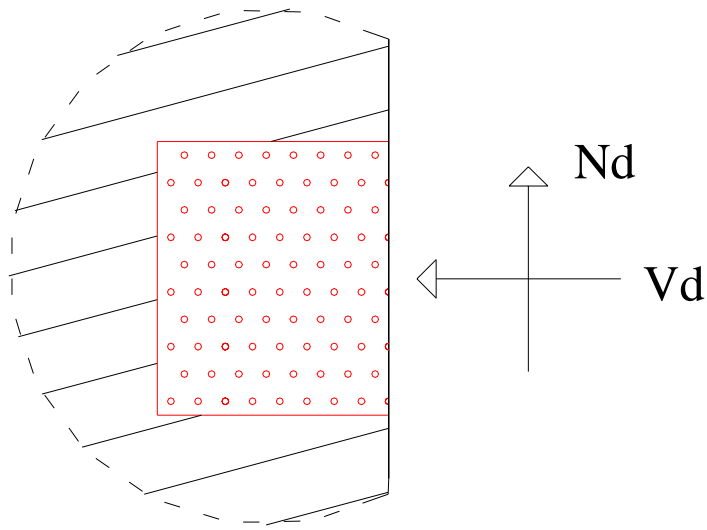
$$V_d = N \sin \alpha - Q \cos \alpha \quad (6)$$

$$N_d = \frac{N \cos \alpha + Q \sin \alpha}{3} \quad (7)$$

Levyjen naulaus mitoitetaan kaavojen (1)–(3) perusteella.



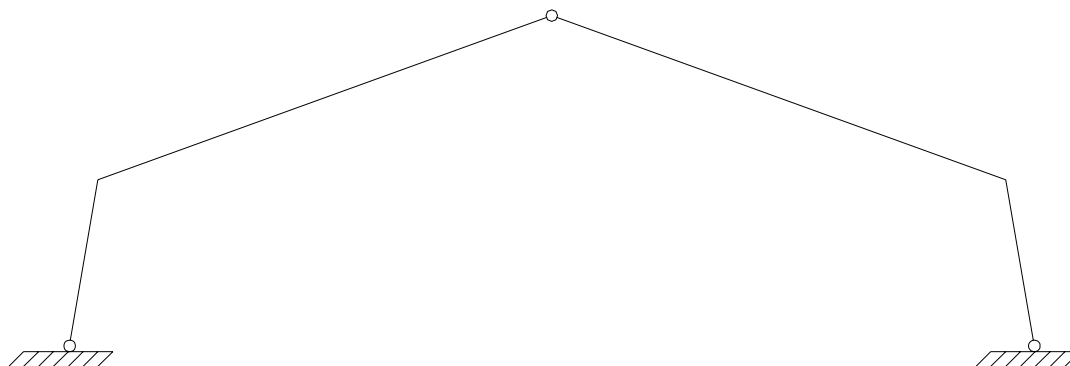
Kuva 45. Harjaliitos toteutettuna naulauslevyillä.



*Kuva 46. Detalji kuvasta 45, jossa esitetään liitoksessa vaikuttavat voimat.*

Myös naulauslevyn nurjahdus on tarkistettava. Liitossauman lähelle voidaan sijoittaa ylimääräisiä nauloja, jotta levyn nurjahduspituus saadaan pienemmäksi. Nurjahduskestävyys lasketaan teräsrakenteiden mitoitusmenetelmien perusteella.

## 5.4 Kolminivelkehä



Kuva 47. Kolminivelkehän laskentamalli.

### Staattinen malli ja kuormitukset

Pääkannatin on yhdistetty kertopuinen kolminivelkehä. Harja- ja kantaliitokset ovat nivelellisiä. Kuvassa 47 on staattinen malli. Kehäpalkin ja kehäpilarin nurkkaliitos voidaan olettaa jäykäksi normaalitapauksissa. Jos halutaan tarkemmat tulokset, nurkkaliitos voidaan mallintaa joustavaksi.

Taulukossa 10 ovat tyypilliset kuormitustapaukset. Koska pysyvän kuorman osuus on pieni, tarkastellaan vain lyhytaikaista lumikuormaa.

Taulukko 10. Kolminivelkehän tyypilliset kuormitustapaukset ja kuorman osavarmuuskertoimet Eurocode-mitoituksessa.

Kuormitustapaus	Kuormatyyppi			Huom.
	Pysyvä	Lumi	Tuuli	
1	1,2	1,5		
2	0,9		1,5	suurin noste
3	1,2	1,5 x 0,5	1,5	suurin vaakavoima
4	1,2	1,5		Toispuolinen lumi
5	1,2	1,5	1,5 x 0,5	Toispuolinen lumi + tuuli
6	1,0	1,0		KRT, harjapisteen taipuma
7	1,0		1,0	KRT, harjapisteen vaakasiirtymä

## Nurkkaliitoksen mitoitus

Pilarin voimasuureista saadaan nurkkapisteeseen vaikuttavat pysty- ja vaakavoimat ( $V$  ja  $H$ ):

$$V = N_{pilari} \sin \alpha - Q_{pilari} \cos \alpha \quad (8)$$

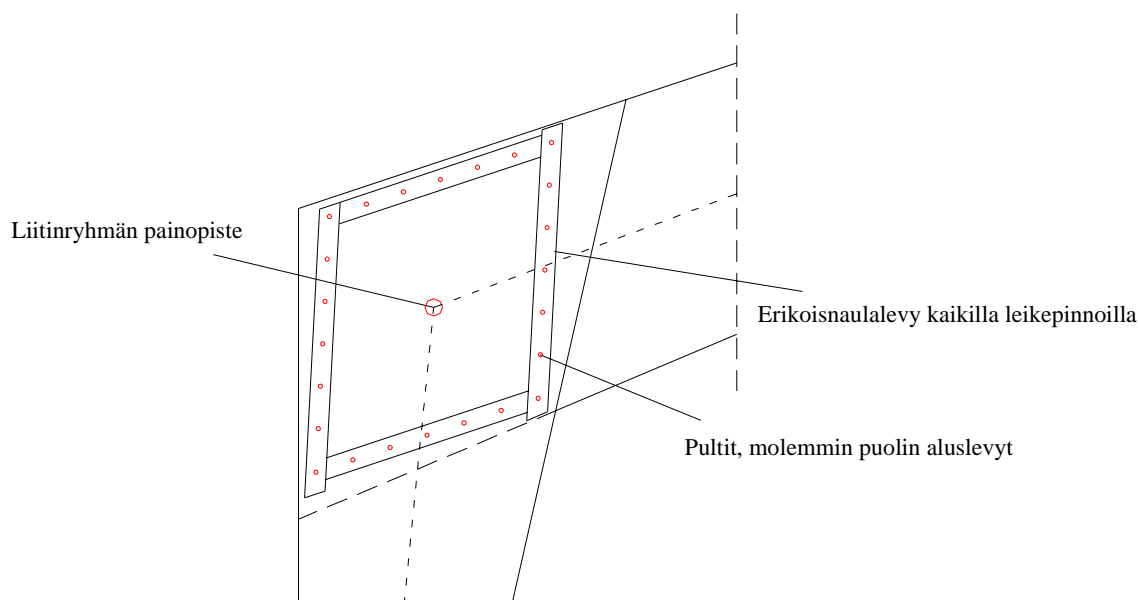
$$H = N_{pilari} \cos \alpha + Q_{pilari} \sin \alpha \quad (9)$$

joissa  $N_{pilari}$  on pilarin normaalivoima nurkkapisteessä

$Q_{pilari}$  on pilarin leikkausvoima nurkkapisteessä

$\alpha$  on pilarin kaltevuus pystysuoraan verrattuna.

Liittimet sijoitetaan siten, että syntyvän liitinryhmän painopiste yhtyy staattisen mallin pisteeseen, jossa palkki- ja pilariosa yhtyvät. Kuvassa 48 esitetään nurkka-alue ja liittimien sijoitus. Nurkkaliitos voidaan tehdä tappivaarnoilla tai pulteilla. Pulttiliitos voidaan myös vahvistaa naulalevynauhoilla [22]. Kuvan 48 liitoksessa on käytetty naulalevynauhoja.



*Kuva 48. Naulalevyillä vahvistettu kolminivelkehän nurkka.*

Naulalevyillä vahvistetuissa liitoksissa käytetään yleensä M16- tai M20 8.8 -pultteja. Vahvistusnaulalevyn pitää olla siihen käyttötarkoitukseen tarkoitettu erikoisnaulalevy, jossa keskialue on meistämatön. Tyypillinen levyn nimellinen ainevahvuus  $t = 1,3$  mm ja laatu Z36. Naulalevyvahvistukset tulevat kaikille puupinnoille eli yhteensä kuudelle pinnalle. Nurkkaliitoksen kannalta mitoittava kuormitustapaus on yleensä KT 3.

Liittimille tulevat voimat lasketaan kaavoista (1) ja (2).

Liittimien kestävyys lasketaan kaavoilla (10). Kaavat ovat normaalille tappivaarna-liitokselle. Naulalevyvahvistusta käytettäessä naulalevyn vaikutus otetaan huomioon levyille annettujen mitoitusohjeiden perusteella (ks. lähde [22]).

$$R_d = \min \begin{cases} f_{h,1,d} t_1 d \\ 0,5 f_{h,1,d} t_2 d \\ 1,1 \frac{f_{h,1,d} t_1 d}{3} \left[ \sqrt{4 + \frac{12M_{y,d}}{f_{h,1,d} d t_1^2}} - 1 \right] \\ 1,1 \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{2M_{y,d} f_{h,1,d} d} \end{cases} \quad (10)$$

missä  $f_{h,1,d}$  on kertopuun reunapuristuksen mitoituslujuus liittyen  $t_1$ :een ( $t_2$ : een)  
 $t_1$  ja  $t_2$  ovat kertopuun paksuuksia  
 $d$  on liittimen läpimitta  
 $M_{y,d}$  on tappivaarnan mitoitusmyötömomentti.

### Puuosien mitoitus

Nurkkaliitoksen kiertymäjäykkyys  $K_r$  lasketaan kaavasta:

$$K_r = \sum_{i=1}^n K_u r_i^2 \quad (11)$$

missä  $K_u$  on yksittäisen liittimeen siirtymäkerroin  
 $r_i$  on yksittäisen liittimen ja liitoksen painopisteen välinen etäisyys.

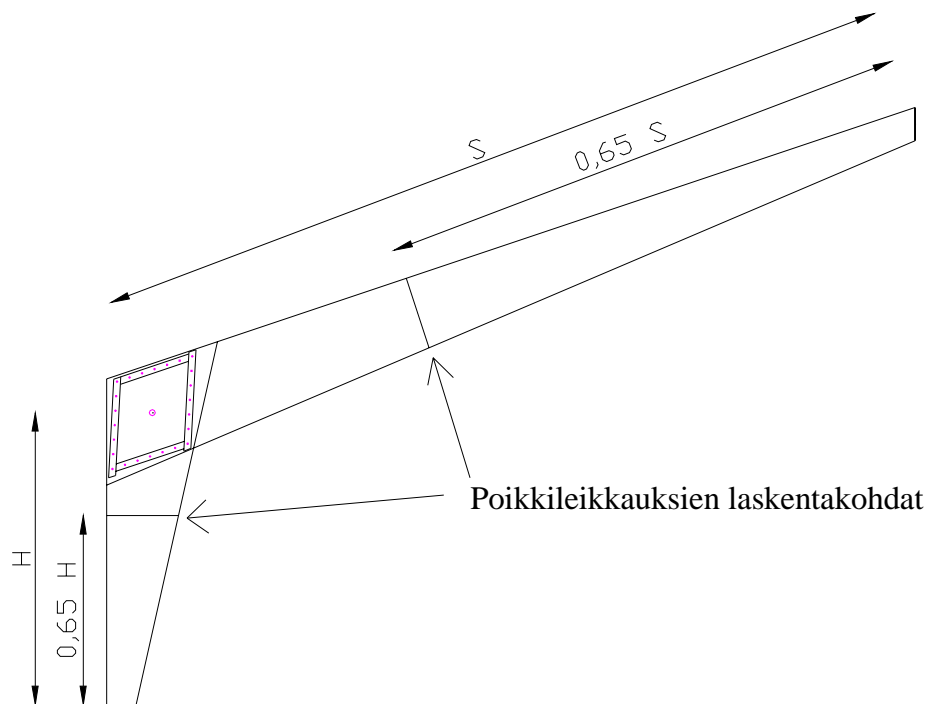
Kehäjalan ja kehäpilarin nurjahduspituudet  $l_{ef}$  kehän tasossa saadaan kaavoista:

$$l_{ef,kehäjalka} = h \sqrt{4 + 3,2 \frac{I_s}{I_0 h} + 10 \frac{EI}{h K_r}} \quad (12)$$

$$l_{ef,kehäpalkki} = h \sqrt{4 + 3,2 \frac{I_s}{I_0 h} + 10 \frac{EI}{h K_r}} \sqrt{\frac{I_0 N}{I N_0}} \quad (13)$$

joissa  $h$  on kehäjalan korkeus  
 $s$  on kehäpalkin pituus  
 $I$  on kehäjalan hitausmomentti  
 $I_o$  on kehäpalkin hitausmomentti  
 $N$  on kehäjalan normaalivoima  
 $N_o$  on kehäpalkin normaalivoima.

Poikkileikkaukseltaan vinosti muuttuvien palkkien ja pilareiden yhteydessä poikkileikkausten jäyhyysmomentit lasketaan pisteissä  $0,65 s$  ja  $0,65 h$  kuvan 49 mukaisesti. Nurjahduspituuksien laskemisen jälkeen nurjahdusmitoitus etenee normaalisti.



Kuva 49. Poikkileikkaussuureiden laskentakohdat nurjahduspituuksia laskettaessa.

Yleensä voidaan olettaa että ulkoreunoilla olevat sekundäärit estävät poikittaisen nurjahduksen myös niillä alueilla, joilla poikkileikkaus on kokonaan puristettu. Nurkka-alueella kiepahdustuet myös estävät poikittaisen nurjahduksen. Sekundäärijako pilari- ja palkkiosalla määritellään siten, että nurjahdus tasosta pois päin ei tule mitoittavaksi. Jos sekundäärijako on tätä suurempi, palkin tai pilarin paksuutta on kasvatettava.

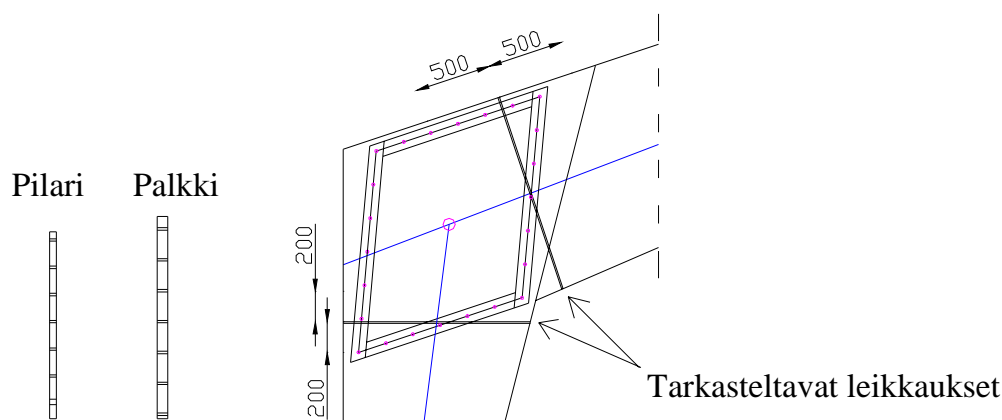
Katto- ja seinäsekundäärit tukevat kehärakenteen ulkopintoja eli alueet, joissa momentti aiheuttaa rakenteen ulkopintaan puristusta, ovat kiepahduksen kannalta hoidossa. Kiepahduksen kannalta ongelman muodostavat alueet, joissa momentti aiheuttaa puristusta rakenteen alapintaan.

Vaadittava poikittainen stabiilitetti kiepahduksen kannalta voidaan saavuttaa seuraavilla tavoilla:

- Lisätään palkin ja pilarin leveyttä riittävästi. Tämä tulee yleensä kysymykseen ai-noastaan pienissä kolminivelkehissä.
- Lisätään tarvittava määrä sivutukia. Useissa tapauksissa riittää yksi sivutuki palkki-osan keskellä. Nurkassa on kuitenkin aina oltava sivutuki.
- Kehäpilari kootaan jäykäksi koteloksi, jolloin sen kiepahduserkkyys pienenee. Kotelon kokoaminen voidaan tehdä ruuvipuristusliimaamalla.

Nurkka-alueen mitoituksessa voidaan olettaa, että nurkka alue ei kiepahda. Sen sijaan nurkka-alueen mitoituksessa huomioidaan kuvan 50 mukaisesti poikkileikkauksissa pulttinreikien ja naulalevyjen aiheuttamat vähennykset. Naulalevyn aiheuttama paksuuden pientyminen on riippuvainen naulalevytyypistä ja voima-syykulmasta. Esimerkiksi käytettäessä TOP-W-erikoisnaulalevyä ja voimasyykulman ollessa suurempi kuin  $10^\circ$  reduktiopaksuus  $B_{red} = 3$  mm. Koska naulalevyt ovat kaikilla leikepinnoilla, on puun tehollinen paksuus  $B_{ef} = B - 2B_{red}$ .

Vedetystä ja/tai taivutetusta Kerto-S-poikkileikkauksesta vähennetään kaikkien alle 500 mm:n päässä tarkastelutasosta sijaitsevien pulttinreikien syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa olevat projektioalueet, kuva 50. Kerto-Q-poikkileikkauksessa vastaava etäisyys on 200 mm.



Kuva 50. Teholliset poikkileikkaukset nurkka-alueella.

Kenttämomentti aiheuttaa vetoa palkin alapintaan ja, koska palkin alapinta on vino, on taivutuslujuutta ja taivutusjännitystä korjattava normien mukaisesti.

Kiepahdustuet mitoitetaan voimalle  $F_d$  kaavalla

$$F_d = N_d/80 \tag{14}$$
$$N_d = (1 - k_{krit}) \frac{M_d}{h}$$

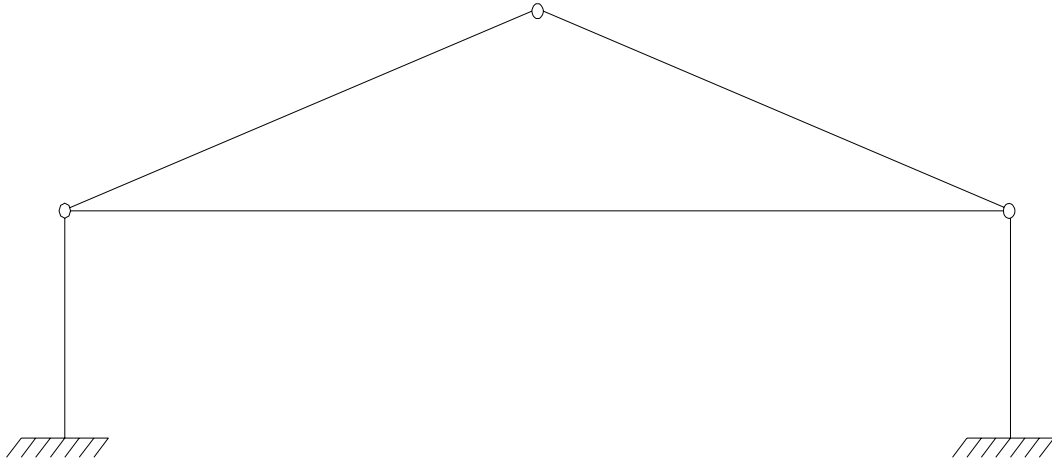
missä  $k_{krit}$  on rakenneosan kiepahduskerroin

$M_d$  on rakenneosan maksimomentin mitoitusarvo

$h$  on rakenneosan korkeus.



## 5.5 Vetotangollinen liimapuukehä



*Kuva 51. Vetotangollisen liimapuukehän laskentamalli.*

Pääkannatin on teräsvetotangoilla toteutettu liimapuukehä. Staattinen malli on kuvassa 51. Pilarit ovat mastopilareita, jotka jäykistävät kehän sivusuunnassa. Palkin ja pilarin välinen liitos sekä harjaliitos ovat nivelellisiä. Vetotangon venymä on huomioitava. Rakenne voidaan tehdä myös kertopuisena, jolloin myös vetotanko voi olla kertopuuta.

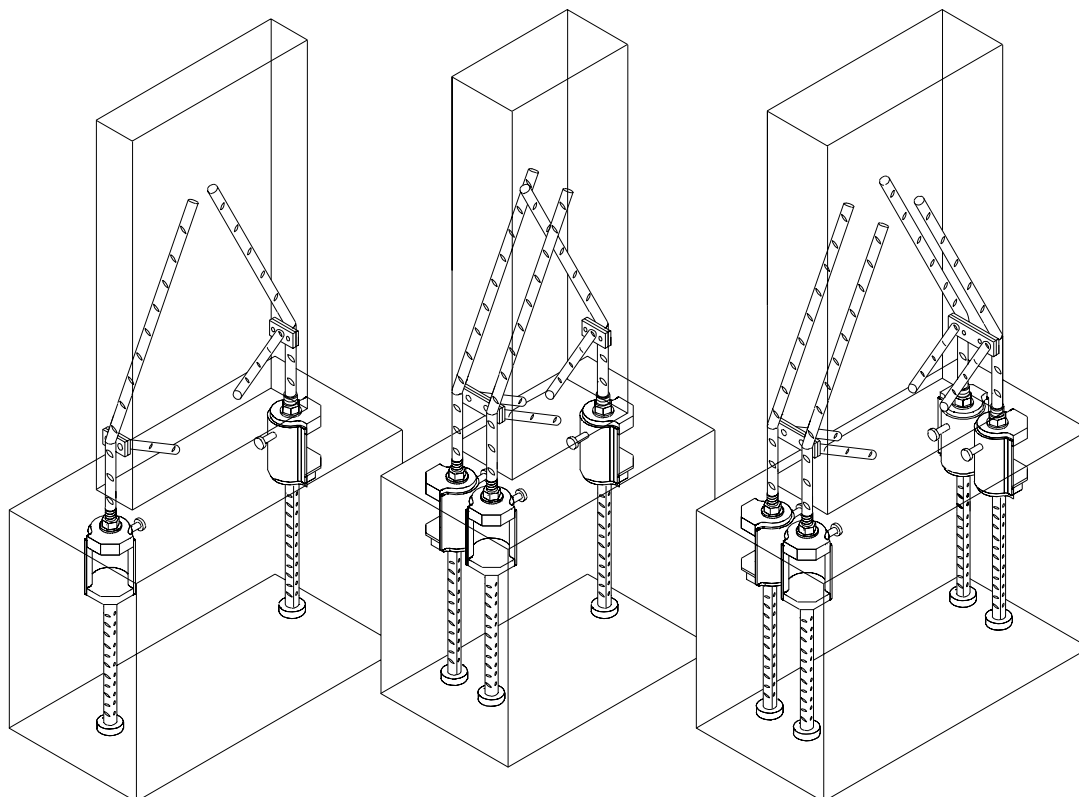
Taulukossa 10 esitetään tyypilliset kuormitustapaukset. Kuormitustapaus 2:ssa vetotanko saattaa muuttua puristetuksi. Tällöin kattorakenteen on siirrettävä vaakavoimia niin, että vetotanko ei pääse nurjahtamaan.

Kehän liitokset tehdään vinotankoliitoksina. Vinotankoliitokset voivat olla jäykkiä tai nivelellisiä. Jäykkä mastopilarin kantaliitos voidaan tehdä kuvassa 52 esitetyllä APL-T-kantaliitoksella. Palkin ja pilarin välinen liitos sekä harjaliitos voidaan tehdä kuvassa 53 esitetyllä APL-P-puristusliitoksella.

APL-T-kantaliitokset on tarkoitettu liimapuupilareiden kiinnittämiseen momenttijäykästi perustuksiin. Liitos siirtää pilarin alapään momentista ja mahdollisesta tuulen imusta aiheutuvaa vetoa, leikkausta ja asennusaikaista puristusta perustukselle. Voimat ankkuroidaan puuhun syysuuntaan vinosti liimatuilla harjateräksillä, joista toiseen tankoon muodostuu vetoa ja toiseen puristusta.

APL-P-puristusliitokset on tarkoitettu pääosin puristusrasitettuihin liitoksiin siirtämään puristus-, leikkaus- ja vetovoimia. Voimat ankkuroidaan puuhun liimatuilla yhdensuuntaisilla harjaterästartunnoilla. Liitos toimii nivelellisesti.

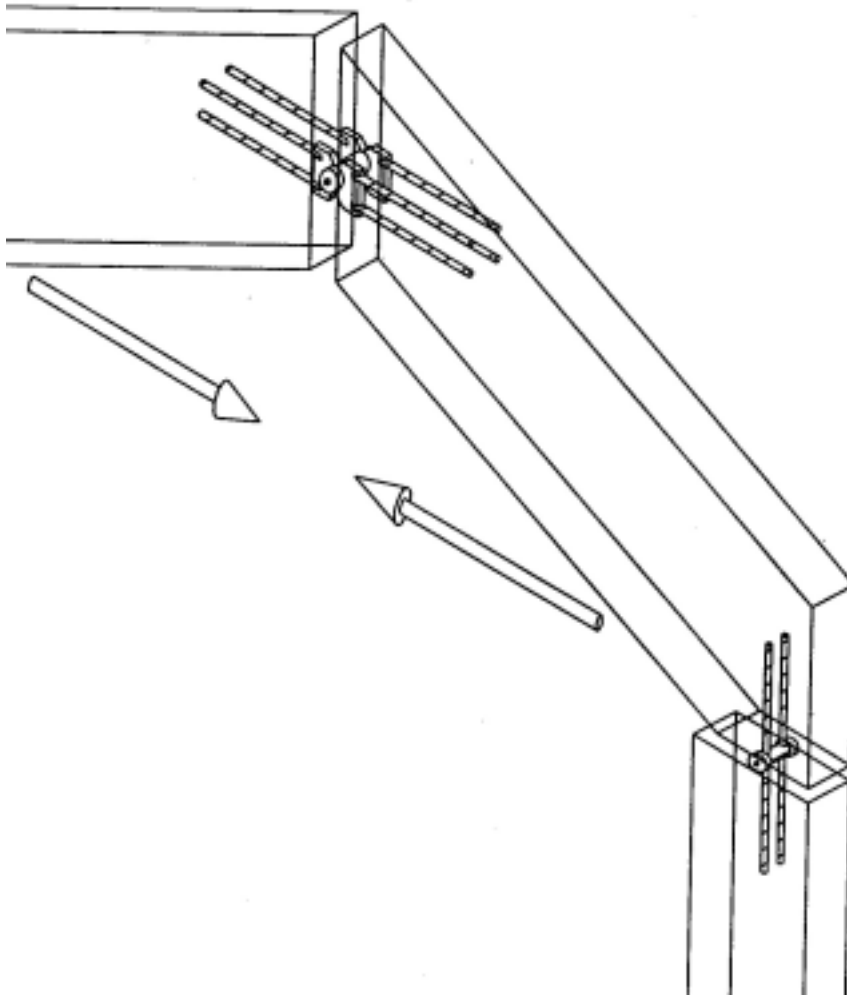
Liitososat mitoitetaan valmistajan tuoteselosteen perusteella. Taulukoissa 11 ja 12 esitetään vakioitujen vinotankoliitosten kapasiteetit. Tarkemmat mitoitusperusteet on esitetty lähteissä [15] ja [16].



Kuva 52. Kantaliitokseen tarkoitettuja vinotankoliitoksia APL-T [15].

Taulukko 11. Kantaliitoksen APL-T-laskentakapasiteetit syynsuuntaiselle vedolle  $F_{uv}$ , kohtisuoralle leikkaukselle  $V_{u1}$  ja momentille heikompaan suuntaan  $M_{u2}$  lyhytaikaisessa kuormituksessa [15].

Liitos	$F_{uv}$ [kN]	$V_u$ [kN]	$M_u$ [kNm]
APL16T	71	0,72	-
APL24T	142	1,62	-
APL30T	223	2,58	-
APL16T-2	142	1,44	3,9
APL24T-2	284	3,24	12,0
APL30T-2	446	5,16	24,0



Kuva 53. Harja- ja palkki-pilari-liitoksissa käytettävät vinotankoliitokset (APL-P-puristusliitos) [16].

Taulukko 12. APL-P-puristusliitoksen laskentakapasiteetit lyhytaikaisessa kuormituksessa [16].  $\alpha$  on voiman ja puun syyn suunnan välinen kulma.

Liitos	$F_{up}$ puristus [kN]	$F_{uv}$ veto [kN]	$V_u$ leikkaus [kN]	
			$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
APL16P-2	182	109	16,7	52,8
APL20P-2	285	171	25,3	79,9
APL25P-2	446	267	37,7	119
APL20P-4	570	342	50,6	159
APL25P-4	892	535	75,4	238

## 6. Hallien jäykistäminen

### 6.1 Jäykistyssysteemit

Rakenteet on jäykistettävä vaakavoimia vastaan. Merkittävimmät vaakavoimat aiheutuvat tuulesta sekä rakenteiden nurjahdus- ja kiepahdustuentavoimista. Hallirakenteet voidaan jäykistää usealla eri tavalla. Yleisimmät käytössä olevat jäykistystavat ovat:

#### Mastojäykistys

- pilarin jäykkä kiinnitys perustuksiin
- tyypillinen liimapuuhallien jäykistystapa
- useita liitostyyppejä
- voimat siirretään kattorakenteelta pilarin päihin.

#### Levyjäykistys

- profiilipelti tai levytys joka siirtää vaakavoimia esim. päätyrakenteille
- Sisäkaton levytystä käytetään NR-rakennuksien jäykistämiseksi, sen sijaan profiilipellin käyttö Suomessa puurakenteisten rakennuksien suunnitelmallisessa jäykistämiseksi on ollut harvinaista. Yhdysvalloissa profiilipeltiä käytetään yleisesti puurakenteiden jäykistämiseksi.

#### Kehäjäykistys

- keharakenteen jäykät nurkat jäykistävät rakenteen
- esimerkiksi kolminivelkehän jäykkä nurkkaliitos.

#### Ristikkojäykistys

- rakenne jäykistetään erilaisilla vinosauvoilla ja ristikoilla
- vinoreivaukset
- yläpohjan jäykistysristikot.

Käytännössä esiintyi myös näiden eri tapojen yhdistelmiä.

Jäykistys suunnitelmassa olennaista on toimivan voimansiirtopolun suunnittelu eli se, miten ja mitä kautta vaakavoimat johdetaan perustuksille. Otetaan esimerkiksi kohdassa 5.2 esitetty Post-Frame-halli ja esitetään tämän tapauksen voimansiirtopolku.

Post-Frame-hallin voimansiirtopolku:

- 1 Tuuli rakennuksen pitkälle sivulle
- 2 Seinäosaan kohdistuva tuulen vaakavoima siirtyy pilarille, josta osa siirtyy suoraan perustuksille ja osa yläpohjarakenteille. Pilarin ja ristikon liitos mitoitetaan siirtyvälle vaakavoimalle. Perustuksille siirtyvä vaakavoima huomioidaan maapohjan kantavuusmitoituksessa.
- 3 Katto-osaan kohdistuva tuulen vaakavoima siirtyy yläpohjarakenteille
- 4 Yläpohjarakenteille kohdistuva tuulen vaakavoima mallinnetaan jatkuvaksi vaakakuormaksi pilarin yläpäähän tasolle
- 5 Yläpohjan profiilipeltikate mitoitetaan tällä jatkuvalla kuormalle. Levykenttä toimii palkkina ja siirtää vaakavoimat rakennuksen pätyihin. Tarkistetaan levykentän, kiinnikkeiden ja reunapaarteiden kestävyys.
- 6 Rakennuksen päädyissä voimat siirtyvät profiilipellistä orsiin ja näistä päädyn yläjuoksulle. Tarkistetaan kiinnikkeiden ja profiilipellin pään kestävyys.
- 7 Vaakajuoksu kiinnitetään päädyn pilareihin. Vaakajuoksussa vaikuttava voima voidaan jakaa kaikille päädyn pilareille. Tarkistetaan liitoksen kestävyys.
- 8 Pilareiden yläpäissä vaikuttavat vaakavoimat siirretään vinoreivauksilla pilareiden alapäihin. Tarkistetaan vinoreivauksen liitokset molemmissa päissä sekä vinoreivauksen kestävyys.
- 9 Pilarin alapään sivun kautta vaakavoima siirretään perustuksille joko kontaktilla tai liitoksella. Tarkistetaan perustuksen kestävyys.

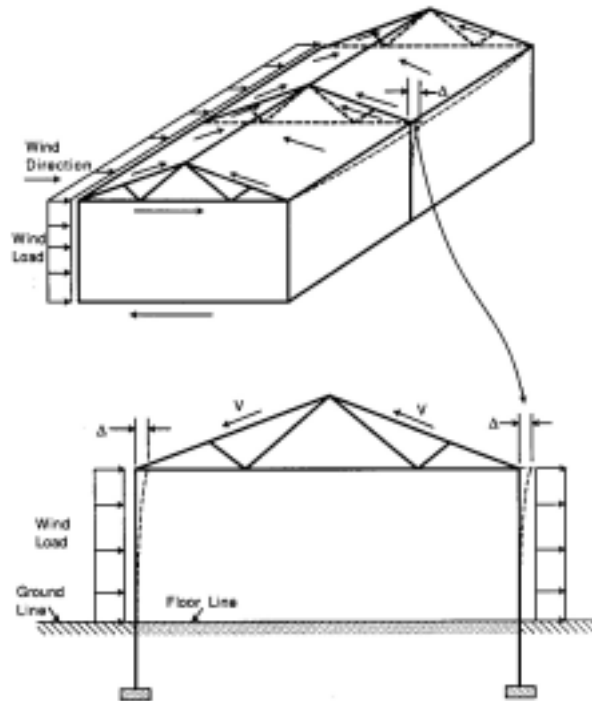
## 6.2 Profiilipeltikatteen hyödyntäminen jäykistämässä

### 6.2.1 Yleistä mitoituksista

Katon profiilipelti muodostaa levykentän, jota käytetään hyväksi kehän jäykistyksessä. Levykenttä siirtää voimia päätyseinille ja pienentää yksittäisen kehän rasituksia. Voima-suureiden jakautuminen kehän (pilarit + NR-ristikko) ja levykentän kesken riippuu näiden jäykkyyksien suhteesta. Kuvassa 54 on esimerkki laskentamallista.

Pienissä rakennuksissa jäykistys voidaan yksistään tehdä profiilipellin avulla, suuremmissa rakennuksissa käytetään lisäksi muita jäykistyksiä.

Mitoituksessa lasketaan levykentän jäykkyys ja voimien jakautuminen levykentän ja muiden jäykisteiden välillä sekä tarkistetaan levykentän, kiinnikkeiden ja reunapaarteiden kestävyys. Esitetty mitoitusmenetelmä perustuu lähteisiin [3], [4] ja [5]. Muilta osin esitetyt kaavat perustuvat Eurocode 5:een, lähde [6].



Kuva 54. Periaatekuva levykentällä jäykistetyn rakennuksen voimista ja siirtymistä [3].

Mitoituksessa tarkistettavat asiat ovat:

- levykentän jäykkyys eli voimien jakaantuminen kehän ja levykentän välillä
- levykentän ja kiinnikkeiden kestävyys
- levykentän paarteiden kestävyys.

Profiilipellin mitoitukseen on tulossa Excel-perustainen mitoitusohjelma, joka on saatavissa VTT:n Internet-sivuilta ([www.vtt.fi](http://www.vtt.fi)). Profiilipeltijäykiste voidaan myös mitoittaa esimerkiksi Dafi-ohjelmalla, joka on saatavilla Internet-osoitteesta [nfba.org/html](http://nfba.org/html).

### **6.2.2 Levykentän ja kehän jousto**

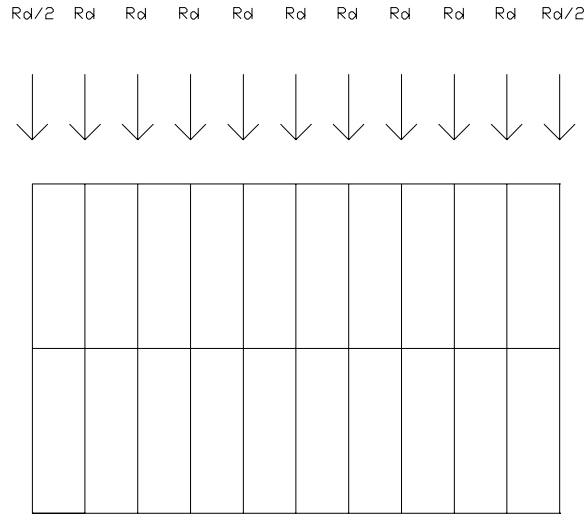
Levykentän ja kehän jäykkyydet määräävät sen, miten voimasuuret jakaantuvat levykentän ja kehän välillä. Levykenttä siirtää voimia päätyseinille ja pienentää yksittäisen kehän rasituksia.

Levykentän jäykkyyteen vaikuttavat:

- profiilin vääristymä
- levyn leikkausmuodonmuutos
- liitoksien liukumata (levysaumata, levyn ja orren liitos, orren ja primäärin liitos)
- muodonmuutokset reunarakenteissa.

Näistä merkittävimmät muuttujat ovat profiilin vääristymä, liitoksien liukumata sekä reunarakenteen aksiaalimuodonmuutokset.

Kuvassa 55 on periaatekuva levykentästä ja siihen vaikuttavista voimista.



Kuva 55. Levykenttä ja siihen kohdistuvat vaakapistevoimat  $R_d$ .

Mitoituslausekkeet eri joustotekijöille lähteen [3] mukaan ovat seuraavia:

a) profiilin vääristymä

$$c_{1,1} = \frac{ad^{2,5}\alpha_1\alpha_4K}{Et^{2,5}b^2} \quad (15)$$

b) levyn leikkausmuodonmuutos

$$c_{1,2} = \frac{2a\alpha_2(1+\nu)(1+\frac{2h}{d})}{Etb} \quad (16)$$

c) levyn ja orren kiinnitys

$$c_{2,1} = \frac{2as_p p \alpha_3}{b^2} \quad (17)$$

d) saumakiinnittimien jousto

$$c_{2,2} = \frac{2s_s s_p (n_{sh} - 1)}{2n_s s_p + \beta_1 n_p s_s} \quad (18)$$

e) orren ja primäärin kiinnitys



$$c_{2,3} = \frac{4(n-1)}{n^2 n_p} \left( s_{pr} + \frac{s_p}{\beta_2} \right) \quad (19)$$

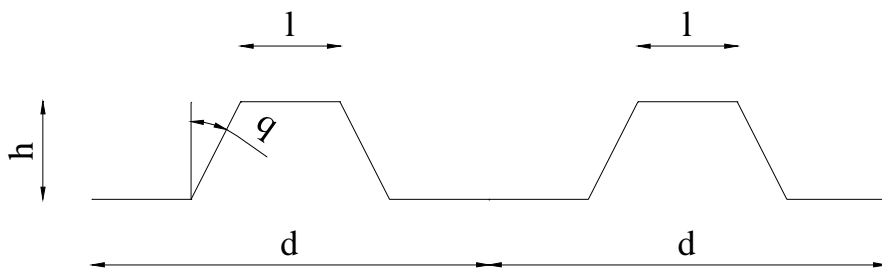
f) reunarakenteen aksiaalimuodonmuutos

$$c_3 = \frac{n^2 a^3 \alpha_3}{4,8 E_p A b^2} \quad (20)$$

Edellisissä kaavoissa on käytetty seuraavia merkintöjä:

$a$	jäykistelevyn pituus poimuja vastaan kohtisuorassa suunnassa (mm)
$A$	pituuosuunnan reunasauvan poikkileikkausala (mm <sup>2</sup> )
$b$	jäykistelevykentän sivumitta poimujen suunnassa (mm)
$d$	poimuväli (mm)
$E$	teräksen kimmokerroin (kN/mm <sup>2</sup> )
$E_p$	puun kimmokerroin (kN/mm <sup>2</sup> )
$h$	profiilin korkeus (mm)
$K$	profiilin joustovakio, joka määräytyy levyn kiinnitystiheyden mukaan (ks. taulukot 15 ja 16)
$p$	levyn ja orren välisten kiinnikkeiden keskinäinen väli (mm)
$t$	levyn laskentapaksuus (mm)
$n$	jäykistelevyn osakenttien lukumäärä levyn pituuosuunnassa
$n_b$	levypituuksien lukumäärä jäykistelevyn muodostaman palkin korkeuden suunnassa
$n_f$	levyn ja orren välisten kiinnikkeiden lukumäärä levyn muodostaman palkin korkeutta kohti
$n_p$	orsien lukumäärä
$n_s$	sivulimityksen kiinnikkeiden lukumäärä limitystä kohti
$n_{sh}$	levyn leveyksien lukumäärä osakenttää kohti
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	kertoimet joilla huomioidaan väliorsien vaikutus, ks. taulukko 13
$\alpha_4$	kerroin, jolla huomioidaan peräkkäisten levyjen vaikutus $\alpha_4 = 1,0$ ; $n_b = 1$ $\alpha_4 = (1 + 0,3n_b)$ ; $n_b > 1$
$\beta_1, \beta_2$	kertoimet joilla huomioidaan levyn leveydellä olevien levy-orsikiinnittimien lukumäärä, ks. taulukko 14
$s_p$	levy-orsikiinnittimen jousto (mm/kN)
$s_{pr}$	orsi-primäärikiinnittimen jousto (mm/kN)
$s_s$	saumakiinnittimen jousto (mm/kN).

Kuvassa 56 on profiilipellin geometria ja tarvittavat merkinnät.



Kuva 56. Profiilinpellin geometria ja merkinnät ( $q$  on poimun reunan kaltevuus ja  $l$  on poimun harjan leveys).

Taulukko 13. Kertoimet, joilla huomioidaan väliorsien vaikutus.

$n_p$ = orsien kokonaismäärä yhden paneelin pituudella tai yhden levyn pituudella			
$n_p$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
2	1	1	1
3	1	1	1
4	0,85	0,75	0,90
5	0,70	0,67	0,80
6	0,60	0,55	0,71
7	0,60	0,50	0,64
8	0,60	0,44	0,58
9	0,60	0,40	0,53
10	0,60	0,36	0,49
11		0,33	0,45
12		0,30	0,42
13		0,29	0,39
14		0,27	0,37
15		0,25	0,35
16		0,23	0,33
17		0,22	0,31
18		0,21	0,30
19		0,20	0,28
20		0,19	0,27

Taulukko 14. Kertoimet, joilla huomioidaan levyn leveydellä olevien levy-orsikiinnittimien lukumäärä.

$n_f$ = kiinnittimien kokonaismäärä levyn leveydellä kiinnitystapa 1 = kiinnittimet levyn poimun harjassa kiinnitystapa 2 = kiinnittimet levyn poimun pohjassa			
$n_f$	$\beta_1$		$\beta_2$
	kiinnitystapa 1	kiinnitystapa 2	
2	0,13	1,0	1,0
3	0,30	1,0	1,0
4	0,44	1,04	1,11
5	0,58	1,13	1,25
6	0,71	1,22	1,40
7	0,84	1,33	1,56
8	0,97	1,45	1,71
9	1,10	1,56	1,88
10	1,23	1,68	2,04

Taulukko 15. Joustotekijöitä laskettaessa tarvittavat K-kertoimet, kun levyt on kiinnitetty jokaisesta poimusta. Kertoimet saadaan kuvan 55 kulman  $q$  ja suhteiden  $h/d$  ja  $l/d$  perusteella. Väliarvot interpoloidaan.

K-kertoimet										
Kulma $q$	Suhde $h/d$	Suhde $l/d$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0°	0,1	0,013	0,030	0,044	0,050	0,048	0,047	0,053	0,061	0,080
	0,2	0,044	0,107	0,145	0,165	0,165	0,171	0,203	0,256	0,323
	0,3	0,090	0,208	0,298	0,336	0,332	0,343	0,423	0,516	0,711
	0,4	0,151	0,350	0,491	0,560	0,554	0,568	0,689	0,877	1,240
	0,5	0,227	0,522	0,735	0,832	0,828	0,843	1,030	1,300	1,920
	0,6	0,310	0,727	1,030	1,160	1,160	1,150	1,410	2,040	3,930
	0,7	0,417	0,966	1,370	1,550	1,530	1,540	1,870	2,620	5,290
	0,8	0,536	1,240	1,770	1,970	1,960	1,950	2,390	3,390	6,870
5°	0,1	0,014	0,032	0,044	0,049	0,047	0,046	0,051	0,061	0,092
	0,2	0,050	0,102	0,144	0,155	0,155	0,163	0,189	0,246	0,328
	0,3	0,113	0,206	0,288	0,310	0,320	0,326	0,391	0,506	0,860
	0,4	0,180	0,359	0,459	0,509	0,503	0,525	0,609	0,922	1,560
	0,5	0,315	0,533	0,711	0,759	0,746	0,797	0,917	1,430	2,580
	0,6	0,452	0,793	0,986	1,010	0,953	1,050	1,380	2,610	
	0,7	0,633	1,060	1,290	1,300	1,220	1,380	1,850	3,620	
	0,8	0,843	1,360	1,630	1,620	1,520	1,740	2,390	4,870	
10°	0,1	0,015	0,033	0,045	0,047	0,045	0,045	0,049	0,061	0,095
	0,2	0,057	0,103	0,143	0,145	0,146	0,155	0,177	0,232	0,533
	0,3	0,130	0,204	0,277	0,291	0,305	0,311	0,364	0,490	
	0,4	0,209	0,369	0,422	0,455	0,432	0,503	0,544	0,960	
	0,5	0,401	0,544	0,659	0,663	0,639	0,688	0,797	1,490	
	0,6	0,556	0,793	0,877	0,817	0,782	0,986	1,530		
	0,7	0,766	1,040	1,100	0,997	1,270	2,100			
	0,8	1,000	1,300	1,330	1,170	1,600	2,910			
15°	0,1	0,016	0,033	0,045	0,046	0,043	0,045	0,047	0,061	0,097
	0,2	0,065	0,104	0,141	0,133	0,135	0,145	0,165	0,217	
	0,3	0,147	0,201	0,261	0,251	0,248	0,290	0,323	0,472	
	0,4	0,236	0,379	0,383	0,390	0,376	0,463	0,512		
	0,5	0,421	0,556	0,537	0,509	0,459	0,622	0,737		
	0,6	0,597	0,729	0,714	0,609	0,690	0,866			
	0,7	0,784	0,900	0,827	0,695	0,838	1,190			
	0,8	0,978	1,050	0,889	0,789	0,874				

Taulukko 15 jatkoa.

K-kertoimet

Kulma q	Suhde h/d	Suhde l/d								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20°	0,1	0,017	0,033	0,044	0,044	0,041	0,042	0,046	0,063	0,105
	0,2	0,070	0,107	0,134	0,124	0,124	0,132	0,157	0,245	
	0,3	0,161	0,226	0,248	0,234	0,231	0,232	0,344		
	0,4	0,274	0,359	0,371	0,354	0,302	0,292	0,520		
	0,5	0,424	0,521	0,490	0,408	0,345	0,431			
	0,6	0,572	0,606	0,508	0,451	0,450				
	0,7	0,696	0,668	0,500	0,449					
	0,8	0,773	0,656	0,445	0,354					
25°	0,1	0,018	0,034	0,043	0,043	0,038	0,039	0,045	0,065	0,110
	0,2	0,076	0,110	0,127	0,117	0,113	0,120	0,145	0,203	
	0,3	0,170	0,201	0,222	0,206	0,201	0,186	0,481		
	0,4	0,282	0,340	0,305	0,288	0,206	0,355			
	0,5	0,430	0,424	0,360	0,250	0,276				
	0,6	0,480	0,427	0,280	0,200					
	0,7	0,495	0,339	0,140						
	0,8	0,413	0,107							
30°	0,1	0,020	0,034	0,042	0,041	0,035	0,035	0,044	0,068	
	0,2	0,082	0,113	0,121	0,109	0,098	0,107	0,149		
	0,3	0,176	0,205	0,193	0,159	0,155	0,181			
	0,4	0,271	0,275	0,219	0,169	0,166				
	0,5	0,331	0,281	0,159	0,122					
	0,6	0,333	0,152	0,109						
	0,7	0,159								
35°	0,1	0,021	0,034	0,041	0,039	0,032	0,033	0,043	0,076	
	0,2	0,085	0,110	0,111	0,106	0,082	0,111	0,184		
	0,3	0,159	0,168	0,164	0,108	0,079	0,135			
	0,4	0,246	0,211	0,109	0,080					
	0,5	0,230	0,169							
	0,6	0,111								
40°	0,1	0,022	0,035	0,040	0,036	0,028	0,031	0,035		
	0,2	0,087	0,104	0,092	0,083	0,065	0,095			
	0,3	0,157	0,146	0,110	0,055					
	0,4	0,168	0,092	0,034						
	0,5	0,063								
45°	0,1	0,024	0,035	0,039	0,032	0,026	0,029	0,049		
	0,2	0,089	0,093	0,081	0,066	0,058				
	0,3	0,128	0,091	0,056						
	0,4	0,059								

Taulukko 16. Joustotekijöitä laskettaessa tarvittavat K-kertoimet, kun levyt on kiinnitetty joka toisesta poimusta. Kertoimet saadaan kuvan 55 kulman  $q$  ja suhteiden  $h/d$  ja  $l/d$  perusteella. Väliarvot interpoloidaan.

K-kertoimet

Kulma $q$	Suhde $h/d$	Suhde $l/d$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0°	0,1	0,076	0,120	0,161	0,196	0,223	0,249	0,293	0,388	0,617
	0,2	0,251	0,375	0,494	0,597	0,680	0,767	0,985	1,200	1,930
	0,3	0,507	0,745	0,974	1,170	1,330	1,470	1,720	2,300	2,770
	0,4	0,893	1,190	1,660	1,980	2,220	2,430	2,780	3,660	5,070
	0,5	1,470	2,060	2,620	3,090	3,430	3,690	4,130	5,300	8,770
	0,6	2,640	3,540	4,370	5,080	5,580	5,940	6,450	7,710	11,650
	0,7	3,940	5,130	6,270	7,190	7,840	8,310	8,940	10,500	15,300
	0,8	5,590	7,160	8,640	9,800	10,600	11,110	11,970	13,900	19,600
5°	0,1	0,078	0,122	0,162	0,196	0,223	0,250	0,297	0,399	0,643
	0,2	0,262	0,383	0,502	0,602	0,686	0,779	0,939	1,300	2,310
	0,3	0,533	0,771	1,040	1,180	1,340	1,510	1,870	2,720	3,550
	0,4	0,962	1,290	1,700	1,990	2,230	2,490	3,050	4,500	8,350
	0,5	1,620	2,260	2,810	3,260	3,630	4,010	5,200	8,710	12,910
	0,6	2,820	3,670	4,430	5,030	5,410	5,800	6,730	9,660	
	0,7	4,200	5,330	6,320	7,080	7,560	8,060	9,310	13,590	
	0,8	5,960	7,410	8,650	9,570	10,160	10,800	12,480	18,740	
10°	0,1	0,080	0,124	0,163	0,197	0,224	0,252	0,303	0,417	0,697
	0,2	0,275	0,400	0,514	0,611	0,695	0,795	0,983	1,420	2,890
	0,3	0,578	0,813	1,120	1,200	1,360	1,560	2,020	3,150	
	0,4	1,030	1,400	1,740	2,000	2,240	2,640	3,490	6,120	
	0,5	1,880	2,480	3,030	3,460	3,860	4,570	6,500	14,500	
	0,6	2,990	3,780	4,450	4,320	5,250	6,000	8,470		
	0,7	4,440	5,460	6,310	6,870	7,330	8,470	13,390		
	0,8	6,290	7,560	8,580	9,220	9,830	11,640	25,460		
15°	0,1	0,082	0,125	0,164	0,197	0,224	0,254	0,309	0,429	0,736
	0,2	0,287	0,412	0,524	0,619	0,706	0,720	1,070	1,630	
	0,3	0,613	0,842	1,190	1,220	1,410	1,690	2,400	4,150	
	0,4	1,110	1,440	1,770	2,040	2,380	3,120	5,600		
	0,5	1,910	2,450	2,940	3,360	4,010	6,220	9,220		
	0,6	3,140	3,860	4,430	4,830	5,480	7,940			
	0,7	4,640	5,540	6,210	6,720	7,960	16,430			
	0,8	6,520	7,600	8,360	9,100	12,010				

Taulukko 16 jatkoa.

K-kertoimet

Kulma q	Suhde h/d	Suhde l/d								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20°	0,1	0,084	0,127	0,164	0,197	0,224	0,256	0,319	0,489	0,756
	0,2	0,302	0,424	0,534	0,627	0,714	0,834	1,130	1,980	
	0,3	0,656	0,879	1,110	1,250	1,440	1,820	2,850		
	0,4	1,170	1,530	1,830	2,080	2,520	3,590	8,750		
	0,5	1,940	2,430	2,840	3,270	4,240	8,300			
	0,6	3,280	3,920	4,430	5,100	7,840				
	0,7	4,790	5,570	6,250	8,020					
	0,8	6,660	7,590	8,840	20,200					
25°	0,1	0,086	0,131	0,167	0,198	0,223	0,256	0,324	0,486	0,815
	0,2	0,317	0,437	0,543	0,634	0,727	0,883	1,270	2,520	
	0,3	0,600	0,915	1,110	1,290	1,540	2,120	4,500		
	0,4	1,260	1,600	1,900	2,250	3,010	6,270			
	0,5	2,060	2,610	3,030	3,920	7,710				
	0,6	3,410	4,050	4,820	8,800					
	0,7	4,990	5,970	9,950						
	0,8	7,100	10,090							
30°	0,1	0,092	0,132	0,168	0,198	0,223	0,258	0,333	0,515	
	0,2	0,331	0,449	0,554	0,644	0,767	0,951	1,650		
	0,3	0,681	0,955	1,160	1,380	1,950	2,420			
	0,4	1,350	1,690	2,560	3,330	4,910				
	0,5	2,280	3,150	5,010	8,010					
	0,6	3,690	4,950	14,720						
	0,7	6,380								
35°	0,1	0,096	0,134	0,169	0,198	0,223	0,262	0,351	0,566	
	0,2	0,347	0,463	0,564	0,656	0,777	1,090	2,090		
	0,3	0,984	1,000	1,210	1,470	2,230				
	0,4	1,460	1,850	2,390	4,430					
	0,5	2,570	3,660	8,730						
	0,6	5,900								
40°	0,1	0,096	0,136	0,167	0,199	0,224	0,266	0,381	0,631	
	0,2	0,362	0,473	0,559	0,682	0,891	1,370			
	0,3	0,834	1,650	2,000	4,020					
	0,4	1,620	2,230	4,590						
	0,5	4,060								
45°	0,1	0,098	0,138	0,166	0,196	0,227	0,273	0,409		
	0,2	0,385	0,493	0,593	0,710	1,010				
	0,3	0,925	1,150	1,620						
	0,4	2,130								

Taulukko 17. Kehien voimien ja momenttien pienennyskertoimet  $k_{red}$  erilaisilla suhteellisen jouston  $\psi$  arvoilla.

Kehien lkm.	Kehä nro	Levyjäykistykseen ja kehän välinen suhteellinen jousto $\psi$											
		0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50
3	2	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,429
4	2	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,375	0,412	0,444	0,474	0,500	0,600
5	2	0,265	0,301	0,333	0,362	0,388	0,412	0,454	0,490	0,521	0,548	0,571	0,659
	3	0,347	0,392	0,432	0,468	0,500	0,529	0,580	0,622	0,658	0,688	0,714	0,805
6	2	0,310	0,347	0,379	0,407	0,432	0,455	0,494	0,526	0,554	0,579	0,600	0,677
	3	0,448	0,497	0,540	0,576	0,608	0,636	0,684	0,721	0,752	0,778	0,800	0,871
7	2	0,340	0,375	0,406	0,432	0,456	0,477	0,513	0,543	0,569	0,591	0,611	0,683
	3	0,515	0,563	0,604	0,638	0,667	0,692	0,734	0,767	0,793	0,815	0,833	0,892
	4	0,569	0,620	0,663	0,698	0,728	0,754	0,795	0,827	0,852	0,873	0,889	0,938
8	2	0,359	0,393	0,421	0,447	0,469	0,488	0,522	0,551	0,575	0,597	0,615	0,685
	3	0,558	0,603	0,641	0,672	0,698	0,721	0,758	0,787	0,811	0,830	0,846	0,898
	4	0,646	0,695	0,734	0,765	0,792	0,814	0,849	0,875	0,895	0,911	0,923	0,959
9	2	0,371	0,403	0,430	0,454	0,475	0,494	0,527	0,554	0,578	0,599	0,617	0,686
	3	0,585	0,627	0,662	0,690	0,715	0,733	0,770	0,796	0,818	0,836	0,851	0,901
	4	0,695	0,739	0,774	0,802	0,825	0,844	0,874	0,896	0,913	0,926	0,936	0,966
	5	0,729	0,773	0,808	0,835	0,857	0,875	0,903	0,923	0,938	0,949	0,957	0,981
10	2	0,379	0,409	0,436	0,458	0,479	0,497	0,529	0,556	0,579	0,599	0,618	0,686
	3	0,602	0,641	0,673	0,700	0,723	0,743	0,775	0,800	0,821	0,838	0,853	0,901
	4	0,725	0,766	0,797	0,822	0,843	0,860	0,886	0,906	0,920	0,932	0,941	0,968
	5	0,780	0,820	0,850	0,873	0,891	0,904	0,929	0,944	0,956	0,964	0,971	0,987

Ruuviliitoksessa (pelti-orisi) tapahtuva siirtymä  $s_p$  saadaan ruuvin siirtymäkertoimen perusteella

$$K_{ser} = \rho_k^{1,5} d / 20$$

$$s_p = \frac{1}{K_{ser}} \quad (21)$$

Saumakiinnittimien jousto  $s_s$  on:

$$s_s = 0,25 \text{ mm} / \text{kN}.$$

Orren ja primäärin välisen liitoksen siirtymät otetaan huomioon kertoimessa  $s_{pr}$ . Orren ja primäärin välisen liitoksen kiinnityksessä voidaan käyttää esimerkiksi kulmarautaa, joka kiinnitetään orteen ja primääriin nauloilla. Kerroin  $s_{pr}$  lasketaan samoin kuin kerroin  $s_p$  ottaen huomioon ruuvien tai naulojen määrä sekä mahdolliset muut muodonmuutokset.

Kokonaisjoustokerroin  $c$  on



$$c = c_{1,1} + c_{1,2} + c_{2,1} + c_{2,2} + c_{2,3} + c_3. \quad (22)$$

Seuraavalla kaavalla huomioidaan katon lapekulma sekä molempien lappeiden vaikutus:

$$c_h = \frac{c}{2 \cos^2 \alpha}. \quad (23)$$

Levykentän maksimivaakasiirtymä lasketaan kaavalla:

$$v_{\max} = \frac{n^2}{8} c q_{\text{räystäs},k}. \quad (24)$$

Lasketaan kehän jäykkyyttä kuvaava kerroin  $k$ . Jos kyseessä on mastopilarit, niin kehän jäykkyys (kaksi mastopilaria) saadaan kaavasta

$$k_{p,MRT} = H_p^3 / (6 E_{0,05} I) \quad (25)$$

missä  $E_{0,05}$  on karakteristinen kimmomoduuli (N/mm<sup>2</sup>)  
 $I$  on pilarin kehän suuntainen jäykkyys (mm<sup>4</sup>)  
 $H_p$  on pilarin korkeus (mm).

Kaava ei huomioi mm. ristikon puuosien eikä pilarin ja ristikon välisten liitoksien muodonmuutoksia kehän suunnassa. Jäykkyys lasketaan sekä murtorajatilalle että käyttöra-jatilalle.

Lasketaan levykentän ja kehän suhteellinen jousto:

$$\psi = \frac{c_h}{k} \quad (26)$$

Taulukon 17 mukaan määritellään momenttien, vaakavoimien ja vaakasiirtymien redusointikertoimet. Redusointikerroin  $k_{red}$  kertoo voimien jakaantumisen kehän ja levyjäykisteeseen kesken. Kertoimet ovat jokaiselle kehälle erilaiset mutta symmetriset hallin keskikohdan suhteen. Redusointikertoimet määräytyvät joustokertoimen  $\psi$  ja kehien määrän mukaan. Mitä jäykempi levyjäykiste on ( $\psi$  on pieni), sitä vähemmän kuormaa menee kehälle.

Levykentän (ja kehän) vaakasiirtymä saadaan kaavasta

$$v_{\text{vaaka,tot}} = k_{red} \cdot v_{\text{vaaka}} \quad (27)$$

missä  $v_{vaaka,tot}$  on levykentän vaakasiirtymä  
 $k_{red}$  on keskimmäisimmän kehän redusointikerroin  
 $v_{vaaka}$  on kehän vaakasiirtymä ilman kehää.

Vaakasiirtymän pitää täyttää vaatimukset, yleensä  $H/200$ .

Levykentän maksimileikkausvoima  $Q_{max,d,lape}$  lasketaan palkkianalogian mukaan vähentämällä vaakakuormista kehille siirtyvät osuudet ja huomioimalla levykentän kaltevuus (ja lappeiden määrä). Esimerkiksi kahdeksan kehän hallilla (päätykehät luettu mukaan) on

$$Q_{max,d,lape} = \frac{(1 - k_{red,1}) + (1 - k_{red,2}) + (1 - k_{red,3})}{2 \cos(\alpha)} R_d \quad (28)$$

missä  $k_{red,i}$  on kehän  $i$  redusointikerroin  
 $R_d$  on kehälle tuleva vaakavoima  
 $\alpha$  on katon kaltevuus.

### 6.2.3 Levykentän kestävyys

Levykentän kapasiteetit lasketaan kaavoista:

a) Saumakestävyys

$$V_R = (n_s F_s + \frac{\beta_1}{\beta_3} n_p F_p) \quad (29)$$

missä  $F_s$  on sivulimityksen yksittäisen kiinnikkeen leikkauskestävyyden mitoitussarvo  
 $F_p$  on levy-orsiliitoksen yksittäisen kiinnikkeen leikkauskestävyyden mitoitussarvo  
 $\beta_3 = (n_f - 1)/n_f$ , kun kiinnittimet ovat levyn poimun harjassa  
 $\beta_3 = 1.0$ , kun kiinnittimet ovat levyn poimun pohjassa.

Saumakestävyys  $V_R$  täytyy olla suurempi kuin maksimileikkausvoima  $Q_{max,d,lape}$ .

b) sisäkenttien liitoksien kestävyys

levy-orsiliitos:

$$V_R = \beta_2 n_p F_p \quad (30)$$

orsi-paarreliitos:

$$V_R = n_p F_{pr} \quad (31)$$

missä  $F_{pr}$  on orsi-paarreliitoksen yksittäisen kiinnittimen leikkauskestävyyden mitoitusarvo.

c) reunakentän liitoksien kestävyys

Levykentän maksimileikkausvoima siirtyy levykentältä päätyrakenteille levy-orsiliitoksen sekä orsi-paarreliitoksen kautta.

Samanaikaisen tuulen nosteen ja leikkausvoiman aiheuttaman murtuman mahdollisuuden estämiseksi levyjen ja orsien kiinnittimiin otetaan 40 % ylimääräinen varmuusmarginaali.

Se tarkistetaan ehdosta:

$$\frac{0,6bF_p}{p\alpha_3} \geq V^* \quad (32)$$

missä  $V^*$  on levykentän leikkauskestävyys

$$V^* = Q_{\max,d,lape} V_R / R_D$$

d) levyn lommahtaminen

Kriittinen lommahdusvoima saadaan kaavasta (33), kun levy on kiinnitetty joka toisesta poimusta:

$$V_{crit} = \frac{18}{b} D_x^{\frac{1}{4}} D_y^{\frac{3}{4}} (n_p - 1)^2 \quad (33)$$

missä  $D_x^{1/4}$  on levyn taivutusjäykkyys levyn poikittaissuunnassa (kNmm<sup>2</sup>/mm)  
 $D_y^{3/4}$  on levyn taivutusjäykkyys levyn pituussuunnassa (kNmm<sup>2</sup>/mm)  
 $b$  on levyn pituus (mm)  
 $n_p$  on orsien lukumäärä.

Levyn taivutusjäykkyydet saadaan kaavoista

$$D_x = \frac{Et^3d}{12u(1-\nu^2)} \quad (34)$$

$$D_y = \frac{EI_y}{d}$$

missä  $E$  on teräksen kimmokerroin (kN/mm<sup>2</sup>)  
 $t$  on levyn laskentapaksuus (mm)  
 $u$  on yhden poimun ympäräysmitta (mm)  
 $\nu$  on Poissonin luku (teräksellä 0,3)  
 $I_y$  on yhden poimun hitausmomentti  $y$ -suunnassa (mm<sup>4</sup>)  
 $D$  on poimuväli (mm).

Kriittiseksi lommahdusvoimaan kannattaa ottaa 25 % ylimääräinen varmuusmarginaali. Kriittisen lommahdusvoiman  $V_{crit}$  täytyy olla suurempi kuin levykentän leikkauskestävyys  $V^*$ .

Tarkistetaan profiilin muodon vääristyminen levyn päissä, käytetään seuraavaa rajoitusta levypaneelin leikkausvoimalle:

$$\frac{0,3t^{1,5}bf_y}{d^{0,5}} \geq V^* \quad (35)$$

missä  $t$  on levyn laskentapaksuus (mm)  
 $b$  on levyn pituus (mm)  
 $f_y$  on levyn laskentalujuus (N/mm<sup>2</sup>)  
 $d$  on poimuväli (mm).

## 6.2.4 Levykentän paarteiden kestävyys

Levykentän paarteina toimivat lappeen reunaorret. Reunaorret mitoitetaan normaali-voimalle sekä taivutukselle. Lasketaan reunaorsissa vaikuttavat voimat.

Suurin reunaorsissa vaikuttava normaalivoima saadaan kaavasta

$$N_{\max, orsi} = \frac{q_{räystäs, d} L^2 \alpha_3}{8b \cos \alpha} \quad (36)$$

Suurin orren taivutusmomentti on

$$M = \frac{q_d L_k^2}{8} \quad (37)$$

missä  $L_k$  on kehän k-jako  
 $q_d$  on mitoittava murtorajatilan kuormitus.

Lasketaan orren taivutusmomentit orren symmetriaakseleilla (y- ja z-suunta)

$$M_y = M \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{tasosta pois päin})$$

$$M_z = M \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{tasossa})$$

missä  $\alpha$  on katon lapekulma.

Reunaorret mitoitetaan normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutukselle molemmilla suunnissa, sekä tasossa että tasosta pois päin.

Määritellään orren hoikkuus:

- tasosta pois päin orren nurjahduspituus  $L_c$  on kehien k-jako ( $L_c=L$ )
- tasossa orren nurjahduspituus  $L_c$  on profiilipellin kiinnitysjakko

Nurjahdus mitoitetaan käyttäen normaaleja nurjahduskaavoja [6]:

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$
$$k_y = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},y} - 0,5) + \lambda_{\text{rel},y}^2 \right] \quad (38)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}}$$

missä  $\beta_c$  on kerroin massiivipuulla  $\beta_c = 0,2$  ja liimapuulla, kertopuulla ja vanerille  $\beta_c = 0,1$ .

Aksiaalisen vedon ja taivutuksen yhteisvaikutus tarkistetaan kaavasta:

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,0,d}} + 0,7 \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (39)$$

Aksiaalisen puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus tarkistetaan kaavasta:

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{k_y f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + 0,7 \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (40)$$

### 6.2.5 Laskentaesimerkki

Mitoitetaan kuvan 57 mukaisen rakennuksen jäykistys vaakavoimille käyttäen profiilipeltiä. Profiilipeltinä käytetään kuvan 58 mukaista Rannilan profiilipeltiä.

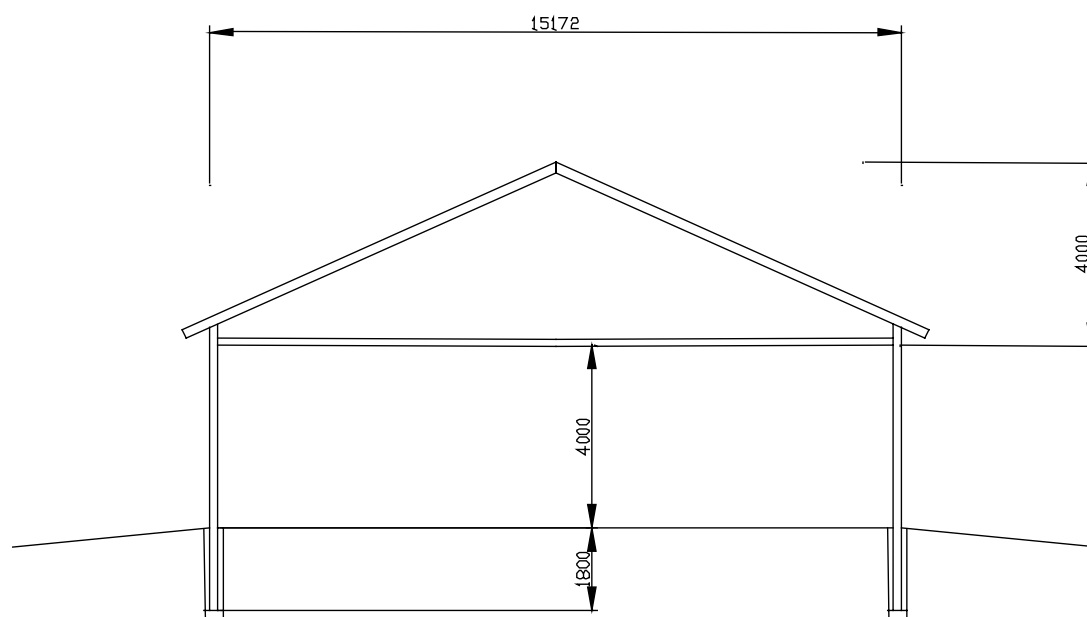
#### Rakennuksen lähtötiedot

Geometria:

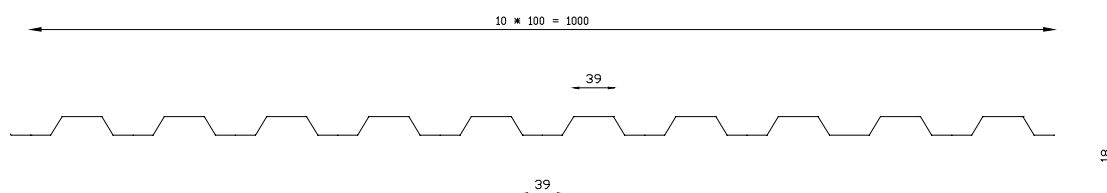
Leveys	15 172 mm
Pituus	24 000 mm
$H_{sisä}$	4 000 mm
$H_{seinä}$	4 600 mm
$H_{harja}$	8 000 mm
Kaltevuus	1/2,5 ( $\alpha = 21,8^\circ$ )
k-jako	2 400 mm

Rakenteet:

Pääkannatin	NR-ristikko
Pilari	k2400 C40 4 x 48 x 197 mm <sup>2</sup>
Kattosekundääri	k600 C24 50 x 150 mm <sup>2</sup>
Profiilipelti	Rannila 20SR t = 0,7 mm, ruuvi 4,2 x 50.



Kuva 57. Laskentaesimerkin poikkileikkaus.



Kuva 58. Rannilan 20SR-profiilin geometria.

Kuormitus:

Lumi

$$q_{lumi,k} = 2,2 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ (lumikuorma katolla)}$$

Katon oma paino

$$g_{katto,k} = 0,3 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Ristikko

$$g_{ristikko,k} = 0,15 \text{ kN} / \text{m}$$

Tuuli

$$q_{k(z),seinä} = 0,52 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ (nopeuspaineen ominaisarvo)}$$

$$q_{k(z),katto} = 0,61 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ (nopeuspaineen ominaisarvo)}.$$

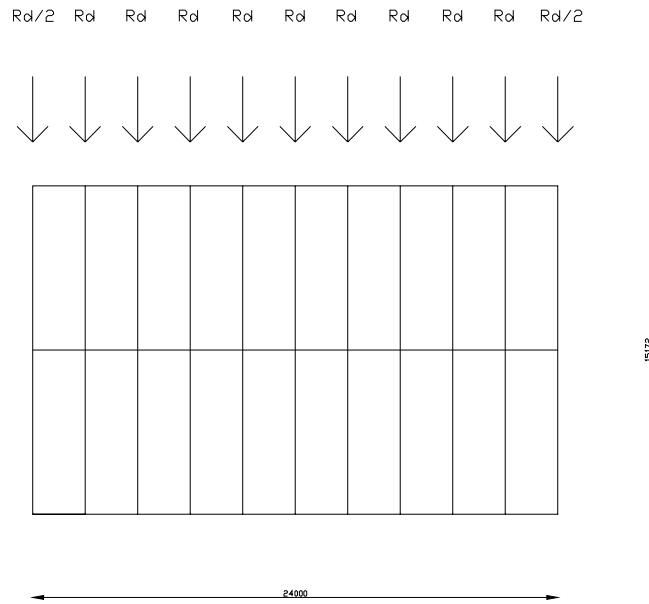
### Levykentän kuormitus

Levykenttään kohdistuvat pilareista vaakapistevoimat kuvan 59 mukaisesti.

Määräävässä kuormitustapauksessa pilareilta tulevat vaakapistevoimat, joiden suuruudet ovat käyttö- ja murtorajatilassa:

$$R_k = 5,09 \text{ kN}$$

$$R_d = 7,64 \text{ kN}.$$



Kuva 59. Laskentaesimerkin levykenttä ja siihen vaikuttavat vaakapistevoimat.

Jatkuvaksi vaakakuormaksi pilarin yläpään tasossa saadaan:

$$q_{vaaka,k} = 2,12 \text{ kN / m}$$

$$q_{vaaka,d} = 3,18 \text{ kN / m.}$$

Levykentän maksimileikkausvoima saa arvon:

$$Q_{max,d,lape} = 21,6 \text{ m} \times 3,18 \text{ kN / m} / 2 = 34,4 \text{ kN.}$$

### Levykentän ja kehän jousto

Lasketaan levykentän jäykkyys.

Esimerkkikohteessa muuttujat ovat seuraavia:

$a$	8 000 mm
$A$	15 000 mm <sup>2</sup> (reunaorsia 2 kpl)
$b$	8 000 mm
$d$	100 mm
$E$	210 000 N / mm <sup>2</sup>
$E_p$	7 400 N / mm <sup>2</sup>
$h$	18 mm
$K$	0,634
$p$	200 mm



$t$	0,63 mm
$n$	9
$n_b$	1
$n_f$	6
$n_p$	13
$n_s$	40
$n_{sh}$	2,4
$\alpha_1$	0,6
$\alpha_2$	0,36
$\alpha_3$	0,49
$\beta_1$	0,71
$\beta_2$	1,4.

Lasketaan liitoksissa tapahtuvat liukumukset  $s_p$ ,  $s_s$  ja  $s_{pr}$ . Ruuviliitoksessa (pelti-orisi) tapahtuva siirtymä:

$$s_p = \frac{1}{K_{ser}} = \frac{1}{\rho_k^{1,5} d / 20} = \frac{1}{1375 \text{ N/mm}} = 0,73 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}.$$

Saumakiinnittimien jousto  $s_s$  on:

$$s_s = 0,25 \text{ mm / kN}.$$

Orren ja primäärin välisen liitoksen kiinnityksessä käytetään kulmarautaa, joka kiinnitetään orteen sekä primääriin kolmella kampanaulalla 2,8 x 75.

Yksittäisen naulan siirtymäkerroin:

$$K_{ser} = 920 \text{ N / mm}.$$

Liitoksen kokonaissiirtymäksi  $s_{pr}$  saadaan:

$$s_{pr} = 920 \times 6 / 2 = 2760 \text{ N / mm} = 0,36 \text{ mm / kN}.$$

Joustotekijät saavat seuraavat arvot:

$$c_{1,1} = \frac{8000 \cdot 100^{2,5} \cdot 0,6 \cdot 1,0 \cdot 0,634}{210 \cdot 0,63^{2,5} \cdot 8000^2} = 0,072 \text{ mm/kN}$$

$$c_{1,2} = \frac{2 \cdot 8000 \cdot 0,36 \cdot (1 + 0,3) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 18}{100}\right)}{210 \cdot 0,63 \cdot 8000} = 0,01 \text{ mm/kN}$$

$$c_{2,1} = \frac{2 \cdot 8000 \cdot 0,73 \cdot 200 \cdot 0,49}{8000^2} = 0,018 \text{ mm/kN}$$

$$c_{2,2} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 0,73 \cdot (3 - 1)}{2 \cdot 40 \cdot 0,73 + 0,71 \cdot 13 \cdot 0,25} = 0,012 \text{ mm/kN}$$

$$c_{2,3} = \frac{4(9 - 1)}{9^2 \cdot 13} \cdot \left(0,36 + \frac{0,73}{1,4}\right) = 0,027 \text{ mm/kN}$$

$$c_3 = \frac{9^2 \cdot 8000^3 \cdot 0,49}{4,8 \cdot 7,4 \cdot 15000 \cdot 8000^2} = 0,60 \text{ mm/kN}$$

Levyn kokonaisjoustavuus levyn suunnassa ja yhtä lapetta kohden on

$$c = 0,739 \text{ mm / kN.}$$

Kaavalla (23) huomioidaan katon lapekulma sekä molempien lappeiden vaikutus:

$$c_h = \frac{c}{2 \cos^2 \alpha} = 0,429 \text{ mm / kN.}$$

Levykentän maksimivaakasiirtymä lasketaan kaavalla (24):

$$v_{\max} = \frac{n^2}{8} c q_{\text{räystäs},k} = 7,5 \text{ mm.}$$

Kehän jäykkyydeksi murtorajatilamitoituksessa saadaan:

$$k_{p,MRT} = H_p^3 / (6E_{0,05} I) = (12 \times 4\,000^3) / (6 \times 9\,400 \times 197^3 \times 48 \times 4) = 9,4 \text{ mm / kN.}$$

Käyttörajan mukainen jäykkyys:

$$k_{p,KRT} = (12 \times 4\,000^3) / (6 \times 14\,000 \times 197^3 \times 48 \times 4) = 6,3 \text{ mm / kN.}$$

Lasketaan levykentän ja kehän suhteellinen jousto:

$$\text{Murtorajatilassa: } \psi = \frac{c_h}{k} = \frac{0,429}{9,4} = 0,0456$$

$$\text{Käyttörajatilassa: } \psi = \frac{c_h}{k} = \frac{0,429}{6,3} = 0,0681$$

Määritellään taulukon 16 mukaan momenttien, vaakavoimien ja vaakasiirtymien redusointikertoimet. Rakennuksessa on 11 kehää, murtorajatilan mukaiset kertoimet eri kehillä ovat:

Kehä	$k_{red}$
2	0,114
3	0,201
4	0,264
5	0,305
6	0,499.

Maksimisiirtymä tapahtuu keskimmäisessä kehässä (kehä 6), jossa redusointikerroin saa suurimman arvon ( $k_{red} = 0,499$ ).

Lasketaan tasokehäohjelmalla kehän pilarin yläpään vaakasiirtymä:

$$v_{vaaka} = 38 \text{ mm}$$

Kun huomioidaan levykentän vaikutus, vaakasiirtymäksi saadaan:

$$v_{vaaka} = 0,499 \times 38 \text{ mm} = 19 \text{ mm} = H / 210.$$

Arvoa voidaan pitää hyväksyttävänä.

Kun huomioidaan levykentän ja kehän yhteistoiminta sekä kattokaltevuus, saadaan maksimileikkausvoimaksi levykentässä seuraavaa:

$$Q_{max,d,lape} = (R_d (1-0,087) + R_d (1-0,154) + R_d (1-0,2) + R_d (1-0,228) + R_d (1-0,236)/2) / (2\cos(20^\circ))$$

$$Q_{max,d,lape} = 14,41 \text{ kN}$$

## Levykentän kestävyys

Lasketaan levykentän kapasiteetit:

a) saumakestävyys, kun  $F_s = 2,5$  kN ja  $F_p = 1,0$  kN :

$$V_R = (n_s F_s + \frac{\beta_1}{\beta_3} n_p F_p) = 113 \text{ kN}$$

Saumakestävyys ei tule mitoittavaksi  $V_R \gg Q_{max,d,lape}$

b) sisäkenttien liitoksien kestävyys

levy-orsiliitos

$$V_R = \beta_2 n_p F_p = 1,4 \cdot 13 \cdot 1,0 = 18,2 \text{ kN}$$

orsi-paarreliitos

$$V_R = n_p F_{pr} = 13 \cdot 1,2 = 15,6 \text{ kN}$$

Orsi-paarreliitos on mitoittava, tarkastetaan kapasiteetin riittävyys:

$$R_d = 7,29 \text{ kN} < 15,6 \text{ kN}$$

c) reunakentän liitoksien kestävyys

Levykentän maksimileikkausvoima siirtyy levykentältä päätyrakenteille levy-orsiliitoksen sekä orsi-paarreliitoksen kautta.

$$Q_{max,d,lape} = 14,41 \text{ kN}$$

Orsi-paarreliitoksen kapasiteetti oli:

$$V_R = 15,6 \text{ kN} > Q_{max,d,lape}$$

Samanaikaisen tuulen nosteen ja leikkausvoiman aiheuttaman murtumisen estämiseksi levyjen ja orsien kiinnittimiin otetaan 40 % ylimääräinen varmuusmarginaali.

Levykentän leikkauskestävyys

$$V^* = Q_{\max,d,lape} V_R / R_D = 14,41 \cdot 15,6 / 7,29 = 30,83 \text{ kN}$$

$$\frac{0,6 \cdot 8 \cdot 1}{0,2 \cdot 0,49} = 48,9 \text{ kN} \geq 30,83 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

### Levyn lommahtaminen

Levyn taivutusjäykkyydet saadaan kaavoista (34):

$$D_x = \frac{210 \cdot 0,63^3 \cdot 100}{12 \cdot 130 \cdot (1 - 0,3^2)} = 5,871 \text{ kN mm}^2/\text{mm}$$

$$D_y = \frac{210 \cdot 1780}{100} = 3738 \text{ kN mm}^2/\text{mm}$$

Kriittiseksi lommahdusvoimaksi saadaan (25 % ylimääräinen varmuusmarginaali):

$$V_{crit} = \frac{18}{8000} \cdot 5,871_x^{\frac{1}{4}} \cdot 3738_y^{\frac{3}{4}} \cdot (13 - 1)^2 / 1,25 = 192 \text{ kN}$$

$V_{crit} \gg V^* \rightarrow$  levykenttä ei lommahda.

Tarkistetaan profiilin muodon vääristyminen levyn päissä (35):

$$\frac{0,3 \cdot 0,63^{1,5} \cdot 8000 \cdot 280}{100^{0,5}} \geq 33,6 \text{ kN} > 30,83 \text{ kN} \rightarrow \text{Vääristymistä ei tapahdu.}$$

### Levykentän paarteiden kestävyys

Lasketaan reunarakenteissa vaikuttavat voimat. Suurin reunaorsissa vaikuttava normaali-voima saadaan kaavasta (36):

$$N_{\max,orsi} = \frac{q_{räystäs,d} L^2 \alpha_3}{8b \cos \alpha} = \pm 7,15 \text{ kN}$$

Reunaorret mitoitetaan tälle normaalivoimalle sekä taivutukselle.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{7,15 \cdot 10^3}{150 \cdot 50} = 1,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{7,15 \cdot 10^3}{150 \cdot 50} = 1,0 \text{ N/mm}^2$$

Orren taivutus (37):

$$L_k = 2\,400 \text{ mm}$$

$q_d$  on mitoitettava murtorajatilan kuormitus

$$q_d = 0,6 \times (2,2 \times 1,5 + 0,3 \times 1,2) = 2,2 \text{ kN / m}$$

$$M = \frac{q_d L_k^2}{8} = 1,58 \text{ kNm}$$

$$M_y = M \cos(21,8^\circ) = 1,47 \text{ kNm}$$

$$M_z = M \sin(21,8^\circ) = 0,59 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{1,47 \cdot 10^6 \cdot 6}{150^2 \cdot 50} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{0,59 \cdot 10^6 \cdot 6}{50^2 \cdot 150} = 9,4 \text{ N/mm}^2$$

Määritellään orren hoikkuus:

- tasossa orren nurjahduspituus  $L_c = 2\,400 \text{ mm}$
- tasosta pois päin orren nurjahduspituus on profiilipellin kiinnitysjaako,  $L_c = 200 \text{ mm}$ .

Suhteelliset hoikkuudet ja  $k_c$ -kertoimet eri suuntiin ovat:

$$\lambda_{rel,y} = 0,916 \rightarrow k_c = 0,8$$

$$\lambda_{rel,z} = 0,235 \rightarrow k_c = 1,0.$$

Tarkistetaan aksiaalisen vedon ja taivutuksen yhteisvaikutus:

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + 0,7 \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

$$f_{t,o,d} = 14 \cdot 0,9 / 1,3 = 9,69 \text{ N / mm}^2$$

$$f_{m,y,d} = f_{m,z,d} = 24 \cdot 0,9 / 1,3 = 16,61 \text{ N / mm}^2$$

$$1,0 / 9,69 + 0,7 \cdot 7,8 / 16,61 + 9,4 / 16,61 = 0,998 \leq 1,0 \rightarrow \text{OK.}$$

Tarkistetaan aksiaalisen puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus:

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{k_y f_{c,o,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + 0,7 \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

$$f_{c,o,d} = 21 \cdot 0,9 \cdot 0,8 / 1,3 = 11,63 \text{ N / mm}^2$$

$$1,0 / 11,63 + 7,8 / 16,61 + 0,7 \cdot 9,4 / 16,61 = 0,952 \leq 1,0 \rightarrow \text{OK.}$$

# 7. Vaipparakenteet

## 7.1 Kantavat sekundäärirakenteet

Vaipparakenteiden valinta on riippuu yläpohjatyypistä ja jänneväleistä.

Mahdollisia kantavia sekundäärirakenteita:

- sahatavara
- liimapuu
- kertopuu
- PI-palkki [18]
- naulalevyristikkopalkit ja -vaarnapalkit
- erilaiset sandwich-elementit.

## 7.2 Elementit

Katto- ja seinäelementteinä voidaan käyttää mm. seuraavia tehdasvalmisteisia elementtityyppejä:

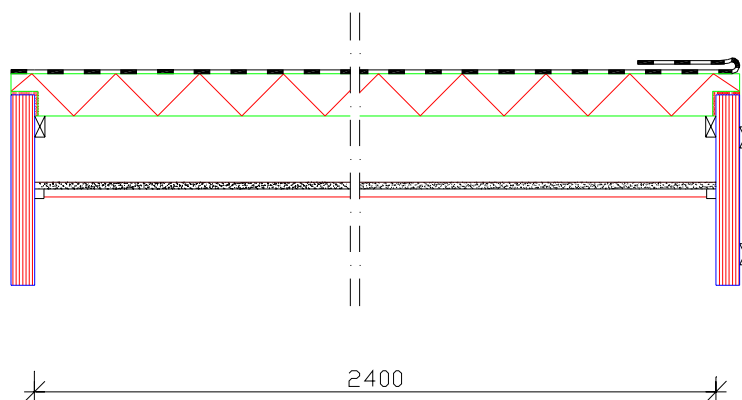
- Tehdasvalmisteinen elementti, jossa on kantavana rakenteena sahatavara, liimapuu tai kertopuu. Tällainen elementti on mm. SPU-elementti [8].
- Sandwich-elementit, joissa on jäykän eristekerroksen molemmin puolin kantava levy, joko pelti- tai vanerilevy tai jokin muu vastaava. Tällaisia elementtejä ovat mm. Isopanel- ja Isora-elementit [9].

SPU-elementtiä kannattaa käyttää moniaukkoisena jatkuva elementtinä. SPU-elementin kantavana runkona käytetään yleensä kertopuupalkkeja k2400. Sisäpinnan materiaali on joko ripaväleissä tai ripojen alapintaan kiinnitettynä. Ripojen alapintaan kiinnittäminen vaatii välikoolauksen, mutta samalla saadaan yhtenäinen kattolaipio. Elementin eristeenä on joko polyuretaani tai mineraalivilla. Mineraalivillaeristeinen elementti voi olla myös tuuletettu. Kuvassa 60 on esimerkki SPU-elementin poikkileikkauksesta.

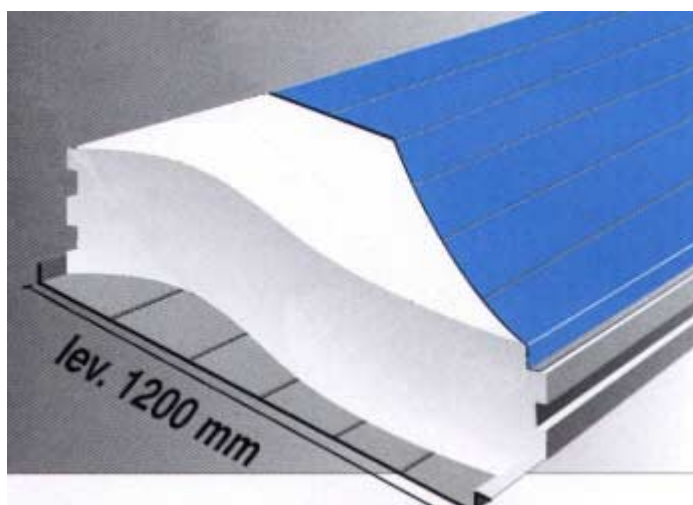


Isora-elementissä voi olla pintana erilaisia sinkittyjä tai ruostumattomia teräsohutlevyjä, alumiiniohutlevyjä tai rakennuslevyjä, esim. vaneri. Eristeenä on EPS-solumuovi. Elementti valmistetaan liimaamalla eristeen molemmille puolille pintalevyt. Isopanel-elementti on molemmilta puoliltaan peltipintainen polyuretaani-elementti. Elementissä on valmis sisäpinta. Kuvassa 61 on Isora-elementin periaatekuva.

Molempi elementtityyppiä voidaan käyttää sekä katto että seinäelementteinä.



*Kuva 60. SPU-elementin poikkileikkaus, jossa lämmöneristeenä on polyuretaani [8].*



*Kuva 61. Isora-elementin periaatekuva [10].*

## 7.3 Paikallarakennettavat

### Paikalla tehty yläpohja käyttäen sahatavara-sekundäärejä

K-jakoon 4800 mm päästään jatkuvilla sekundääreillä 50 x 200 C24 k600. Jatkuva sahatavaraorsi limitetään 600 mm, jolloin kokonaispituus on 5 400 mm. Yhteen orsijatkokseen menee noin 26 naulaa (100 x 3,4).

Jos sisäpinnaksi valitaan ALU-pelti, jako k600 toimii hyvin. Muita mahdollisia sisäpinnan materiaaleja on lautapaneli, vaneri yms. Kestävyyden kannalla kuitenkin ainakin sikaloissa ALU-pelti on varmin ratkaisu.

### Paikalla tehty yläpohjaelementti

K-jakoon 4800 mm päästään yksiaukkoisilla sahatavarasekundääreillä 50 x 200 C24 k400.

### Paikalla tehty yläpohja + liimapuu/ kertopuu-sekundäärit

K-jakoon 4800 mm päästään jatkuvilla kertopuusekundääreillä 260 x 39 Kerto-S k1650 tai liimapuulla 42 x 270 GL32 k1500. Sisäpinnan materiaali vaatii uuden koolauksen kiinnityksen takia. Myös sekundäärien yläpuoliset kerrokset vaativat enemmän materiaalia.

### Yläpohjan rakenne

Tyypillinen yläpohjan rakenne:

Sisäpinta	ALU-pelti tai paneeli (kiinnitys sekundääriin)
Höyrysulku	
Sekundäärit	Sahatavara, k-jako 600–900 mm sisäpinnan kiinnityksen mukaan
Lämmöneriste	Puhallusvilla
Tuulensuojalevy	Huokoinen kuitulevy
Tuuletusväli 50 mm	Korotusrimat 50 x 50 k300–600
Ruoteet	32 x 100–50 x 100 k300–600
Profiilipelti	

Yläpohjarakenne voidaan tehdä erilaisilla sekundääri-tuuletusväli-ruoteetyhdistelmillä, jotka täyttävät kantavuusvaatimuksen. Seuraavassa on kolme erilaista mallia siitä, miten yläpohjarakenne voidaan tehdä:

Malli 1:	k-jako	Palkki	Koko
Sekundäärit	k600	Sahatavara C24	50 x 200
Tuuletusvälirimat	k600	Sahatavara C24	50 x 50
Ruoteet	k600	Sahatavara C24	50 x 50

Malli 2:	k-jako	Palkki	Koko
Sekundäärit	k1800	Kerto-S	45 x 210
Tuuletusvälirimat	k900	Sahatavara C24	50 x 100
Ruoteet	k600	Sahatavara C24	50 x 50

Malli 3:	k-jako	Palkki	Koko
Sekundäärit	k2400	Kerto-S	45 x 310
Tuuletusvälirimat	k600	Sahatavara C24	50 x 100
Ruoteet	k600	Sahatavara C24	50 x 50

## 8. Kilpailukykyvertailut

### 8.1 Tyyppirakenteiden kustannukset

Esitellyille tyyppirakenteille laskettiin primäärirungosta aiheutuvat kustannukset lattianeliometriä kohden. Lasketut kustannukset perustuvat valmistajien ja toimittajien ilmoittamiin yksikköhintoihin, joiden perusteella on laskettu koko rakenteen kustannukset. Taulukossa 18 esitetään laskemissa käytettyjä yksikkökustannuksia. Kustannukset on laskettu bruttolattianeliometriä kohden.

Esitettyihin neliöhintoihin sisältyvät

- primääri vaakakannatin
- primääri pystykannatin
- sahatavarasta tehty seinärunko
- liitososat.

Esitettyihin neliöhintoihin eivät sisälly

- sekundäärirakenteet
- perustukset ellei ole toisin mainittu
- vaipparakenteet
- asennus
- kuljetus.

Vertailtavat rakenteet eivät ole kaikissa tapauksessa täysin vertailukelpoisia. Laskelmissa käytetyt oletukset, rajaukset ja laskelmien perusteet kerrotaan seuraavissa kohdissa.

Vertailukohtana käytetty perinteinen naulalevyristikkohalli sisältää NR-ristikot k900 ja rankaseinän k600. Hinnassa ei ole huomioitu hallin jäykistystä. Vertailuhinta ei myöskään sisällä aukkopalkkeja.

Taulukko 18. Kustannuslaskelmissa käytettyjä yksikköhintoja. Hinnat ilman ALV:a.

Materiaali	Yksikköhinta	Tiedon tausta
Liimapuu	470 €/m <sup>3</sup>	Valmistajan ilmoittama tieto, vähintään 50 m <sup>3</sup>
Kertopuu	470 €/m <sup>3</sup>	Toimittajan ilmoittama tieto, vähintään 50 m <sup>3</sup>
Sahatavara	200 €/m <sup>3</sup>	Valmistajan ilmoittama tieto (50 x 200 C24)
Sormijatkettu sahatavara	270 €/m <sup>3</sup>	Valmistajan ilmoittama tieto (50 x 200 C24)
Kyllästetty sahatavara	319 €/m <sup>3</sup>	Vaativin kyllästysluokka, valmistajan ilmoittama tieto
Naulalevyristikko	10 €/m <sup>2</sup>	Valmistajan ilmoittama tieto
Harjateräs	1,7 €/kg	Toimittajan ilmoittama tieto
Sinkitty harjateräs	2,4 €/kg	Toimittajan ilmoittama tieto
Jäykkä perustusliitos	126 €/kpl	Valmistajan ilmoittama tieto. Hitsattava liitosmalli (suorat harjateräkset + päätylevy) L= 19 m, k jako 4,8 m, pilarin h = 3 m. Hintaan sisältyy liitososat ja niiden asennus (poraus + liimaus) puuosiin
Vinotankoliitokset:		
- jäykkä perustusliitos	28,5 €/kpl	Vain liitososa
- pilaripalkkiliitos	27 €/kpl	Vain liitososa
- harjaliitos	50 €/kpl	Vain liitososa
Liitososien asennuskustannukset (poraus + liimaus)	47 €/kpl	Liitososan lisäksi

NR-kehähalli sisältää NR-kehän k4800. Rakenteella tason suuntainen jäykistys hoituu itse rakenteella. Erillisiä aukkopalkkeja ei tarvita.

Post-Frame-halli sisältää naulalevyristikot k2400, kaksi ristikkoo yhdessä, ja kyllästetyt sahatavaratolpat 4 x 50 x 200 mm<sup>2</sup> k2400 pystyrunkona. Seinän kyllästetty sahatavaratolppa ulottuu anturaan asti. Tason suuntainen jäykistys hoidetaan mastopilareilla ja levyjäykistyksellä. Jäykistyksen hoitaminen pelkästään levyjäykistyksellä aiheuttaisi hiukan lisäkustannuksia laskettuihin hintoihin verrattuna. Vertailuhinta sisältää perustukset.

Liimapuukehähalli sisältää vetotangolliset liimapuukehät k4800. Kehä sisältää palkin  $165 \times 650 \text{ mm}^2$ , mastojäykät liimapuupilarit  $165 \times 315 \text{ mm}^2$  ja vetotangot  $2 \times 25 \text{ mm}$ . Tason suuntainen jäykistys hoituu itse rakenteella. Vetotangot ovat kuumasinkittyä terästä.

Kertopuinen A-kehä sisältää puuvetotangollisen palkkirakenteen k4800, jossa palkki on  $75 \times 700 \text{ mm}^2$  kertopuuta, mastojäykät kertopuupilarit  $210 \times 400 \text{ mm}^2$  (kotelo) ja vetotangot kertopuuta  $2 \times 51 \times 300 \text{ mm}^2$ . Tason suuntainen jäykistys hoituu itse rakenteella.

Kolminivelkehässä on yhdistetty kertopuinen kolminivelkehä k4800. Palkkiosan koko on  $75 \times 500\text{--}1\ 350 \text{ mm}^2$  ja jalkaosan  $2 \times 51 \times 500\text{--}1\ 350 \text{ mm}^2$ . Tason suuntainen jäykistys hoituu itse rakenteella. Nurkkaliitos tehdään tappivaaroin.

Kolmilaivaisen liimapuuhallin jako on k4800. Palkin koko on  $165 \times 700 \text{ mm}^2$ , mastopilarin  $165 \times 500 \text{ mm}^2$ , reunapilarin  $165 \times 165 \text{ mm}^2$  ja vaakapalkin  $165 \times 225 \text{ mm}^2$ . Tason suuntainen jäykistys hoituu itse rakenteella.

Lasketut primäärirakenteen kustannukset neliometriä kohden esitetään taulukossa 19 konehalleille ja taulukossa 20 pihatoille ja sikaloille.

*Taulukko 19. Konehallien primäärirakenteiden kustannuksia lattianeliometriä kohden. Jänneväli 14–16 m. Hinnat ilman ALV:a.*

Rakenne	Huomioita	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Naulalevyristikko + rankaseinä	NR k900, seinä k600, jäykistystä ei ole huomioitu	12
NR-kehähalli	k4800	22
Post-Frame	k2400, kyllästetyt sahatavaratolpat anturaan asti, sisältää perustukset.	17

*Taulukko 20. Pihattojen ja sikaloitten primäärirakenteiden kustannuksia lattianeliometriä kohden. Kannattimien k-väli on 4 800 mm ja jänneväli 19 m, lukuun ottamatta kolmilaivaista liimapuuhallia, jossa rakennuksen leveys on 33 m. Hinnat ilman ALV:a.*

Rakenne	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Liimapuukehä	22
Kertopuinen A-kehä	24
Kolminivelkehä	27
Kolmilaivainen liimapuuhalli	18

## 8.2 Tyyppirakenteiden vertailu muihin rakenteisiin

Taulukoissa 21 ja 22 vertaillaan kehitettyjen tyyppirakenteiden kustannuksia erilaisiin puu, teräs ja betonirakenteisiin. Muiden rakenteiden kustannukset perustuvat lähteeseen [2]. On huomattava, että kustannukset eivät ole kaikilta osin suoraan vertailukelpoiset. Taulukkojen 19 ja 20 sekä lähteen [2] mukaiset kustannukset eroavat toisistaan mm. erilaisten tutkimusajankohtien ja eri valmistajilta saatujen tietojen takia.

*Taulukko 21. Erilaisten primäärirunkorakenteiden kustannuksia lattianeliömetriä kohden, kun jänneväli on 14–16 m. Hinnat ilman ALV:a.*

Tyyppi	Rakenne	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Tyyppirakenne	Naulalevyristikko k900 + rankaseinä k600	12
	NR-kehähalli k4800	22
	Post-Frame	17
Puu [2]	Naulalevyristikot k900 + rankaseinä k600	10
	Naulalevyristikot k1200 + rankaseinä k600	13
	Kertopuukolminivelkehä k4000	24
Teräs [2]	Putkipalkkiristikko k4000	29
	Kolminivelristikkokehä k4000	24
Betoni [2]	Betonikehä-HI-elementit, k4000	37

*Taulukko 22. Erilaisten primäärirunkorakenteiden kustannuksia lattianeliömetriä kohden, kun jänneväli on 19 m. Hinnat ilman ALV:a.*

Tyyppi	Rakenne	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Tyyppirakenne k4800	Liimapuukehä	22
	Kertopuinen A-kehä	24
	Kolminivelkehä	27
	Kolmilaivainen liimapuuhalli, leveys 33 m	18
Puu [2]	Naulalevyristikot k900 + rankaseinä k600	12
	Naulalevyristikot k1200 + rankaseinä k600	16
	Liimapuupalkki + pilari k4000	23
	Liimapuupalkki + pilari k5000	21
	Liimapuupalkki + pilari k6000	19
	Kertopuuansarakenne k4000	24
	Kertopuukolminivelkehä k4000	26
Teräs [2]	Putkipalkkiristikko k4000	32
Betoni [2]	Betonikehä - HI-elementit, k4000	36

Jänneväliltään 14–16 m:n hallissa tyyppirakenteiden kustannukset ovat 12–22 €/m<sup>2</sup>. Halvin rakenne on perinteinen naulalevyristikkohalli, kustannukset ovat 12 €/m<sup>2</sup>. Lähteen [2] mukaiset kustannukset ovat puurakenteille 10–24 €/m<sup>2</sup>. Naulalevyristikoilla k900 ero tutkimusten välillä oli 20 %. Tämä selittyy aiemmin mainituilla tutkimusten lähtötietojen eroilla. Lähteen [2] naulalevyristikkorakenteiden k900 ja k1200 välinen kustannusero selittyy erilaisilta valmistajilta saatujen tietojen takia. Yleensä suuremman k-jaon pitäisi olla kustannuksiltaan halvempi.

Teräsristikkorakenteiden kustannukset ovat 24–29 €/m<sup>2</sup> ja betonipalkkirakenteen 37 €/m<sup>2</sup>. Tämän kokoisessa hallissa puurakenteiden kustannukset ovat selvästi teräs- ja betonirakenteiden kustannuksia pienempiä.

Jänneväliltään 19 m:n hallissa tyyppirakenteiden kustannukset ovat 18–27 €/m<sup>2</sup>. Lähteen [2] mukaan naulalevyristikoiden kustannukset ovat 12–16 €/m<sup>2</sup>, liimapuupalkkirakenteen 19–23 €/m<sup>2</sup> k-jaosta riippuen ja kertopuurakenteiden 24–26 €/m<sup>2</sup>. Teräs- ja betonirakenteiden kustannukset ovat 32–36 €/m<sup>2</sup>. Tämän kokoisessa hallissa puurakenteet ovat kustannuksiltaan kilpailukykyisiä teräs- ja betonirakenteisiin verrattuna mutta ero on pienempi kuin pienemmissä halleissa.

### 8.3 Sekundäärirakenteiden kustannukset

Taulukossa 23 esitetään neliökustannuksia sekundääreille, jotka käyvät primäärirakenteen k-jaolle 4 800 mm.

*Taulukko 23. Sekundääripalkkien materiaalimenekkejä ja kustannuksia lattianeliömetriä kohden, kun primäärirakenteen k-jako on 4 800 mm. Jokaisella palkkityypillä on valittu edullisin taivutus- ja taipumakriteerit täyttävä palkki. Yksikköhintoina on käytetty taulukon 18 mukaisia hintoja. Asennustyös osuutta ei ole huomioitu.*

	L	k-jako	H	B	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
Sahatavara	4 800	400	200	50	0,0250	5,0
Sahatavara 3-aukk.	4 800	650	200	50	0,0154	3,5
Kertopuu 3-aukk.	4 800	1 650	260	39	0,0061	2,9
Liimapuu 3-aukk.	4 800	1 500	270	42	0,0076	3,6

Jos yläpohja tehdään paikalla, niin tällöin kertopuu- ja liimapuuorsien suuri k-jako aiheuttaa sen, että sisäpuolella on käytettävä yhtä ylimääräistä koolausta johon kiinnitetään sisäpuolen verhous. Ja vastaavasti tuuletusvälikerroksen koolaus vaatii tiheimmän tai korkeamman koolauksen kuin sahatavara-sekundäärien tapauksessa. Yläpohjan puutavaran hinnaksi tulisi esimerkiksi seuraavaa:



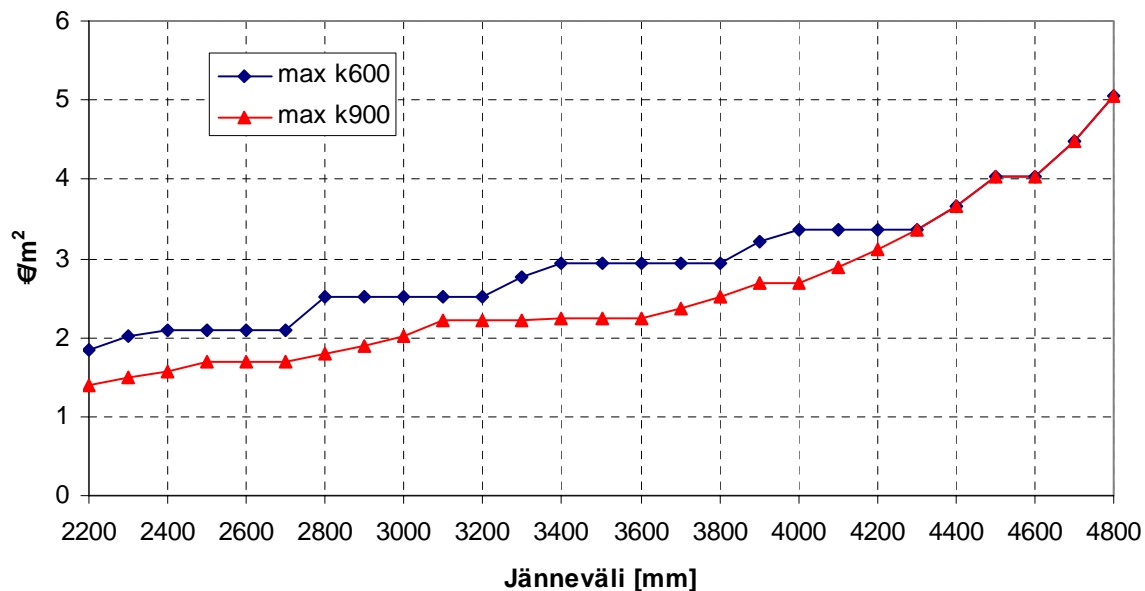
Malli 1: sahatavara L = 4800 mm

Rakenneosa	k-jako	Koko	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Sekundääri	k600	ST 200 x 50	3,4
Tuuletus	k600	50 x 50	0,8
Ruoteet	k600	50 x 50	0,8
Yhteensä =			5,0

Malli 2: kertopuu L = 4800 mm

Rakenneosa	k-jako	Koko	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Sisäkoolaus	k900	50 x 50	0,8
Sekundääri	k1650	KP 260 x 39	2,9
Tuuletus	k900	100 x 50	1,2
Ruoteet	k600	50 x 50	0,8
Yhteensä =			5,7

Kuvassa 62 esitetään yksiaukkoisen sahatavarasekundäärin neliökustannukset jännevälilin funktiona, kun sekundäärien k-jako on rajoitettu.



Kuva 62. Sahatavarasekundäärien neliöhinta lattianeliömetriä kohden, kun maksimi k-jako on 600 mm tai 900 mm. Jokaisella jännevälillä on valittu edullisin taivutus- ja taipumakriteerit täyttävä palkki. Lujuusluokka on C24, korkeus 100–200 mm ja leveys 50 mm. Yksikköhintoina on käytetty taulukon 18 mukaisia hintoja. Asennustyös osuutta ei ole huomioitu.

## 9. Yhteenveto ja päätelmät

Suomalaisten kotieläintilojen kasvu on aiheuttanut rakennusten koon kasvua ja rakenteiden muutostarvetta. Suuriin yksiköihin soveltuvien hyvien ja tutkittujen rakenneratkaisujen puute aiheuttaa epävarmuutta rakenneratkaisujen valinnassa. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää uusia toiminnallisia pohjaratkaisuja, toimivia rakenneratkaisuja ja tyyppirakenteita erilaisiin käyttökohteisiin.

Tutkimuksessa selvitettiin yhdeksän lypsykarjapihatton ja kolmen sikalarakennuksen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita vuoden kestäneellä mittauksella. Olosuhdeselvityksen tarkoituksena oli saada tietoa siitä, millaisiin sisäilmastorasituksiin uusien suurten kotieläinrakennusten rakenteet ja pintamateriaalit joutuvat. Sisäolosuhteiden erot näyttivät korreloivan kunkin kohteen ilmanvaihtojärjestelmän tekniseen toimivuuteen ja toimintaperiaatteeseen. Ilmanvaihdon määrässä oli tuntuvia puutteita. Kotieläinrakennusten ullakko-onteloiden tuulettumisessa oli puutteita. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että etenkin talviolosuhteissa suhteelliset sisäkosteudet olivat tasolla, jossa homeen synty ja esiintyminen oli todennäköistä. Sisäilman kosteudesta johtuvien lahovaurioiden syntyriski oli kuitenkin vähäinen.

Konehalleille, lypsykarjapihatoille ja sikaloille kehitettiin toiminnalliset pohjaratkaisumallit, jotka vastaavat kotieläintilojen lähitulevaisuuden rakennustarpeita. Konehalleille kehitettiin 15 m:n jännevälän pohjaratkaisumalli. Sikaloitten toiminnalliset mallit hahmotettiin perheviljelmän kokoluokkiin, joissa porsassikala on 100/200-paikkainen ja lihasikala noin 1 000-paikkainen. Kehitetyt sikalamallit ovat monistettavia ja modulaarisesti – vaiheittain tai yksiköittäin – laajennettavia rakennustyyppejä. Lypsykarjapihatoille kehitettiin useita pohjaratkaisuja, joissa kantavien rakenteiden paikka voi vaihdella.

Perinteisillä runkorakennetyypeillä on useita ongelmia. Rakennusten kasvaminen vaatii uusia rakenneratkaisuja. Rakennusten jäykistäminen on ongelmallista ja kattorakenteissa on stabiliteettiongelmia. Myös ilmanvaihdossa ja rakennysfysikaalisessa toimivuudessa on puutteita.

Uusiin pohjaratkaisumalleihin kehitettiin uusia, puumateriaaleihin perustuvia tyyppirakennejärjestelmiä. Uusiksi runkotekniikoiksi konehalleihin suositeltiin naulalevytekniikkaan perustuvaa kolminivelristikkokehää sekä amerikkalaisperäistä Post-Frame-runkoa. Pihattoihin ja sikaloihin suositeltiin kerto- tai liimapuista kolminivelkehää, vetotangollista ansaristikkoa joko liima- tai kertopuusta sekä liimapuista, kolmiaukkoista pilari-palkkirunkoa. Runkorakennemalleille selvitettiin rakenneratkaisut ja mitoitusmenetelmät ja esiteltiin mitoitus-esimerkkejä. Suurten rakennusten jäykistämiseen esiteltiin Suomessa vähän käytetty poimulevyjäykistys. Poimulevyjäykistykselle johdettiin suunnitteluohjeet ja laadittiin mitoitusohjelma.

Kehitetyille tyyppirakenteille tehtiin kilpailukykyvertailut vertaamalla niitä perinteisiin puurakenteisiin ja muihin materiaaleihin. Uudet tyyppirakennemallit olivat tutkimuksen perusteella taloudellisesti kilpailukykyisiä, kun huomioidaan niistä saatavat edut.

Puurakenteiden käytön esteinä ovat olleet aikaisemmin todetut tutkittujen esimerkkien puute. Toinen este on saattanut olla suunnittelijoiden asenteissa, sillä puu on sekä palava että lahoava materiaali. Vikaa on suunnittelijoiden lisäksi voinut olla myös rakennuttajien eli viljelijöiden asenteissa. Puurakenteita voidaan käyttää maatalousrakennuksissa, kun detaljit suunnitellaan oikein. Pitkäaikaiskestävyys riippuu erityisesti rakennuksen ilmanvaihdosta.

Maatalousrakennukset ovat nykyään yhä enemmän teollisuusrakennuksen kaltaisia mittakaavan ja ulkonäkönsä puolesta. Tämä suuntaus tulee jatkumaan. Teollisuushalleille ovat tyyppillisiä merkittävät, insinöörilaskentaa edellyttävät rakenteet, joiden suunnittelu tai rakentaminen ei onnistu kotitarverakentajalta. Esiteolliset järjestelmät nopeuttavat rakennusprosessia ja näin mahdollistavat mittavan investoinnin saamisen nopeasti tuotantotoiminnan piiriin. Teollinen rakentamistapa ei silti estä maatilán oman puutavaran käyttöä täydentävissä rakenteissa. Tutkimuksessa selvitettyt nykyiset ongelmakohdat sekä kehitetyt rakenneratkaisut ja tyyppirakenteet parantavat maatarakennusten laatua ja taloudellisuutta.

## Lähdeluettelo

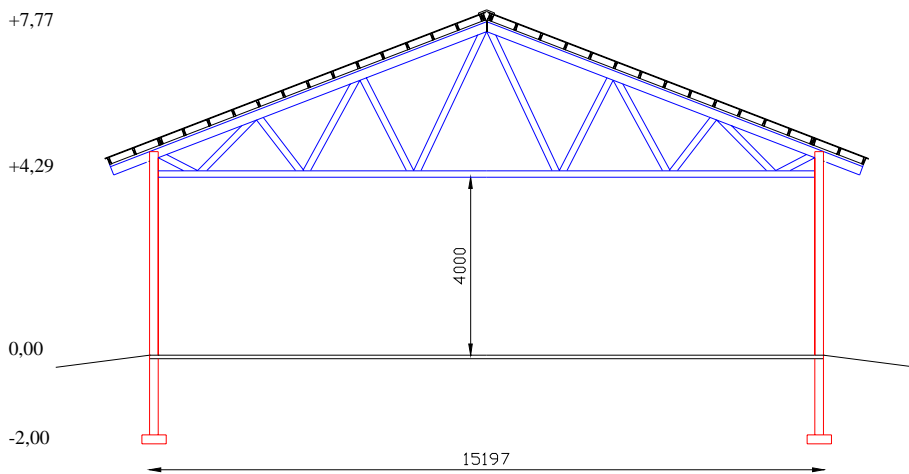
1. Kivinen, T. Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut. Olosuhdemittaukset ja toiminnalliset mallit. Vihti: Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus, 2003.
2. Virta, J. & Koponen, S. Maatilan tuotantorakennuksiin soveltuvien runkojärjestelmien kustannuarviovertailu. Teknillisen korkeakoulun talonrakennustekniikan julkaisuja 113. Espoo: 2001. 30 s. ISBN 951-22-5348-2.
3. Walker, J. N. & Woeste, F. E. Post-Frame Building Design. ASAE, 1992. 358 s. ISBN 0-929355-29-6.
4. Post-Frame Building Design Manual. NFBA. 2000.
5. Teräsrakenneyhdistys TRY Internet-sivut, [www.vtt.fi/virtual/try/Esdep/index.html](http://www.vtt.fi/virtual/try/Esdep/index.html), ESDEP työryhmä 9: Luento 9.5: Ohutlevyjien käyttö jäykisterakenteina. 31.10.2002.
6. RIL 205-1997, Puurakenteiden suunnittelu, Euronormi. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 1997.
7. RIL 162-1, Puurakenteet I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 1987. 248 s. ISBN 951-758-143-2.
8. SPU-Systems Oy, Internet-sivut, [www.spu.fi](http://www.spu.fi), 31.10.2002.
9. Thermisol Finland Oy, Internet-sivut, [www.isora.fi](http://www.isora.fi), 31.10.2002.
10. RT-kortti, RT 325.4-36077. Rakennustieto Oy, 2002.
11. Suomi-Lindberg, L., Viitaniemi, P., Häkkä-Rönholm, E. & Ritschkoff, A. Metalliliittimien korroosio puurakenteissa, Biokorroosio. VTT Julkaisuja 839. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1999. 50 s. + liitt. 9 s. ISBN 951-38-5016-1.
12. Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT Tiedotteita 1991. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1999. 160 s. ISBN 951-38-5499-X.
13. Lausunto No RTE2628/02. Lausunto liimapuupilarin APL-T kantaliitoksesta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2002.

14. Lausunto No RTE2629/02. Lausunto liimapuurakenteiden APL-P puristusliitoksesta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2002.
15. Anstar APL-T liimapuupilarin kantaliitos, käyttöohje. 2002.
16. Anstar APL-P puristusliitos liimapuulle, käyttöohje. 2002.
17. Lausunto No RTE1328/01. Lausunto PI-palkin tuoteselosteesta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2001.
18. PI-palkki. Kaksipuoleisilla naulalevyillä sahatavarasta koottu I-palkki. Tuoteseloste 20.09.2001. Hämeenkoski: Teurowood Oy, 2001.
19. Teurowood Oy, Internet-sivut, [www.teurowood.fi](http://www.teurowood.fi), 1.12.2002.
20. Ehlbeck, J. & Görlacher, R. Syyn suuntaan nähden poikittainen veto liitoksissa. STEP 1, Puurakenteet, luento C2. Helsinki: Rakennustieto, 1996.
21. Blass, H. J. Nurjahduspituus. STEP 1, Puurakenteet, luento B7. Helsinki: Rakennustieto, 1996.
22. Kevarinmäki, A., Kangas, J., Nokelainen, T. & Kanerva, P. Naulalevyillä vahvistettu Kertopuupulttiliitos – Tuoteseloste. Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 50. Espoo: 1995. 39 s. ISBN 951-22-2724-X.

# Liite A: Post-Frame-hallin mitoitus esimerkki

## Rakenteen kuvaus ja lähtötiedot

Mitoitetaan kuvan A1 mukainen Post-Frame-halli. Pääkannitin on naulalevyristikko, ja pilareina ovat sahatavarapilarit. Rakennus jäykistetään profiilipellin avulla. Sekundääreinä käytetään jatkuvia sahatavaraorsia, joiden k-jako määräytyy kantavuuden ja profiilipellin vaatimuksien mukaan.



Kuva A1. Mitoitettavan konehallin leikkauskuva.

Perustus on neliöantura ( $400 \times 400 \times 250 \text{ mm}^3$ ). Anturan päältä lähtee pilari, joka koostuu kolmesta lamellista, 3 kpl C30  $48 \times 197 \text{ mm}^2$ . Lamellit ovat M-luokan painekyllästettyä männyn pintapuuta. Pilareiden k-jako on 2 400 mm. Pilarin lamellit ovat yksimittaisia. Hallissa on maanvarainen teräsbetonilaatta ( $b = 100 \text{ mm}$ ). Pilari kiinnitetään maanvaraiseen teräsbetonilaattaan teräsosalla. Katon pääkannatin on NR-ristikko, joita on kaksi rinnakkain. Katon sekundääreinä ovat jatkuvat sahatavaraorret, C24  $50 \times 150 \text{ mm}^2$ , k-jaolla 600 mm. Vesikate on Rannilan R20SR,  $t = 0,7 \text{ mm}$ , profiilipelti. Seinäsekundäärit ovat vaakatasossa kulkevat soivot C24  $50 \times 150 \text{ mm}^2$  k-jaolla 900 mm.

Hallin staattinen malli on sivusiirtävä kehä, jossa on mastopilarit. Pilarin ja NR-ristikon liitoksen oletetaan toimivan täysin nivelellisesti. Liitos siirtää leikkaus- ja normaalivoimaa.

## Rakennelaskelmien lähtötiedot ja kuormat

Leveys (mm)	15 197	$q_{\text{lumi, lyhyt, k}}$ ( $\text{kN} / \text{m}^2$ )	2,2
K-jako (mm)	2400	$g_{\text{yläpohja, k}}$ ( $\text{kN} / \text{m}^2$ )	0,4
Pituus (mm)	24 000	$q_{k(z), \text{seinä}}$ ( $\text{kN} / \text{m}^2$ )	0,52

Kaltevuus (°)	18,4	$q_{k(z),katto}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,59
$H_{sisä}$ (mm)	4 000		
$H_{seinä}$ (mm)	4 600		
$H_{harja}$ (mm)	7 100		

Tuulen nopeuspaineen ominaisarvot  $q_{k(z),seinä}$  ja  $q_{k(z),katto}$  on laskettu maastoluokan II ja tasamaan mukaan. Kuormitustapaukset ja osavarmuuskertoimet on esitetty kohdan 5.2 taulukossa 8.

Rakenteet mitoitetaan tuulen nettopaineella joka on ulkoisen ja sisäisen paineen erotus. Positiivinen paine (+) on painetta vasten pintaa ja negatiivinen paine (-) on painetta pois päin pinnasta.

Ulkoisen paine	$w_e = q_{k(z_e)} \cdot c_{pe}$
Sisäinen paine	$w_e = q_{k(z_i)} \cdot c_{pi}$
Nettopaine	$w_{net} = q_{k(z)} \cdot (c_{pe} - c_{pi})$

Ulkopuolisen paineen kertoimet ovat:

Seinä	$c_{pe} = + 0,8$ (tuulen puoli)
	$c_{pe} = - 0,3$ (suojan puoli)
Katto	$c_{pe} = -0,28 / + 0,24$ (alue H, tuulen puoli)
	$c_{pe} = - 0,4$ (alue I, suojan puoli)
	$c_{pe} = - 0,74 / + 0,30$ (alue G, räystääs)
	$c_{pe} = - 0,90$ (alue J, harja)

Räystääs- ja harja-alueiden painekertoimien vaikutusalue on 1,5 m, kun hallin leveys = 15 m.

Sisäpuolisessa paineessa käytetään raja-arvoja  $c_{pi} = 0,8$  ja  $c_{pi} = - 0,5$ . Tarkistetaan molemmat tapaukset ja haetaan mitoittavat tilanteet.

Nettopaine kertoimet, kun  $c_{pi} = 0,8$  ja räystäällä sekä harjalla imu:

Seinä	$c_{net} = + 0,8 - 0,8 = 0,0$	(tuulen puoli)
	$c_{net} = - 0,3 - 0,8 = -1,1$	(suojan puoli)
Katto	$c_{net} = - 0,28 - 0,8 = -1,08$	(alue H, tuulen puoli)
	$c_{net} = - 0,4 - 0,8 = -1,2$	(alue I, suojan puoli)

$$c_{net} = -0,9 - 0,8 = -1,77 \quad (\text{alue J, harja})$$

$$c_{net} = -0,74 - 0,8 = -1,54 \quad (\text{alue G, räystä})$$

Tämä tapaus tuottaa suurimman nosteen.

Nettopaine kertoimet, kun  $c_{pi} = -0,5$  ja räystäällä sekä harjalla paine:

Seinä  $c_{net} = +0,8 - (-0,5) = 1,3$  (tuulen puoli)

$$c_{net} = -0,3 - (-0,5) = 0,2 \quad (\text{suojan puoli})$$

Katto  $c_{net} = 0,29 - (-0,5) = 0,79$  (alue H, tuulen puoli)

$$c_{net} = -0,4 - (-0,5) = 0,1 \quad (\text{alue I, suojan puoli})$$

$$c_{net} = -0,77 - (-0,5) = -0,27 \quad (\text{alue J, harja})$$

$$c_{net} = 0,43 - (-0,5) = 0,93 \quad (\text{alue G, räystä})$$

Tämä tapaus tuottaa suurimman tuulen paineen.

Tarkasteltavia tuulen kuormitustapauksia saadaan siis kaksi, toinen tuottaa suurimman nosteen ja toinen suurimman paineen. Määritellään tuulikuorman lopulliset arvot lausekkeella:

$$q_{tuuli,k} = q_{k(z)} \cdot c_{net} \cdot k\text{-jako}$$

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden nostava tuuli tapauksessa:

Seinä  $q_{tuuli,k} = 0,0 \text{ kN / m}$  (tuulen puoli)

$$q_{tuuli,k} = -1,38 \text{ kN / m} \quad (\text{suojan puoli})$$

Katto  $q_{tuuli,k} = -1,53 \text{ kN / m}$  (alue H, tuulen puoli)

$$q_{tuuli,k} = -1,70 \text{ kN / m} \quad (\text{alue I, suojan puoli})$$

$$q_{tuuli,k} = -2,51 \text{ kN / m} \quad (\text{alue J, harja})$$

$$q_{tuuli,k} = -2,18 \text{ kN / m} \quad (\text{alue G, räystä})$$

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden ”painava tuuli” -tapauksessa:

Seinä  $q_{tuuli,k} = 1,63 \text{ kN / m}$  (tuulen puoli)

$$q_{tuuli,k} = 0,25 \text{ kN / m} \quad (\text{suojan puoli})$$

Katto  $q_{tuuli,k} = 1,12 \text{ kN / m}$  (alue H, tuulen puoli)

$$q_{tuuli,k} = 0,15 \text{ kN / m} \quad (\text{alue I, suojan puoli})$$

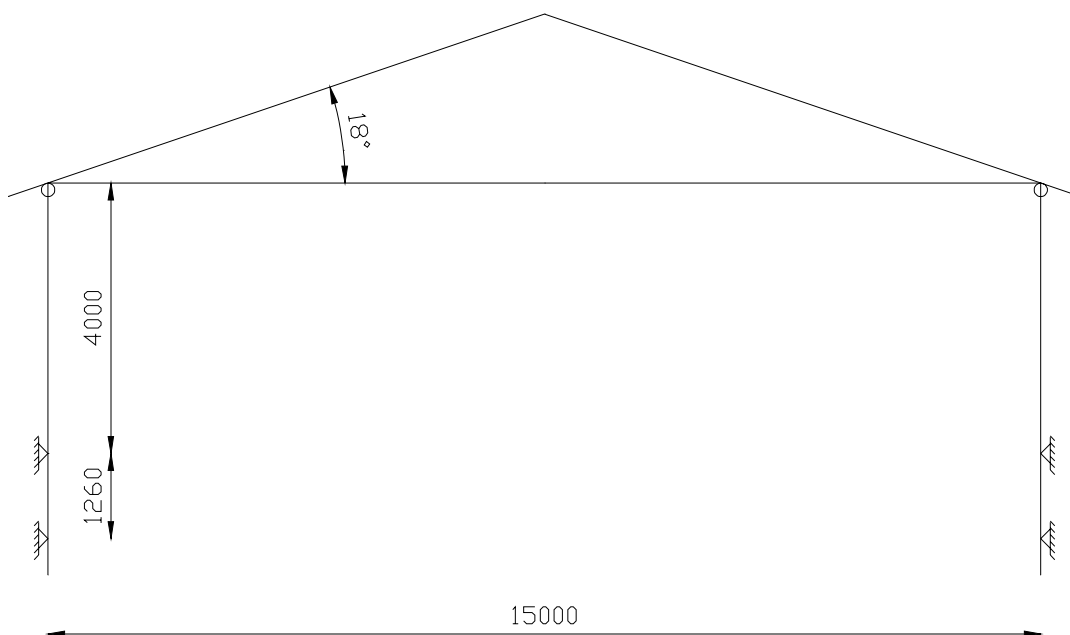
$$q_{tuuli,k} = -0,39 \text{ kN / m} \quad (\text{alue J, harja})$$

$$q_{tuuli,k} = 1,32 \text{ kN / m} \quad (\text{alue G, räystä})$$



## Rakenteiden mitoitus

Luodaan kuvan A2 mukainen staattinen malli, täydennetään kuormitustapaukset ja ratkaistaan kuormitustapauksittain pilarin voimasuureet  $M$ ,  $N$  ja  $Q$ .



Kuva A2. Mitoitettavan kehän staattinen malli.

Kuvan A2 mukaisessa staattisessa mallissa ei ole huomitu levykentän vaikutusta. Tässä yhteydessä levykentän vaikutus pilarien voimasuureisiin ratkaistaan yksinkertaisen palkkianalogian ratkaisun mukaisesti ja tulokset varmennetaan tasokehähjelmalla. Esitetään kuitenkin vertailun vuoksi voimasuureet myös ilman levyvaikutusta.

Pilarin voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavaa:

KT	$N$ (kN)	$Q_{ylä}$ (kN)	$Q_{ala}$ (kN)	$M$ (kNm)
1	-73,1	0	0	0
2	13,5 / 13,9	7 / 2,1	-1,3 / 2,1	11,4 / 8,3
3	-76 / -70,6	8,7 / 2,7	0 / 4	17,3 / 13,5

Kehän tukireaktiot murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavaa:

KT	$R_{x,ylä}$ (kN)	$R_{x,ala}$ (kN)	$R_y$ (kN)
1	0	0	73,1
2	8,7 / -16,1	-6,6 / 9,1	-13,9 / -13,5
3	22,5 / -13,4	-13,7 / 10,7	76 / 70,6

Pilarin yläpään hetkellinen vaakasiirtymä tuulikuormasta käyttörajatilassa (KT 4) on 66 mm.

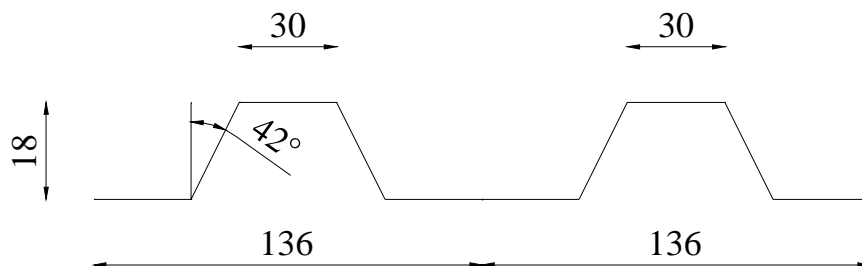
Lasketaan pilarin jäykkyys ja levykentän jäykkyys. Näiden avulla ratkaistaan vaakavoimien jakaantuminen pilarin ja levykentän kesken.

Pilarin jäykkyys saadaan lausekkeen (25) mukaan.

$$k_{p, MRT} = 14,53 \text{ mm/kN}$$

$$k_{p, KRT} = 9,69 \text{ mm/kN.}$$

Esitetään levykentän geometria ja lähtöarvot.



Kuva A3. Laskentaesimerkin profiilipellin geometria.

Vesikatteena on Rannilan R20B ( $t = 0,7 \text{ mm}$ ;  $b = 1\,090 \text{ mm}$ ) profiilipelti. Kuvassa A3 on pellin geometria.

Valitaan vesikatteen kiinnitykset:

levy-orsiliitin	itseporautuva peltiruuvi	4,8 x 35
saumaliitin	itseporautuva peltiruuvi	4,8 x 20
orsi-primääriliitin	naulakiinnitys (kulmalevy)	BMF-naula 4 x 40

Lasketaan liittimien kestävyys ja siirtymät:

Liitin	Kestävyys / leike (kN)	Liukuma (mm / kN)
Ruuvi 4,8 x 35	1,3	0,64
Ruuvi 4,8 x 20	1,6	0,25
Naula 4 x 40	1,0	1,27

Levy kiinnitetään ruoteisiin joka toisesta poimusta ja poimun pohjasta. Ruoteet kiinnitetään primääreihin BMF-kulmaraudalla, kiinnitys 3 n 4 x 40 molempiin osiin.

Levyjäykistyksen lähtöarvot:

Muuttuja		
$a$ (mm)	2 400	k-jako
$A$ (mm <sup>2</sup> )	15 000	reunaorren ala, 2 kpl 50 x 150
$b$ (mm)	7 900	lappeen pituus
$d$ (mm)	136	poimuväli
$E$ (N / mm <sup>2</sup> )	210 000	teräksen kimmomoduuli
$E_p$ (N / mm <sup>2</sup> )	7 400	orren kimmomoduuli, C24 mukaan
$h$ (mm)	18	profiilin korkeus
$K$	0,258	profiilin joustovakio (taulukko 15)
$p$ (mm)	272	levyn ja orren välisten kiinnikkeiden keskinäinen väli
$t$ (mm)	0,63	profiilin laskentapaksuus
$n$ (kpl)	10	jäykistelevyn osakenttien lkm levyn pituussuunnassa
$n_b$ (kpl)	1	levypaneelien lkm jäykistelevyn pituudella (peräkkäiset levyt)
$n_f$ (kpl)	4	levyn ja orren välisten kiinnikkeiden lkm levyn muodostaman palkin korkeutta kohti
$n_p$ (kpl)	14	orsien lukumäärä jäykistelevyissä
$n_s$ (kpl)	27	levyjen saumakiinnittimien lukumäärä yhdessä saumassa
$n_{sh}$ (kpl)	3	levyn leveyksien lukumäärä osakenttää kohden
$\alpha_1$	0,6	(taulukko 13)
$\alpha_2$	0,27	(taulukko 13)
$\alpha_3$	0,37	(taulukko 13)
$\beta_1$	1	(taulukko 14)

$\beta_2$	1	(taulukko 15)
$s_p$ (mm / kN)	0,64	levy-orsikiinnikkeiden jousto
$s_s$ (mm / kN)	0,25	saumakiinnikkeiden jousto
$s_{pr}$ (mm / kN)	0,85	orsi-primäärikiinnikkeiden jousto

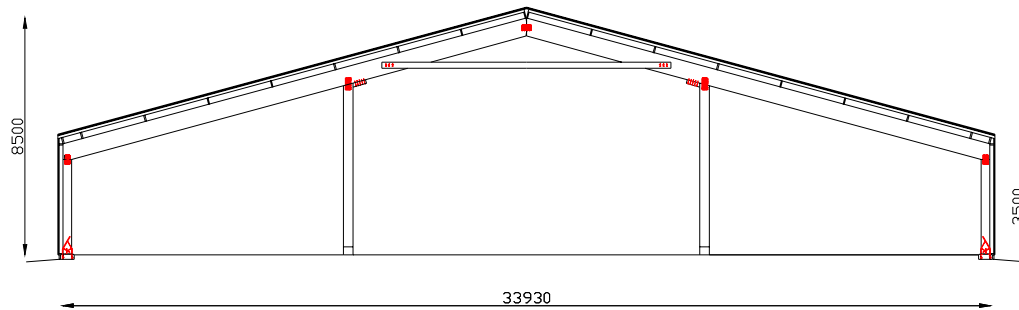
Lasketaan levyjäykistyksen kokonaisjoustavuus lausekkeiden (15–20) mukaan:

Joustotekijä	Jousto (mm / kN)
$c_{1,1}$	0,019
$c_{1,2}$	0,002
$c_{2,1}$	0,019
$c_{2,2}$	0,032
$c_{2,3}$	0,077
$c_3$	0,062
kokonaisjoustavuus	0,109

Kokonaisjoustavuudessa huomioitu lapekulma sekä molemmat lappeat lausekkeella (23). Vaakavoimien jakaantumista levykentän ja pilareiden suhteen voidaan arvioida suhteellisella joustolla  $\psi$ .

$$\psi = c / k_{p, MRT} = 0,008$$

## Liite B: Kolmilaivaisen liimapuuhallin mitoitus-esimerkki



Kuva B1. Kolmilaivaisen liimapuuhallin mitoitus-esimerkki.

### Rakenteen kuvaus

Pääkannatin on kuvan B1 mukainen kolmilaivainen liimapuinen pilaripalkkiratkaisu. Lapepalkkien dimensio on  $165 \times 570 \text{ mm}^2$ , nämä tukevat rakennuksen keskialueella nivelpilareihin ja seinälinjoilla mastopilareihin. Lapepalkit yhdistetään keskiaukossa toisiinsa kahdella liimapuisille vetotangolla, joiden dimensiot ovat  $42 \times 225 \text{ mm}^2$ . Mastopilareiden dimensio on  $165 \times 315 \text{ mm}^2$  ja keskilinjoiden nivelpilareiden  $165 \times 350 \text{ mm}^2$ . Mastopilarit jäykistävät rakennuksen kehän suunnassa. Liimapuu on lujuusluokkaa GL32. Liitokset toteutetaan kuumasinkityillä naulauslevyillä, paitsi jäykät perustusliitokset, jotka tehdään vinotankoliitoksilla. Rakenteen voimasuureet ja siirtymät ratkaistaan tasokehähjelmalla.

Yläpohjan sekundäärirakenteena ovat jatkuvat sahatavaraorret.

### Rakennelaskelmien lähtötiedot ja kuormat

Leveys (mm)	33 600	$q_{lumi,lyhyt,k}$ (kN / m <sup>2</sup> )	2,2
K-ako (mm)	48 00	$g_{yläpohja,k}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,5
Pituus (mm)	48 000	$q_{k(z),seinä}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,50
Kaltevuus (°)	15	$q_{k(z),katto}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,62

Lasketaan tuulikuorman eri variaatiot ja haetaan niistä tapaukset jotka tuottavat suurimman nosteen sekä suurimman vaakavoiman, ks. kohta 5.3.

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden nostava tuuli tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 0,0 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 2,62 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = - 3,28 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 3,58 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 5,37 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = - 4,77 \text{ kN / m}$	(alue G, räystääs)

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden ”painava tuuli” -tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 3,1 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = 0,48 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = 2,09 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = 0,30 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = -1,49 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = 2,09 \text{ kN / m}$	(alue G, räystääs)

Ratkaistaan rakenne tasokehähöjelmällä. Esitetään mitoittavat voimasuureet kuormitustapauksittain.

Pilareiden ja vetotangon voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavat:

KT	$N_{masto}$ [kN]	$Q_{masto,ylä}$ [kN]	$Q_{masto,ala}$ [kN]	$M_{tuki}$ [kN]	$N_{nível}$ [kN]	$N_{vetotanko}$ [kN]
1	-77,5	0,5	0,5	1,8	-238	123
2	17,8 / 15,3	3,7 / 1,3	3,7 / 12,5	12,7 / 19,5	33,3 / 38,8	2,5
3	-82,9 / -75,7	2,8 / 9,9	17,5 / 7,6	35,5 / 30,6	-249 / -219	105
4	-77,8 / -44,5	0,4	0,4	1,4	-231 / -145	97
5	-83,2 / -46,1	3 / 9,8	17,6 / 7,6	35,9 / 30,3	-243 / -136	81,4

Palkin voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavaa:

KT	$N_{min}$ [kN]	$M_{N,min}$ [kN]	$M_{max}$ [kN]	$N_{M,max}$ [kN]	$Q_{harja}$ [kN]	$N_{harja}$ [kN]
1	-144	-64,6	-207	32,3	-33,4	-119
2	8,5 / 5,5	0	31,5 / 36	24 / 22,6	4,5 / 9,5	25,5 / 24,1
3	-134 / -136	-74,3 / -62,5	-218 / -191	-38 / -40,1	-35 / -27,4	-110 / -112
4	-118 / -110	-69,2 / -32,8	-203 / -123	32,3 / 18,7	-32,5 / -20,2	-92 / -95,4
5	-110 / -105	-78,5 / -33,9	-215 / -117	29,4 / -29,7	-34,2 / -15,5	-85,8 / -91,1

Rakenteen siirtymät käyttörajatilassa eri kuormitustapauksissa KT 6 ja 7 ovat:

KT	$u_{2,nst,palkki}$ (mm)	$u_{2,fin,palkki}$ (mm)	$u_{2,nst,pilari}$ (mm)
6	$23,6 = L_{palkki} / 420$	$43,9 = L_{palkki} / 225$	
7			$16 = H_{pilari} / 220$

Siirtymiä pidetään hyväksyttävänä.

### Rakenteiden mitoitus

Mastopilarin mitoittava kuormitustapaus on KT 5. Määritellään pilarin nurjahduskerroin ja tarkistetaan normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutus.

$H$ (mm)	315	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	-83,2	$\sigma_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	1,6	$f_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,06
$M$ (kNm)	35,9	$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	13,16	$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,2
$L_{c,y}$ (mm)	8 750	$k_{c,y}$	0,37		
Taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus:				$0,74 \leq 1,0$	

Tarkistetaan palkin osalta kuormitustapaukset KT 3 ja KT 5. Määritellään palkin nurjahduskerroin kehän suunnassa lausekkeella 22. Määritetään poikittaissuunnan tuentavälit siten, että kiepahdus tai nurjahdus ei tule mitoittavaksi tekijäksi.

#### KT 3

$H$ (mm)	630	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	-38	$\sigma_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	0,37	$f_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,06
$M$ (kNm)	218	$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	19,98	$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,15
$l_{c,y}$ (mm)	6 400	$k_{c,y}$	0,99		

$l_{c,z}$ (mm)	1 450	$k_{c,z}$	1,00		
$l_{ef}$ (mm)	6 200	$k_{crit}$	1,00		
Taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus:				$0,92 \leq 1,0$	

#### KT 5

$H$ (mm)	630	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	29,4	$\sigma_{t,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	0,29	$f_{t,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	16,61
$M$ (kNm)	215	$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	19,71	$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,15
Taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus:				$0,91 \leq 1,0$	

Keskipilarin mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Määritellään pilarin nurjahduskerroin lausekkeella 22 ja tarkistetaan normaalivoimakestävyys:

$H$ (mm)	350	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	-249	$\sigma_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	4,31	$f_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,06
$l_{c,z}$ (mm)	6 100	$k_{c,z}$	0,215		
Kestävyyden käyttöaste:				$1,00 \leq 1,0$	

Vetotangon mitoittava kuormitustapaus on KT 1. Tarkistetaan vetokestävyys.

$H$ (mm)	225	$B$ (mm)	84		
$N$ (kN)	123	$\sigma_{t,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	6,51	$f_{t,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	19,1
Kestävyyden käyttöaste:				$0,34 \leq 1,0$	

Päässä pultinreiät vähennettävä poikkileikkauksessa.

#### Liitoksien mitoitus

Valitaan mastopilarin kantaliitokseksi APL24T + APL16T-2 [15]. Kuvassa B2 esitetään käytetty kantaliitosa. Pilarin pään ja betonin väliin asennetaan teräslevyt joiden koko on 60 x 170 mm<sup>2</sup>. Kuormitustapaus KT 2 tuottaa suurimman vedon ja kuormitustapaus KT 5 suurimman momentin, puristuksen ja leikkausvoiman.

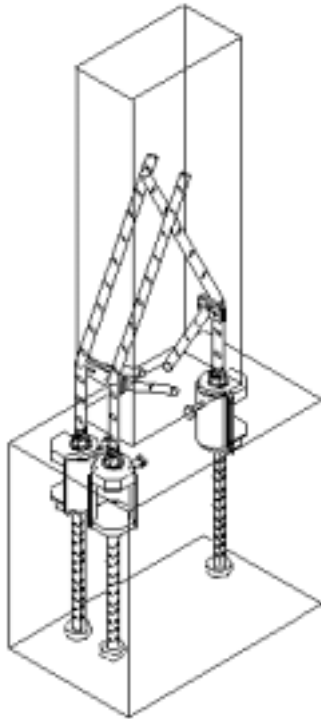


Mitoittavat voimasuureet ovat:

$N_{max}$ (kN)	17,8		
$M_{max}$ (kNm)	35,9		
$N_{min}$ (kN)	-83,2	$F_{dp}$ (kN)	161
$Q$ (kN)	17,6		

Kestävyydet:

$F_{uv}$ (kN)	142	$\geq N_{max}$
$M_{u1}$ (kNm)	42,6	$\geq M_{max}$
$V_{uv}$ (kN)	3,0	$< Q$



Kuva B2. Mastopilarin kantaliitos APL24T + APL16T-2.

Kantaliitoksen leikkauskestävyys ylittyy. Liimataan pilarin pätyyn erillinen vaartatappina toimiva harjaterästanko joka ulottuu jälkivaluun. Valitaan 2 kpl vaarnatappia, halkaisija  $\varnothing 20$  mm ja liimauspituus puussa  $L = 200$  mm. Vaarnatappien leikkauskestävyys on  $V_{u2} = 2 \times 9 \text{ kN} = 18 \text{ kN} > Q = 17,6 \text{ kN}$ .

Mikäli pilari asennetaan vain pulttien varaan asennusaikana, niin asennusaikainen kestävyys on tarkistettava.

Mastopilarin yläpään liitos palkkiin tehdään BMF-naulauslevyillä. Puristava normaali-voima siirretään kontaktilla ottaen huomioon palkin poikittaisen puristuksen kestävyys. Mitoittava kuormitustapaus on KT 5. Naulauslevyn kautta siirretään leikkausvoima sekä vetävä normaalivoima. Liitoksen kestävyys tarkistetaan kuormitustapauksien KT 2 ja KT 3 suhteen.

$H$ (mm)	315	$B$ (mm)	165	$A$ (mm <sup>2</sup> )	51 975
$N$ (kN)	-83,2	$f_{c,0,g,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,07	$f_{c,90,g,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	4,15
$\alpha$ (°)	15	$\sigma_{c,15,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	1,6	$f_{c,15,g,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	15,96
Kestävyyden käyttöaste kontaktivoimalle:				0,10 ≤ 1,0	

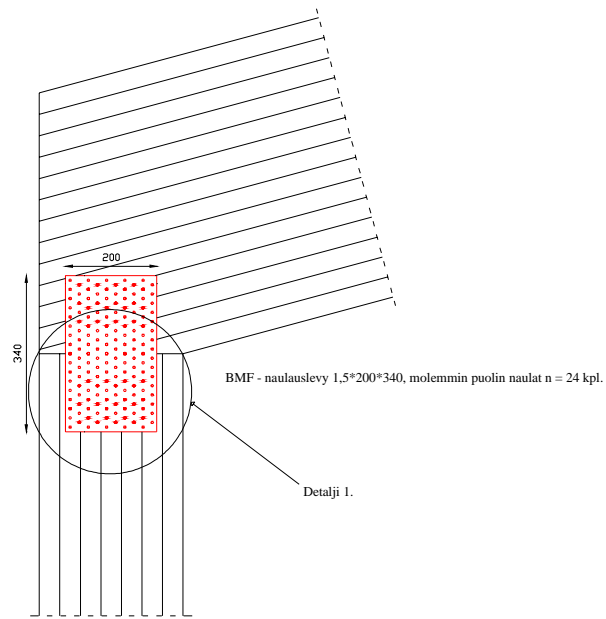
	KT 2	KT 3
$N$ (kN)	17,8	-75,7
$Q$ (kN)	3,7	9,9

Liitoksen kestävyys:

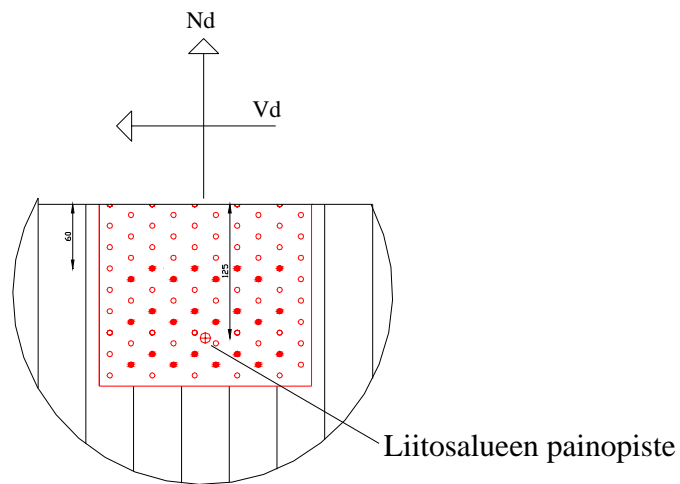
$f_{h,1,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	16,5
$d$ (mm)	4
$t_l$ (mm)	38
$M_{y,d}$ (Nmm)	6 015
$R_d$ (N / naula)	980

Valitaan alustavasti nauvoja 24 kpl, muodostetaan liitinryhmä ja lasketaan lopullinen liitosryhmän käyttöaste. Liittimien sijoitus esitetään kuvassa 5. Naulauslevyn rei'itys on molempiin suuntiin 20 mm:n jaolla. Päätetytäisyys on 60 mm, joka vastaa kuormittamattoman päädyn minimietäisyyttä.

Sellaisessa kuormitustapauksessa, jossa palkki on vedetty (KT 2), liittimiä, jotka ovat lähempänä kuin 80 mm:n etäisyydellä palkin päädyistä, ei huomioida laskennassa.



Kuva B3. Reunapilarin yläpään liitos.



Kuva B4. Detalji 1 kuvasta 2.

Määritetään liitinryhmän geometria ja lasketaan sen polaarinen jäyhyys.

	KT 2	KT 3
$n$ (kpl)	16	24
$I_P$ (mm <sup>3</sup> )	40 400	89 000
$e_y$ (mm)	25	45
$e_x$ (mm)	90	90

Lasketaan liitinryhmän painopisteen voimasuureet ja ja rasiitetuimman liittimen voimasuureet eri kuormitustapauksissa. Painopisteen etäisyys liittosaumasta KT 2 on 125 mm ja liittosaumasta KT 3 105 mm.

	KT 2	KT 3
$V_{d,pp}$ (kN)	1,85	4,95
$N_{d,pp}$ (kN)	8,9	0
$M_{d,pp}$ (kNm)	0,232	0,520
$q_x$ (N)	631	732
$q_x$ (N)	700	263
$F_d$ (N)	942	778

Mitoittava kuormitustapaus on KT 2, jossa rasiitetuimman liittimen käyttöaste on 96 %.

Nivelpilareiden (keskipilareiden) alapäiden liittokset tehdään pultti-teräslevyliitoksin. Teräslevyt ankkuroidaan pilarivaluun ja kiinnitetään pilariin sen läpi menevällä pultilla. Teräslevyt ja pultti ovat kuumasinkittyjä. Teräslevyn (10 x 50 x 300) lujuus on S235 (Fe360) ja pultti M 16 mm 8.8. Pilarin ja betonin väliin asennetaan 10 mm:n neopreenikumi.

Mitoitetaan pulttiliitos. Mitoittava kuormitustapaus on KT 2. Lasketaan kaksileikkeisen teräs-puu-teräslitoksen kestävyys  $R_d$  lausekkeella (3).

$$N \text{ (kN)} \quad 38,8 \quad R_d \text{ (kN)} \quad 39,2 \quad R_d > N$$

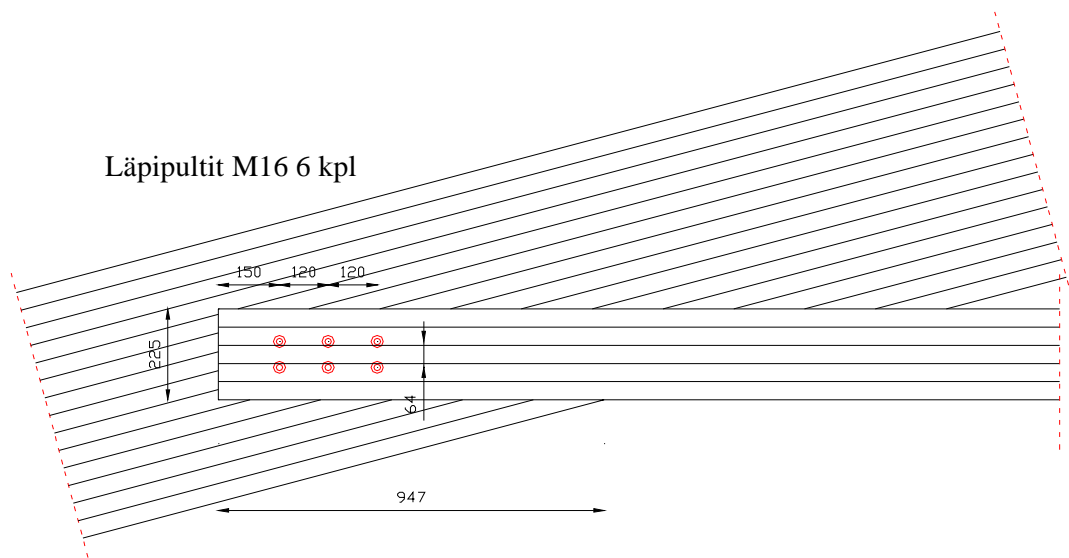
Vetotangot kiinnitetään lapepalkkeihin läpipulttauksella. Mitoittava kuormitustapaus on KT 1. Valitaan pultiksi M16 8.8, pituus  $l = 300$  mm ja aluslevy  $d = 30$  mm. Lasketaan pulttiliitoksen kestävyys  $R_d$  lausekkeella (4).

$$N \text{ (kN)} \quad 123 \quad R_d \text{ (kN)} \quad 22,86$$

$$n_{vaadittava} \quad 5,4 \quad \text{kpl} \quad \text{Valitaan 6 kpl.}$$

Vetotangon kiinnitys aiheuttaa poikittaista vetoa palkkiin. Tarkistetaan poikittaisen vedon kestävyys lausekkeella (5):

$f_{v,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,42		
$b_e$ (mm)	345		
$t$ (mm)	165		
Kestävyys (kN)	91,8	> $V_d$ (kN)	31,84



Kuva B5. Vetotangon liitos lapepalkkiin.

Nivelpilarin yläpään liitos palkkiin tehdään BMF-naulauslevyillä ja liimapuisella apupalalla, joka kiinnitetään ruuvaamalla lapepalkin alapintaan. Puristava normaalivoima siirretään kontaktilla ottaen huomioon palkin poikittaisen puristuksen kestävyys. Sauman suuntainen komponentti siirretään kontaktilla pilarilta apupalalle, josta voima siirretään ruuveilla lapepalkille. Valitaan ruuviksi kansiruuvi  $\varnothing 12$  4.6 l = 200. Reiät esiporataan. Mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Naulauslevy mitoitetaan vetävälle normaalivoimalle. Liitoksen kestävyys tarkistetaan kuormitustapauksen KT 2 suhteen.

$L_{sauma}$ (mm)	362	$B$ (mm)	165	$A$ (mm <sup>2</sup> )	59 730
$N_{sauma}$ (kN)	-241	$f_{c,90,g,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	4,15	$\sigma_{c,90,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	4,04
$\alpha$ (°)	15				
Kestävyyden käyttöaste:					0,97 ≤ 1,0

$H_{apupala}$ (mm)	135	$B_{apupala}$ (mm)	165	$A$ (mm <sup>2</sup> )	22 275
$Q_{sauma}$ (kN)	64,5	$f_{c,90,g,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	4,15	$\sigma_{c,90,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,90
Kestävyyden käyttöaste:			0,70 ≤ 1,0		

Apupalaliitoksen kestävyys:

$f_{h,1,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,0	$f_{h,2,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,0		
$d$ (mm)	12				
$t_1$ (mm)	135	$t_2$ (mm)	65		
$M_{y,d}$ (Nmm)	83 782	$\beta$	1,0		
$R_d$ (kN / ruuvi)	6,6	$Q_{sauma}$ (kN)	64,5	$n_{vaadittava}$ (kpl)	10

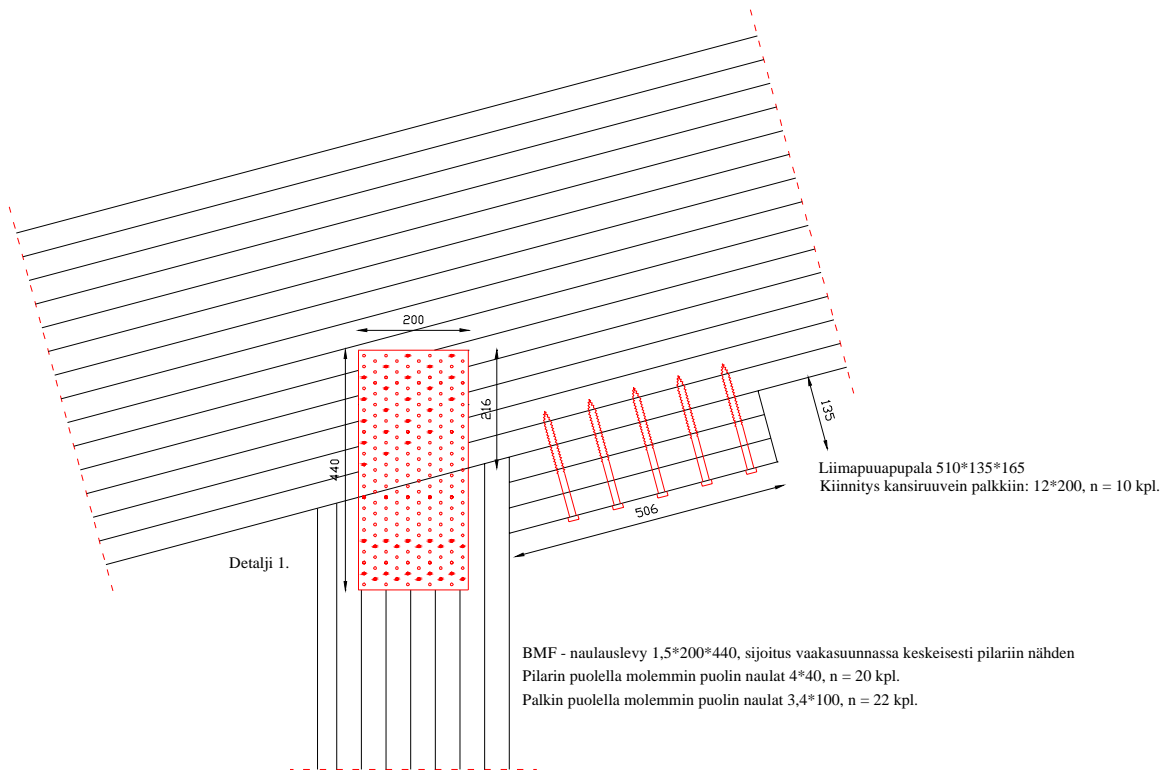
Apupala kiinnitetään lapepalkkiin 10 kpl kansiruuvilla. Pilarin puolella naulauslevy kiinnitetään BMF-nauloilla 4 x 40 ja palkin puolella nauloilla 3,4 x 100. Tarkistetaan lapepalkin poikittaisen vedon kestävyys.

BMF-naulan kestävyys

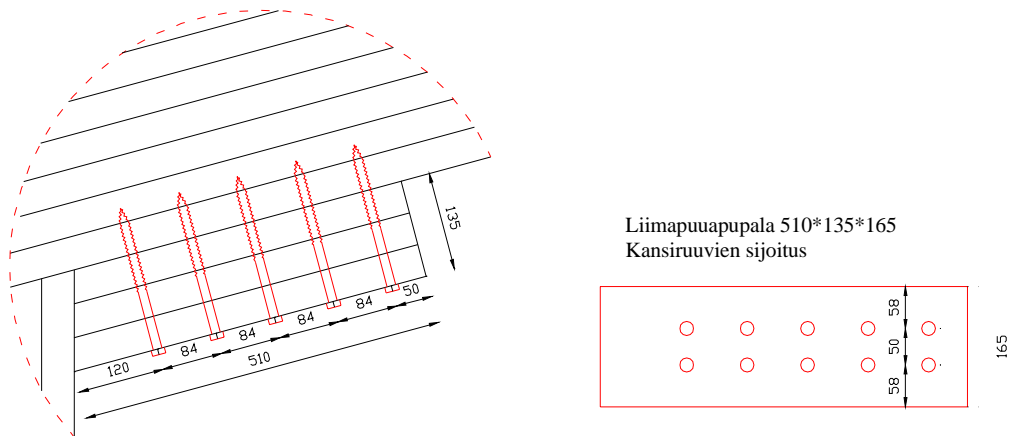
$N$ (kN)	38,8		
$N_d$ (kN)	19,4		
$R_d$ (N / naula)	980	$n_{vaadittava}$ (kpl)	20

Naulan kestävyys:

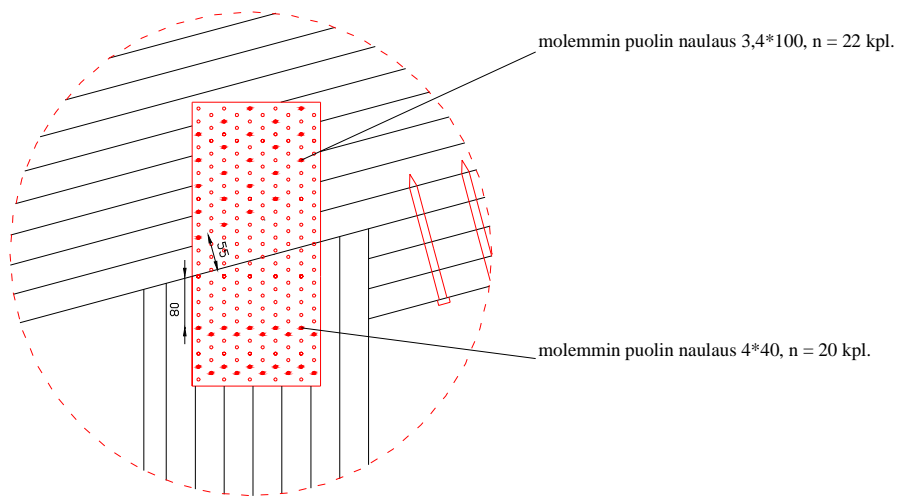
$f_{h,1,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	17,3		
$d$ (mm)	3,4		
$t_1$ (mm)	98		
$M_{y,d}$ (Nmm)	5 913		
$R_d$ (N / naula)	918	$n_{vaadittava}$ (kpl)	22



*Kuva B6. Nivelpilarin yläpään liitos.*



*Kuva B7. Liimapuupalan kiinnitys.*

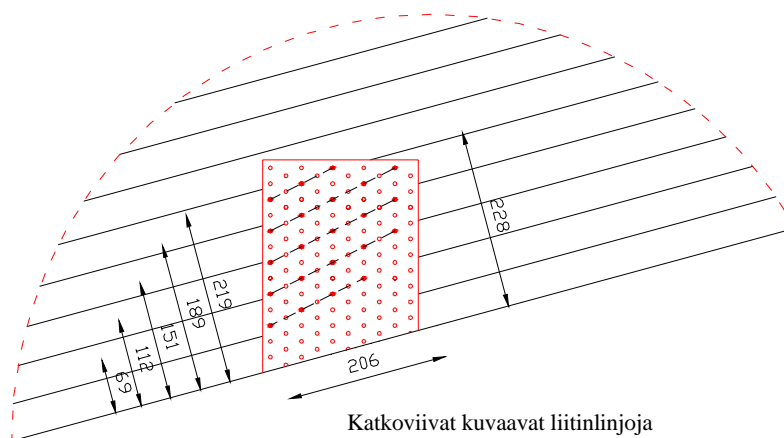


Kuva B8. Levyn naulaus.

Palkin poikittaisen vedon kestävyys:

$f_{t,90,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	0,31		
$b_e$ (mm)	228	$t_{ef}$ (mm)	165
$h$ (mm)	630	$l_r$ (mm)	206
$h_{i, i = 1...5}$ (mm)	411, 441, 479, 518, 561		
$F_{90,d}$ (kN)	46	$> N_{90}$ (kN)	37,5

Mitat  $h_i$  ovat liitinlinjojen keskimääräisiä etäisyyksiä palkin yläpinnasta. Liitinalueen leveys  $l_r$  on kauimmaisten liittimien välisen etäisyyden kohtisuora projektiio liitossaumalle.



Katkoviivat kuvaavat liitinlinjoja

Kuva B9. Poikittaisen vedon mitat.



Harjaliitos tehdään BMF-naulauslevyin. Valitaan naulaksi  $d = 4$  mm ja  $l = 40$  mm. Tarkistetaan kuormitustapaukset KT 1, KT 2, KT 3 ja KT 5. Lasketaan naulaliitoksen kestävyys kaavoilla (1)–(3). Siirretään liitoksen puristavasta vaakavoimasta  $2/3$  kontaktilla sauman yli. Lasketaan palkin normaali- ja leikkausvoimista liitosvoimat kaavoilla (6) ja (7).

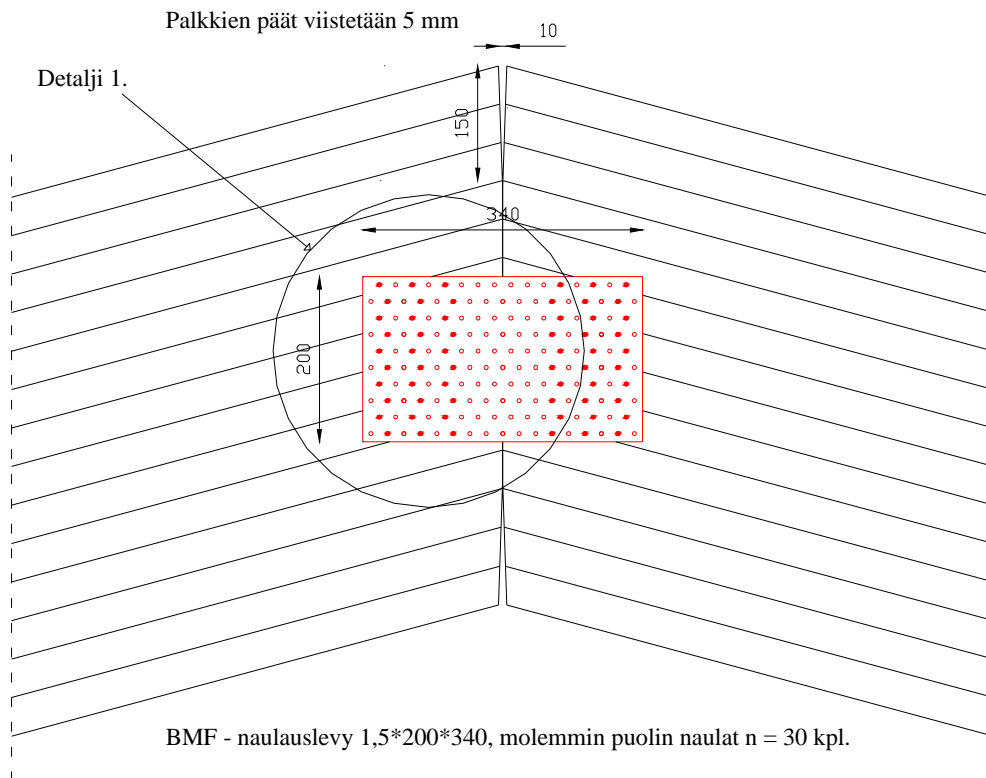
Voimasuureet:

	KT 1	KT 2	KT 3	KT 5
$Q_{harja}$ (kN)	-33,4	4,5	-35,0	-34,2
$N_{harja}$ (kN)	-119	25,5	-110	-85,8
$V_d$ (kN)	1,5	2,3	5,4	10,8
$N_d$ (kN)	-41,4	25,8	-38,7	-30,6

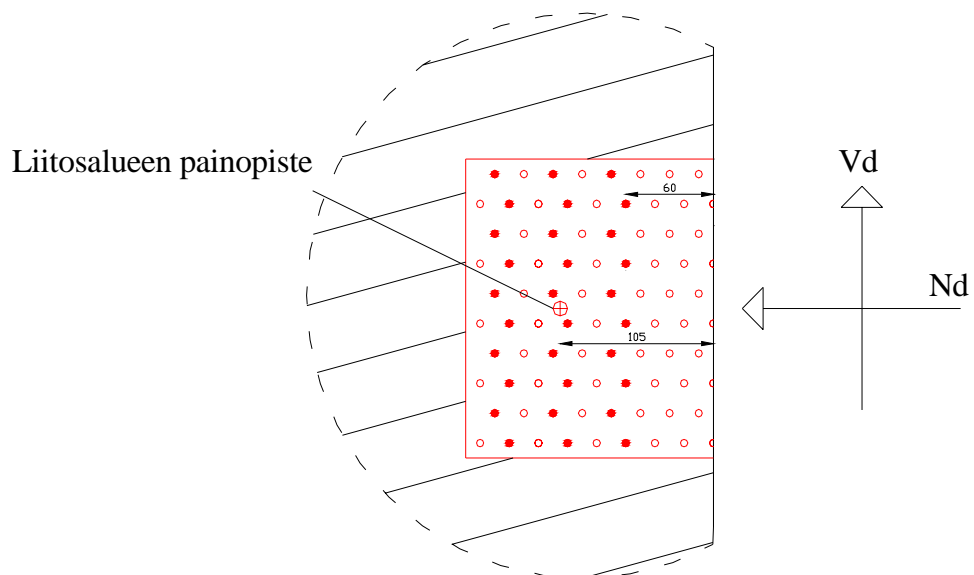
Liitoksen kestävyys:

$f_{h,l,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	16,5			
$d$ (mm)	4			
$t_l$ (mm)	38			
$M_{y,d}$ (Nmm)	6015			
$R_d$ (N / naula)	980	$n_{alustav}$	30	kpl

Valitaan alustavasti liittimiä 30 kpl, muodostetaan liitinryhmä ja lasketaan lopullinen liitosryhmän käyttöaste. Liittimien sijoitus esitetään kuvassa 10. Naulauslevyn rei'itys on molempiin suuntiin 20 mm:n jaolla. Päätyetäisyys on 60 mm, joka vastaa kuormittamattoman päädyn minimietäisyyttä. Kuormitustapauksessa, missä palkki on vedetty (KT 2), liittimiä, jotka ovat lähempänä kuin 80 mm:n etäisyydellä palkin päädyistä, ei huomioida laskennassa.



*Kuva B10. Harjaliitos.*



*Kuva B11. Detalji 1 kuvasta B10.*

Määritetään liitinryhmän geometria ja lasketaan sen polaarinen jäyhyys.

	KT 1,3 ja 5	KT 2
$n$ (kpl)	30	20
$I_P$ (mm <sup>3</sup> )	131 750	74 500
$e_y$ (mm)	90	90
$e_x$ (mm)	45	25

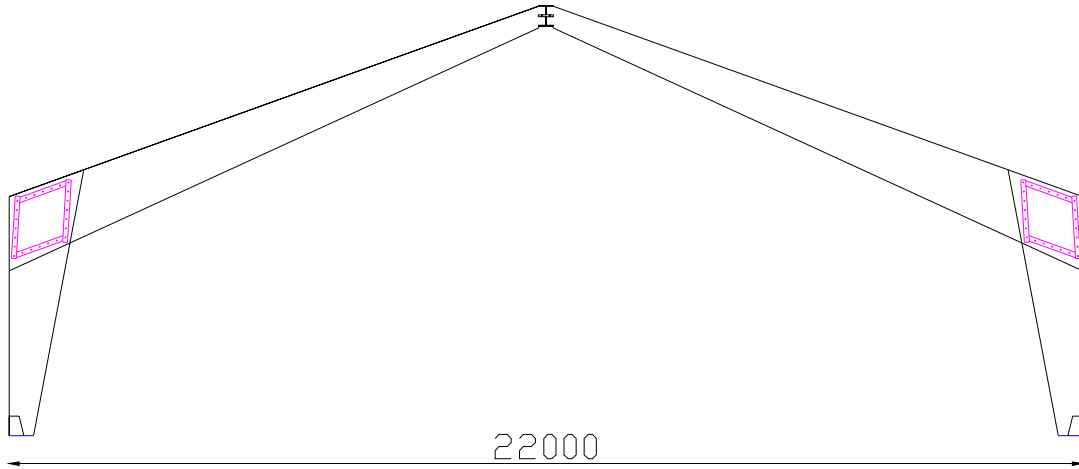
Lasketaan liitinryhmän painopisteen voimasuuret ja ja rasitetuimman liittimen voimasuuret eri kuormitustapauksissa. Painopisteen etäisyys liitossaumasta KT 2 on 125 mm ja muissa 105 mm.

	KT 1	KT 2	KT 3	KT 5
$V_{d,pp}$ (kN)	0,75	1,15	2,7	5,4
$N_{d,pp}$ (kN)	20,7	12,9	19,4	15,3
$M_{d,pp}$ (kNm)	0,079	0,144	0,284	0,567
$q_x$ (N)	744	819	841	898
$q_x$ (N)	52	106	187	374
$F_d$ (N)	746	826	861	972

Mitoittava kuormitustapaus on KT 5, jossa rasitetuimman liittimen käyttöaste on 99 %. Tarkistetaan levyn puristuskestävyys. Lisätään liitoksen molemmin puolin yksi naularivi (5 kpl) 30 mm:n etäisyydelle päädystä estämään levyn nurjahtamista. Levyn nurjahduspituus  $l = 30 \times 2 = 60$  mm ja tehollinen ala  $A_{ef} = (200 - 10 \times 5) \times 2 = 300$  mm<sup>2</sup>. Suurin puristusjännitys on KT 1:n mukaan:  $\sigma_c = 69$  N / mm<sup>2</sup>. Lasketaan nurjahduskestävyys Eurocode 5:n mukaan:

$f_y$ (N / mm <sup>2</sup> )	250	
$\lambda_k$	1,14	
$\beta$	1,06	
$f_{ck}$ (N / mm <sup>2</sup> )	116	
$f_{cd}$ (N / mm <sup>2</sup> )	105	> $\sigma_c = 69$ (N / mm <sup>2</sup> )

## Liite C: Kolminivelkehän mitoitus esimerkki



Kuva C1. Kolminivelkehän mitoitus esimerkki.

### Rakenteen kuvaus

Pääkannatin on kuvan C1 mukainen yhdistetty kertopuinen kolminivelkehä. Kehäpalkin ja kehäpilarin nurkkaliitos tehdään pulttiliitoksena. Mitoitetaan nurkkaliitos naulalevyvahvisteisena. Kehäpalkkien dimensio on  $1\,375\text{--}500 \times 75 \text{ mm}^2$  ja kehäpilarin  $1\,375\text{--}430 \times 63 \times 2 \text{ mm}^2$ . Pilari on laatua Kerto-Q ja palkki Kerto-S. Rakenteen voimasuuret ja siirtymät ratkaistaan tasokehäohjelmalla.

Kolminivelkehä jäykistää rakennuksen kehän suunnassa. Yläpohjan sekundäärirakenteena ovat jatkuvat sahatavaraorret.

### Rakennelaskelmien lähtötiedot

Leveys (mm)	22 000	$q_{\text{lumi, lyhyt, k}}$ (kN / m <sup>2</sup> )	2,2
K-jako (mm)	4 800	$g_{\text{yläpohja, k}}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,5
Pituus (mm)	48 000	$q_{k(z), \text{seinä}}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,51
Kaltevuus (°)	18,43	$q_{k(z), \text{katto}}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,61

Kuormitustapaukset ja osavarmuuskertoimet on esitetty kohdan 5.3 taulukossa 9. Lasketaan tuulikuorman eri variaatiot ja haetaan niistä tapaukset, jotka tuottavat suurimman nosteen sekä suurimman vaakavoiman.

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden nostava tuuli tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 0,0 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 3,2 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = - 3,19 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 3,59 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 4,88 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = - 4,49 \text{ kN / m}$	(alue G, räystä)

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden ” painava tuuli ” -tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 3,78 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = 0,58 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = 2,29 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = 0,30 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = -1,0 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = 2,59 \text{ kN / m}$	(alue G, räystä)

Ratkaistaan rakenne tasokehähöjelmalla. Esitetään mitoittavat voimasuureet kuormitustapauksittain:

Nurkan voimasuureet murtorajatilassa palkin ja pilarin kannalta kuormitustapauksittain ovat seuraavat:

KT	$N_{pilari}$ [kN]	$Q_{pilari}$ [kN]	$N_{palkki}$ [kN]	$Q_{palkki}$ [kN]	$M_{nurkka}$ [kN]
1	-225	-114	201	132	447
2	36,5 / 32,2	14 / 12,7	30 / 26,9	-22 / -20	55 / 19
3	-227 / -223	-108 / -120	-198 / -206	136 / 129	389 / 466
4	-200 / -156	-87 / -93	-166 / -152	123 / 86,3	342 / 364
5	-205 / -161	-83,5 / -101	-166 / -162	128 / 87	295 / 392

Tukireaktiot ja harjan voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavaa:

KT	$R_x$ [kN]	$R_y$ [kN]	$N_{harja}$ [kN]	$Q_{harja}$ [kN]
1	141	209	-132	-50,2
2	-18,5 / -0,7	-35,4 / -30,4	38,6 / 35,4	10 / 18,3
3	118 / 144	212 / 206	-135 / -143	-64 / -41,3
4	112	187 / 143	-96,3 / 112	-60 / -19,5
5	91,5 / 118	193 / 147	-102 / -125	-72,5 / -13,8

### Rakenteiden mitoitus

Mitoitus aloitetaan nurkkaliitoksesta. Valitaan liittimeksi pultti M20 8.8 ja vahvistusnaulalevyksi M18H-erikoisnaulalevy, jossa keskialue on meistämätön. Levyn nimellinen ainevahvuus  $t = 1,3$  mm ja laatu Z36. Pulttien lukumäärä on 24 kpl ja naulalevyvahvistukset tulevat kaikille puupinnoille eli yhteensä kuudelle pinnalle. Nurkkaliitoksen kannalta mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Lasketaan pilarin voimasuureista nurkkapisteeseen vaikuttavat vaaka- ja pystyvoima.

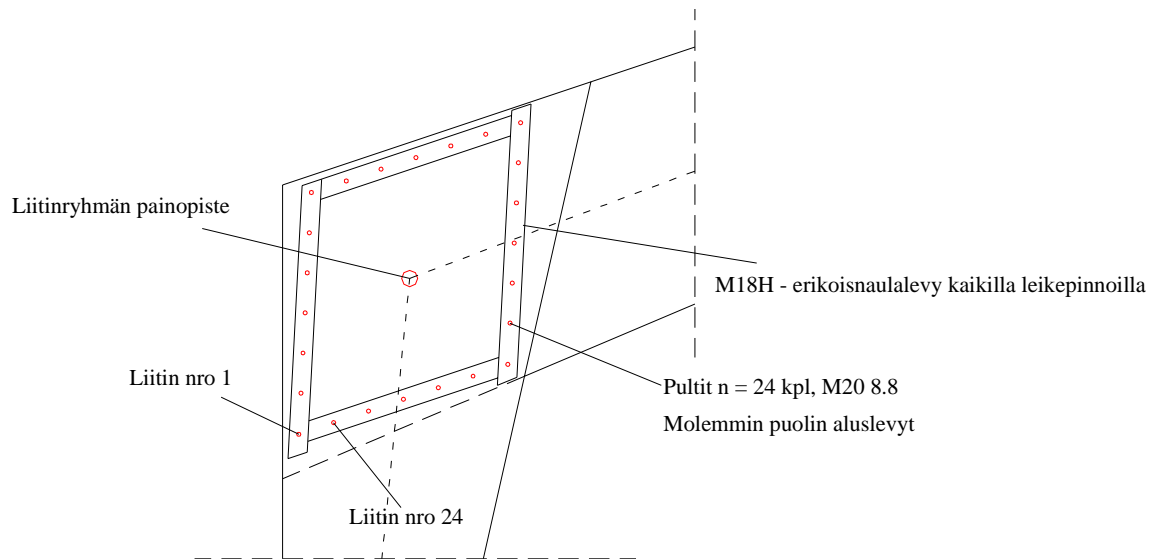
Painopisteessä vaikuttaviksi voimasuureiksi saadaan:

$$V = 185 \text{ kN}$$

$$H = 174 \text{ kN}$$

$$M = 466 \text{ kNm}$$

Mallinnetaan nurkkaliitos. Liittimet sijoitetaan siten että syntyvän liitinryhmän painopiste yhtyy staattisen mallin pisteeseen, jossa palkki- ja pilariosa yhtyvät. Kuvassa C2 esitetään valittu liitinryhmä.



*Kuva C2. Mitoitettavan kolminivelkehän nurkka-alue.*

Liitin numero 1 on vasemman alanurkan liitin ja numerointi alkaa tästä myötapäivään. Liittimien koordinaatit painopisteestä ovat seuraavaa:

Liitin	x (mm)	y (mm)	Liitin	x (mm)	y (mm)
1	-542,80	-760,70	13	542,80	760,70
2	-532,30	-559,60	14	532,30	559,60
3	-522,00	-363,80	15	522,00	363,80
4	-511,70	-168,10	16	511,70	168,10
5	-501,50	27,60	17	501,50	-27,60
6	-491,20	223,40	18	491,20	-223,40
7	-480,90	419,40	19	480,90	-419,40
8	-310,30	476,30	20	310,30	-476,30
9	-139,70	533,20	21	139,70	-533,20
10	30,90	590,00	22	-30,90	-590,00
11	201,50	646,90	23	-201,50	-646,90
12	372,10	703,80	24	-372,10	-703,80

Lasketaan eri liittimille tulevat voimat. Mitoittava liitin on numero 12.

Liitoksen kestävyys:

$\alpha_1$ (°)	60,2	$\alpha_2$ (°)	9,9	$d$ (mm)	16
$t_1$ (mm)	63	$t_2$ (mm)	75	$t_{levy}$ (mm)	1,2
$f_{h,1,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	39,19	$f_{h,2,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	42,02	$\beta$	1,07
$M_{y,d}$ (Nmm)	436 900				
$R_d$ (N / leike)	21 000	$F_d$ (N / leike)	20 700		
Käyttöaste (%)	98,5				

Liitin	$F_d$ (N)	$\alpha$ (°)	Liitin	$F_d$ (N)	$\alpha$ (°)
1	10 150	35,46	13	20 692	35,53
2	10 227	47,66	14	20 656	41,36
3	10 600	64,69	15	20 473	49,92
4	11 594	87,39	16	19 939	62,44
5	13 355	-67,40	17	18 820	79,00
6	15 302	-45,79	18	17 275	-83,44
7	16 767	-30,67	19	15 813	-68,29
8	18 018	-17,27	20	14 370	-53,06
9	19 221	-2,50	21	12 716	-33,26
10	20 063	11,14	22	11 342	-11,49
11	20492	21,93	23	10 547	8,28
12	20 656	29,84	24	10 223	23,89

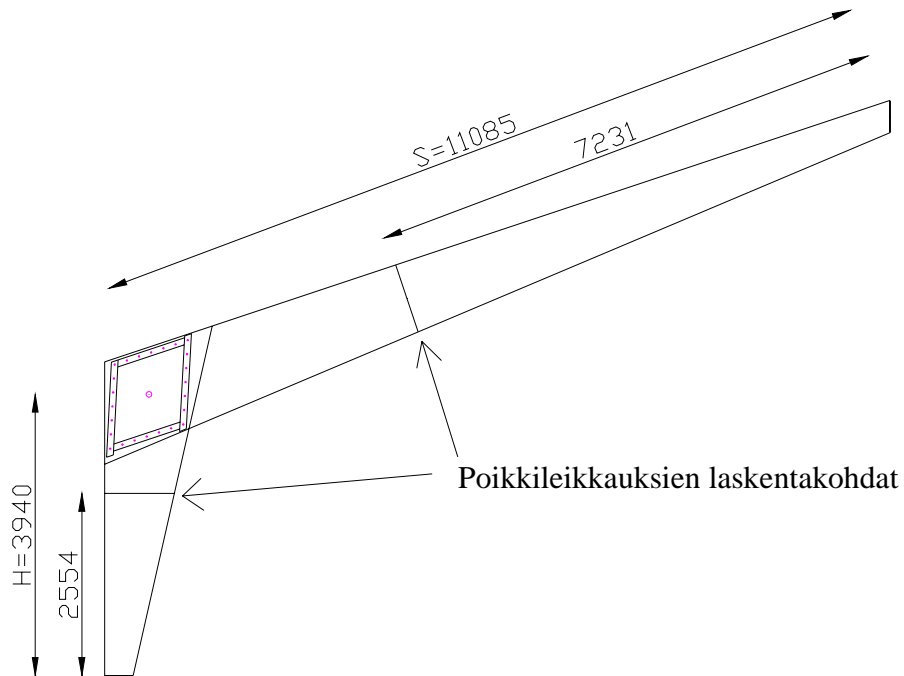
### Puuosien kestävyys

Tarkistetaan puuosien kestävyudet. Määritellään nurkkaliitoksen kiertymäjäykkyys  $K_r$ , jonka avulla saadaan kehäjalan ja kehäpilarin tason nurjahduspituudet laskettua.

$K_{ser}$ (N / mm )	17 053	$K_u$ (N / mm )	11 368
$I_p$ (mm <sup>4</sup> )	10 378 268	$K_r$ (Nmm )	2,36e11
$H$ (mm)	3 940	$S$ (mm)	11 085
$H_{pilari, x = 0,65H}$ (mm)	980	$H_{palkki, x = 0,65S}$	990



$I_{pilari}$ (mm <sup>4</sup> )	10,034e9	$I_{palkki}$ (mm <sup>4</sup> )	5,972e9
$N_{pilari}$ (kN)	-220	$N_{palkki}$ (kN)	-205
$L_{C,pilari}$ (mm)	14 180	$L_{C,palkki}$ (mm)	17 660
$K_{c,y,pilari}$	0,92	$K_{c,y,palkki}$	0,97

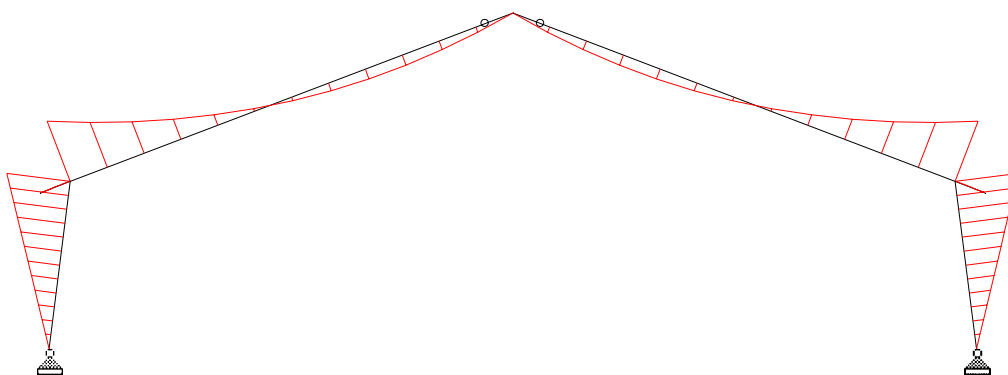


Kuva C3. Poikkileikkaussuureiden laskentakohdat.

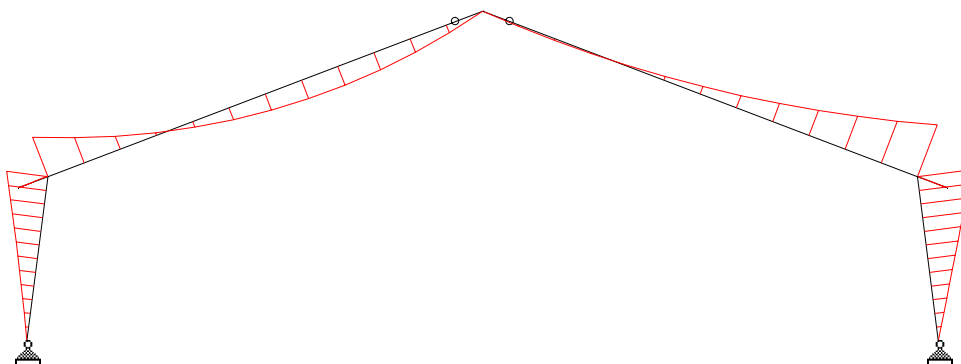
Määritellään kehän osien vaatima poikittaistuentatarve. Kuvissa C4–C6 on kuormitustapauksien KT 1, KT 2 ja KT 4 momenttipinnat. Katto- ja seinäsekundäärit tukevat kehärakenteen ulkopintoja eli alueet, joissa momentti aiheuttaa rakenteen ulkopintaan puristusta, ovat kiepahduksen kannalta hoidossa. Kiepahduksen kannalta ongelman muodostavat alueet, joissa momentti aiheuttaa puristusta rakenteen alapintaan. Vaadittava poikittainen stabiliteetti saavutetaan seuraavasti: kehäpilari kootaan koteloksi ja kehäpalkkia tuetaan poikittaistuennoilla. Valitaan kumpaankin kehän puolikkaaseen kaksi poikittaistuenta, joista toinen sijoitetaan nurkka-alueelle ja toinen kenttään. Tuet sijoitetaan ja kiinnitetään kuvan C3 mukaan. Kiepahdustarkastelu tehdään seuraavien oletusten mukaan:

- Kehäpalkki tutkitaan kahdessa osassa: osa 1 on nurkkapisteestä kentässä sijaitsevaan tukeen asti ja osa 2 on kenttätuesta lakipisteeseen.

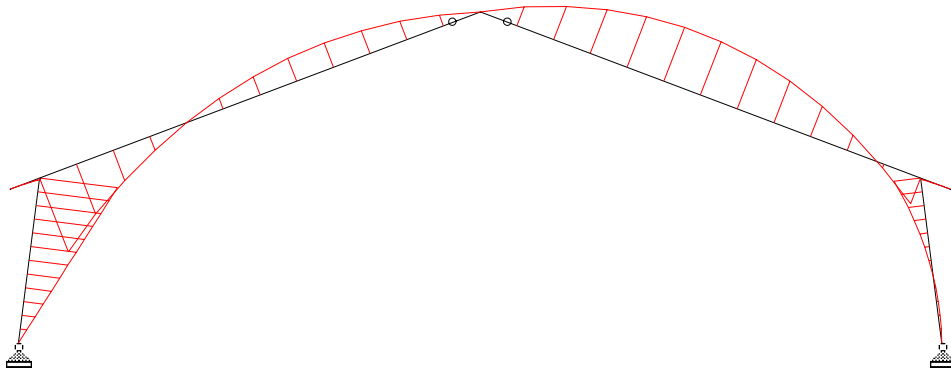
- Osalla 1 muuttujan  $m_{rel,m}$  arvo lasketaan lausekkeesta:  $m_{rel,m} = 1,15 \times (1 / (1,75 - 1,05\gamma + 0,3\gamma^2))$ , jossa termi  $\gamma$  on nurkkapisteessä ja tukipisteessä vaikuttavien momenttien suhde.
- Osalla 2 muuttujan  $m_{rel,m}$  arvo on 0,66.
- Nurkka-alueella, laskettaessa tehollisten poikkileikkauksien kestävyyttä, taivutuslujuutta ei pienennetä  $k_{krit}$ -kertoimella, ts. nurkka-alue ei kiepahda.
- Tuet mitoitetaan voimalle  $F_d = N_d / 80$ , jossa  $N_d = (1 - k_{krit})M_d / h$ .



Kuva C4. Kuormitustapaus KT 1 momenttipinta.



Kuva C5. Kuormitustapaus KT 4 momenttipinta.



Kuva C6. Kuormitustapaus KT 2 momenttipinta.

Tarkistetaan palkin taivutuskestävyys kuormitustapauksessa KT 3 välillä nurkkapiste – kentän kiepahdustuki. Mitoittava kohta on heti nurkka-alueen jälkeen, 820 mm:n etäisyydellä nurkkapisteestä.

Tarkastelualue nurkasta kentän kiepahdustukeen:

$l_{ef}$ (mm)	2 400		
$M_{nurkka}$ (kNm)	470	$M_{x=3,0\text{ m}}$ (kNm)	150
$\gamma$	0,319	$m_{rel,m}$	0,796
$h_{palkki, x=0,82}$ (m)	1 310	$k_{crit}$	0,678
$M_{x=0,82\text{ m}}$ (kNm)	370	$N_{x=0,82\text{ m}}$ (kN)	201
$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	17,2	$\sigma_{c,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,0
$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	18,7	$f_{c,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,6
Käyttöaste (%) :	92		8
Yhteisvaikutus (%):	100		

Tarkistetaan palkin taivutuskestävyys kuormitustapauksessa KT 3 välillä kentän kiepahdustuki–harjanivel. Mitoittava kohta on kentän kiepahdustuen kohdalla eli 3 000 mm:n etäisyydellä nurkkapisteestä.

Tarkastelualue kentän kiepahdustuelta harjalle:

$l_{ef}$ (mm)	8 000	$m_{rel,m}$	0,66
$h_{palkki, x=3,0}$ (m)	1 130	$k_{crit}$	0,36
$M_{x=3,0\text{ m}}$ (kNm)	150	$N_{x=3,0\text{ m}}$ (kN)	182
$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	9,4	$\sigma_{c,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,1

$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	10,2	$f_{c,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,6
Käyttöaste (%) :	92		8
Yhteisvaikutus (%):	100		

Muut kuormitustapaukset eivät tule mitoittavaksi. Esimerkiksi kuormitustapaus KT 2 palkin alapinta on pääosin puristettu (ks. kuva C6) mutta momentin suuruus on merkittävästi pienempi kuin kuormitustapaus KT 3 ja tuentavälillä  $l_{ef} = 8\ 000$  se ei tule mitoittavaksi.

Tarkastellaan kehäpilarin kiepahtamista. Pilari kootaan koteloksi, jolloin kokonaispaksuus  $B = 63 + 63 + 80 = 206$  mm. Kotelon laipat ovat Kerto-S ja paksuus 80 mm. Kehäpalkin ja kotelon laipan paksuusero, 5 mm, aiheutuu naulalevyistä. Kotelon kokoaminen tehdään ruuvipuristusliimaamalla. Kotelopoikkileikkauksen paksuus on niin suuri, että kiepahtaminen ei tule mitoittavaksi.

Tarkastellaan kehän osien tasosta pois päin tapahtuvaa nurjahtamista. Kehän ulkoreunat tukeutuvat seinä- ja kattosekundääreihin. Oletetaan, että nämä ulkoreunoilla olevat sekundäärit estävät poikittaisen nurjahduksen myös niillä alueilla, joilla poikkileikkaus on kokonaan puristettu. Nurkka-alueella kiepahdustuet myös estävät poikittaisen nurjahduksen. Määritellään sekundäärijako, jolla nurjahdus pois tasosta päin ei tule mitoittavaksi, ts.  $k_{c,z} = k_{c,y}$ . Käytetään laskennassa pilarin osalta leveytenä  $B = 206$  mm.

$k_{c,y,pilari}$	0,92	$k_{c,y,palkki}$	0,97
$k_{c,y,pilari}$	0,92	$k_{c,y,palkki}$	0,97
$l_{C,pilari}$ (mm)	2 600	$l_{C,palkki}$ (mm)	800

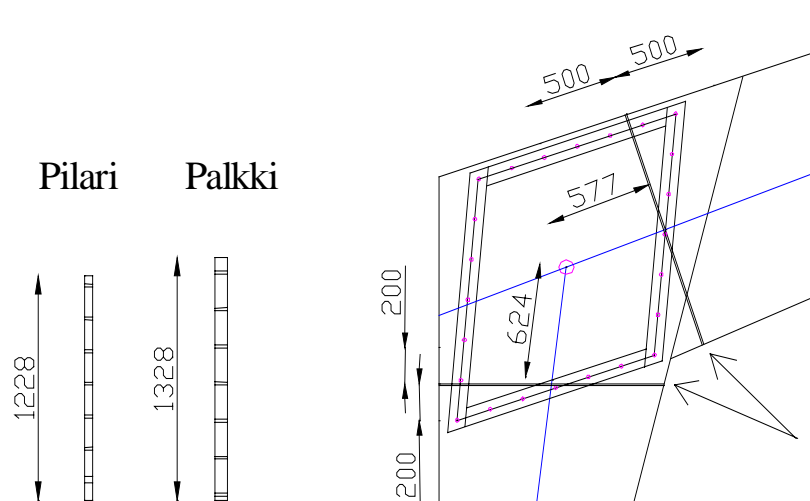
Saadut nurjahduspituudet ovat siis sekundäärirakenteiden maksimi k-jakoja.

Iteroidaan nurkka-alueen mitoittavat kohdat. Huomioidaan poikkileikkauksissa pulttireikien ja naulalevyjen aiheuttamat vähennykset. Naulalevyn aiheuttama paksuuden pienentyminen on riippuvainen naulalevytyypistä ja voima-syykulmasta. Käytettäessä M18H-erikoisnaulalevyä ja voimasyykulman ollessa suurempi kuin 10° reduktiopaksuus  $B_{red} = 3$  mm. Koska naulalevyt ovat kaikilla leikepinnoilla, on puun tehollinen paksuus  $B_{ef} = B - 2B_{red}$ .

Vedetystä ja/tai taivutetusta Kerto-S-poikkileikkauksesta vähennetään kaikkien alle 500 mm:n päässä tarkastelutasosta sijaitsevien pulttireikien syitä vastaan kohtisuorassa

suunnassa olevat projektioalueet. Kerto-Q poikkileikkauksessa vastaava etäisyys on 200 mm. Mitoittava kohta ja sen teholliset poikkileikkaussuureet ovat (kuva C7):

$x_{pilari}$ (mm)	624	$x_{palkki}$ (mm)	577
$h_{x,pilari}$ (mm)	1 228	$h_{x,palkki}$ (mm)	1 328
$I_{eff, pilari}$ (mm <sup>4</sup> )	15,3e+9	$I_{eff, palkki}$ (mm <sup>4</sup> )	12,0e+9
$e_{max}$ (mm)	616	$e_{max}$ (mm)	721
$B_{ef,pilari}$ (mm)	112	$B_{ef,palkki}$ (mm)	68



Kuva C7. Teholliset poikkileikkaukset nurkka-alueella.

Määritellään tarkastelukohtien voimasuureet kuormitustapauksessa KT 3 ja lasketaan puuosien kestävyys.

$N_{pilari}$ (kN)	-222	$N_{palkki}$ (kN)	-203
$M_{pilari}$ (kNm)	395	$M_{palkki}$ (kNm)	400
$\sigma_{b,d,pilari}$ (N / mm <sup>2</sup> )	18,55	$\sigma_{b,d,palkki}$ (N / mm <sup>2</sup> )	24,0
$\sigma_{c,d,pilari}$ (N / mm <sup>2</sup> )	1,43	$\sigma_{c,d,palkki}$ (N / mm <sup>2</sup> )	1,94
$f_{b,d,pilari}$ (N / mm <sup>2</sup> )	21,31	$f_{b,d,palkki}$ (N / mm <sup>2</sup> )	28,16
$f_{c,d,pilari}$ (N / mm <sup>2</sup> )	17,57	$f_{c,d,palkki}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,78
Käyttöaste (%) :	95		100

Tarkistetaan palkin kestävyys myös kentässä. Kenttämomentti aiheuttaa vetoa palkin alapintaan ja, koska palkin alapinta on vino, kaltevuus  $\alpha = 4,6^\circ$ , on taivutuslujuutta ja taivutusjännitystä pienennettävä. Tarkastellaan kuormitustapausta KT 4.

$x$ (mm)	8 270		
$H_x$ (mm)	713	$B$ (mm)	75
$M_x$ (kNm)	131,2	$N_x$ (kN)	-118
$\sigma_{b, \alpha, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,5	$\sigma_{c, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,21
$f_{m, \alpha, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,45	$f_{c, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,7
Käyttöaste (%):	100		

Tarkistetaan nivelalueiden leikkauskestävyys. Kantanivelen maksimi leikkausvoima saadaan kuormitustapauksesta KT 3 ja harjaliitoksen kuormitustapauksesta KT 5. Pilaria käsitellään kotelopoikkileikkauksena.

Kanta / KT 3		Harja / KT 5	
$Q$ (kN)	144	$Q$ (kN)	71,5
$\sigma_{v, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,5	$\sigma_{v, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,21
$f_{v, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,45	$f_{v, d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	

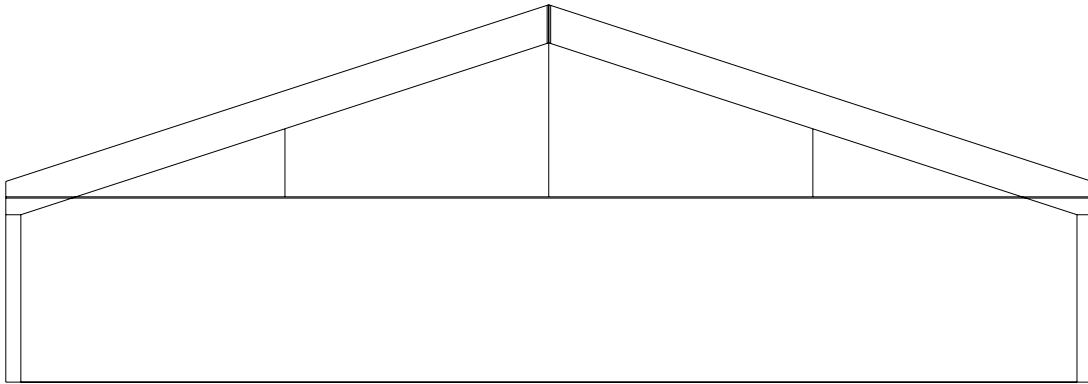
#### Kiepahdustukien mitoitus

Tuet ja niiden kiinnitykset mitoitetaan voimalla  $F_d = N_d / 80$ , jossa  $N_d = (1 - k_{krit})M_d / h$ .

Nurkkatuki		Kenttätuki	
$L$ (mm)	4 725	$L$ (mm)	4 725
$h$ (mm)	1 375	$h$ (mm)	1 130
$M_d$ (kNm)	470	$M_d$ (kNm)	150
$k_{krit}$	0,678	$k_{krit}$	0,36
$F_d$ (kN)	1,4	$F_d$ (kN)	1,1

# Liite D: Vetotangollisen liimapuukehän mitoitus- esimerkki

## Rakenteen kuvaus ja mitoitusperiaatteet



Kuva D1. Vetotangollisen liimapuukehän mitoitus-esimerkki.

Pääkannatin on kuvan D1 mukainen teräsvetotangoilla toteutettu liimapuukehä. Liimapuu on lujuusluokkaa GL32. Palkkiosien dimensio on 165 x 675 mm<sup>2</sup> ja pilareiden 165 x 315 mm<sup>2</sup>. Vetotangot, 2 kpl, ovat harjaterästä A500HW Ø 25 mm. Liimapuuosien liitokset toteutetaan vinotankoliitoksilla. Kaikki teräsosat ovat kuumasinkittyjä. Rakenteen voimasuureet ja siirtymät ratkaistaan tasokehäohjelmalla. Liitososat mitotetaan valmistajan tuoteselosteen perusteella.

Yläpohjan sekundäärirakenne on kolmiaukkoinen SPU-elementti.

### Rakennelaskelmien lähtötiedot

Leveys (mm)	19 500	$q_{lumi, lyhyt, k}$ (kN / m <sup>2</sup> )	2,2
k-jako (mm)	4 800	$g_{yläpohja, k}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,5
Pituus (mm)	48 000	$q_{k(z), seinä}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,50
Kaltevuus (°)	18,4	$q_{k(z), katto}$ (kN / m <sup>2</sup> )	0,57

Kuormitustapaukset ja osavarmuuskertoimet on esitetty kohdan 5.3 taulukossa 9.

Lasketaan tuulikuorman eri variaatiot ja haetaan niistä tapaukset, jotka tuottavat suurimman nosteen sekä suurimman vaakavoiman.

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden nostava tuuli tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 0,0 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 2,62 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = - 2,95 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 3,28 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = - 4,64 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = - 4,21 \text{ kN / m}$	(alue G, räystääs)

Tuulikuormat yhtä kannatinta kohden ” painava tuuli ” -tapauksessa:

Seinä	$q_{tuuli,k} = 3,1 \text{ kN / m}$	(tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = -0,48 \text{ kN / m}$	(suojan puoli)
Katto	$q_{tuuli,k} = 2,02 \text{ kN / m}$	(alue H, tuulen puoli)
	$q_{tuuli,k} = 0,27 \text{ kN / m}$	(alue I, suojan puoli)
	$q_{tuuli,k} = -1,09 \text{ kN / m}$	(alue J, harja)
	$q_{tuuli,k} = 2,18 \text{ kN / m}$	(alue G, räystääs)

Ratkaistaan rakenne tasokehähajelmalla. Esitetään mitoittavat voimasuureet kuormitustapauksittain:

Pilarin ja vetotangon voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavat:

KT	$N$ (kN)	$Q_{ylä}$ (kN)	$Q_{tuki}$ (kN)	$M_{tuki}$ (kNm)	$N_{vetotanko}$ (kN)
1	-182	0	0	0	257
2	25,5 / 25,3	3,1 / 1,4	3,1 / 10,5	9,3 / 13,7	-
3	-186 / -177	1,8 / 7,3	14,3 / 5,3	24,1 / 18,8	248
4	-163 / -125	0	0	0	203
5	-168 / -124	1,7 / 7,0	13,8 / 5,1	23,2 / 18,1	199



Kuormitustapaus 2:ssa vetotanko muuttuu puristetuksi. Oletetaan kuitenkin, että kattorakenne pystyy siirtämään vaakavoimia, ts. kokonaisuus kehän kattopalkit ja vetotanko pysyy jäykkänä kappaleena.

Palkin voimasuureet murtorajatilassa kuormitustapauksittain ovat seuraavat:

KT	$N_{tuki}$ (kN)	$N_{harja}$ (kN)	$Q_{tuki}$ (kN)	$Q_{harja}$ (kN)	$M_{max}$ (kNm)
1	-303	-242	85,8	-85,8	219
2	35,1 / 33,4	42,6 / 40,8	-14,6 / -14,9	12,4 / 17,3	-32 / - 38,6
3	-294 / -299	-238 / -243	92,8 / 80,3	-92,6 / -78,3	237 / 205
4	-246 / -233	-185 / -198	85,8 / 49,9	-85,8 / -49,9	219 / 207
5	-242 / -235	-186 / -203	92,3 / 47,9	-92,1 / -45,9	235 / 122

Kehän siirtymät käyttörajatilassa eri kuormitustapauksissa KT 6 ja 7 ovat:

KT	$u_{2,nst,palkki}$ (mm)	$u_{2,fin,palkki}$ (mm)	$u_{2,nst,pilari}$ (mm)
6	$23,3 = L_{palkki} / 420$	$37 = L_{palkki} / 260$	
7			$7,5 = H_{pilari} / 400$

Siirtymiä pidetään hyväksyttävänä.

### Rakenteiden mitoitus

Pilarin mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Määritellään pilarin nurjahduskerroin, ja tarkistetaan normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutus:

$H$ (mm)	315	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	-186	$\sigma_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	3,58	$f_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,06
$M$ (kNm)	24,1	$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	12,03	$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	25,47
$l_{c,y}$ (mm)	7500	$k_{c,y}$	0,49		
Taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus:				$0,84 \leq 1,0$	

Palkin mitoittava kuormitustapaus on KT 3. Määritellään palkin nurjahduskertoimet molempiin suuntiin lausekkeella 22, kiepahduskerroin ja tarkistetaan normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutus lausekkeella 33.

$H$ (mm)	675	$B$ (mm)	165		
$N$ (kN)	-266	$\sigma_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	2,39	$f_{c,0,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	20,06
$M$ (kNm)	237	$\sigma_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	18,91	$f_{b,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	22,15
$l_{c,y}$ (mm)	10 200	$k_{c,y}$	0,90		
$l_{c,z}$ (mm)	2 400	$k_{c,z}$	0,91		
$l_{ef}$ (mm)	2 400	$k_{crit}$	1,0		
Taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus:				0,99 ≤ 1,0	

Vetotangon mitoittava kuormitustapaus on KT 1. Tarkistetaan vetokestävyys. Tankojen päihin tehdään täyskapasiteettikierteet.

$\varnothing$ (mm)	25	$A$ (mm <sup>2</sup> )	980		
$N$ (kN)	257	$\sigma_{t,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	262	$f_{y,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	322
Normaalivoimakestävyys				0,82 ≤ 1,0	

### Liitoksien mitoitus

Valitaan kantaliitokseksi APL24T + APL16T-2 (ks. kuva B2). Pilarin pään ja betonin väliin asennetaan teräslevyt joiden koko on 60 x 170 mm<sup>2</sup>. Kuormitustapaus KT 2 tuottaa suurimman vedon ja kuormitustapaus KT 3 suurimman momentin, suurimman puristuksen ja mitoittavan leikkausvoiman. Lasketaan kantaliitoksen kestävyudet lähteen [15] mukaan.

Mitoittavat voimasuuret ovat:

$N_{max}$ (kN)	25,5		
$M_{max}$ (kNm)	24,1		
$N_{min}$ (kN)	-186	$F_{dp}$ (kN)	173
$Q$ (kN)	14,3		

Kestävyudet:

$F_{uv}$ (kN)	142	≥ $N_{max}$
$M_{ul}$ (kNm)	42,6	≥ $M_{max}$
$V_{uv}$ (kN)	3,0	< $Q$

Kantaliitoksen leikkauskestävyys ylittyy. Liimataan pilarin pätyyn erillinen vaartatap-pina toimiva harjaterästanko, joka ulottuu jälkivaluun. Valitaan 2 kpl vaarnatappia, joi-den halkaisija on  $\varnothing$  20 mm ja liimauspituus puussa  $l = 200$  mm. Vaarnatappien leik-kauskestävyys on  $V_{u2} = 2 \times 9 \text{ kN} = 18 \text{ kN} > Q = 14,3 \text{ kN}$ .

Mikäli pilari asennetaan vain pulttien varaan asennusaikana, asennusaikainen kestävyys tarkistetaan.

Valitaan pilaripalkkiliitokseksi APL20P-2. Kuormitustapaus KT 2 tuottaa suurimman vedon ja kuormitustapaus KT 3 suurimman puristuksen ja mitoittavan leikkausvoiman sekä näiden yhdistelmän. Tarkistetaan pilaripalkkiliitoksen kestävyudet. Tankojen kul-ma puunsyihin nähden on pilarissa  $\alpha = 0^\circ$  ja palkkiosassa  $\alpha = 71^\circ$ . Mitoittava tapaus on pilarin puoli.

Mitoittavat voimasuuret ovat:

$N_{max}$ (kN)	25,5		
$N_{min}$ (kN)	-186	$Q$ (kN)	1,8
$N_{min}$ (kN)	-177	$Q$ (kN)	7,3

Kestävyudet:

$F_{up}$ (kN)	258	$\geq N_{min}$
$F_{uv}$ (kN)	171	$\geq N_{max}$
$V_{u,\alpha=0}$ (kN)	16,7	$\geq Q$

Tarkistetaan puristuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus:

$$(177 / 258)^2 + (7,3 / 16,7)^2 = 0,66 \leq 1,0$$

Pilariliitosalue vahvistetaan poikittaisella lisätangolla ( $\varnothing$  20mm,  $l = 275$  mm), jolla es-tetään puun murtuminen poikittaisesta vetorasituksesta.

Valitaan harjaliitokseksi APL25P-2. Lasketaan kuormitustapauksista mitoittava nor-maalivoiman ja leikkausvoiman yhdistelmä.

Kuormitustapaus KT 5 tuottaa mitoittavan normaalivoiman ja leikkausvoiman yhdis-telmän. Tarkistetaan harjaliitoksen kestävyudet. Tankojen kulma puunsyihin nähden on palkkiosassa  $\alpha = 18,43^\circ$ .

Mitoittavat voimasuureet ovat:

$N_{min}$ (kN)	-186	$Q$ (kN)	92,1
$N_d$ (kN)	205,6	$V_d$ (kN)	28,6
$N_{max}$ (kN)	42,6		

Kestävyydet:

$F_{up}$ (kN)	446	$\geq N_d$
$F_{uv}$ (kN)	267	$\geq N_{max}$
$V_{u,\alpha=18,43}$ (kN)	54,3	$\geq V_d$

Tarkistetaan puristuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus:

$$(205,6 / 446)^2 + (28,6 / 54,3)^2 = 0,49 \leq 1,0$$

Palkki vahvistetaan lisätangolla ( $\varnothing$  25 mm,  $l = 540$  mm), jolla estetään puun murtumisen poikittaisesta vetorasituksesta. Lisätanko sijoitetaan rakennedetaljin mukaan [15].

Vetotankojen liitos palkkiosaan tehdään teräspäätylevyllä (Fe355,  $t = 40$  mm). Päätylevyn koko on  $265 \times 120$  mm<sup>2</sup>. Tarkistetaan palkkiosan päädyn puun pintapuristuskestävyys. Päätylevy mallinnetaan yksiaukkoisena palkkina, jonka jänneväli on  $165 + 30 = 195$  mm ja kuormitus  $q_d = 1558$  N/mm.

$A_{pääty}$ (mm <sup>2</sup> )	19 800	$\sigma_{c,18,4,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	13	$\leq 14,4$ N / mm <sup>2</sup>
$N_{vetotanko}$ (kN)	257	$\sigma_{b,päätylevy,d}$ (N / mm <sup>2</sup> )	231	$\leq 322$ N / mm <sup>2</sup>

Päätylevy kiinnitetään kansiruuveilla palkin pätyyn.

Tekijä(t) Kurkela, Juha, Kivinen, Tapani, Westman, Veli-Matti & Kevarinmäki, Ari			
Nimeke <b>Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut Esivalmistetut rakennejärjestelmät</b>			
Tiivistelmä VTT on tehnyt tutkimuksen yhteistyössä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen kanssa. Tutkimuksessa selvitettiin yhdeksän lypsykarjapihatton ja kolmen sikalarakennuksen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita vuoden kestäneellä mittauksella. Olosuhdeselvityksen tarkoituksena oli saada tietoa siitä, millaisiin sisäilmastorasituksiin uusien suurten kotieläinrakennusten rakenteet ja pintamateriaalit joutuvat. Sisäolosuhteiden erot näyttivät korreloivan kunkin kohteen ilmanvaihtojärjestelmän tekniseen toimivuuteen ja toimintaperiaatteeseen. Ilmanvaihdon määrässä oli tuntuvia puutteita. Kotieläinrakennusten ullakko-onteloiden tuulettumisessa oli puutteita. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että etenkin talviolosuhteissa suhteelliset sisäkosteudet olivat tasolla, jossa homeen synty ja esiintyminen oli todennäköistä. Lahovaurioiden syntyriski oli kuitenkin vähäinen.  Tutkimuksen toisessa vaiheessa konehalleille, lypsykarjapihatoille ja sikaloille kehitettiin toiminnalliset pohjaratkaisumallit, jotka vastaavat kotieläintilojen lähitulevaisuuden rakennustarpeisiin. Pohjaratkaisuihin sovellettiin uusia puumateriaaleihin perustuvia runkorakennemalleja. Konehalleihin suositeltiin nauhallevyrakenteista kolminivelristikkokehää sekä amerikkalaisperäistä post-frame runkoa. Pihatoihin ja sikaloihin suositeltiin kerto- tai liimapuista kolminivelkehää, vetotangollista ansaristikkoa sekä liimapuista, kolmiaukkoista pilari-palkkirunkoa. Kehitetyt runkorakennejärjestelmät ovat teollisesti esivalmistettavia tyyppiratkaisuja, jotka voidaan tarvittaessa toimittaa tuoteosatoimituksena valmiiksi asennettuna. Kaikki kehitetyt runkotyypit ovat itsensä jäykistäviä, jolloin niitä voidaan käyttää pitkissä rakennuksissa ilman poikittaisia väliseiniä tai jäykistereivauksia.  Runkorakennemalleille selvitettiin rakenneratkaisut ja mitoitusmenetelmät. Jäykistysmenetelmät ja rakennemalleihin soveltuvat vaipparakenteet esiteltiin. Uutena jäykistemenetelmänä tarkasteltiin seinä- ja kattopeltien hyödyntämistä yhdessä mastopilarijäykistykseen kanssa. Tälle jäykistysmenetelmälle laadittiin suunnitteluohjeet ja mitoitusohjelma. Uusien runkorakennemallien kustannuksia verrattiin perinteisiin rakenteisiin. Uudet rakennemallit olivat tutkimuksen perusteella taloudellisesti kilpailukykyisiä.			
Avainsanat timber construction, building frame, wooden structures, nail plate structures, glulam, agricultural buildings, steel sheet bracing, machine halls, dairy barns, prefabrication, structural systems			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6137-6 (nid.) 951-38-6138-4 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinumero R0SU00438	
Julkaisu-aika Maaliskuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 116 s. + liitt. 39 s.	Hinta D
Projektin nimi Laajarunkoisten maatalousrakennusten kantavien puurakenteiden uudet ratkaisut		Toimeksiantaja(t) Maa- ja metsätalousministeriö	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. +358 9 4561  
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 2194  
VTT-TIED-2194

Author(s) Kurkela, Juha, Kivinen, Tapani, Westman, Veli-Matti & Kevarinmäki, Ari			
Title <b>Wooden frame solutions of wide span agriculture buildings Prefabricated structure systems</b>			
Abstract <p>VTT Technical Research Centre of Finland has done this study in cooperation with Agrifood Research Finland. In the first phase the indoor climate conditions, relative humidity and temperature, carbon dioxide and ammonia emissions were studied in nine dairy barns and swineries. Conditions seemed to correlate strongly with the ventilation system and its functionality. The ventilation rate was considerably low in most barns. A one year long measurement revealed that the indoor humidity was between 80–100 % for long periods especially during the wintertime. The humidity seemed to enable the mould growth on wall and ceiling surfaces. The risk of wood decay was not obvious.</p> <p>In the second phase new functional wide span lay-outs were designed for machine halls, swineries and dairy barns. The lay-outs were constructed with new wooden load bearing building frames. These new constructions were three hinge glulam, LVL or nail plate truss frames, tension bar frames and post and beam frame systems. Characteristic for these frames is also the industrial production line before site operations. A new wooden solutions for a self made builder is a post frame system for simple uninsulated machine halls.</p> <p>The detailed structures and design methods were studied for the developed timber structure systems. Bracing methods and wall and ceiling surfaces of the frames were introduced. The costs of the new frame systems were compared to traditional structures. The new timber frame systems were economically competitive.</p>			
Keywords timber construction, building frame, wooden structures, nail plate structures, glulam, agricultural buildings, steel sheet bracing, machine halls, dairy barns, prefabrication, structural systems			
Activity unit VTT Building and Transport, Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6137-6 (soft back ed.) 951-38-6138-4 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Project number ROSU00438	
Date March 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 116 p. + app. 39 p.	Price D
Name of project Laajarunkoisten maatalousrakennusten kantavien puurakenteiden uudet ratkaisut		Commissioned by Ministry of Agriculture and Forestry	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Tutkimuksessa selvitettiin yhdeksän lypsykarjapihaton ja kolmen sikalarakennuksen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita vuoden kestäneellä mittauksella. Tutkimuksen toisessa vaiheessa konehalleille, lypsykarjapihatoille ja sikaloille kehitettiin toiminnalliset pohjaratkaisumallit, jotka vastaavat kotieläintilojen lähitulevaisuuden rakennustarpeita. Pohjaratkaisuihin sovellettiin uusia puumateriaaleihin perustuvia runkorakennemalleja. Konehalleihin suositeltiin naulalevyrakenteista kolminivelristikkokehää sekä amerikkalaisperäistä post-frame-runkoa. Pihatoihin ja sikaloihin suositeltiin kerto- tai liimapuista kolminivelkehää, vetotangollista ansaristikkoa sekä liimapuista, kolmiaukkoista pilari-palkkirunkoa. Uudet rakennemallit olivat tutkimuksen perusteella taloudellisesti kilpailukykyisiä.

---

Tätä julkaisua myy  
VTT TIETOPALVELU  
PL 2000  
02044 VTT  
Puh. (09) 456 4404  
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av  
VTT INFORMATIONSTJÄNST  
PB 2000  
02044 VTT  
Tel. (09) 456 4404  
Fax (09) 456 4374

This publication is available from  
VTT INFORMATION SERVICE  
P.O.Box 2000  
FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 9 456 4404  
Fax + 358 9 456 4374

---