

Esivalmistettujen kattoelementtien hyödyntäminen osana puurakenteisten hallien jäykistystä

Sami Pajunen¹ ja Markku Heinisuo

Tiivistelmä Esivalmistettujen kattoelementtien käyttö puurunkoisten hallien rakentamisessa on nykyään hyvin sujuvaa ja kustannustehokasta. Tyypillisesti kattoelementit suunnitellaan siten, että ne toimivat myös stabiliteettitukina pääkannattimille. Tässä tutkimuksessa käsitellään suunnittelumenetelmää, jossa kattoelementit suunniteltaisiin siten, että ne toimisivat osana koko rakennuksen jäykistysjärjestelmää perinteisten mastopilarien rinnalla. Vastaavaa suunnittelumenetelmää on käytetty jo pitkään teräsrunkoisissa hallirakennuksissa, ja tässä artikkelissa menetelmää muokataan puurakentamisen erityispiirteet huomioiden soveltumaan myös puurunkoisille hallirakennuksille. Artikkelissa tarkastellaan puuhallin pitkää sivua vastaan kohdistuvaa vaakakuormaa, jota voidaan pitää jäykistyslaskelmien perustapauksena. Katon levyjäykistys toteutetaan puurunkojen jäykistyksessä yleisesti käytetyllä kipsilevyllä, joka on ruuvattu puurunkoon. Saaduista tuloksista nähdään, että katon levyvaikutuksella on suuri vaikutus pilarien vaakakuormiin sekä katon vaakasiirtymiin. Pilareiden vaakakuormitukset ja nurjahduspituudet pienenevät huomattavasti verrattuna tapaukseen, jossa mastopilarit yksin ottaisivat vastaan rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat. Kun katon levyjäykistys otetaan mitoituksessa huomioon, kehäpilareiden nurjahduspituudet pienenevät jopa 47 prosenttia verrattuna pelkkään mastojäykistykseen. Tulokset ovat vastaavia kuin on saatu teräsrunkoisten hallien laskelmissa. Esitetty menetelmä antaa perusteet puurunkoisten hallien kehittyneempään ja todellisuutta paremmin vastaavaan taloudelliseen mitoitukseen jopa ilman lisäkustannuksia verrattuna nykyiseen käytäntöön.

Avainsanat: levyjäykistys, puurakentaminen, puurunkoinen halli, kattoelementti

Vastaanotettu: 8.6.2023. *Hyväksytty:* 17.8.2023. *Julkaistu verkossa:* 28.8.2023.

Johdanto

Rakennuksen jäykistykseen suunnittelussa on otettava huomioon yksittäisten rakenneosien tukeminen stabiiliuden menettämistä vastaan sekä koko rakennuksen riittävän jäykkä ja

¹Vastuullinen kirjoittaja: sami.pajunen@tuni.fi

kestävä tuenta ulkoisia vaakakuormia vastaan. Suomen olosuhteissa merkittävin vaakakuorma aiheutuu tuulesta, mutta myös valmistuksesta ja asennuksesta aiheutuvat vaakavoimat vaikuttavat mitoitukseen. Rakennuksen mittasuhteista ja käyttötarkoituksesta riippuen kustannustehokkaimman jäykistysjärjestelmän valinnassa voidaan käyttää suuntaa antavia nyrkkisääntöjä. Matalissa rakennuksissa mastojäykistyksellä saavutetaan yleensä paras lopputulos, kun taas korkeammissa rakennuksissa esimerkiksi pystyseiniä leikkausjäykkyyteen perustuva levyjäykistys on usein toimivin tapa johtaa ulkoiset vaakakuormat perustuksille. Jäykistykseen liittyvä rakenteiden mekaniikka on periaatteiltaan sama riippumatta rakennuksen runkomateriaalista. Se pitää sisällään aina jäykistysjärjestelmän ja sen yksittäisten osien lujuus- ja jäykkyydestä tarkastelut eri kuormitusyhdistelmillä, ja lisäksi koko rakennuksen kaatumisvarmuuden ja ankkurointien tarpeen analysoinnin. Vaikka vallitsevat statiikan ja lujuusopin yhtälöt ovat samoja, erilaisten rakennusmateriaalien paino, kimmokertoimet sekä käytettävissä olevat rakennustuotteet ja niiden liitostekniikka vaikuttavat oleellisesti jäykistysjärjestelmän suunnitteluun, analysointiin, ja mitoitukseen.

Tässä artikkelissa rakennusten jäykistämistä ja kaatumisvarmuutta ei käsitellä yleisellä tasolla, vaan keskitytään levyjäykistykseen hyödyntämiseen puurunkoisissa matalahkoissa hallirakennuksissa. Levyjäykistyksellä tarkoitetaan yleisesti pysty- tai vaakatasorakenteen käyttöä osana jäykistysjärjestelmää, ja tässä artikkelissa keskitytään näistä jälkimmäiseen. Artikkelissa tarkastellaan levyjäykistykseen vaikuttamista kuvan 1 mukaisessa yksiläiväisessä hallirakennuksessa, kun vaakakuormitus kohdistuu hallin pitkälle sivulle. Hallin pääpalkit eli pääkannattimet on tuettu nivelellisesti kehäpilareihin, jotka puolestaan on kiinnitetty jäykästi perustuksiin. Levyjäykistysvaikutus saadaan aikaiseksi pääpalkkien päälle asennettavilla kattoelementeillä, jotka siirtävät osan pitkän sivun vaakakuormituksesta hallin siirtymättömiksi oletettuihin päätyihin. Artikkelissa ei käsitellä levyjäykistystä vaakakuormien vaikuttaessa hallin päätyihin, koska kyseinen kuormitustapaus hallitaan jo nykyisillä suunnitteluohjeilla varsin kattavasti.



Kuva 1. Puurunkoinen halli; mukaillen lähdettä [1].

Levyjäykistyksen hyödyntämiseen liittyviä suunnittelumenetelmiä on kehitetty teräsrunkoisille halleille jo 1970-luvulta lähtien [2–4] ja tutkimustuloksiin perustuva eurooppalainen suunnitteluohje julkaistiin vuonna 1995 [5]. Teräsrakenteiden ja -liitosten suuren lujuuden ja jäykkyyden ansioista levyjäykistystä on voitu menestyksekkäästi hyödyntää isoissakin hallirakenteissa pääasiallisena jäykistysjärjestelmänä tuuli- ja vinovoimia vastaan [6–8]. Teräshalleissa kattotasolla käytetään usein ohutseinäisiä muotolevyjä, joiden mitoituksessa erilaiset stabiiliusilmiöt korostuvat. Puuhalleissa rakennustuotteet ovat tältä osin yksinkertaisempia mitoittaa. Puurakenteisissa halleissa käytetään tyypillisesti mastojäykistystä ulkoisia kuormia vastaan, ja vain sisäiset, nurjahdus- ja kiepahdustuennoista syntyvät voimat otetaan vastaan katon levykentillä. Osaltaan tähän vaikuttaa puurakenteiden ja niissä käytettyjen liitosten lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, mutta asiaan vaikuttaa myös suunnitteluprosessin ja sen osatehtävien monimutkaistuminen. Vaikka levyjäykistyksen täysimittaisella hyödyntämisellä olisi saatavissa merkittäviä kokonais-taloudellisia hyötyjä hallirakennuksen tilaajalle, hankkeen muilta osapuolilta se vaatii tavanomaista hanketta enemmän suunnittelua sekä yhteistyötä. Tyypillisessä hankkeessa kukin tuoteosatoimittaja suunnittelee oman tuotteensa suunnitteluohjeidensa mukaisesti ja pääsuunnittelija kokoaa tulokset yhteen. Sen sijaan levyjäykistystä hyödynnettäessä eri tuoteosatoimittajien on tehtävä suunnittelutyönsä yhteistyössä iteroiden, koska tuotteiden ominaisuudet ja vaatimukset kytkeytyvät toisiinsa.

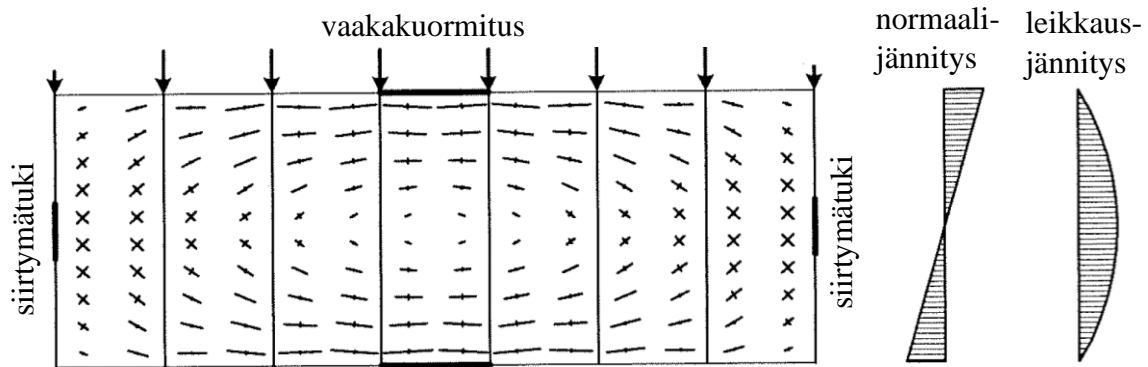
Tämä artikkeli on jäsenelty siten, että luvussa 2 esitellään levyjäykistyksen peruseräiteitä sekä tarkastellaan hallirungon ja katon levykenttien vuorovaikutusta. Luvussa 3 tarkastellaan levyjäykistystä numeerisessa esimerkkilaskelmassa. Luvussa 4 esitetään johtopäätöksiä saaduista tuloksista sekä teoriatarkastelun soveltamismahdollisuuksista.

Levyjäykistyksen suunnittelu

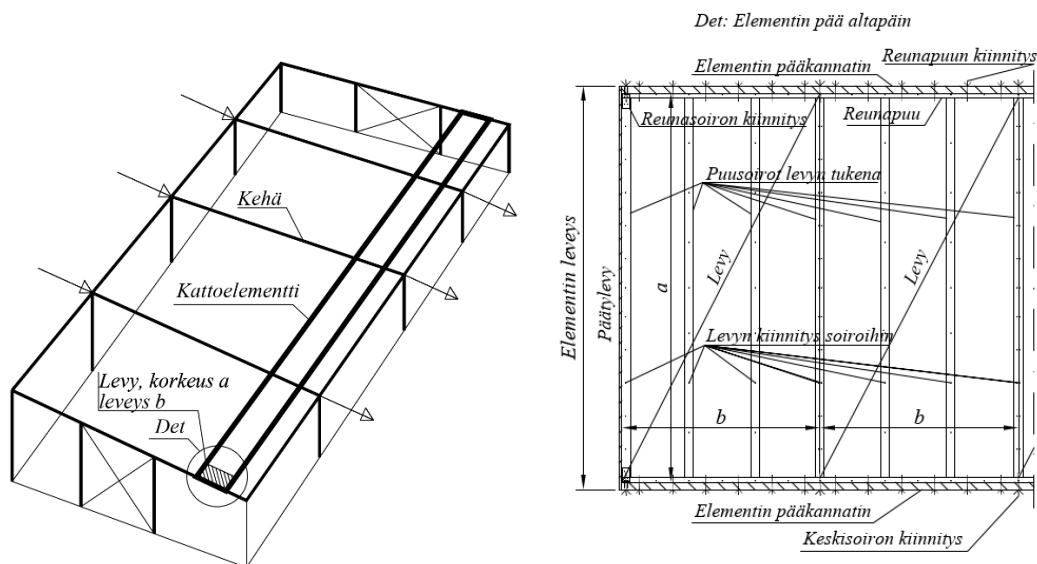
Peruskäsitteitä

Oletetaan rakennuksen kattotaso yhtenäiseksi tatorakenteeksi, joka on tuettu siten, että rakennuksen päädyissä siirtymät ovat täysin estetty. Ulkoinen vaakakuormitus aiheuttaa kattotasoon kuvan 2 mukaiset rasitukset, jonka mukaan katon leikkausjäännitys on suurimmillaan kattotason päissä, ja normaalijännitys on suurimmillaan rakennuksen keskellä. Kattotaso vastaa näin ollen ohutuomaisen palkin tarkastelua, jossa laipat kantavat normaalijännityksistä aiheutuvan momentin, ja uuma kantaa leikkausvoiman.

Jotta puuhallin kattotaso toimisi kuvan 2 mukaisena yhtenäisenä rakenteena, on katorakenteen kestävä siihen syntyvät rasitukset. Käytettäessä puurakenteisia kattoelementtejä, on varmistuttava siitä, että levykentän reunoilla olevat elementit kestävät niihin kohdistuvat veto- ja puristusrasitukset. Lisäksi kattoelementit sekä niiden väliset kiinnitykset on mitoitettava siten, että ne kestävät päätyalueilla suurimmillaan olevat leikkausrasitukset. Kuvassa 3 esitetyllä tyypillisellä puurunkoisella kattoelementillä on lisäksi huolehdittava siitä, että pintalevy ei lommahda.

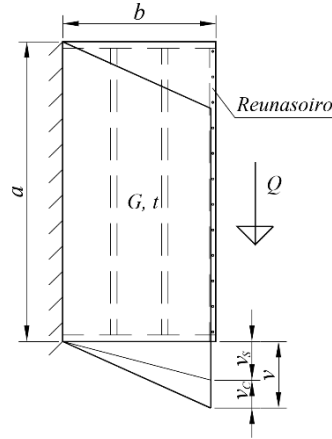


Kuva 2. Kattotason jännitysten suuntaviivat sekä normaali- ja leikkausjännitysjakaumat, mukailen lähdettä [6].



Kuva 3. Kattoelementti ja detalji kattoelementin päätyalueesta.

Kun edellä listatut rakenteen mitoituseseen liittyvät välttämättömät ehdot toteutuvat, voidaan määrittää levykentän jäykkyys ja sen vaikutukset hallin kokonaissiirtymiin. Tyypillisesti puurunkoiset kattoelementit ovat niin pitkiä (maksimipituus n. 25 m), että ne ulottuvat useamman pääkannattimen yli, ja ne kiinnitetään ruuvaamalla kuhunkin pääkannattimeen. Tarkastellaan ensin kuvan 4 mukaista kahden pääkannattimen välistä yhtä jäykistävää levyä, jossa leikkausvoima kohdistuu levyn pidemmässä suunnassa levyyn. Jos leikkausvoima kohdistuu levyn lyhemässä suunnassa, niin vastaavia kaavoja on esitetty mm. lähteessä [9]. Leikkausvoimasta aiheutuvat siirtymät voidaan jakaa levyn muodonmuutoksesta aiheutuvaan siirtymäkomponenttiin v_s sekä levyn kiinnitysten joustosta aiheutuvaan siirtymäkomponenttiin v_c .



Kuva 4. Leikkauskuormitetun levyn siirtymät. Levyn liukumoduuli on G , ja levyn paksuus on t .

Määritettäessä siirtymäkomponenttia v_c , levyjen ja päatypalkkien välisten liittimien vaikutusta jäykkyyteen ei oteta huomioon, koska sen merkitys on pieni verrattuna levyjen ja reunasoijojen liittimien vaikutukseen. Merkitään levyjen reunasoiroihin tulevien liittimien lukumäärää termillä n_c , ja yhden liittimen jäykkyyttä muuttujalla k_c . Tällöin levyn siirtymä voidaan kirjoittaa muodossa

$$v = v_s + v_c = \frac{Qb}{Gat} + \frac{Q}{n_c k_c} = \left(\frac{b}{Gat} + \frac{1}{n_c k_c} \right) Q \Rightarrow v = sQ \quad (1)$$

jossa on otettu käyttöön termi s kuvaamaan levyn ja sen liitosten joustavuutta. Tässä ei ole otettu huomioon myöskään levyjen keskellä olevien liittimien jäykkyyksiä, eli on otettu huomioon vain levyjen liittimet, jotka on näytetty kuvassa 4. Mikäli levyn jäykkyyden määrittämisessä halutaan ottaa huomioon myös levyn keskellä olevien liittimien vaikutus, se on suoraviivaista tehdä esim. lähteen [9] mukaisilla kiinnitystapakertoimilla. Kun levykentässä on levyjä n_b kappaletta vierekkäin ja kaikissa levyissä vaikuttaa sama leikkausvoima Q , niin levykentän siirtymä on $n_b v$.

Tarkastellaan seuraavaksi useamman pääkannattajan yli ulottuvaa kattoelementtiä kuvan 5 mukaisesti. Kussakin kehävälissä on vierekkäin n_b kappaletta levyjä, joiden leveys on b ja korkeus on a . Kattoelementtiin kohdistuu kehien kohdilla tuulesta ja vinovoimista aiheutuva vakio vaakavoima P . Kattoelementin pituus on $L = nm_b$, jossa n on levykenttien lukumäärä. Tällöin voidaan kaavan (1) mukaisesti kirjoittaa levykentän m alueella kertyvä siirtymä muodossa

$$\Delta v_m = n_b s [V - (m-1)P] \quad (2)$$

jossa tukireaktio $V = (n-1)P/2$. Vastaavasti voidaan kirjoittaa kokonaissiirtymä levykentän m oikeassa reunassa muodossa

$$\begin{aligned} v_m &= n_b s \{ mV - [1 + 2 + \dots + (m-1)]P \} \\ &= n_b s \{ m[(n-1)P/2] - [m(m-1)/2]P \} \\ &= n_b s [(m/2)(n-m)]P \end{aligned} \quad (3)$$

Taipuman suurin arvo on rakenteen keskellä, jossa $m = n/2$. Kun otetaan huomioon, että $n = L/(n_b b)$ ja, että $P = qn_b b$ eli pistekuormat on muutettu vastaavaksi tasaiseksi kuormaksi q , niin maksimitaipumaksi saadaan

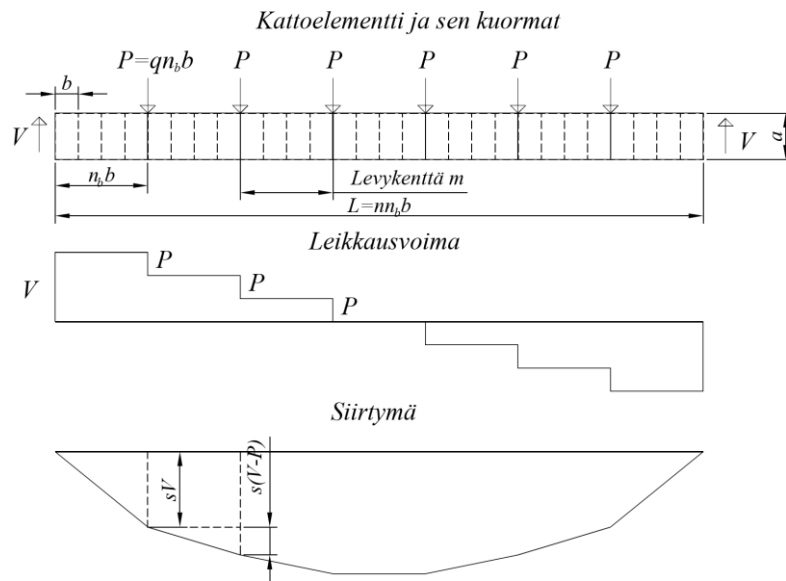
$$v_{max} = \frac{n_b s n^2 P}{8} = \frac{n_b s L^2 q}{8b} = \frac{s}{b} \frac{qL^2}{8} = \frac{qL^2}{8S} \quad (4)$$

jossa termillä S on merkattu levykentän leikkausjäykkyyttä

$$S = \frac{b}{s} = \frac{1}{\frac{1}{Gat} + \frac{1}{n_c k_c b}} \quad (5)$$

Liittimien lukumäärä levyjen reunapalkissa voidaan esittää muodossa $n_c = a/c$, jossa c on liittimien etäisyys toisistaan. Tällöin levykentän leikkausjäykkyys voidaan kirjoittaa muodossa

$$S = \frac{b}{s} = \frac{1}{\frac{1}{Gat} + \frac{c}{k_c ab}} \quad (6)$$



Kuva 5. Tasaisesti kuormitettu kattoelementti, leikkausvoimakuvio sekä siirtymämuoto.

Edellä kuvattu jäykkyyden määrittäminen voidaan tehdä yhden kattoelementin sijaan täysin analogisesti esimerkiksi koko kattotasolle tai yhdelle lappeelle, mikäli kattoelementin on kiinnitetty toisiinsa siten, että ne toimivat täysin yhdessä monoliittisen rakenteen tavoin. Kattoelementtien välisiä liitoksia ja niiden vaikutuksia kokonaisjäykkyyteen on havainnollistettu kappaleen 3 numeerisen esimerkin yhteydessä.

Levyjäykistys rungon kokonaisjäykistyksessä

Periaatteessa hallirakennuksen jäykistys voitaisiin suunnitella täysin kattotason levyjäykistykseen sekä päätyjen jäykkyyden varaan, mutta käytännön syistä se ei olisi puurunkoisissa halleissa mielekäästä. Sen sijaan on huomattavasti järkevämpää hyödyntää katon levyjäykistyskykyä yhdessä mastopilareiden kanssa. Tällöin kattotaso vie osan vaakakuormituksesta hallin päätyihin, ja lisäksi kattotaso toimii joustavana nurjahdustukena pilarille. Näistä kahdesta syystä pääpilareiden poikkileikkausta voidaan merkittävästi pienentää.

Mastopilareiden ja kattotason välisen yhteistoiminnan selvittämiseksi tarkastellaan kuvassa 6 esitettyä rakennetta, jossa mastopilareiden lisäksi kattorakenteena on M kappaletta vierekkäisiä pitkiä kattoelementtejä, jotka eivät ole kiinni toisissaan, vaan kiinnitetty tukirakenteena toimiviin kehiin. Kattotason pituus on L ja leveys on A . Kehäpilarit oletetaan samoiksi kaikilla kehillä molemmissa päissä kehiä. Kattotasoa kuormittaa kehälinjalla i kattotasossa painepuolella vaakakuormat P_i^p ja imupuolella vaakakuormat P_i^c . Kuormitus linjalla i jakautuu pilareiden yläpäiden voimiksi T_i ja kunkin kattoelementin kehään välittäväksi voimaksi F_i . Pilarien ja kattoelementtien kiinnitykset kehiin oletetaan liukumattomiksi, joten sekä pilareiden yläpäiden että kattoelementtien vaakasiirtymät ovat samat δ_i koko linjalla i . Tästä syystä pilareiden voimat ovat yhtä suuret tukikehän molemmissa päissä ja kaikki kattoelementeistä kehään kohdistuvat voimat ovat samat koko kehälinjalla.

Tehtävänä on määrittää siirtymät δ_i sekä voimat T_i ja F_i . Voimien F_i perusteella voidaan laskea kattoelementtien rasitukset ja voimien T_i perusteella voidaan mitoittaa pilarit. Siirtymien δ_i avulla voidaan arvioida ratkaisun käyttökelpoisuutta.

Pilarivoimien T_i ja katon siirtymien δ_i välille voidaan kirjoittaa yhteys

$$\delta_i = c_T T_i \quad (7)$$

jossa c_T on pilarin joustokerroin, joka mastopilarin tapauksessa on

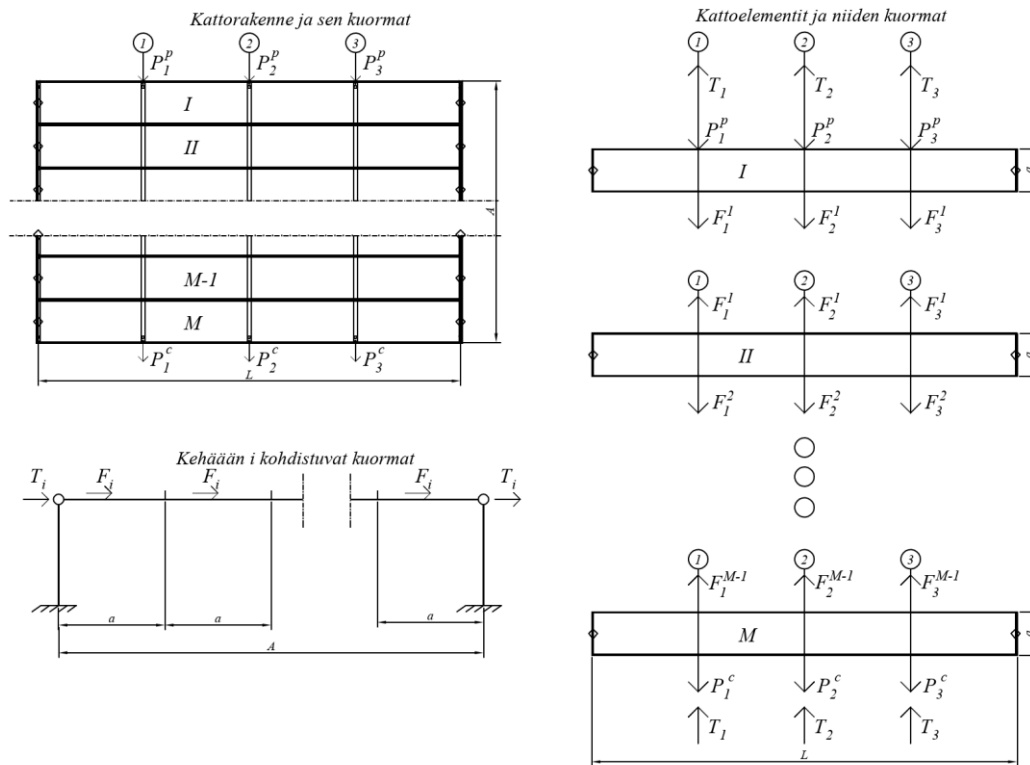
$$c_T = \frac{H^3}{3EI} \quad (8)$$

jossa EI on pilarin taivutusjäykkyys ja H on pilarin korkeus.

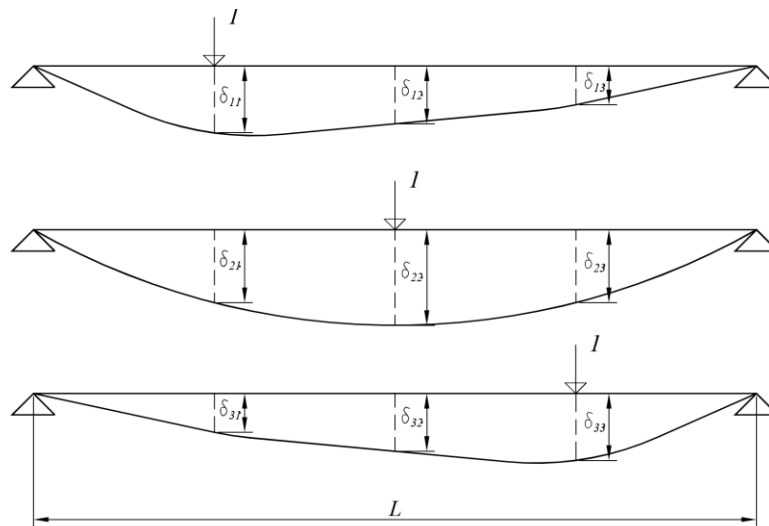
Voimat F^1 siirtävät kuormia kattoelementiltä I kattoelementille II , voimat F^2 kattoelementille II kattoelementille III jne. Käytännössä voimat F^i siirtyvät kattoelementtien liitosten kautta kehään ja sieltä elementiltä toiselle. Voimaerot $F^i - F^{i-1} = F_i$ jäävät kattoelementille I ja kuormittavat kehää kuvan 6 mukaisesti. Kehälinjojen siirtymät lasketaan yhteenlaskuperiaatteen mukaan reunimmaiselle kattoelementille I siten, että

$$\delta_i = \sum_{j=i}^3 (P_j^p - T_j + F_j^1) \delta_{ij}, i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

olettaen, että kehälinjoja on kolme. Jos kehälinjoja on useampia, niin indeksejä i ja j kasvatetaan vastaavasti. Kaavassa (9) siirtymäkerroin δ_{ij} tarkoittaa kattoelementin taipumaa linjalla j kun yksikkövoima vaikuttaa kattoelementillä linjalla i , kuten kuvassa 7 on esitetty.



Kuva 6. Vaakakuormien jakaantuminen kehäpilarille ja kattoelementeille sekä kattoelementtien kuormat. Kattoelementtien lukumäärää on merkattu muuttujalla M .



Kuva 7. Yksikkövoimien aiheuttamat siirtymät

Oletetaan, että kukin kattoelementti toimii Timoshenkon palkkiteorian mukaisesti. Tällöin siirtymäkertoimet δ_{ij} voidaan laskea kuvan 7 tapauksessa virtuaalisen työn yhtälön mukaan

$$\delta_{ij} = \int_0^L \frac{M_{t,i}(x)M_{t,j}(x)}{(EI)_T} dx + \int_0^L \frac{Q_i(x)Q_j(x)}{S} dx \quad (10)$$

jossa $(EI)_T$ ja S ovat palkin taivutus- ja leikkausjäykkyydet, $M_i(x)$ on taivutusmomentti ja $Q(x)$ on leikkausvoima palkin akselin suuntaisen koordinaatin x funktiona.

Kirjoittamalla yhtälöä (9) vastaavat siirtymälausekkeet kaikille elementeille, saadaan siirtymien yhteensopivuusyhtälön avulla eliminoitua elementtien väliset voimat F^i , ja päädytään pilarivoimien lausekkeeseen

$$\langle T \rangle = [\text{diag}(Mc_T) + 2C]^{-1}[C]\langle P^p + P^c \rangle \quad (11)$$

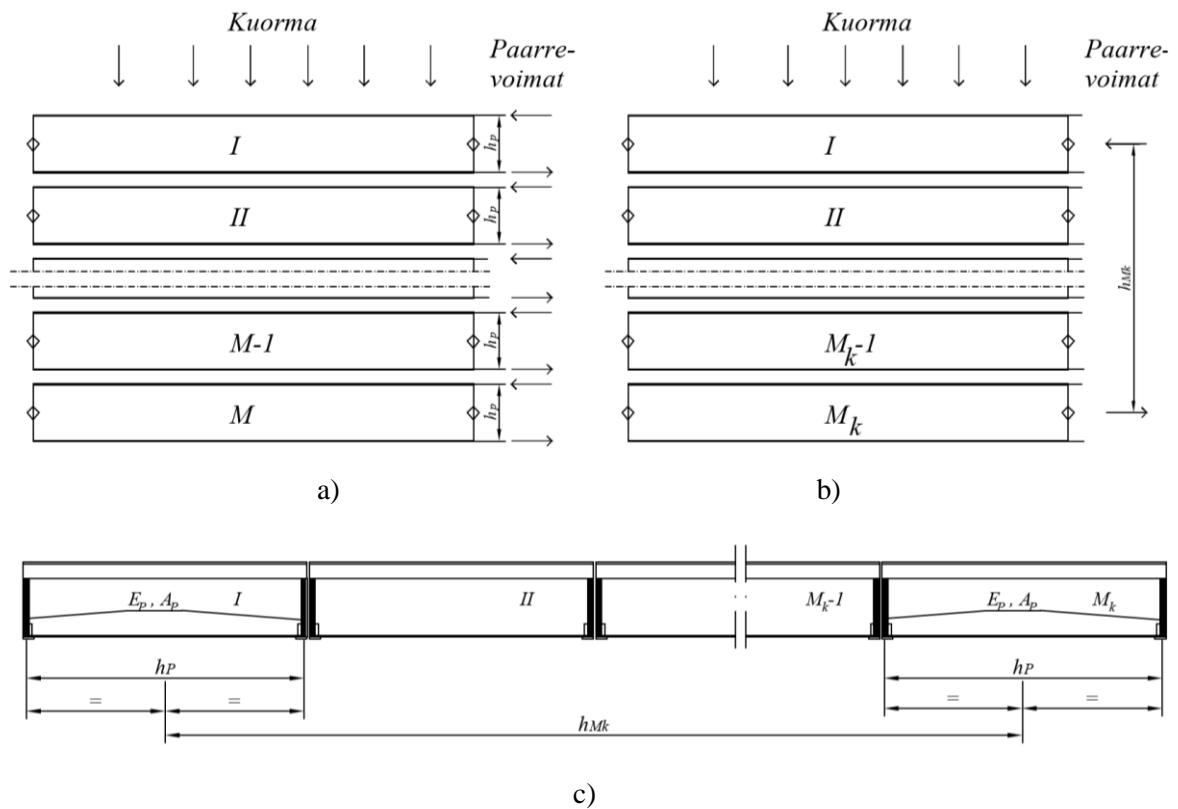
Yllä M on erillisten kattoelementtien lukumäärä ja notaatiolla $\langle \rangle$ tarkoitetaan pystyvektoria, ja notaatiolla $[]$ matriisia. Joustomatriisin $[C]$ yleinen alkio C_{ij} on kaavan (10) mukainen siirtymäkerroin δ_{ij} . Kuvan 7 mukaisessa kolmen kehälinjan tapauksessa joustomatriisi on

$$C = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kun siirtymät δ_i on laskettu kaavalla (7) niin kuhunkin palkkiin kohdistuvat kuormat F_i voidaan laskea seuraavasti

$$\langle F \rangle = [C]^{-1}\langle \delta \rangle \quad (13)$$

Kattorakenteen konstruktion mukaan kattoelementit voivat osallistua levyjäykistykseen usealla eri tavalla. Mikäli kattoelementtejä ei ole kiinnitetty toisiinsa, jokainen kattoelementti osallistuu levyjäykistykseen itsenäisesti siten, että jokaisen elementin uuma kantaa leikkausrasituksen, ja laippoina toimivat pääkannattimet osallistuvat taivutusmomentin kantamiseen. Tällöin yhteen kiinnitettyjen elementtien lukumäärää kuvaavan muuttujan M_k arvo on 1. Mikäli taas jos kattoelementit on kiinnitetty toisiinsa joko yhden lappeen tai koko katon osalta kaikkien kiinnitettyjen elementtien levytys toimii yhtenä levyjäykisteenä, ja reunimmaisten elementtien pääkannattimet vastaanottavat taivutusmomentin. Tällöin on varmistuttava siitä, että elementtien väliset saumaliitoksen kestävät rikkoutumatta niihin syntyvät leikkausrasitukset. Kuvassa 8 ja taulukossa 1 on havainnollistettu levyjäykistykseen toimintaa edellä mainituissa tapauksissa. Elementin pääkannattajan kimmomoduuli on E_P ja elementin yhden pääkannattajan pinta-ala on A_P . Pääkannattajien pintakeskiöiden etäisyyttä yhden elementin alueella merkitään kuvan 8 mukaisesti muuttujalla h_P , kun taas äärimmäisten elementtien keskipisteiden etäisyyttä merkitään termillä h_{Mk} .

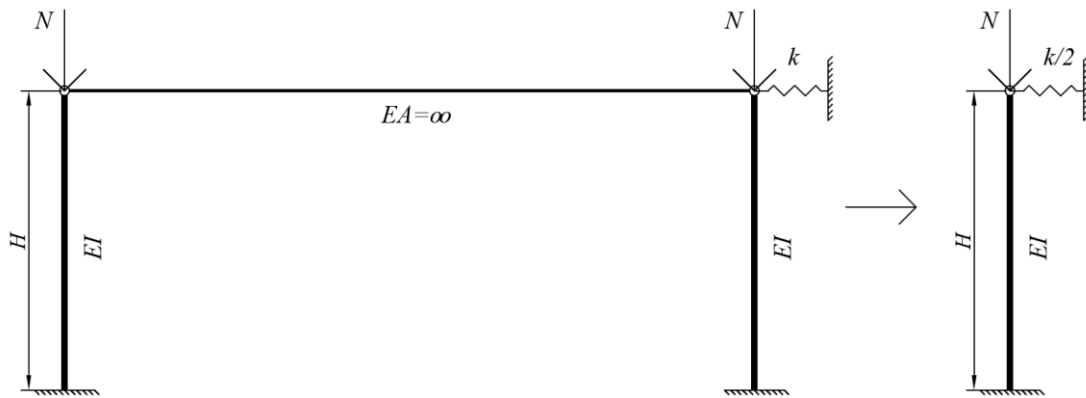


Kuva 8. Kattoelementin rasitukset erilaisissa rakenteissa. a) Elementit toimivat erillisinä. b) M_k elementtiä on yhdistetty toisiinsa. c) Poikkileikkaus.

Taulukko 1. Kattotason taivutus- ja leikkausjäykkyydet eri rakenteissa.

Levyjäykistysrakenne	Taivutusjäykkyys $(EI)_T$	Leikkausjäykkyys S
Elementit toimivat erillisinä	$(EI)_T = E_P A_P h_P^2 / 2$	$S = \frac{1}{\frac{1}{Gat} + \frac{c}{k_c ab}}$
M_k elementtiä on yhdistetty toisiinsa	$(EI)_T = 2E_P A_P h_{M_k}^2 / 2$	$S = M_k \frac{1}{\frac{1}{Gat} + \frac{c}{k_c ab}}$

Levyjäykisteenä toimiva kattotaso antaa tukea mastopilarille myös nurjahdusta vastaan kuvan 9 mukaisesti. Pilarin normaalivoimien N ei oleteta vaikuttavan viereisten kehien kohdilla kattolevyn vaakajäykkyyksiin k .



Kuva 9. Mastopilarin nurjahdusmalli, jossa k tarkoittaa kattolevyn jäykkyyttä.

Katon vaakajäykkyys on pienimmillään siellä missä vaakasiirtymä on suurin, joten käytetään siinä laskettua jäykkyyttä mastopilarin nurjahdustuen konservatiivisena jousivakiona, joka voidaan kirjoittaa yhtälön (10) avulla muodossa

$$k = \frac{M}{\max \delta_{ij}} \quad (14)$$

Nurjahduspituus H_n kuvan 9 mukaisesti tuetulle pilarille saadaan lähteen [10] mukaisesti ratkaistua yhtälöstä

$$H_n = H \frac{\pi}{\varepsilon} \quad (15)$$

jossa ε määritetään numeerisesti siten, että

$$\frac{\varepsilon}{\tan \varepsilon} = \frac{1}{1 - \frac{2EI\varepsilon^2}{kH^3}} \quad (16)$$

Nurjahduspituuden määrittämisen jälkeen nurjahduskuorma saadaan Eulerin nurjahduskaavasta

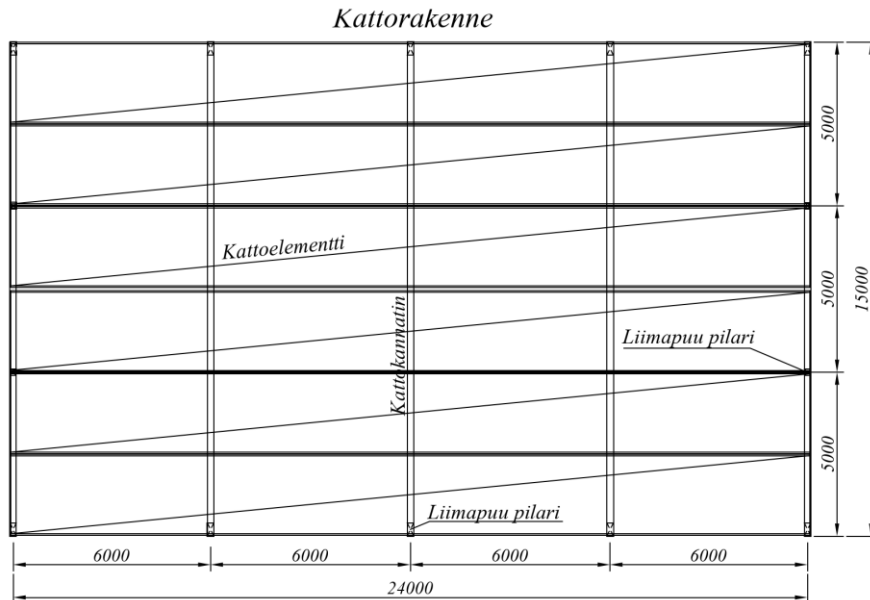
$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{H_n^2} \quad (17)$$

Esimerkki - kattoelementeillä jäykistetty halli

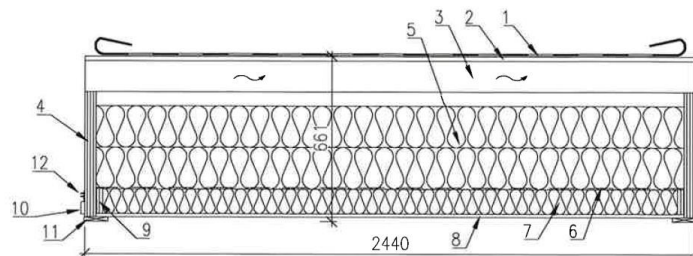
Lähtötiedot

Tarkastellaan kuvassa 10 esitettyä puuhallin kattoa, jonka kattorakenteina käytetään kuvassa 11 esitettyjä kattoelementtejä. Kehä- ja pääty pilarit on valmistettu liimapuusta GL30C. Kehän kattokannatin on liimapuupalkki, ristikkokannatin tai vastaava [1]. Katon kokonaiskorkeus pilarista ylöspäin oletetaan olevan 1.8 m. Esitetyissä laskelmissa tarkasteltiin vain tuulikuormien vaikutuksia, ja tuulesta aiheutuvien vaakakuormien oletetaan

vaikuttavan pilareiden kohdilla pilareiden yläpäissä kehälinjoilla. Paine- ja imupuolella tuulipinnoiksi oletetaan puolet kehäpilareiden korkeudesta lisättynä katon kokonaiskorkeudella. Vesikaton kallistusta ei erikseen oteta huomioon. Taulukossa 2 on annettu laskennan lähtötiedot, ja annetuissa kuormituksissa on jo huomioitu kuormakerroin 1.5.



Kuva 10. Tarkasteltavan puurunkoisen hallin katto.



1. PVC-yksikerroskate 1,2
2. OSB-levy 18 mm
3. Koolaus 123x42 C24 k/k 610 / tuuletusväli
4. Kerto-S reunapalkit 45x500
5. Mineraalivilla 0,037 W/mK (165+165) 330mm, T2, A2-s1,d0, yläpinnan luokitus B-s1,d0
6. Höyrynsulkumuovi
7. Koolaus ST C24 48x98 k/k 600 + mineraalivilla 0,037 W/mK 100mm, A2-s1,d0, yläpinnan luokitus B-s1,d0
8. Kipsilevy 13 mm (Tyyppi A)
9. Kerto-T reunarima 27x100
10. Vaneririma 15x50
11. Saumalauta ST 18x95
12. EPDM

Kuva 11. Kattoelementti [11].

Taulukko 2. Lähtötiedot.

Katto				
Katon pituus L (m)	Kehäväli l (m)	Katon leveys A (m)	Elementin leveys + sauma (m)	Elementtien lukumäärä M
24	6	15	2.5	6
Kehäpilari				
Korkeus H (m)	Poikkileikkaus (mm ²)	Kimmoduuli (MPa)	Taivutusjäykkyys EI (Nmm ²)	Joustokerroin c_T (N/mm)
5	165x495	13500	2.251E+13	1.851E-03
Kuormat				
Tuulipinta/kehäväli (m ²)	Tuulenpaine (kN/m ²)	Tuulen imupaine (kN/m ²)	Pistekuorma P^p	Pistekuorma P^c
25.8	0.5	0.3	19.35	11.61

Hallin mitoitus tehdään neljällä eri tavalla. Kappaleessa 3.2 mitoitetaan mastopilarit siten, että ne ottavat vastaan kaiken tuulikuorman ja kattoelementit jäykistävät rakennuksen vain sisäisiä kiepahdustuennasta syntyviä voimia vastaan. Kappaleessa 3.3 mitoitetaan halli siten, että laskelmissa hyödynnetään kattoelementtien levyjäykistyskyky siten, että elementit toimivat joko itsenäisesti, tai siten, että yhden lappeen elementit toimivat yhdessä, tai että koko katto toimii yhtenä levykenttänä. Vierekkäiset kattoelementit saadaan toimimaan yhdessä, kun elementtien väliset pituussaumat toteutetaan siten, että ne pystyvät siirtämään leikkausvoimia saumojen suunnassa. Tämä saattaa vaatia lisärakenteita totuttuihin ratkaisuihin, mutta ne pystyttäneen toteuttamaan kustannustehokkaasti.

Mitoitus ilman levyjäykistystä

Tässä tapauksessa pilarit ovat mastopilareita ja niiden teoreettinen nurjahduspituus on $2H$, jossa H on pilarin korkeus. Paine- ja imupuolen vaakakuormien summa yhdessä kehässä kohdistuu tasan kahdelle kehäpilarille. Pilareiden siirtymät kattotasossa lasketaan kaavan (7) mukaisesti. Kaikkiin pilareihin kohdistuu tässä tapauksessa sama kuorma. Tulokset laskennasta on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Mitoitus ilman levyjäykistystä.

Nurjahduspituus H_n (m)	Nurjahduskuorma N_{cr} (kN)	Pilarikuormat T_i (kN)	Katon siirtymät δ_i kehälinjoilla (mm)
10.00	2222	15.5	28.7

Mitoitus levyjäykistettynä rakenteena

Tarkastellaan ensin tapausta, jossa jokainen kuudesta kattoelementistä toimii itsenäisenä jäykisteenä, $M = 6$. Kattoelementin lähtötiedot on annettu taulukossa 4. Pääkannattajat elementeissä ovat kuvan 11 mukaisesti Kerto-S palkkeja 45x500 mm², jäykistävät levyt ovat kipsilevyjä, jotka on ruuvattu puusoiroihiin. Taulukossa 4 annetut arvot ovat tyyppilisiä kipsilevyn ja sen kiinnikkeiden arvoja.

Taulukko 4. Kattoelementin lähtötiedot.

E_p MPa	A_p mm ²	h_p mm	$(EI)_T$ Nmm ²	t mm	G MPa	a mm	b mm	c mm	k_c N/mm	S kN
13800	22500	2395	8.905E+14	13	200	2350	1200	200	650	3666

Kaavan (10) mukaiset siirtymäkertoimet δ_{ij} voidaan laskea Mohrin integraalitalukoiden mukaan. Merkitään kehäväliä symbolilla l jolloin voidaan kirjoittaa

$$\delta_{11} = \delta_{33} = \frac{3l^3}{4(EI)_T} + \frac{3l}{4S} = 1.82 \times 10^{-04} + 1.23 \times 10^{-03} = 1.41 \times 10^{-03} \text{ mm/N} \quad (18)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{32} = \delta_{23} = \frac{11l^3}{12(EI)_T} + \frac{l}{2S} = 2.22 \times 10^{-04} + 8.18 \times 10^{-04} = 1.04 \times 10^{-03} \frac{\text{mm}}{\text{N}} \quad (19)$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = \frac{7l^3}{12(EI)_T} + \frac{l}{4S} = 1.41 \times 10^{-04} + 4.09 \times 10^{-04} = 5.51 \times 10^{-04} \text{ mm/N} \quad (20)$$

$$\delta_{22} = \frac{4l^3}{3(EI)_T} + \frac{l}{S} = 3.23 \times 10^{-04} + 1.64 \times 10^{-03} = 1.96 \times 10^{-03} \text{ mm/N} \quad (21)$$

Tuloksista nähdään, että leikkausmuodonmuutos on määräävä siirtymiä laskettaessa. Pilarivoimat ja siirtymät kehälinjoilla voidaan nyt laskea kaavoilla (11) ja (13), ja saadut tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tulokset, kun kaikki kuusi kattoelementtiä toimivat erillisinä.

	Linja 1	Linja 2	Linja 3
Pilarivoima T_i (kN)	5.2	6.9	5.2
Vaakasiirtymä δ_i (mm)	9.7	12.7	9.7
Mastopilarin jousivakio $k/2$ (N/mm)	2129	1531	2129
Elementin voimat F_i (kN)	3.4	2.9	3.4
Nurjahduspituus H_n (mm)	4710	5225	4710
Nurjahduskuorma N_{cr} (kN)	10018	8048	10018
Nurjahduspituus / Nurjahduspituus ilman kattoelementtejä	0.47	0.53	0.47
Nurjahduskuorma / Nurjahduskuorma ilman kattoelementtejä	4,51	3,62	4,51

Tuloksista nähdään, että pilarikuormat pienentyvät noin kolmasosaan edellisestä tapauksesta ja kehien siirtymät pienentyvät alle puoleen. Nurjahduspituudet pienenevät huomattavasti ja samoin nurjahduskuormat kasvavat moninkertaisiksi. Tuloksista nähdään, että katon levyvaikutuksella on suuri vaikutus pilarikuormiin ja katon vaakasiirtymiin. Pilareiden vaakakuormitukset ja nurjahduspituudet pienenevät huomattavasti verrattuna tapaukseen, jossa pilarit yksin ottavat vastaan katon vaakakuormat.

Tarkastellaan seuraavaksi tapauksia, joissa yhden lappen kolme elementtiä tai koko katon kuusi elementtiä toimivat yhdessä. Edellisessä tapauksessa muuttuja M saa arvon 2 ja jälkimmäisessä tapauksessa arvon 1. Lähtötiedot näihin tapauksiin on esitetty taulukossa 6, ja tulokset vastaavasti taulukoissa 7 ja 8.

Taulukko 6. Lähtötiedot katosta, kun elementtejä on yhdistetty toimimaan yhdessä.

	h_M (mm)	$(EI)_T$ (Nmm ²)	S (kN)
Lappeiden elementit yhdistetty	5000	7.763E+15	1.100E+07
Koko katon elementit yhdistetty	12500	4.852E+16	2.200E+07

Taulukko 7. Laskennan tulokset, kun kummankin lappeen kolme elementtiä toimivat yhdessä.

	Linja 1	Linja 2	Linja 3
Pilarivoima T_i (kN)	4.8	6.3	4.8
Vaakasiirtymä δ_i (mm)	8.9	11.7	8.9
Mastopilarin jousivakio $k/2$ (N/mm)	2325	1716	2325
Elementin voimat F_i (kN)	10.7	9.2	10.7
Nurjahduspituus H_n (mm)	4576	5059	4576
Nurjahduskuorma N_{cr} (kN)	10610	8681	10610
Nurjahduspituus / Nurjahduspituus ilman kattoelementtejä	0.46	0.51	0.46
Nurjahduskuorma / Nurjahduskuorma ilman kattoelementtejä	4.77	4.91	4.77

Taulukko 8. Laskennan tulokset, kun koko katon kuusi elementtiä toimivat yhdessä.

	Linja 1	Linja 2	Linja 3
Pilarivoima T_i (kN)	4.7	6.1	4.7
Vaakasiirtymä δ_i (mm)	8.7	11.3	8.7
Mastopilarin jousivakio $k/2$ (N/mm)	2405	1794	2405
Elementin voimat F_i (kN)	21.6	18.8	21.6
Nurjahduspituus H_n (mm)	4527	4985	4527
Nurjahduskuorma N_{cr} (kN)	10844	8942	10844
Nurjahduspituus / Nurjahduspituus ilman kattoelementtejä	0.45	0.50	0.45
Nurjahduskuorma / Nurjahduskuorma ilman kattoelementtejä	4.88	4.02	4.88

Taulukoissa 7 ja 8 esitetyistä tuloksista nähdään, että pilarivoimat ja vaakasiirtymät eivät pienene enää paljon taulukossa 5 esitetyistä tuloksista. Mastopilarien jousivakiot ovat suurimmat taulukossa 8, mikä vaikuttaa nurjahduspituuksiin ja nurjahduskuormiin.

Levyjäykistyksen suhteellisen vaikutuksen havainnollistamiseksi toistetaan laskelmat vielä tapauksessa, joissa pilareiden jäykkyyksiä ei oteta huomioon lainkaan, vaan katon vaakakuormat otetaan vastaan vain kattotason levyjäykisteillä. Tällöin laskennan tilanne vastaa sitä, että mastopilareiden sijaan käytettäisiin kummastakin päästä nivelellisesti tuettuja pilareita. Laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Katon vaakasiirtymät (mm) kun halli on jäykistetty pelkällä levyjäykistyksellä.

	Linja 1	Linja 2	Linja 3
Kuusi erillistä kattoelementtiä	15.5	20.9	15.5
Kummankin lappeen elementit yhdistetty	13.6	18.3	13.6
Koko katon kuusi elementtiä yhdistetty	13.0	17.3	13.0

Kun taulukon 9 arvoja verrataan taulukossa 3 esitettyyn, pelkän mastojäykistetyn hallin katon siirtymäarvoon 28.7 mm nähdään, että katon levyjäykistys on tehokkaampi kuin mastojäykistys. Tapaus, jossa koko katto on yhdistetty yhdeksi levyksi, on luonnollisesti tehokkain, koska siirtymät ovat silloin pienimmät. Laskennan tulosten mukaan nurjahduspituuden arvo $1.05H = 5225$ mm on varmalla puolella kaikissa lasketuissa tapauksissa, kun katto otetaan huomioon jäykistyksessä. Tämä arvo on 47 % verrattuna nurjahduspituuteen, kun pilari oletetaan mastoksi.

Edellä esitetyt laskelmat perustuvat teorian mukaan siihen, että kattoelementit sekä niiden väliset liitokset pystyvät kantamaan niihin levyjäykistyksessä aiheutuvat rasitukset. Tarkastellaan seuraavaksi levyjäykistystä näiltä osin. Katon hyödyntäminen levyjäykistyksessä aiheuttaa normaalijännityksiä kattoelementtien pääkannattajiin, leikkausjännityksiä levyihin sekä leikkausvoimia levyjen kiinnikkeisiin.

Suurimmat normaalijännitykset kattoelementtien pääkannattajissa vaikuttavat jännelälin keskellä kuvan 2 mukaisesti. Kuhunkin elementtiin vaikuttavat, kuvassa 6 esitetyt kuormat F_i voidaan laskea kaavalla (13). Kun kuormalinjoja on kolme, niin kattoelementin vasemmassa päässä vaikuttava tukireaktio R_L on

$$R_L = \frac{3F_1 + 2F_2 + F_3}{4} \quad (22)$$

ja vastaavasti katon oikeassa päässä vaikuttava tukireaktio R_R on

$$R_R = \frac{F_1 + 2F_2 + 3F_3}{4} \quad (23)$$

Kuormitus on symmetrinen, joten kattoa rasittava suurin momentti taivutusmomentti $M_{t,max}$ on

$$M_{t,max} = 2lR_L - lF_1 = lF_1 + lF_2 \quad (24)$$

Normaalivoima N_t joka vaikuttaa kattoelementtien pääkannattajissa on erillisten elementtien tapauksessa

$$N_t = \frac{M_t}{h_p} \quad (25)$$

ja jos on yhdistetty M_k kattoelementtiä toisiinsa, niin reunimmaisten elementtien kahteen pääkannattajaan kohdistuu normaalivoima

$$N_t = \frac{M_t}{h_{M_k}} \quad (26)$$

Vastaavasti normaalijännitys σ pääkannattajissa on erillisten elementtien tapauksessa

$$\sigma = \frac{N_t}{A_p} \quad (27)$$

ja yhdistettyjen elementtien tapauksessa

$$\sigma = \frac{N_t}{2A_p} \quad (28)$$

Taulukoon 10 on koottu edellä esitetyn mukaan lasketut normaalijännitykset kattoelementtien pääkannattajissa eri kattorakenteissa.

Taulukko 10. Kattoelementtien pääkannattajien normaalijännitykset eri kattorakenteissa. Suure h_x viittaa kaavojen (25) tai (26) nimittäjään ja suure A_x viittaa kaavojen (27) tai (28) nimittäjään.

Kattorakenne	h_x (mm)	A_x (mm ²)	M_t (kNm)	N_t (kN)	σ (MPa)
Kuusi erillistä kattoelementtiä	2395	22500	38	16	0.70
Kummankin lappeen elementit yhdistetty	5000	45000	119	24	0.53
Koko katon kuusi elementtiä yhdistetty	12500	45000	242	19	0.43

Taulukossa 10 esitetyistä tuloksista nähdään, että levyjäykistyksestä aiheutuvat normaalijännitykset kattoelementtien pääkannattajissa jäävät kaikissa tapauksissa varsin pieniksi verrattuna pääkannattajissa käytetyn puutuotteen lujuuteen.

Levyjen ja niiden kiinnikkeiden suurimmat rasitukset ovat kuvan 2 mukaisesti puolestaan kattoelementtien päissä. Levyjen leikkausjännitykset ovat

$$\tau = \frac{Q}{Dt} \quad (29)$$

jossa Q on leikkausvoima, D on levyjen kokonaiskorkeus ja t on levyjen paksuus. Kaavalla (29) määritetyt leikkausjännitykset eri kattorakenteille on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Levyjen leikkausjännitykset eri kattorakenteissa.

	D (mm)	t (mm)	Q (kN)	τ (MPa)
Kuusi erillistä kattoelementtiä	2350	13	4.9	0.16
Kummankin lappeen elementit yhdistetty	7050	13	15.2	0.17
Koko katon kuusi elementtiä yhdistetty	14100	13	31.0	0.17

Kattoelementissä levyn kiinnikkeiden leikkausvoimat r saadaan jakamalla niissä vaikuttava leikkausvoima kiinnikkeiden lukumäärällä

$$r = \frac{Q}{n_t} \quad (30)$$

jossa n_t on kiinnikkeiden lukumäärä yhdellä leikkausvoiman suuntaisella elementin sivulla. Tulokset on annettu taulukossa 12 eri kattorakenteille.

Taulukko 12. Kiinnikevoimat eri kattorakenteilla.

	n_t	r (N)
Kuusi erillistä kattoelementtiä	12*	404
Kahden lappeen kolme elementtiä yhdistetty	36**	422
Koko katon kuusi elementtiä yhdistetty	72***	430

*) $n_t = a/c = 2350/200 = 11.75 \approx 12$, **) $n_t = 3 \cdot 12 = 36$, ***) $n_t = 6 \cdot 12 = 72$.

Taulukoista 11 ja 12 nähdään, että levyjen leikkausjännitykset sekä kiinnikkeiden leikkausvoimat pysyvät melko pieninä ja ovat suuruusluokaltaan tyypillisen kokoisia normaaleille levyille ja kiinnikkeille.

Yhteenveto

Artikkelissa on tarkasteltu kattoelementtien hyödyntämistä puurunkoisen hallin jäykityksessä ulkoisia vaakakuormia vastaan. Puurakenteiset kattoelementit eroavat merkittävästi vastaavista teräsrakentamisen tuotteista sekä rakenteeltaan että liitosten osalta. Tämän vuoksi perinteisiä teräsrakentamiseen tehtyjä levyjäykistysohjeita ei voida suoraan soveltaa, vaan kattoelementin tyypistä riippuen teoriatarkastelut eroavat toisistaan. Tässä artikkelissa on tarkasteltu kertopuurunkoista kipsilevytettyä kattoelementtiä, jonka pituus on oleellisesti suurempi muihin mittoihin verrattuna. Kattoelementti on mallinnettu leikkausmuodonmuutokset huomioon ottavalla palkkiteorialla, ja artikkelissa on johdettu pilarien vaakavoimien ja nurjahduspituuden sekä kattotason vaakavoimien ja -siirtymien lausekkeet. Artikkelissa esitetyissä laskelmissa on vertailtu tuloksia itsenäisesti toimivien sekä toisiinsa kiinnitettyjen kattoelementtien tapauksissa. Laskelmissa on myös tarkasteltu levyjäykistyksestä liittimien sekä levyihin syntyviä rasituksia ja niiden suuruusluokkia. Tulosten perusteella kattoelementtien käyttö levyjäykisteenä ei lisää merkittävästi kattoelementin sisäisiä rasituksia, mutta toisaalta pienentää merkittävästi katon vaakasiirtymiä sekä kehäpilareiden nurjahduspituuksia. Artikkelissa esitetyllä lähestymistavalla saadut tulokset ovat erittäin lupaavia, jonka vuoksi on perusteltua tutkia laajemminkin kattoelementtien hyödyntämistä puurakenteisten hallien mitoituksessa. Tällöin tutkittaviksi asioiksi nousevat etenkin kattoelementtien välisten kiinnitysten rakenneratkaisut, kattoelementin sisäisten liitosten tarkempi käsittely, erilaisten jäykistävien levyjen, kuten vaneri, erilaiset liimatut levyt, teräslevyt ja -vanteet jne, käyttö sekä koko hallirakennuksen optimaalinen suunnittelu.

Lähteet

- [1] Salonen K., Keronen A., Lod T. *Puuhallin suunnittelu*. Puuinfo. 2009.
- [2] Bryan E. R. *The stressed skin design of steel buildings*. Lockwood. 1973.
- [3] Davies J.M. Developments in stressed skin design, *Thin-Walled Structures* 44 (2006) 1250–1260 <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.002>
- [4] Davies J.M., Bryan E.R. *Manual of stressed skin diaphragm design*, Granada, 1982

- [5] *European Recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm*. European Convention for Constructional Steelwork, No. 88, 1995.
- [6] Höglund T. *Stabilisation by stressed skin diaphragm action*. Stålbyggnadsinstitutet. 2002.
- [7] Brockmann M. *Levyjäykistyksen laskentamenetelmien kehittäminen*. Diplomityö, TKK, 2009.
- [8] Hietikko-Kaukola H. *Muotolevyn vaikutus teräsrunгон rakenneanalyysissä*, Diplomityö, Tampereen Yliopisto, 2022.
- [9] RIL 205-1-2017 Puurakenteiden Suunnitteluohje. RIL. 2017.
- [10] Roik K. *Vorlesungen Über Stahlbau, Grundlagen*. Ernst & Sohn. 1983.
- [11] Lausunto kattoelementin palonkestävyydestä, Lapwall. 2018. Viitattu 7.6.2023
<https://lapwall.fi/dokumentit/>

Sami Pajunen, Markku Heinisuo
Tampereen yliopisto
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto (Hervannan kampus)
sami.pajunen@tuni.fi, markku.heinisuo@tuni.fi