

KAKSIPAARRETASOISEN TERÄKSISEN AVARUUSRISTIKON GEOMETRIAN OPTIMOINTI

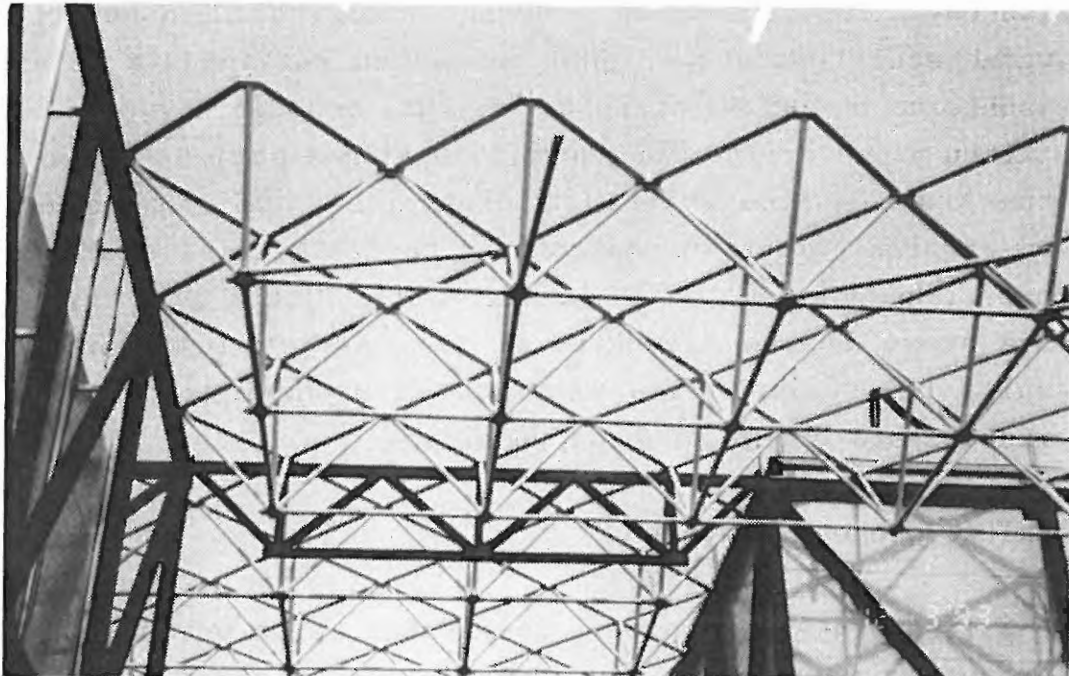
Aleksi Rotko

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 26
No 3 1993, pp. 29 - 46

Tiivistelmä: Avaruusristikko on rakennejärjestelmänä Suomessa vielä uusi, eikä eri geometriatyyppeiden soveltuvuutta maamme olosuhteisiin aikaisemmin juurikaan tunnettu. Geometrian optimoimiseksi ja sivusuhteiden muutoksen vaikutuksen selvittämiseksi vertailtiin keskenään viittä geometriatyyppeä. Kustakin tyyppistä tutkittiin kaksi tapausta: kaikilta sivuiltaan vapaasti tuetut $36 \times 36 \text{ m}^2$:n neliö sekä $36 \times 72 \text{ m}^2$:n suorakaide (sivusuhte 1:2). Ristikot analysoitiin FEM-3D-ohjelmalla, ja niille määritettiin optimiprofiilit Eurocode 3-ohjeen mukaan. Optimoinnin tuloksia on vertailtu keskenään sekä neliö- että suorakaidetapauksissa. Tutkimus kuului osana kirjoittajan diplomityöhön.

Johdanto

Avaruusristikot koostuvat pääsääntöisesti suuresta joukosta yksinkertaisia, standardikokoisia, esivalmistettuja elementtejä, jotka yhteenliitettynä muodostavat kevyen ja jäykän kolmiulotteisen rakenteen. Tällaisella rakenteella, jossa kuormitus jakautuu tasaisesti moneen eri suuntaan, saavute-



Kuva 1. Sirius-avaruusristikkoa kauppakeskus Myyrmannissa Vantaalla.

taan luonnollisesti useita etuja perinteisiin tasorakenteisiin verrattuna. Avaruusristikot ovatkin saavuttaneet maailmalla suosiota tehokkuutensa, kapasiteettinsa, joustavuutensa sekä ulkonäkönsä ansiosta. Erityisen suosittuja ne ovat olleet rakenteissa, joiden jännevälit ovat suuria.

Suomessa tämä rakennejärjestelmä on vielä uusi. Muutamana viime vuotena on jo joitakin kohteita (mm. Helsinki-Vantaan kotimaan terminaali) toteutettu käyttäen tuotenimellä **Sirius** tunnettua PPTH TERÄS OY:n valmistamaa avaruusristikkosysteemiä.

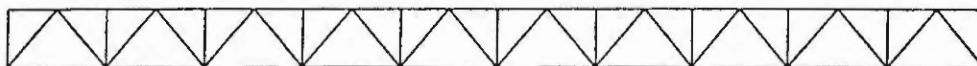
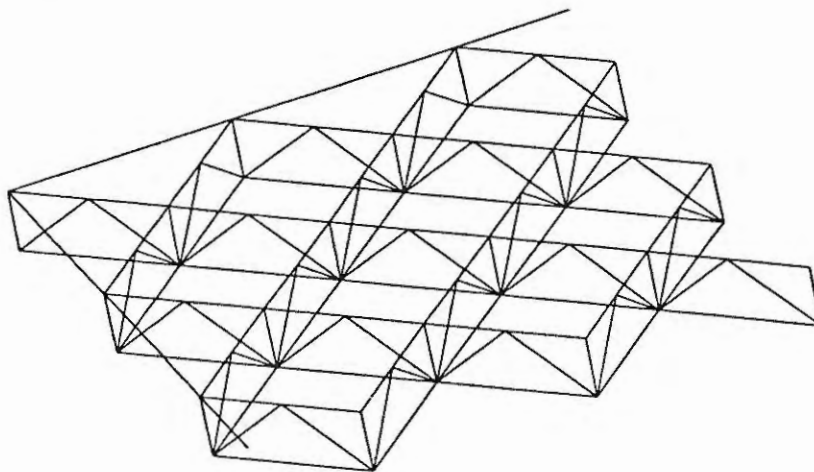
Ehkä tärkein avaruusristikon sovellus on mm. **Sirius**-ristikon edustama ns. kaksipaarretasoinen ristikko (*double-layer grid* kuva 1). Se koostuu kahdesta yhdensuuntaisesta paarretasosta ja näitä yhdistävistä diagonaaleista ja on saavuttanut erityistä suosiota, koska sitä voidaan levymäisenä rakenteenä hyödyntää sekä ylä- että välipohjakonstruktioissa.

Avaruusristikon geometriatyypin valintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta rakenteen tarjoamat edut pystytäisiin mahdollisimman tarkkaan hyödyntämään. Valintaan vaikuttavia muuttujia on useita (kuormitus, jännemitta, sivusuhteet, tuentatapa, jne) ja niiden keskinäisiä vaikutussuhteita on vaikea arvioida /1/. Eri geometriatyyppejä on tutkittu ja vertailtu eri puolilla maailmaa paljon /2,3,4,5/, mutta koska lähtöarvoilla on olennainen vaikutus geometriavertailun tuloksiin, katsottiin tarpeelliseksi suorittaa geometriatyypien vertailu lähtöarvoilla, jotka ovat tyyppilisiä juuri Suomen olosuhteissa (mm. suuret lumikuormat). Samalla haluttiin tietoa ristikon sivusuhteiden muutosten vaikutuksesta eri geometriatyyppeihin.

Tutkitut geometriatyypit

Kirjallisuustutkimuksen perusteella valittiin vertailuun seuraavat viisi geometriatyyppeä, joille on tässä käytetty

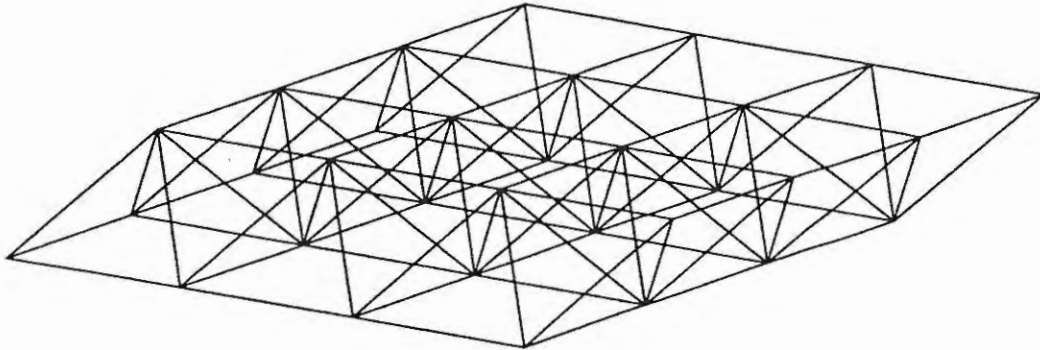
niiden yleisesti kirjallisuudessa esiintyviä englanninkielisiä nimiä.



Kuva 2. Lattice grid with K-bracing (diagonal). Moduuli $m_d = 4.24$ m, ruudun halkaisija 6.0 m ja rakennekorkeus $h = 2.12$ m.

Tyyppi 1 (*lattice grid with K-bracing*, kuva 2) muodostuu toisensa kohtisuorasti leikkaavista tasoristikoista, jotka on asetettu diagonaalisesti siten, että ne muodostavat 45° :n kulman rakenteen reunojen kanssa. Käytännössä tällainen rakenne kannattaa toteuttaa siten, että jomman kumman suunnan ristikot valmistetaan jatkuvina ja leikkaavat ristikot pätkitään täytepaloiksi. Myös tutkittu rakennemalli toteutettiin näin, eli ylä- ja alapaarretason sauvoista tehtiin toiseen suuntaan jatkuvia läpi rakenteen. On huomattava, että koska osa vapausasteista on näin kiinnitetty, ei rakennemalli enää edusta puhdasta avaruusristikkoa.

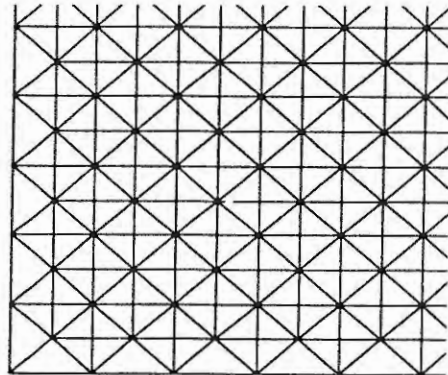
Tyyppi 2 (*square on square offset*, kuvat 3 ja 4) muodostuu neliöpohjaisista pyramidielementeistä. Pyramidien pohjat muodostavat yläpaarretason, jonka sauvat ovat kohtisuorassa ristikon reunoja vastaan. Alapaarretaso muodostuu puolestaan pyramidien huippuja yhdistävistä sauvoista, jotka ovat yläpaarresauvojen kanssa samansuuntaisia.



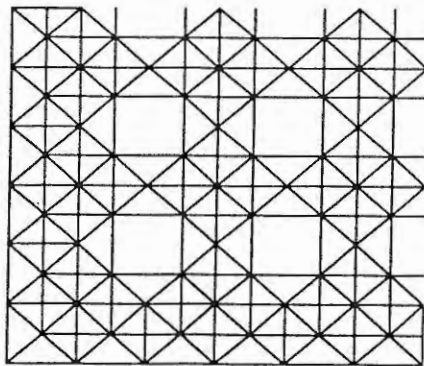
Kuva 3. Square on square offset. Moduuli $m_d = 3.0$ m ja rakennekorkeus $h = 2.12$ m.

Molemmat paarretasot muodostavat siis samankokoisia neliöitä. Paarretasot on kuitenkin limitetty toisiinsa nähden siten, etteivät niiden solmut enää ole samassa pystytasossa, vaan sijaitsevat aina vastakkaisen tason moduulineliön keskellä muodostaen näin yhdessä diagonaalien kanssa todellisen avaruusristikon. Näin saadaan erittäin tiheä ja jäykkä rakenne, missä sauvojen ja solmujen lukumäärä on kuitenkin suuri.

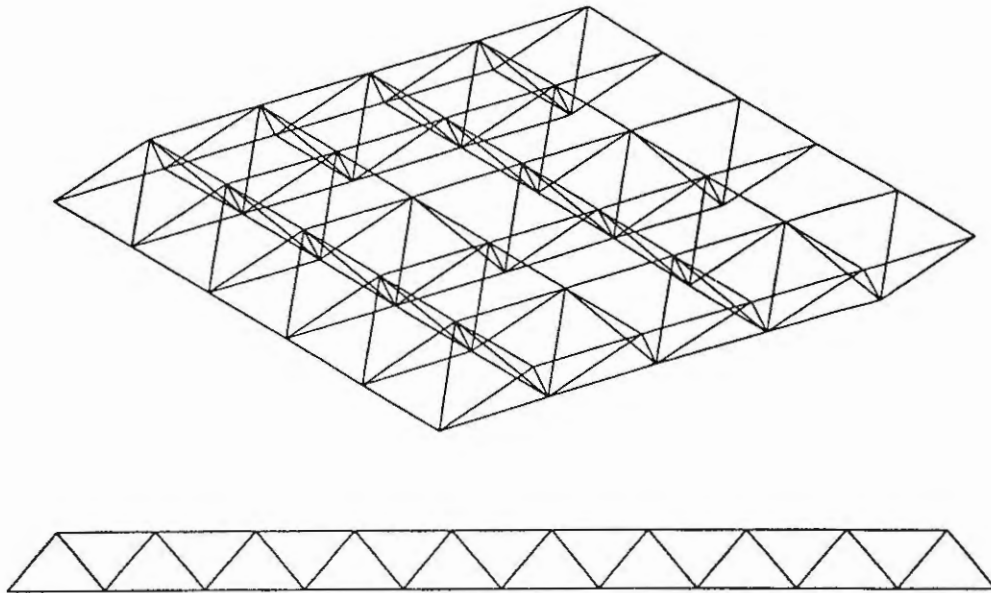
Tyyppi 3 (*square on larger square*, kuvat 5 ja 6) saadaan poistamalla tyyppin 2 ristikosta puolet alapaarteen sauvoista sekä neljännes diagonaaleista. Tuloksena on ns. **aukotettu avaruusristikko** (*space grid with internal*



Kuva 4. Square on square offset, tasopiirros (osa).



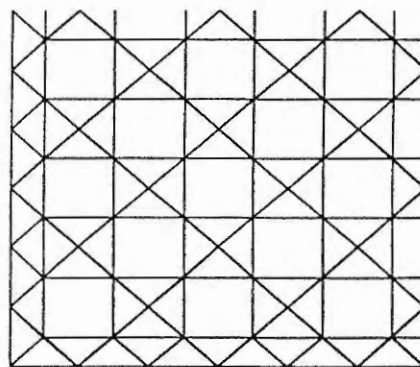
Kuva 5. Square on larger square, tasopiirros (osa).



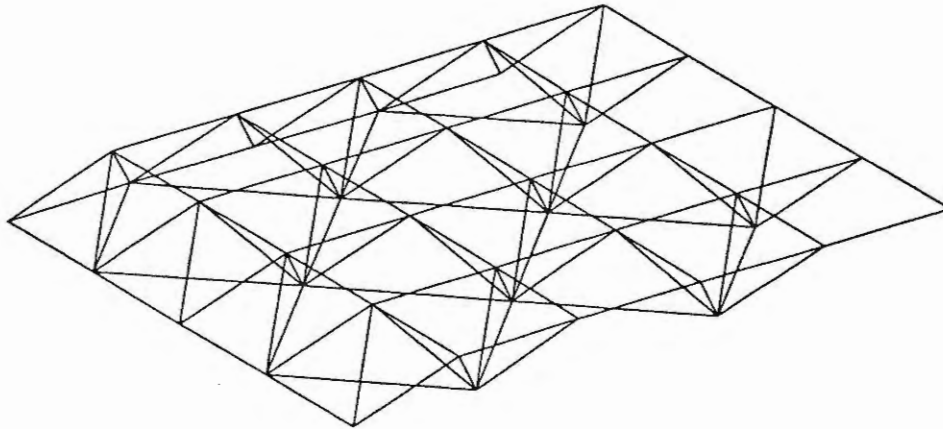
Kuva 6. Square on larger square. Moduuli $m_d = 3.0$ m (alapaarretasossa 6.0 m) ja rakennekorkeus $h = 2.12$ m.

openings). Yläpaarteen sauvajako pysyy siis samana, mutta alapaarretason sauvajako harvenee puoleen siten, että alapaarteen muodostamat neliöt ovat sivumitoiltaan kaksinkertaisia yläpaarteen neliöihin verrattuna. Poistamalla sauvoja vähemmän kuormitetuilta alueilta saadan kuormitus jakautumaan tasaisemmin jäljelle jäävään rakenteeseen, ja samalla solmujen ja sauvojen lukumäärä vähenee. Nyrkkisääntönä kannattaa muistaa, että tässä systeemissä alapaarteeseen syntyvät voimat ovat noin kaksinkertaisia yläpaarteeseen verrattuna.

Tyyppin 4 (square on diagonal, kuvat 7 ja 8) voidaan ajatella muodostetun tyyppistä 2 kiertämällä alapaarretasoa 45° rakenteen diagonaalien suuntaiseksi. Alapaarteen sauvajako joudutaan nyt sovittamaan yläpaarteen perusmoduuliin, jolloin sauvajako harvenee ja sauvojen pituus kasvaa. Samalla poistetaan puolet diagonaaleista.

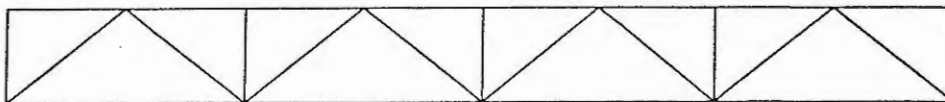
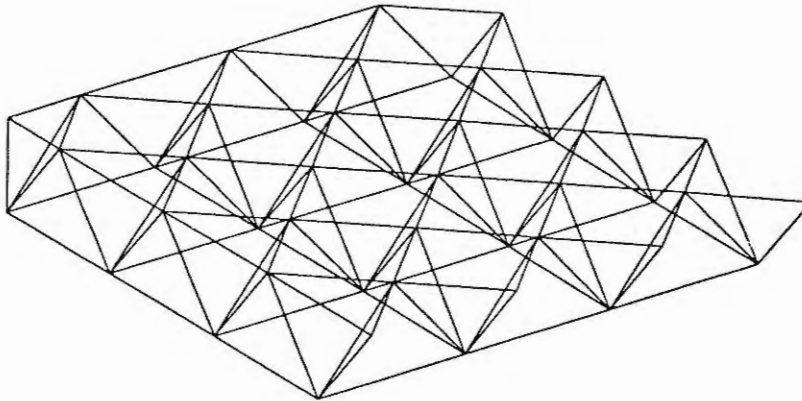


Kuva 7. Square on diagonal, tasopiirros (osa).



Kuva 8. Square on diagonal. Moduuli $m_d=3.0$ m (alapaarteen ruudun sivu 4.24 m ja halkaisija 6.0 m), rakennekorkeus $h=2.12$ m.

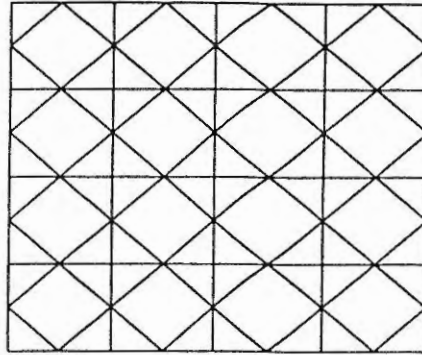
Koska alapaarresauvat ovat pääasiassa vedettyjä, ei pituuden lisäyksestä ole haittaa. Päinvastoin järjestely yleensä parantaa rakenteen tehokkuutta. Solmuja ja sauvoja on myös vähemmän kuin edellisissä tyypeissä.



Kuva 9. Diagonal on square. Moduuli $m_d = 3.18$ m (alapaarteen ruudun sivu 4.5 m) ja rakennekorkeus $h = 2.12$ m.

Tyyppi 5 (*diagonal on square*, kuvat 9 ja 10) muistuttaa järjestelyltään tyyppiä 4. Alapaarteen sijasta on nyt kui-

tenkin yläpaarretasoa kierretty 45°. Samalla poistetaan taas puolet diagonaalisauvoista. Alapaarreen sauvajako joudutaan jälleen sovittamaan yläpaarreen moduliin siten, että alapaarresauvat yhdistävät yläpaarreen pyramidien huiput. Yläpaarretasoon tarvitaan nyt ylimääräiset reunapalkit. Tästä huolimatta on tässä ristikossa vertailutyypeistä vähiten sauvoja ja solmuja. Alapaarretason sauvat ovat jälleen yläpaarresauvoja pitempiä. Tyyppi 5 edustaa geometrialtaan **Sirius**-ristikkoa.



Kuva 10. Diagonal on square, tasopiirros (osa).

Koska rakennekorkeus haluttiin pitää kaikilla vertailuristikoidella samana, oli tämän tyyppin sovittaminen valittuun jännemittaan hankalaa. Lopulta päädyttiin ratkaisuun, jossa diagonaalisauvat ovat hieman yläpaarresauvoja lyhyempiä. Diagonaalien ja yläpaarretason väliseksi kulmaksi muodostuu tällöin 43.3°, mikä poikkeaa hieman optimaalisesta 45°:sta ja heikentää näin hiukan rakenteen tehokkuutta.

Lähtöarvot ja -oletukset

Valituille viidelle geometriatyypille optimoitiin kaksi rakenneratkaisua:

a) 36 m x 36 m neliö ja b) 36 m x 72 m suorakaide.

Optimointikriteeriksi valittiin rakennepaino, koska esim. liitosten valmistuskustannuksista ei tietoa vielä ole riittävästi saatavissa. Eri tyyppien keskinäisessä vertailussa tulee materiaalimenekin lisäksi ottaa huomioon myös solmujen ja sauvojen lukumäärä, koska etenkin liitosten lukumäärä vaikuttaa yleensä merkittävästi ristikon kustannuksiin.

Vertailuristikoiden mitoitus suoritettiin Eurocode 3:n mukaan käyttäen QSE Space-nimistä FEM-3D-ohjelmaa. Rakenne-

malli muodostettiin palkkielementeistä, jolloin yläpaarresauvoille voitiin sallia myös taivutusmomenttia. Kuormien ja materiaalin osavarmuuskertoimet valittiin SRMK:n osan B7 mukaan. Rakenteiden analysointi ja sauvojen mitoitus suoritettiin seuraavien lähtöarvojen ja oletusten perusteella:

- 1) Kuormitus: kattorakenteen paino $g_k = 0.35 \text{ kN/m}^2$
hyötykuorma $q_k = 0.25 \text{ kN/m}^2$
lumikuorma $q_l = 1.80 \text{ kN/m}^2$

Ristikon oman painon QSE Space laskee automaattisesti.

- 2) Ristikot noudattavat lineaarista kimmoteoriaa.
3) Kaikki liitokset oletetaan nivelellisiksi (poikkeuksena tyyppi 1).
4) Sauvojen nurjahduspituus on solmujen välinen etäisyys.
5) Rakennekorkeus $h = 2.12 \text{ m}$ ($L/17$) siten, että diagonaali- ja yläpaarresauvat ovat yhtä pitkiä.
6) Kussakin kolmesta rakenneosasta (yläpaarre, alapaarre, diagonaalit) käytetään max. kolmea eri profiilikokoa, eli kussakin ristikossa on enintään 9 profiilia.
7) Käytetään terästä Fe 510 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$).
8) Koska avaruusristikoissa ei voida erottaa primääri- ja sekundäärirakenteita, on suurimmaksi sallituksi taipumaksi käyttörajatilassa valittu $L/250$ (keskiarvo B7:n vaatimuksista primääri- ja sekundäärirakenteille)
9) Ristikot on tuettu alapaarretasosta vapaasti ympäri reunan 6 m:n välein. Poikkeuksen muodostaa tyyppi 5, jossa tukien välinen etäisyys on 4.5 m.
10) Käytetään RHS-neliöputkiprofiileja (nurjahduslk. 1)
11) Kuormitus on jakautunut tasaisesti yläpaarretasoon, eli yläpaarretason sauvat ovat myös taivutettuja.

Optimointimenetelmä

Kun vertailtavat geometriatyypit on valittu, jää tehtäväksi vielä kunkin vertailutyyppin poikkileikkauksien optimointi edellä esitettyjen reunaehtojen mukaan. Tutkimuksessa käytettiin vastaavaa optimointimenetelmää kuin tanskalaisessa

vastaavassa tutkimuksessa /4/. Menetelmä on sovellus Sieve-Search-menetelmästä, ja sen kulku on seuraava.

Analysoidaan ensin kukin ristikko vakiopoikkileikkausarvolla (alustavasta mitoituksesta saadut profiilit), jolloin saadaan tulokseksi sauvoissa vaikuttavat voimasuureet. Näillä voimasuureilla mitoitetaan yksitellen kaikki sauvat. Tulosten perusteella valitaan "järkevä" ratkaisu, jossa kussakin ristikon osassa on enintään kolme eri profiilikokoa. Näillä profiileilla suoritetaan rakenteen analysointi uudestaan ja tehdään tarvittavat korjaukset. Iterointia jatketaan, kunnes korjauksia ei enää tarvita. Yleensä tarvitaan 3-5 iteraatiokierrosta.

"Järkevät" ratkaisut löydetään vertailemalla aluksi yksitellen mitoitetuille sauvoille saatuja profiileja, ja valitsemalla näistä profiileista kuhunkin ristikon osaan sellaiset kolme, jotka antavat kevyimmän lopputuloksen. Koska ristikon tiettyyn osaan (esim. yläpaarre) valittavilla profiileilla on vaikutusta myös ristikon muiden osien kuormitukseen (ristikon eri osien suhteelliset jäykkyydet vaikuttavat voimien jakautumiseen), ei optimiratkaisua saada välttämättä ensimmäisellä kerralla, vaan on tutkittava myös muut todennäköiset vaihtoehdot. Käytännössä vaihtoehtoja on 2-4.

Ristikoiden puristettujen osien (käytännössä yläpaarre ja diagonaalit) optimiprofiilit löytyvät yleensä helposti, koska mahdollisten optimaalisten profiilien valikoima on hyvin rajoitettu. Vedettyjen sauvojen profiilivalikoima on runsaampi, mutta myös niille löytyy kokeilemalla kohtuullisen helposti optimaalinen profiilikoko.

Neliöpohjaiset ristikot

Optimoinnin tulokset neliöpohjaisille ristikoille on esitetty taulukossa 1. Vertaillaessa eri tyypeille saatuja

tuloksia nähdään, että pelkän rakennepainon perusteella tyypit 4, 5 ja 1 ovat tutkitussa tuentatapauksessa suositeltavimpia. Seuraavaksi sijoittuu tyyppi 3 ja viimeiseksi tyyppi 2.

Järjestys ei olennaisesti muutu, vaikka otetaan huomioon myös sauvojen ja solmujen lukumäärä. Vaikka eri ristikko-tyyppien tarkkoja liitostkustannuksia ei tunneta, tiedetään kuitenkin, että liitosten osuus avaruusristikon valmistuskustannuksista on merkittävä (tavallisesti n. 30-50 %). Tämän perusteella voidaan taulukon 1 tuloksista tehdä seuraavat johtopäätökset: Tyyppi 5 nousee nyt niukasti tyyppin 4 edelle. Tyyppi 1 säilyttää kolmannen sijansa, sillä tasoristikoista koostuvan systeemin liitosten valmistuskustannukset ovat keskimäärin avaruusristikon vastaavia kustannuksia pienemmät. Tyyppi 2 pysyy edelleen viimeisenä.

Vertailtaessa ristikoiden sauvatiheyttä huomataan, että sauvatiheys (sauvojen kokonaispituus) korreloi hyvin neliöpainon kanssa. Tyyppi 1 tekee tässä pienen poikkeuksen, mikä johtuu siitä, ettei se ole todellinen avaruusristikko.

Taulukko 1. Tutkittujen neliöpohjaisten (36x36 m²) avaruusristikoiden vertailuarvot.

Vertailu- tyyppi	Neliö- paino kg/m ²	Solmut kpl	Sauvat kpl	v _{max} mm	Sauvojen kok.pit. m
Tyyppi 1	21.9	314	829	113.2	2407.7
Tyyppi 2	24.2	313	1152	125.6	3456.0
Tyyppi 3	22.8	288	952	142.2	2856.0
Tyyppi 4	21.3	252	788	131.9	2542.6
Tyyppi 5	21.8	225	724	126.7	2505.5

Saadut tulokset eivät poikkea merkittävästi lähdekirjallisuudesta löytyvistä tuloksista /2,3,4/. Suurimpana yllätyksenä voidaan pitää tyyppin 1 yllättävän hyvää sijoitusta, mikä selittyy osin sillä, että toisen suunnan osaristikoiden paarteet oletettiin jatkuviksi. Oletus pitää kuitenkin

käytännössä yleensä paikkansa, joten se lienee perusteltu.

Tyypistä 5 on huomattava, että toisin kuin muille vertailutyypeille ei vertailussa oletettu tuentatapa ole sille luonnollisin. Tuenta yläpaarretasosta soveltuu sille huomattavasti paremmin. Tällöin ei esimerkiksi reunapalkkeja yleensä tarvita ja rakenteen tehokkuus paranee entisestään. Myös paarretason ja diagonaalien välisen kulman muuttaminen 45°:seen parantaisi hieman tyypin tehokkuutta.

Suorakaidepohjaiset ristikot

Suorakaidepohjaisten vertailuristikoiden sivusuhteeksi valittiin kirjallisuustutkimuksen perusteella 1:2 (36x72 m²), mikä on käytännön kokemuksen mukaan maksimisuhde, jolloin avaruusristikko on vielä kilpailukykyinen /3,6/. Optimoitaessa vertailuristikoita huomattiin, että tämä sivusuhte oli näin suurella kuormituksella ja tiukalla taipumarajoituksella useimmille vertailuristikoille liian suuri. Vain vertailutyypit 2B ja 3B alittivat sivusuhteella 1:2 taipumarajoituksen siten, ettei optimimitoitusta tarvinnut sallitun taipuman (144 mm) alittamiseksi mainittavasti muuttaa. Muiden vertailutyyppeiden (1B, 4B ja 5B) taipumat olivat jo lähtöprofiileilla niin suuria, ettei näiden vertailuristikoiden mitoittaminen tällä sivusuhteella ollut järkevää.

Lähtöprofiileilla tarkoitetaan tässä kunkin ristikon osan (yläpaarre, alapaarre, diagonaalit) vaatimaa maksimipoikkileikkausta murtorajatilassa, jolloin rakenne koostuu mitoituksen jälkeen max. kolmesta erikokoisesta profiilista.

Vaikka avaruusristikon taipumaa voidaan käytännössä varsin helposti rajoittaa esikorotuksella, ei esikorotusta tässä tutkimuksessa otettu huomioon, vaan vertailuristikoiden ylä- ja alapaarteet toteutettiin tasoina. On mainittava, että taipumarajoitus $L/250$ on varsin tiukka verrattuna

esimerkiksi Eurocode 3:n vaatimukseen. Rakenteen muodonmuutos (taipuma) kertoo kuitenkin omalta osaltaan rakenteen toiminnasta ja tehokkuudesta, vaikka muodonmuutosarvoille ei olisikaan asetettu rajoituksia. Sallitun taipuman ylitykset olivat lisäksi muutamilla 72 x 36 m²:n vertailuristikoidella niin suuria, että oli selvää, etteivät ne toimineet enää riittävän tehokkaasti.

Vertailuristikon maksimitaipuman ylittäessä jo lähtöprofiileilla sallitun arvon meneteltiin seuraavasti: Ristikön pitkä sivua lyhennettiin yhdellä moduulilla, ja lähtöprofiilit mitoitettiin uudestaan. Mikäli maksimitaipuma edelleen ylitti sallitun, ristikkoa lyhennettiin jälleen. Näin jatkettiin, kunnes suurin taipuma lähtöprofiileilla alitti sallitun (144 mm). Ristikön profiilit optimoitiin näin saadulla sivusuhteella, kuten edellä on esitetty. Mikäli optimiratkaisun suurin taipuma ylitti sallitun (kuten poikkeuksetta kävi), korjattiin profiileja jäykemmiksi, kunnes taipuma pysyi sallituissa rajoissa. Tällä tavoin saatua sivusuhdetta voidaan pitää kunkin ristikon kohdalla maksimina, jolloin ylimääräistä materiaalia ei vielä merkittävästi jouduta kuluttamaan taipuman rajoittamiseen, vaan ainoastaan voimasuureet määräävät sauvojen profiilikoot.

On huomattava, että koska rakennemalleissa käsiteltiin vain neljännesristikoita, yhden moduulimitan lyhennys vaikutti koko ristikkoon kaksinkertaisesti. Siksi rakenne lyheni tyypeillä 1B ja 4B kerrallaan 6 m ja tyyppillä 5B 4.5 m.

Vertailutyyppit 2B ja 3B (72 x 36 m²)

Tyyppit 2B ja 3B täyttävät ainoana vertailutyyppeinä taipumavaatimukset sivusuhteen ollessa 1:2. Vaikka tyyppillä 3B taipuma muodostuukin mitoitettavaksi, on painon lisäys optimiratkaisuun verrattuna merkityksetön (optimimitoituksen neliöpaino ilman taipumarajoitusta 26.9 kg/m², jolloin v_{\max} = 144.3 mm, vrt. taulukko 2). Molemmille vertailutyypeille on

ominaista, että sivusuhteen kasvaessa kasvaa myös lyhyemmän sivun suuntaisten sauvojen kuormitus suhteessa pidemmän sivun suuntaisiin sauvoihin. Rakenteet pyrkivät siis kantamaan suurimman osan kuormasta lyhyemmän jänteen suunnassa ja sivusuhteen kasvaessa pidemmän sivun suuntaisten sauvojen merkitys vähenee.

Optimoinnin tulokset ristikoille 2B ja 3B on esitetty taulukossa 2. Kuten neliöpohjaisillakin ristikoilla alittaa tyyppi 3B tyyppin 2B vertailuarvot sekä neliöpainon että myös solmujen ja sauvojen osalta. Tällä kuormituksella on siis tyyppi 3B kaikin puolin suositeltavampi tyyppiin 2B verrattuna.

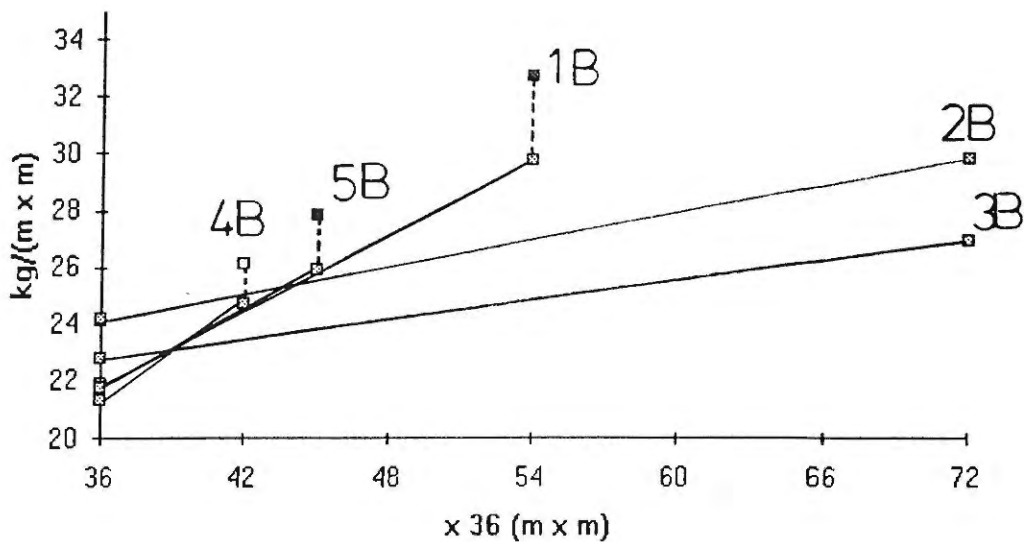
On kuitenkin huomattava, että tyyppin 2B taipuma on selvästi tyyppin 3B taipumaa pienempi eikä vielä ole profiilien mitoituksen kannalta rajoittava tekijä. Lisäksi tyyppin 3B alapaarretason sauvavoimat ovat jo varsin suuria (> 2000 kN), minkä vuoksi myös profiilikoko on melkoinen ja sen kasvattaminen entisestään aiheuttaisi huomattavan painon lisäyksen. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että tyyppi 2B soveltuu parhaiten suurille sivusuhtelle, kun kuormitus on raskas ($q_k \gg 2.4$ kN/m²).

Taulukko 2. Suorakaidepohjaisten ristikoiden 2B ja 3B vertailuarvot (pohjan ala 72 x 36 m², sivusuhte 1:2).

Vertailu- tyyppi	Neliö- paino kg/m ²	Solmut kpl	Sauvat kpl	v_{max} mm	Sauvojen kok.pit. m
Tyyppi 2B	29.8	612	2304	134.0	6912.0
Tyyppi 3B	27.0	558	1864	142.7*	5592.0

*taipuma mitoittava

Neliöpainon kehitys sivusuhteen kasvaessa on esitetty kuvassa 11. Muutos on oletettu lineaariseksi. Huomataan, että tyyppin 3B paino on pienin pidemmän sivumitan ylittäessä 40 m. Myös tyyppin 2B paino alittaa kolmen muun vertailuristikon painon, kun pidempi sivumitta ylittää 45 m.



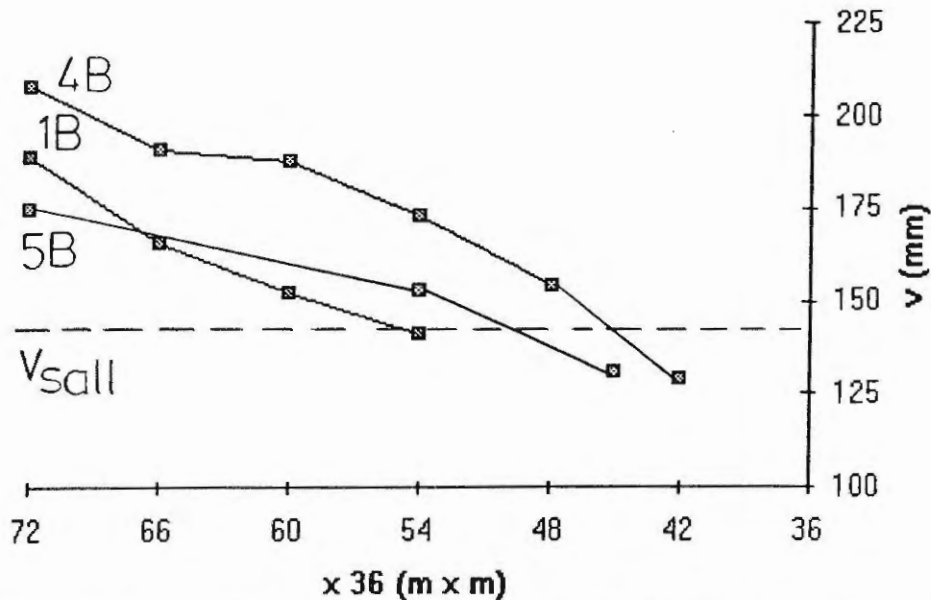
Kuva 11. Vertailuristikoiden optimaalisen neliöpainon muutos sivusuhteen kasvaessa (muutos oletettu lineaariseksi, - - - = taipumarajoituksen täyttävä arvo).

Vertailutyyppit 1B, 4B ja 5B (54x36, 42x36 ja 45x36 m²)

Kuten edellä jo mainittiin, jouduttiin näiden vertailuristikoiden sivusuhdetta taipuman rajoittamiseksi pienentämään alkuperäisestä suhteesta 1:2 (kuva 12). Näiden vertailuristikoiden lopulliset sivumitat ja vertailuarvot on esitetty taulukossa 3. Kaikissa kolmessa tapauksessa jäi taipuma valituilla sivumitoilla edelleen mitoittavaksi.

Kuvasta 11 nähdään myös näiden vertailutyyppien optimipainon muutos sivusuhteen kasvaessa. Vertailutyypeille 1B, 4B ja 5B on optimipainon lisäksi esitetty myös taipumarajoituksen aiheuttama painon lisäys (katkoviivat suorien lopussa), mikä esim tyyppillä 1B on jo huomattava.

Tyyppin 1B lopullisiksi sivumitoiksi jäivät 54 x 36 m² (sivusuhte 1:1.5). Se kesti siis taipumansa puolesta näistä kolmesta vertailutyyppistä parhaiten toisen sivumitan kasvattamisen. Vastaavasti sen neliöpaino on näistä kolmesta suurin. Optimi neliöpaino näillä sivumitoilla olisi ollut



Kuva 12. Taipuman muutos lähtöprofiileilla varustetuilla ristikoilla 1B, 4B ja 5B lyhennettäessä pidempää sivua arvosta 72 m kohti arvoa 36 m.

29.7 kg/m², jolloin suurin taipuma vastaavasti olisi ollut 151.6 mm. Taipumarajoituksen täyttämistä aiheutuva painon lisäys on jo niin suuri (koko rakenteessa 5832 kg), että vieläkin pienempi sivusuhte saattaisi olla perusteltu.

Tyyppin 4B lopulliset sivumitat ovat 42 x 36 m² ja sivusuhte 1:1.17. Se kesti siis taipumansa puolesta huonoiten sivusuhteen kasvattamisen. Neliöpohjaiseen ristikkoon on siis lisätty vain kaksi moduulia, minkä seurauksena optimi neliöpaino kasvaa 21.3 kg/m²:stä 24.7 kg/m²:n (kokonaispainon lisäys 5140 kg) ja taipumarajoituksen täyttämisen myötä vielä 26.1 kg/m²:n (kuva 11). Näin ollen vertailutyyppin 4 toteuttaminen suorakaiteena ei näytä olevan mielekäästä.

Vertailutyyppin 5B lopulliseksi sivusuhteeksi muodostui 1:1.25 (45 x 36 m², taulukko 3), millä arvolla se jää vertailussa tyyppin 4B edelle viimeistä edellisiksi. Sen painon kasvu on kuitenkin 45 m:n sivumittaan saakka käytännössä sama kuin tyyppillä 1B (kuva 11). Tyyppille 5B on ominaista, että ryhdyttäessä kasvattamaan ristikon sivusuhdetta

Taulukko 3. Suorakaidepohjaisten ristikoiden 1B, 4B ja 5B vertailuarvot

Vertailu- tyyppi	Neliö- paino kg/m ²	Solmut kpl	Sauvat kpl	v _{max} mm	Sivu- suhde
Tyyppi 1B	32.7	464	1234	143.1*	1:1.5
Tyyppi 4B	26.1	271	892	144.0*	1:1.17
Tyyppi 5B	27.8	280	894	143.7*	1:1.25

*taipuma mitoittava

neliöstä (1:1) kohti sivusuhdetta 1:2 sen taipuma kasvaa aluksi melko voimakkaasti mutta suuremmilla arvoilla kasvu alkaa pienetä ja taipuma alittaa jopa lopulta tyyppin 1B vastaavan arvon (kuva 12). Vaikka tyyppi 5B ei näytäkään soveltuvan kovin hyvin suurille sivusuhteille, on se kuitenkin alhaisen sauva- ja solmumääränsä ansiosta 45 x 36 m²:n mittoihin saakka kilpailukykyinen.

Johtopäätökset

Geometriavertailun tulosten perusteella voidaan avaruusristikon geometrian optimaalisesta valinnasta tehdä seuraavat johtopäätökset:

- 1) Avaruusristikkoa suunniteltaessa kannattaa yleensä pyrkiä ratkaisuun, jossa sauvatiheys on valitun moduulin sallimissa rajoissa mahdollisimman pieni. Pieni sauvatiheys tarkoittaa kevyttä rakennepainoa. Samalla solmujen ja sauvojen lukumäärä pysyy mahdollisimman pienenä, mikä johtaa minimikustannuksiin.
- 2) Neliöristikoiden geometria tulisi pyrkiä valitsemaan siten, että puristussauvojen pituus on vetosauvojen pituutta lyhyempi (vrt. ristikkotyypit 4 ja 5).
- 3) Neliöpohjaisille ristikoille suositellaan käytettäväksi tyyppejä 4 ja 5 tuennan ollessa alapaarretasosta. Myös tyyppi 1 saattaa olla tässä tapauksessa

kilpailukykyinen. Mikäli tuenta on yläpaarretasosta, suositellaan tyyppiä 5. Lopullisen valinnan perusteeksi tarvitaan tarkat tiedot liitostustannuksista.

- 4) Neliö on pohjamuotona selvästi suorakaidetta tehokkaampi. Tämä pätee kaikille vertailussa mukana olleille geometriatyypeille.
- 5) Suorakaidepohjaisille ristikoille, kun sivusuhte ylittää arvon 1:1.5, suositellaan käytettäväksi normaalikuormituksella tyyppiä 3B ja raskaalla ($> 2.4 \text{ kN/m}^2$) kuormituksella tyyppiä 2B. Em. sivusuhteen alittavissa tapauksissa saattavat myös tyypit 1B ja 5B olla kilpailukykyisiä. Lopullisen valinnan perusteeksi tarvitaan jälleen tiedot liitostustannuksista.

Lähdeluettelo

- /1/ Walker, H.B. The Design and Construction of Double-layer Space Frame Grids. In: Makowski, Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-layer Grids. London 1981, Applied Science Publishers. s. 289-302.
- /2/ Eberlein, H. Latticed Space Structures a Comprehensive Survey. Acier-Stahl-Steel (1975)2, s. 50-66.
- /3/ Makowski, Z.S. Review of the Development of Various Types of Double-layer Grids. In: Makowski, Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-layer Grids. London 1981, Applied Science Publishers. s. 1-56.
- /4/ Angerskov, H. & Björnbak-Hansen, J. Optimum Design of Corner Supported Double-layer Space Trusses. 1983, Technical University of Denmark, ABK Serie R 177. 56s.
- /5/ Usama Rustom Madi, An Investigation into the Design Parametres of Double Layer Space Frame Grids. Space Structures 2(1986/87)4, s. 215-222.
- /6/ Dauner, H.G. Reflections on the Choice, Design and Calculation of Plane Steel Space Frame. Acier-Stahl-Steel (1977)3, s.107-112.

Aleksi Rotko, DI
Teknillinen korkeakoulu
Teräsrakennetekniikka