

Puurakenteiden jäykistysuunnittelun ohje

VTT

9.10.2006

SISÄLTÖ

1	Jäykistys.....	4
1.1	Jäykistykseen kuvaus.....	4
1.1.1	Esimerkki koko rakennuksen jäykistyksestä	4
1.2	Yksittäisten komponenttien jäykistys	5
2	Kuormat	6
2.1	Vaakakuormat	6
2.1.1	Tuuli	6
2.1.2	Pystyrakenteiden vinoudesta aiheutuvat kuormat.....	9
2.1.3	Muut kuormat	10
2.1.4	Vaakakuormien laskeminen	10
3	Rakennuksen jäykistysperiaatteet	11
3.1	Pystysuorat rakenneosat.....	11
3.1.1	Kehät	11
3.1.2	Ulokkeet	11
3.1.3	Ristikkojäykistys.....	11
3.1.4	Levyjäykistys.....	11
3.2	Vaakajäykistys.....	12
3.3	Pitkät rakennukset.....	12
3.4	Jäykistysesimerkki.....	13
4	Rakenteiden jäykistys	14
4.1	Nurjaldustuet	14
4.1.1	Eurocode 5 mukainen mitoitus	14
4.1.2	Nurjalduskaavojen teoreettisia lausekkeita	15
4.1.3	Numeroesimerkkejä	17
4.2	Ristikkojen poikittaistuenta.....	19
5	Mitoitusesimerkki.....	21
5.1	Jäykistysperiaate.....	21
5.2	Kuormat	22
5.2.1	Omapaino ja tuulikuorma.....	22
5.2.2	Vaakakuormat pystykuormien epäkeskisyydestä	22
5.3	Päätseinän mitoitus	22
5.4	Sivuseinät	24
5.4.1	Voimat.....	24
5.4.2	Jäykisteen mitoitus.....	25
5.5	Jäykistävä levykenttä.....	27
5.6	Päätykolmiot.....	28
5.6.1	Voimat.....	28
5.6.2	Tukirakenteet	29
5.6.3	Tukiristikoiden väliin jäävät kattoristikot	30
5.6.4	Ristikoiden yläpaarteiden sivuttaistuenta.....	30

TIIVISTELMÄ

Tämä puurakenteiden jäykistysohje on tarkoitettu suunnittelijoille, valmistajille ja käyttäjille. Tämän ohjeen tavoite on selvittää, miten kokonainen rakennus ja yksittäiset rakenteet pitää jäykistää.

Kokonaisen rakennuksen jäykistyksessä huolehditaan siitä, että rakennuksen vaakasuuntaiset kuormat viedään hallitusti perustuksille. Yksittäisten rakenteiden jäykistyksessä huolehditaan siitä, että ne eivät nurjahda tai menetä muuten stabiiliuttaan. Rakenteen ulkopuoliset voimat pitää aina siirtää rakenteen ulkopuolisille tukirakenteille. Esimerkiksi tuulikuorma on vietävä aina perustuksille. Rakenteiden sisäiset voimat voidaan tukea myös rakennekokonaisuuden sisällä. Esimerkiksi puristussauvan nurjahdustukea ei tarvitse viedä välttämättä perustuksille.

Jäykistävän rakenteen pitää olla riittävän luja kestämään siihen kohdistuvat rasitukset. Suunnitteluohjeessa annettavat tarvittavat tukivoimat perustuvat siihen, että rakenne on riittävän jäykkä ja siirtymät jäävät niin pieniksi, ettei annetun tukivoiman arvo ylitä. Jäykistysohjeessa on annettu vaadittavien tukivoimien arvoja eri tapauksissa ja esitetty näitä tukivoimien arvoja vastaavat jäykkyysvaatimukset. Myös esimerkkejä on laskettu.

ALKUSANAT

Puurakenteiden jäykistysohje on laadittu siksi, että se on apuväline suunnitella ja rakentaa erityisesti iso- ja hallimaisia rakennuksia, joilla on riittävä jäykkyys kokonaisuutena ja rakennusten yksittäisillä osilla on riittävä stabiilius. Ohje on laadittu osana laajempaa tutkimusta, jota ovat rahoittaneet opetusministeriö, ympäristöministeriö, VTT, Teräsrakenneyhdistys ry. ja Wood Focus Oy.

Ohjeet on laadittu rahoittajien muodostaman johtoryhmän ohjauksessa. Projektin johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

- Teppo Lehtinen puheenjohtaja, ympäristöministeriö, teppo.lehtinen@ymparisto.fi
- Jaakko HUUHTANEN, ympäristöministeriö, jaakko.huuhtanen@ymparisto.fi
- Risto Järvelä, opetusministeriö, risto.jarvela@minedu.fi
- Unto Kalamies, Teräsrakenneyhdistys ry., unto.kalamies@rakennusteollisuus.fi
- Pekka Nurro, Wood Focus Oy, pekka.nurro@woodfocus.fi
- Tapani Tuominen, SPU Systems Oy, tapani.tuominen@spu.fi

Lisäksi johtoryhmän kokouksiin osallistuivat:

- Markku Korttesmaa, VTT, markku.korttesmaa@vtt.fi
- Mauri Peltovuori, opetusministeriö, mauri.peltovuori@minedu.fi
- Tapio Leino, VTT, tapio.leino@vtt.fi

Ohjeen teknistä sisältöä on kommentoinut Asko Keronen. Kommenttien huomioon ottaminen on parantanut ohjetta.

1 JÄYKISTYS

Rakennejärjestelmän tulee kestää ulkoisten vaakakuormien ja ulkoisista pystykuormista aiheutuvien vaakakuormien aiheuttamat rasitukset. Ulkoisiksi vaakakuormiksi lasketaan myös rakennuksen sisällä kiihtyvyysoimista, esimerkiksi nosturien jarruvoimista, aiheutuvat voimat. Kaikki edellä mainitut kuormat on vietävä perustuksille.

Yksittäisten rakennusosien tulee kestää rakenteen sisäisistä voimista syntyvät rasitukset. Tällaisia rasituksia syntyy rakenteeseen, kun rakenteiden geometria poikkeaa joko geometrisesti tai fysikaalisilta ominaisuuksiltaan ideaalisesti virheettömästä rakenteesta. Näitä voimia ei tarvitse siirtää perustuksille, vaan riittää, että ne on otettu vastaan rakennesysteemin sisällä. Mitoitusta näille voimille kutsutaan usein stabiiliusmitoitukseksi.

Jäykistys käsittää siis

- koko rakennuksen jäykistykseen ja
- yksittäisten komponenttien muodostaman kokonaisuuden sisäisen jäykistykseen.

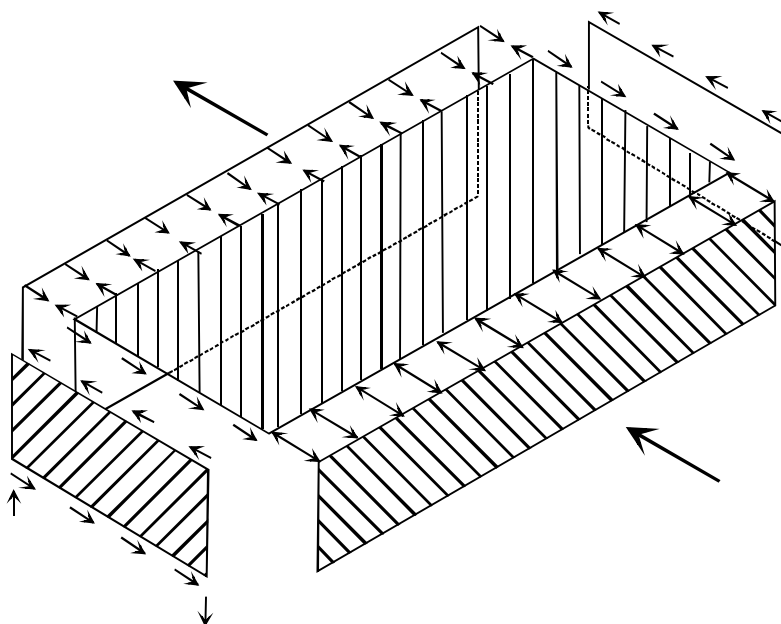
Seuraavassa käsitellään rakennuksen varsinaista jäykistämistä. Liitteessä 5 on annettu ohjeita rakentamisen aikaisesta jäykistyksestä.

1.1 Jäykistykseen kuvaus

Kaikissa jäykistysuunnitelmissa pitää esittää yksinkertaistuksena, miten voimat siirretään jäykistysmitoituksessa rakennustasolla rakenteilta toisille ja mitkä voimat pitää siirtää aina perustuksille saakka. Tämä kuvaus käsittää yksinkertaisen piirroksen ja lyhyen sanallisen kuvauksen. Laajuus on yksi A4-sivu. Tällainen yksinkertainen malli auttaa rakentamisen eri osapuolia ymmärtämään koko rakennuksen toiminta. Tähän sisältyy se, että kaikki tietävät, mihin on erityisesti kiinnitettävä huomiota. Seuraavassa on esitetty esimerkki koko rakennuksen jäykistämisestä

1.1.1 Esimerkki koko rakennuksen jäykistyksestä

Koko rakennuksen jäykistyksessä siirretään **vaakakuormat** rakenteiden kautta perustuksille. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki vaakakuormien siirtämisestä perustuksille.



Kuva 1 Vaakakuormien siirtäminen perustuksille, periaate.

Rakennukseen sivuseinälle ja kattolapelle vaikuttava vaakakuorma siirretään eri rakenteille seuraavasti:

1. Rakennuksen sivuseinään vaikuttavasta tuulikuormasta puolet siirretään seinän alareunan kautta perustuksille
2. Puolet sivuseinään vaikuttavasta kuormasta ja koko kattoon vaikuttava kuorma siirretään vaakatasossa olevalle levyrakenteelle.
3. Jäykkä vaakataso siirtää kuormat päätyseinien yläreunaan.
4. Päätyseinän yläreunasta kuorma siirtyy päädyn jäykistysrakenteiden kautta perustuksille.
5. Voimia siirtävänä rakenteena on vaakatasossa levyrakenne, joka toimii palkkirakenteena, jonka korkeus on rungon syvyys ja pituus lappeen pituus.
6. Seinän ja vaakatasossa olevan levyrakenteen liitos kestää siihen kohdistuvat vaakakuormat.
7. Päädyt toimivat jäykistysseininä. Päädyn nurkkiin on piirretty näkyviin pystysuuntaiset voimanuolet, sillä päätyjäykiste kiertyy jäykkänä levynä kulmansa ympäri, ellei sitä ole ankkuroitu perustukseen tai pystykuorma jää niin pieneksi, ettei se estä kiertymistä. Päädyille tuleva pystykuorma jää usein pieneksi, koska pystykuorma siirretään tavallisesti sivuseinien kautta perustuksille.
8. Vaakatasossa olevan levyrakenteen ja päätyseinän välisen liitoksen on kestettävä vaakarakenteelta tuleva leikkausvoima

Rakennuksen päätyyn vaikuttava vaakakuorma siirretään eri rakenteille seuraavasti:

1. Jäykistävän vaakarakenteen alapuolelle jäävistä kuormista puolet siirretään perustuksille.
2. Puolet vaakarakenteen yläpuolelle jäävästä kuormasta ja kaikki vaakarakenteen yläpuolelle jäävästä kuormasta siirretään jäykistävän vaakarakenteen avulla rakennuksen sivuseinille.
3. Sivuseinien yläreunasta kuormat siirretään kummankin sivuseinän kumpaankin päähän sijoitettavan jäykistävän rakenteen kautta perustuksille.

Kattorakenteen jäykistys

1. Kattotuolien kaatuminen sivusuunnassa estetään kattotuolien väliin jännevälän neljännespisteisiin ja harjalle asennettavalla pystysuuntaisilla jäykistysristikoilla.
2. Kattotuolien yläpaarten nurjahdus estetään rakennuksen molempiin päihin ja ristikkoihin kiinnitetyillä vaakaristikoidella. Vaakaristikoiden väliin jäävät kattotuolit jäykistetään vaakaristikoihin ruodelautojen avulla

Kuvassa 1 on esitetty vaakavoimat seiniltä päädyille siirtävä rakenne vaakasuorana rakenteena. Myös vino kattolape voi toimia jäykisteenä. Kattolapteen kaltevuus on kuitenkin otettava huomioon.

1.2 Yksittäisten komponenttien jäykistys

Yksittäisten komponenttien jäykistyksessä huolehditaan, ettei kyseinen komponentti menetä stabiiliuttaan. Tämä tehdään joko vahvistamalla itse rakennetta tai tukemalla se muihin rakenteisiin siten, että kokonaisuus muodostaa riittävän jäykän rakennekokonaisuuden. Jäykistäviä voimia ei tarvitse viedä kokonaisuuden ulkopuolelle esimerkiksi perustuksille. Tällainen kokonaisuus on esimerkiksi kahden ristikon yläpaarteet ja näiden väliin rakennettu tukirakenne, joka estää yläpaarteiden nurjahtamisen sivulle.

2 KUORMAT

Vaakakuormat koostuvat ulkoisista vaakakuormista ja pystykuormista aiheutuvista vaakakuormista. Ulkoisille vaakakuormille on ominaista se, etteivät ne synny rakenteiden sijainnin poikkeamisesta tarkoitusta asemastaan. Näitä voi tulla esimerkiksi tuulesta ja nosturien jarruvoimista. Pystykuormien aiheuttavat vaakavoimat syntyvät esimerkiksi pystyrakenteiden poikkeamisesta ideaalisesta pystysuunnasta, mikä voi aiheutua esimerkiksi asennustoleransseista. Nämä kuormat viedään aina perustuksille.

Yksittäisten rakenteiden jäykistykseen mitoituksessa käytettävät voimat ovat **rakenteiden sisäisiä voimia**, jotka ovat seurausta siitä, että rakenteet poikkeavat jollain tapaa ihannemallistaan. Tällaisia ovat esimerkiksi

- kehiin ja pilarien poikittaissiirtymistä aiheutuvat voimat,
- nurjahdukselle ja kiepahdukselle alttiiden palkkien ja ristikoiden puristussauvojen tukemisesta aiheutuvat voimat
- puristussauvojen välituissa vaikuttavat voimat ja
- ristikkojen vedettyjen sauvojen liitoskohdissa poikittaisissa tuissa vaikuttavat voimat.

Näitä voimia ei aina tarvitse viedä perustuksille.

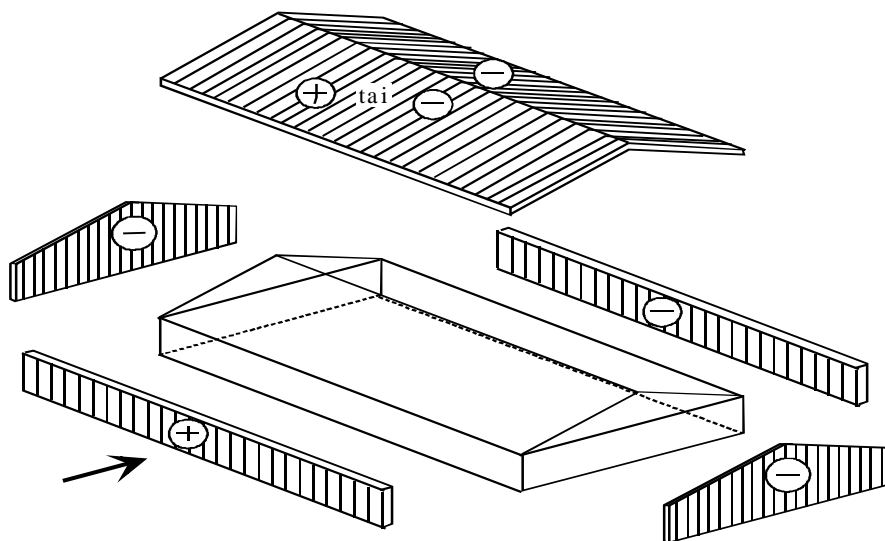
Vaikka edellä on jaettu kuormat rakennukseen kohdistuviin kuormiin ja rakenteiden sisäisiin voimiin, niin kummatkin voimat voidaan ottaa vastaan samalla rakenteella. Nämä kuormat summeerataan, jos ne voivat vaikuttaa samanaikaisesti. Esimerkkinä ovat ristikkorakenteiden tuennat, jos samalla jäykistävää rakennetta käytetään estämään ristikoiden yläpaarten nurjahdus sivulle ja ottamaan päätyyn kohdistuvaa tuulikuormaa ja kuormat summeerataan, koska yläpaarten nurjahdus voi tapahtua samaan suuntaan kuin tuuli vaikuttaa..

2.1 Vaakakuormat

2.1.1 Tuuli

Vakavuustarkastelussa huomioon otettavia tuulikuormia ovat seiniin ja kattoon kohdistuvat tuulikuormat.

Kuvassa 2 on esitetty periaate rakennukseen kohdistuvista tuulikuormista.



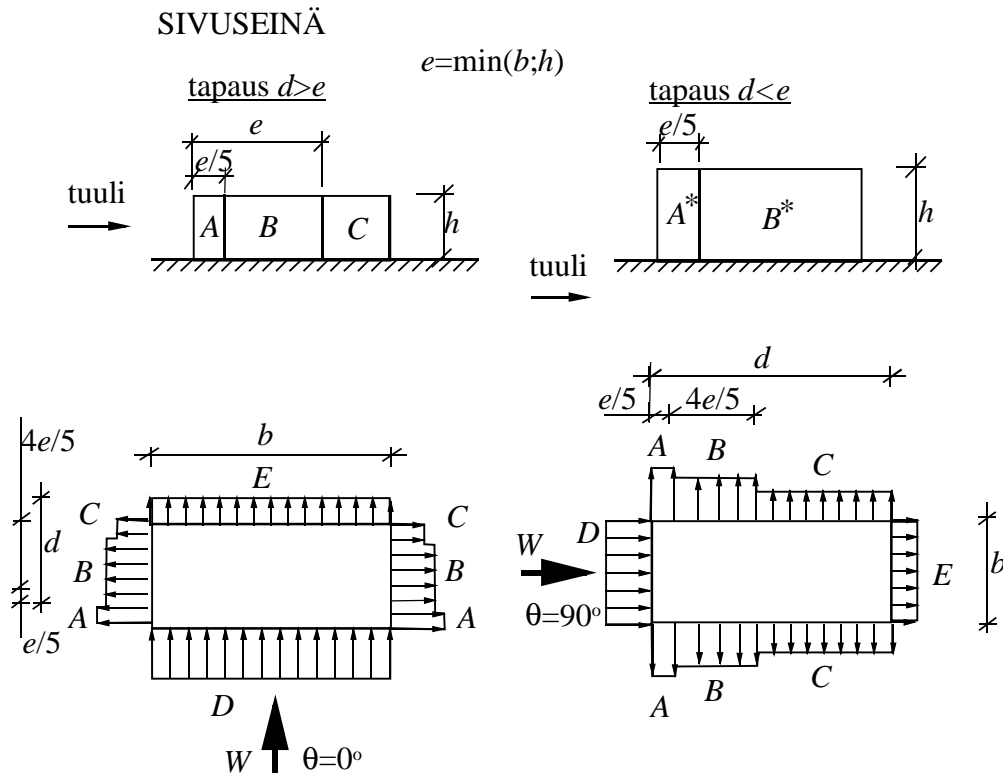
Kuva 2. Rakennukseen kohdistuvat tuulikuormat

Tuulen puoleiselle **seinälle** tulee painetta ja suojan puoleiselle seinälle imua. Kokonaistuulikuorma on edellä mainitun paineen ja imun summa. Tuulen suuntaisille seinille tulee imua. Katon tuulen puoleiselle

lappelle tulee painetta ja vastakkaiselle lappelle kattokaltevuudesta riippuen joko painetta tai imua. Pystysuuntaisten seinien painekertoimet on tarkemmin annettu taulukossa 1. Alueet A...E on esitetty kuvassa 3.

Taulukko 1. Seinien painekertoimet. Alue D pätee tuulen puolella olevalle seinälle ja alue E suojan puolella olevalle seinälle. Alueet A, B ja C pätevät tuulen suuntaisille seinille, jonne siis tulee aina imua. Suhde h/d on rakennuksen korkeuden ja tuulen suuntaisen sivun suhde. Taulukkoon on tummennettu rakennuksen vakavuustarkastelussa tarvittavat arvot. Arvot pätevät seinien osille joiden pinta-ala on suurempi kuin 10 m^2 eli käytännössä siis aina. Suhteen h/d väliarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti.

Alue	A	B	C	D	E
h/d					
5	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,7
1	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,3



Kuva 3. Taulukon 1 alueet A...E

Taulukosta 1 huomataan, että tuulen puoleiselle seinälle painekerroin on aina 0,8 ja suojan puolelle taivannomaisen hallin mitoilla välillä -0,3...-0,5 eli sopiva arvo käytännössä on -0,4. tällöin päädytään kokonaiskerroimeen 1,2, jota käyttäen saadaan tuulen kaatava kokonaisvoima jäykistystarkastelussa. Rakennesuunnittelussa kannattaa harkita, sijoitetaanko koko kuorman yksin tuulen puolelle, jolloin painekerroin on siis 1,2. Tuulen jakaminen tuulen puolelle ja suojan puolelle on suositeltavaa, koska se on teoreettisesti oikein ja se jakaa voimia kummallekin seinälle, jolloin jäykistävät rakenteet saattavat myös keventyä eikä vaakarakenteiden avulla tarvitse siirtää kuormia vastakkaiselta seinältä jäykistävälle seinälle. Toisaalta kumpikin seinä joudutaan mitoittamaan sekä paineelle että imulle.

Kattoon osuvan tuulen vaikutus on laskennallisesti monimutkaisempi kuin seiniin osuvan tuulen vaikutus. Lähtökohdiana on se, että kattoon kohdistuva tuuli vaikuttaa aina kohtisuorasti kattopintaa vastaan ja jäykistyksessä tarvittava voima on tämän kattoon kohdistuvan voiman vaakakomponentti. Kattojen pai-

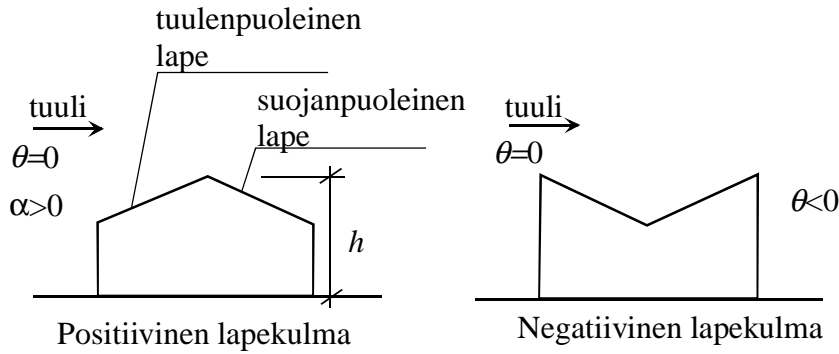
nekertoimista esitetään seuraavassa vain harjakattojen painekertoimet, kun tuulen suunta on kohtisuorasti harjaa vastaan. Täydellisyyden vuoksi otetaan mukaan myös painekertoimet, kun harja kallistuu sisälle päin. Jos tuulen suunta on päädyistä, painekertoimet poikkeavat taulukon 2 painekertoimista. Näitä ei esitetä, koska rakennuksissa, jossa harja on vaakasuuntainen, ei kattoon tule vaakasuuntaista tuulesta aiheutuvaa voimaa.

Painekertoimet on esitetty taulukossa 2. Kuvassa 4 on esitetty piirroksena alueet, joita taulukon 2 painekertoimet koskevat.

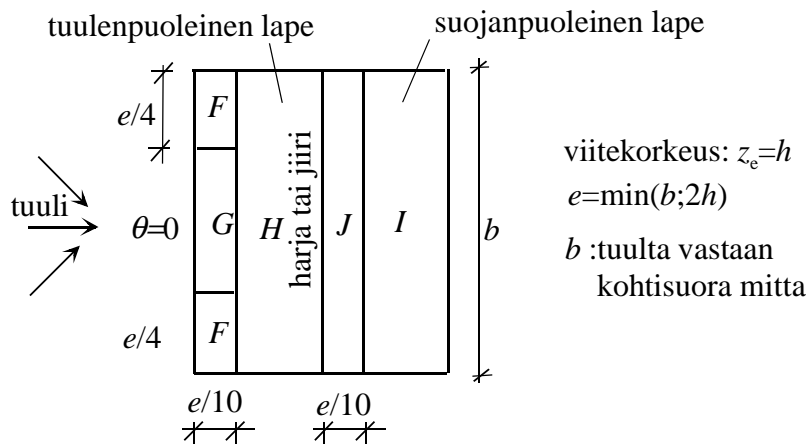
Taulukko 2. Harjakattojen painekertoimet. Kirjaintunnuksilla F...I merkityt alueet ilmenevät kuvasta 4 kattokaltevuuksilla $-30^\circ \dots +30^\circ$ kattoon voi tietyillä aleilla voi tulla joko painetta tai imua. Molemmat pitää erikseen tarkastella. Kaltevuuksien välikulmien samanmerkkiset painekertoimet voidaan interpoloida suoraviivaisesti. Kumpaankin lappeeseen vaikuttavalle tuulikuormalle lasketaan suurin ja pienin arvo, joita laskettaessa käytetään vain samanmerkkisten osa-alueiden tuulikuormia. Lappeiden tuulikuormat yhdistetään siten, että saadaan aikaan määräävä yhdistelmä. Näitä kombinaatioita on siis yhteensä 4 kpl. Käytännössä riittää kun käytetään taulukon arvoja, jotka pätevät seinien osille joiden pinta-ala on suurempi kuin 10 m^2 .

Lape- kulma α	Tuulen suunta harjaa vastaan kohtisuorasti ($\theta = 0^\circ$)				
	F	G	H	I	J
-45°	-0,6	-0,6	-0,8	-0,7	-1,0
-30°	-1,1	-0,8	-0,8	-0,6	-0,8
-15°	-2,5	-1,3	-0,9	-0,5	-0,7
-5°	-2,3	-1,2	-0,8	+0,2	+0,2
				-0,6	-0,6
5°	-1,7	-1,2	-0,6	-0,6	+0,2
	+0,0	+0,0	0,0		-0,6
15°	-0,9	-0,8	-0,3	-0,4	-1,0
	+0,2	+0,0	+0,2	+0,0	+0,0
30°	-0,5	-0,5	-0,2	-0,4	-0,5
	+0,7	+0,7	+0,4	+0,0	+0,0
45°	-0,0	-0,0	-0,0	-0,2	-0,3
	+0,7	+0,7	+0,6	+0,0	+0,0
60°	+0,7	+0,7	+0,7	-0,2	-0,3
75°	+0,8	+0,8	+0,8	-0,2	-0,3

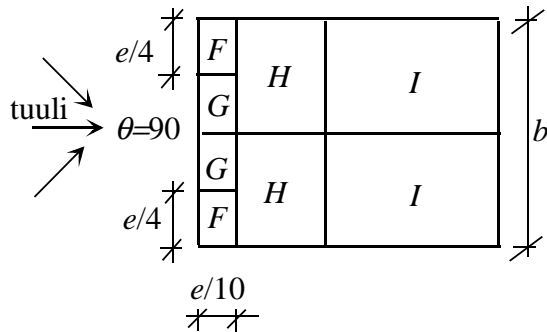
a) Lapekulmat



b) Tuuli pitkälle sivulle



c) Tuuli päätyyn



Kuva 4. Taulukon 2 symboleja F...J vastaavat harjakaton alueet.

Kun painekertoimet tiedetään, niin tuulikuorma saadaan kertomalla perustuulikuorma painekertoimella. Perustuulikuorman suuruuteen vaikuttaa maaston karheusluokitus, jossa luokkia on yhteensä neljä. Karheusluokitukseen vaikuttaa rakennuksen ympäristön tuuliolosuhteet.

2.1.2 Pystyrakenteiden vinoudesta aiheutuvat kuormat

Pystyrakenteiden mahdollisesta vinoudesta tai kuormituksen oletettua epäedullisemmasta vaikutussuunnasta aiheutuvat lisävaakavoimat voidaan laskea kaavasta (RIL 144).

$$H_L = \frac{B}{L} \frac{P_d}{150} \geq \frac{P_d}{250} \tag{1}$$

missä

H_L on lisävaakavoima rakennuksen pitemmässä suunnassa,
 P_d on pystykuorman laskenta-arvo,

B on rakennuksen leveys ja
 L on rakennuksen pituus.

2.1.3 Muut kuormat

Muita kuormia ovat esimerkiksi törmäyskuormat ja nosturien jarrukuormat, joiden arvot määritetään tapauskohtaisesti.

2.1.4 Vaakakuormien laskeminen

Taulukossa 3 on excel-linkki, jolla voidaan laskea rakennukseen kohdistuva vaakakuorma, joka koostuu seinään ja kattoon kohdistuvasta tuulikuormasta ja pystykuormien epäkeskisyyksistä. Harjakaton kaltevuus pitää olla välillä $-45^\circ \dots 75^\circ$ eikä katto saa olla ole tasakatto.

Taulukko 3. Excel-linkki tuulikuorman laskemiseksi suorakaiteen muotoiselle rakennukselle. Keltaisiin ruutuihin annetaan tapauskohtaiset arvot.

Tuuli kattoon sivuseinältä			Laskentavaakavoimat kattoon [kN]		
	$A \cdot C_{pe}$	$A \cdot C_{pe}$			
$A_F = 24,2$	-18,68	8,71			
$A_G = 63,8$	-44,92	22,97	Lape 1:	88,42	-71,35
$A_H = 412,0$	-110,42	108,76	Lape 2:	-193,73	0,00
$A_I = 88,0$	-35,20	0,00			
$A_J = 412,0$	-346,10	0,00			
Tuuli sivuseinää vasten:			Tuuli päätyseinää vasten:		
	$Ala_{sivuseinä}$	260,00		$Ala_{pääty}$	219
	Laskentavoima _{seinä 1}	195,67		Laskentavoima _{pääty 1}	165
	Laskentavoima _{seinä 2}	-85,77		Laskentavoima _{pääty 2}	-72,2
Momentti _{seinän alareuna, seinä 1 ja lape 1}		1409,6	Momentti _{seinän alareuna, pääty 1}		736,1
Momentti _{seinän alareuna, seinä 2 ja lape 2}		-1973,9	Momentti _{seinän alareuna, pääty 2}		-322,7
Momentti _{seinän yläreuna, lape 1}		198,9	Momentti _{seinän yläreuna, pääty 1}		87,0
Momentti _{seinän yläreuna, lape 2}		435,9	Momentti _{seinän yläreuna, pääty 2}		-38,1
Pystykuormat:			Tuulikuorma		
$\gamma_g = 1,2$	$g_k = 0,9$			$q_{k,tuuli} = 0,63$	
$\gamma_{lumi} = 1,5$	$q_k = 2$				
$\gamma_{tuuli} = 0,75$	$q_d = 4,15$				
$\psi_{lumi} = 0,7$	$F_{d,v} = 4148$				
$\psi_{tuuli} = 0,5$	$F_{d,h,b} = 17,3$				

3 RAKENNUKSEN JÄYKISTYSPERIAATTEET

Useissa tapauksissa jäykistettävä rakennus on symmetrinen, jolloin voimien laskeminen on suhteellisen helppoa. Monimutkaisemmissa tapauksissa voidaan joutua myös monimutkaisempiin tasapainotarkasteluihin, joiden periaatteita on esitetty liitteessä 1.

3.1 Pystysuorat rakenneosat

Kuvassa 5 on esitetty jäykistävien rakenneosien perustyyppejä.

3.1.1 Kehät

Kehiä käytetään yleisesti yksikerroksisissa teollisuusrakennuksissa. Kehässä voi olla mekaanisin liittimin koottuja momenttiliitoksia, esimerkiksi tappivaarnaliitoksia, tai sormiliitoksia liitettyjä nurkkakappaleita. Kehä voi olla myös taivutettu liimapuurakenne, jolloin välttyään liitokselta.

Vaakakuormituksessa mekaanisin liittimin koottuja puukehiä käytetään tavallisesti vain tuulikuormia vastaan. Suuremmilla kuormilla, esimerkiksi vaakasuuntaisilla nosturien jarruvoimilla, nurkan poikkeileikkaukset mitat kasvavat nopeasti liittimien vaatiman tilan vuoksi. Tällöin myös rakennuksen vapaa korkeus voi pienentyä liikaa.

3.1.2 Ulokkeet

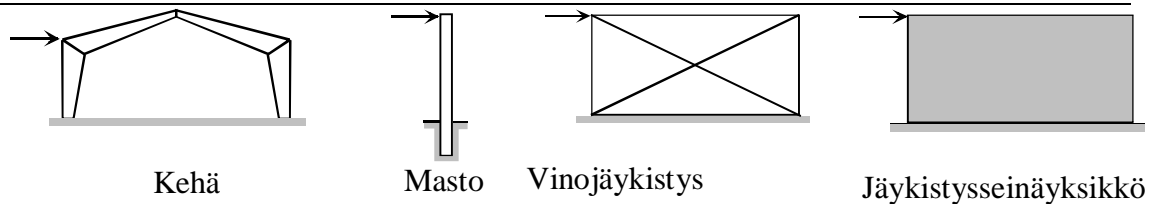
Teollisuusrakennuksissa, joissa käytetään nostureita, käytetään ulokkeina vaakakuormien toimivia teräs- ja teräsbetonipilareita vaakajäykisteinä. Jos kuormina on lähinnä tuulikuormia, ulokkeina toimivat pilarit voivat olla liimapuuta tai pyöreätä puuta. Jälkimmäiset tulevat kyseeseen esimerkiksi maataloushallsissa. Puurakenteiden momenttijäykkä liitos perustuksiin tehdään perustuksiin upotettavien teräsosien avulla, jotka teräsosat kiinnitetään puupilarin alapäähän liimaamalla ne valmiiksi tehtaalla tai työmaalla ruuveilla tai pulteilla. Pilarin alapää voi joutua helposti alttiiksi liian suurelle kosteudelle, jolloin seurauksena voi olla puun homehtuminen tai lahoaminen, joten on syytä suunnitella alapää ja sen liitos todella huolella. Yksi hyvä tapa on nostaa tämä liitos riittävän ylös lattiatasosta.

3.1.3 Ristikojäykistys

Vinosauvat voidaan mitoittaa vetorasitukselle tai puristusrasitukselle. Edellisiin on järkevä käyttää terästä ja jälkimmäisiin puuta. Vedetyt terästangot sijoitetaan tavallisesti ristikkäin, jolloin toinen toimii vedetyinä tietyn suuntaiselle vaakakuormalle ja toinen vastakkaissuuntaiselle kuormalle. Terästankojen päissä on tavallisesti kierteet ja mutterit. Puuhun kiinnitettäessä tarvitaan aluslevyrakenne, jolla levitetään terästangon pistemäinen voima puuhun. Vinojäykisteet sijoitetaan usein rakenteen sisään, mutta ne voidaan sijoittaa myös näkyviin esimerkiksi rakennustaiteellisista syistä. Tällöin ne voidaan myöhemmin helposti tarkastaa.

3.1.4 Levyjäykistys

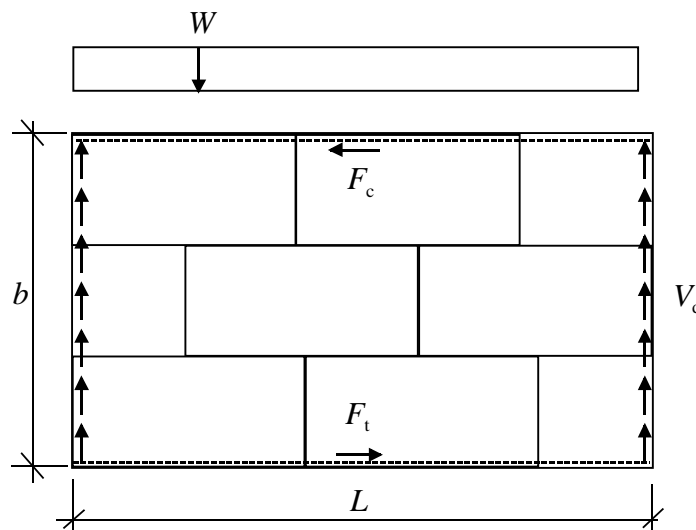
Levyjäykistys muodostuu puisista pystytolpista ja juoksuista ja puulevyistä tai kartonkipintaisista kipsilevyistä. Leikkausvoimat siirretään levyn reunoihin sijoitettujen liittimien (naulat tai ruuvit avulla). Noun estämiseksi pystyt osat ankkuroidaan perustuksiin. Puristuksessa olevat pystytolpat on mitoitettava pystykuormille ja vaakakuormien aiheuttamille pystysuuntaisille lisäkuormille. Kuitulevyt, OSB-levyt ja vanerit ovat hyvän lujuutensa ja jäykkyytensä vuoksi tavallisimmin käytetyt levymateriaalit. Pientaloissa käytetään myös kipsilevyjä.



Kuva 5. Esimerkkejä pystyjäykisteistä.

3.2 Vaakajäykistys

Kaikissa rakennuksissa on oltava vaakajäykisteet kussakin kerroksessa tai kattotasossa. Katon vaakakuormat ottavat jäykisteet sijaitsevat tavallisesti kattotasossa. Välipohjissa ja yläpohjissa olevat levymäiset jäykisteet ottavat vastaan leikkausvoimat ja reunapalkit ja niihin liitetyt seinäjuoksut ottavat taivutusvoimat, Välipohja toimii siis vaakapalkkina, joka siirtää vaakakuormat pystyille rakennusosille. Tämä ilmenee periaatekuvasta 6. Palkin korkeus on rakennuksen syvyys ja välipohjan reunapalkit ja erityisesti palkin vetojatkokset mitoitetaan voimalle F_t . Päätyjen liitokset mitoitetaan leikkaukselle



Kuva 6. Vaakajäykisteen mitoitusperiaate

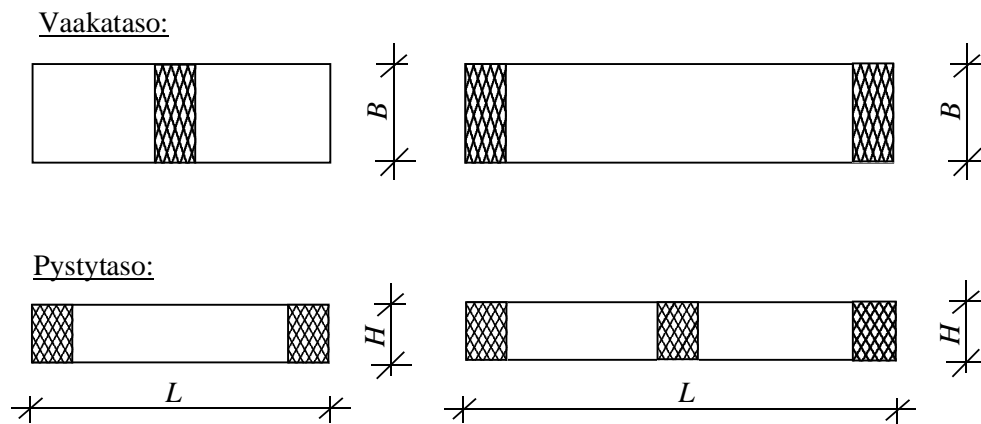
Vaakajäykiste voi olla levymäinen rakenne tai ristikkorakenne, joka on suunniteltu ottamaan sille tulevat kuormat. Rakenteen toiminnan kannalta on tärkeää, että voimat siirtyvät liitoksissa rakenteelta toiselle. Sen vuoksi esimerkiksi ristikkorakenteissa kaikkien liitosten ja veto- ja puristussauvojen yksityiskohdat on tehtävä huolellisesti.

Kattotasossa voidaan käyttää teräsrankoja tai ohutlevyprofiileista tehtyjä vinosauvoja, jotka toimivat yhdessä orsien kanssa. Toinen mahdollisuus on käyttää vaakasuuntaisia ristikoita. Kattoristikoiden tulee aina olla vaakajäykistettyjä kattotasossa olevilla lisäristikoilla. Kun käytetään ristikoita liimapuupalkkeja jäykistämässä, ei jäykistys toimi ainoastaan vaakakuormia vastaan ottavana rakenteena, vaan sitä käytetään myös estämään palkkien kiepahdusta poikittaissuunnassa.

3.3 Pitkät rakennukset

Jos rakennuksen mitta on suuri jäykistettävässä suunnassa ja jäykistävät rakenteet eivät jatku katkeamattomina koko rakennuksen mitan matkalla, niin jäykistävät kentät pitää olla ainakin molemmissa rakennuksen päädyissä ja tarvittaessa myös rakennuksen keskiosissa. Minimimäärä on, että jäykistäviä pystyrakenteita on yksi rakennuksen kummassakin pitkässä seinässä ja kummassakin päädyssä. Jäykistäviä vaakarakenteita on vastaavasti yksi, joka on rakennuksen keskellä. Rakenteiden kapasiteetin kannalta voi olla järkevää sijoittaa pitkissä rakennuksissa jäykistävät seinärakenteet myös rakennuksen keskelle.

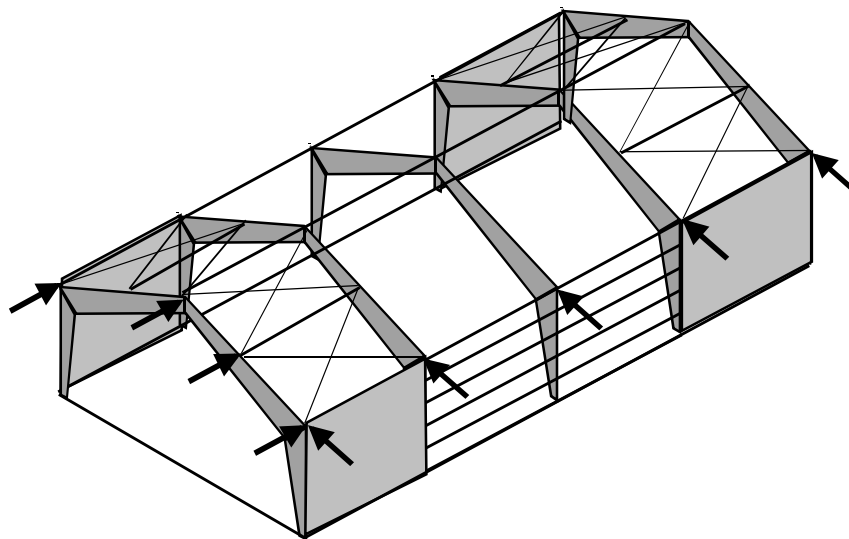
Jäykistävät vaakarakenteet voidaan tarvittaessa sijoittaa myös rakennuksen pätyihin. Periaatteita on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Rakennuksen jäykistyskentät.

3.4 Jäykistysesimerkki

Esimerkki jäykistysperiaatteesta on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Hallin jäykistävät osat. Pitkän seinän vaakajuoksut tukevat välillä olevat pääkannatteet päädyn jäykisteisiin. Samanlaiset voimia siirtävät juoksut tarvitaan tietenkin toiselle seinälle ja kattoon.

Kuvassa 8 hallin poikittaissuunnassa jäykistävänä rakenteena ovat kolminivelkehät, jotka siirtävät rakennuksen poikittaissuuntaiset vaakavoimat perustuksille.

Rakennuksen pätyyn kohdistuva vaakakuorma siirretään seinille esimerkiksi kahden pääkannatteen väliin tehdyllä ristikkorakenteella. Kuvassa 8 ristikossa on päätykannattelelta ensimmäiselle pääkannattelelle ulottuvat puristusta kestävä vertikaalit ja ainoastaan vetoa kestävä ristikkäiset diagonaalit, jolloin puolet diagonaaleista toimii tuulen paineelle ja puolet imulle. Koska ristikko on voiman suunnassa korkea, niin taivutusmomentista syntyvät normaalivoimat jäävät pieniksi. Leikkausvoimasta ristikon päätydiagonaaleihin tulevat voimat ovat suuria.

Rakennuksen pituussuunnassa jäykistys on hoidettu nurkkien lähelle nurkkien seinälevyillä. On tärkeää, että pätyihin sijoitetut jäykistävät osat yhdistetään toisiinsa, koska on hyvä, että rakennuksessa on vähintään kaksi toisiinsa liitettyä jäykistysosaa. Jos toinen jäykistävä rakenne jostain syystä tulee käyttökel-

vottomaksi, niin tällöin rakennuksen tai ainakin sen osan sortuminen estyy. Samalla voidaan varmistaa myös päätyjen väliin jäävien pääkannatteiden pysyminen pystyssä.

4 RAKENTEIDEN JÄYKISTYS

Jäykisteiden on kestävä tietyt kuormat ja jäykistykseen pitää olla riittävän jäykkä. Jälkimmäinen ehto on tarpeen siitä syystä, että jäykisteille tulee yleensä sitä suurempi kuorma, mitä suuremmat siirtymät syntyvät rakenteeseen eli rakenne on geometrisesti epälineaarinen, vaikka yksinkertaisilla kaavoilla laskettaessa sitä ei erikseen tarvitse ottaa huomioon, koska geometrinen epälineaarisuus on sisällytetty laskentakaavoihin.

Rakennekomponenttien jäykistysmitoitus eli stabiiliusmitoitus voidaan tehdä kahdella tavalla:

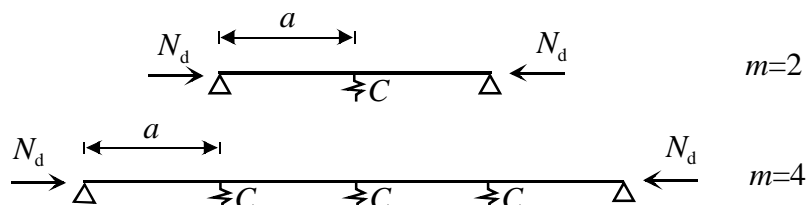
- lasketaan voimat geometrisesti epälineaarisenä tehtävänä ja mitoitetaan rakenne deformatiiviseen tilaan kuormille tai
- käytetään suunnitteluohjeissa annettuja mitoitukskaavoja, joissa on jo otettu huomioon edellisessä kohdassa mainittu geometrinen epälineaarisuus

Puristetun rakenteen jäykisteiden mitoitettua kehitettäessä, kuormaksi oletetaan yleensä kuorma, jonka suuruus riippuu puristusvoiman suuruudesta ja puristetun rakenteen ja rakenneosan suuruudesta. Tämän tarkastelun perusteella päädytään mitoituksessa käytettävään kuormaan, joka annetaan suunnitteluohjeissa.

4.1 Nurjahdustuet

4.1.1 Eurocode 5 mukainen mitoitus

Välein a poikittaistuenta tarvitseville puristetuille rakenneosille (ks. kuva 9) tulee alkupoikkeamien suuruuden tukivälillä mahtua rajoihin $a/500$ liimapuusauvoilla ja $a/300$ muilla sauvoilla



Kuva 9. Esimerkkejä yksittäisistä puristetuista ja poikittaistuetuista rakenneosista.

Jos pilari tai muu puristussauva nurjahtaa, niin se pitää sivusuunnassa tukea. Tämä tuki mitoitetaan massiivipuurakenteissa voimalle

$$F_d = N_d / 50 \quad (2)$$

ja liimapuulla voimalle

$$F_d = N_d / 80 \quad (3)$$

missä

N_d on sauvan puristusvoima.

Jos poikittaistukivälinä a ei käytetä suurina mahdollista mitta, kaavojen (2) ja (3) mukaan laskettua tulentavoimaa saadaan pienentää kertoimella

$$k = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (4)$$

missä

$\sigma_{m,d}$ on tuettavan sauvan taivutusjännityksen mitoitusarvo,
 k_{crit} on kiepahduskerroin tukivälillä a ,
 $f_{m,d}$ on taivutuslujuuden mitoitusarvo,
 $\sigma_{c,d}$ on puristusjännityksen mitoitusarvo,
 $k_{c,z}$ on poikittaissuunnan nurjahduskerroin tukivälillä a ja
 $f_{c,0,d}$ on tuettavan sauvan puristuslujuuden mitoitusarvo.

Kaavojen käyttö edellyttää, että tuki pitää olla riittävän jäykkä. Riittävä jäykkyys C saadaan kaavasta

$$C = k_s \frac{N_d}{a} \quad (5)$$

missä

$$k_s = 2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{m} \right) \right] \quad (6)$$

N_d on puristusvoima ja
 a on tukiväli.

4.1.2 Nurjahduskaavojen teoreettisia lausekkeita

4.1.2.1 Pistemäinen tuenta

Kun yksi tuki on keskellä, niin saadaan jäykkyyden lausekkeeksi

$$C = \frac{N_d}{a} \frac{1}{\frac{1}{2} \left[1 - \frac{\tan \left(\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}} \right)}{\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}}} \right] + \frac{e N_d}{a H_d} \frac{1}{\frac{N_E}{4N_d} - 1}} \quad (7)$$

missä

N_d on puristusvoima,
 a on nurjahdustukien väli,
 N_E on nurjahduskuorma, kun nurjahduspituus on nurjahdustukien väli a ,
 e on alkukäyryys tukivälillä a ja
 H_d on tukivoima keskellä

Jos edelleen valitaan $e=0$ eli sauva on alun perin suora, niin saadaan kaava

$$C = \frac{2N_d}{a} \frac{1}{1 - \frac{\tan \left(\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}} \right)}{\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}}}} \quad (8)$$

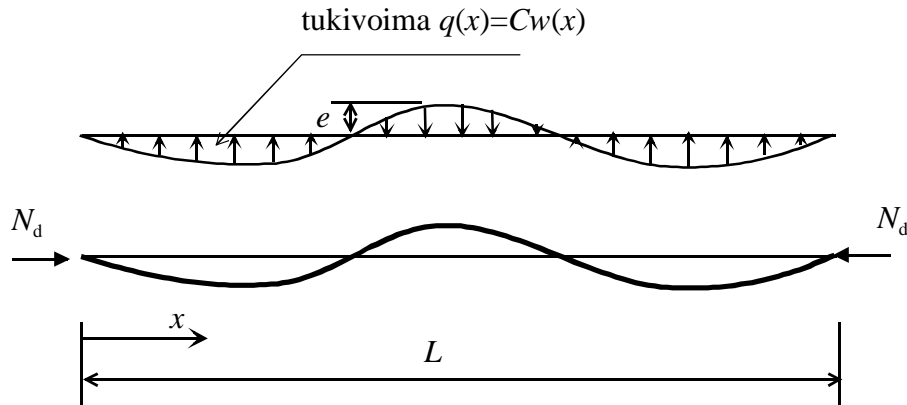
Jos $N_d=N_E$, niin tan-termi menee nolllaksi ja saadaan suunnitteluohjeen kaava. Toinen raja saadaan silloin, kun $N_d=N_E/4$ eli nurjahduspituus on $2a$ ja tukea ei siis tarvita. Tällöin tuki on $C=0$ eli kaava toimii.

Suunnitteluohjeessa annettu jäykkyys C on niin sanotusti varmallalla puolella, kun puristussauva oletetaan alun perin täysin suoraksi.

4.1.2.2 Jatkuva tuenta

Jos ristikoiden yläpaarteiden nurjahdustuenta tehdään usein niin tiheällä tuennalla, että se voidaan idealisoida jatkuvaksi tuennaksi. Tuentaa voidaan pitää riittävän tiheänä, jos tuettavan rakenteen hoikkuus tukipisteiden välillä on korkeintaan $\lambda = 25$.

Jatkuvasti tuettu rakenne taipuu yhdeksi kaareksi tai yhdeksi tai useammaksi aalloksi eli s-aalloksi. Jälkimmäinen on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Puristusvoimasta aalloksi taipunut palkki.

Kaavasta (8) voidaan laskea tällöin syntyvä jatkuva tuentavoima, jolle jäykistys mitoitettava.

$$q_{d,\max} = \frac{N_d C e}{2\sqrt{CEI - N_d}} \quad (9)$$

missä

- N_d on puristusvoima,
- C on tuentaliitoksen jäykkyysvakio (N/mm^2),
- e on yhden aallon suurin alkuepäkeskisyys ja
- EI on sauvan taivutusjäykkyys nurjahdussuunnassa.

Kaavasta (8) huomataan, että syntyvä tuentavoima riippuu myös tuen jäykkyydestä C , mikä tietenkin on luonnollista.

Yhden aallon alkuepäkeskisyydelle voidaan sahatavararakenteissa käyttää arvoa

$$e = \frac{L}{300m} \quad (10)$$

ja liimapuorakenteissa arvoa

$$e = \frac{L}{500m} \quad (11)$$

missä m on kaavasta (12) saatava aaltojen lukumäärä ja L on sauvan kokonaispituus.

$$m = \frac{L}{\pi} \sqrt[4]{\frac{C}{EI}} \quad (12)$$

Edellä olevat epäkeskisyydet ovat sovelluksia yleisestä sovitusta alkukäyryydestä, joka on sahatavaralle $L/300$ ja liimapuulle $L/500$.

4.1.3 Numeroesimerkkejä

Esimerkki 1: Puinen pilari:

- leveys $b=45$ mm (nurjahdussuunnan mitta),
- korkeus $h=190$ mm
- nurjahduspituus tukemattomana $L_c=4800$ mm,
- lujuusluokka on C24

Käyttöluokka 2 (sateelta suojattu lämmittämätön tila)

Puristusvoima $F_d=40$ kN, kimmomoduuli $E_k=7400$ MPa ja puristuslujuus $f_{c,k}=21$ MPa

Nurjahduskapasiteetti korkeussuunnassa on $R_{d,h}=42,7$ kN eli pilari kestää nurjahtamatta.

Nurjahduskapasiteetti heikommassa suunnassa on $R_{d,b}=2,73$ kN eli pilari nurjahtaa.

Nurjahduspituus heikommassa suunnassa on $L_{c,b}=1180$ mm eli pilari pitää tukea käytännössä tukea neljännespisteistään, jolloin nurjahduspituudeksi tulee 1200 mm.

Tuenta EC5:n mukaan:

Tarvittava tukivoima on

$$H_d = \frac{N_d}{50} = \frac{40000}{50} = 800 \text{ N}$$

Tuen vähimmäisjäykkyys on

$$C = k_s \frac{N_d}{a} = 2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{4} \right) \right] \frac{N_d}{a} = 3,41 \frac{40000}{1200} = 114 \text{ N/mm}$$

Riittävä tukivoima saadaan esimerkiksi kolmella 2,1x50 lankanaulalla, sillä yhden naulan kapasiteetti leikkausliitoksessa on 322 N. Jos käytetään lankanauloja 2,5x60, niin riittää kaksi naulaa, koska yhden kapasiteetti on 435 N.

Naulojen jäykkyyydet leikkausliitoksessa ovat vastaavasti 316 N/mm ja 363 N/mm yhtä naulaa kohti. Näin ollen jäykkyyydet näyttävät olevan selvästi suurempia kuin vaatimukset. Jos muodonmuutoksia ei tapahdu muualla kuin liitoksissa, niin lujuuden mukaan mitoitettaessa jäykkyys on $3 \cdot 316/114 \approx 8$ -kertainen naulalla 2,1x50 ja noin 10-kertainen naulalla 2,5x60. Tämä pätee silloin, kun jäykistävänä rakenteena on puulevy, joka on naulattu reunastaan pilariin. Muutoin pitää määrittää tukevan rakenteen jäykkyys ja se voi olla jotain muuta kuin naulaliitoksen jäykkyys.

Jatkuvan tuennan kaavat:

Jos oletetaan, että edellä olevassa esimerkissä yhteen tukipisteeseen sijoitetut 3 kpl 2,1x50 naulaa sijoitetaan tasavälein eli 400 mm välein, saadaan jatkuvan tuennan kaavoja soveltaen

$$C = \frac{C_{\text{naula}}}{s} = \frac{316}{400} = 0,79 \text{ N/mm}^2$$

Koska liittimet ovat 400 mm välein, niin liittintä kohti vaadittava jäykkyys on $400 \cdot 0,79 = 316$ N/mm ja yhden liittimen jäykkyys on juuri sama.

$$m = \frac{L}{\pi} \sqrt[4]{\frac{C}{EI}} = \frac{4800}{\pi} \sqrt[4]{\frac{0,79}{7400 \cdot 190 \cdot 45^3 / 12}} = \frac{4800}{\pi} \sqrt[4]{\frac{0,79}{10,7 \cdot 10^9}} = 4,48$$

$$q_{d,max} = \frac{N_d C e}{2\sqrt{CEI} - N_d} = \frac{40000 \cdot 0,79 \cdot (4800 / 4,48 / 300)}{2\sqrt{0,79 \cdot 10,7 \cdot 10^9} - 40000} = \frac{112000}{184000 - 40000} = 0,79 \text{ N/mm.}$$

Yhdelle naulalle tuleva voima on $400 \cdot 0,79 = 316$ N ja yhden naulan vastaava kapasiteetti on edellä lasketun mukainen eli 322 N/mm eli liitos on OK.

Esimerkki 2: Kattoristikon puristettu yläpaarre:

- leveys $b=45$ mm (nurjahdussuunnan mitta),
- korkeus $h=145$ mm
- pituus $L=12\ 000$ mm,
- lujuusluokka on C24

Käyttöluokka 2 (sateelta suojattu lämmittämätön tila)

Puristusvoima $F_d=40$ kN, kimmomoduuli $E_k=7400$ MPa ja puristuslujuus $f_{c,k}=21$ MPa

Oletetaan, että yläpaarre on tuettu siten, että se ei nurjahda korkeussuunnassa. Esimerkiksi se on ristikon osa, jolloin ristikon diagonaalit toimivat nurjahdustukina.

Nurjahduskapasiteetti sivusuunnassa on $R_{d,b}=0,44$ kN eli yläpaarre nurjahtaa lähes ilman kuormaa. Nurjahduspituus on esimerkin 1 mukaan $L_{c,b}=1180$ mm eli yläpaarre pitää tukea käytännössä 1200 mm välein tukien tukemattomia aukkoja on yhteensä 10 kpl.

Tuenta EC5:n mukaan:

Tarvittava tukivoima on

$$H_d = \frac{N_d}{50} = \frac{40000}{50} = 800 \text{ N}$$

Tuen vähimmäisjäykkyys on

$$C = k_s \frac{N_d}{a} = 2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{12} \right) \right] \frac{N_d}{a} = 3,90 \frac{40000}{1200} = 130 \text{ N/mm}$$

Riittävä tukivoima saadaan esimerkiksi kolmella 2,1x50 lankanaulalla, sillä yhden naulan kapasiteetti leikkausliitoksessa on 322 N. Jos käytetään lankanauloja 2,5x60, niin riittää kaksi naulaa, koska yhden kapasiteetti on 435 N.

Naulojen jäykkyyksille pätevät samat kommentit kuin esimerkissä 1.

Jatkuvan tuennan kaavat:

Jos oletetaan, että naulat 2,1x50 naulaa sijoitetaan 400 mm välein, saadaan jatkuvan tuennan kaavoja soveltaen

$$C = \frac{C_{\text{naula}}}{s} = \frac{316}{400} = 0,79 \text{ N/mm}^2$$

$$m = \frac{L}{\pi} \sqrt[4]{\frac{C}{EI}} = \frac{12000}{\pi} \sqrt[4]{\frac{0,79}{7400 \cdot 145 \cdot 45^3 / 12}} = \frac{12000}{\pi} \sqrt[4]{\frac{0,79}{8,15 \cdot 10^9}} = 12,0$$

$$q_{d,\text{max}} = \frac{N_d C e}{2\sqrt{CEI} - N_d} = \frac{40000 \cdot 0,79 \cdot (12000/12,0/300)}{2\sqrt{0,79 \cdot 8,15 \cdot 10^9} - 40000} = \frac{105300}{160500 - 40000} = 0,87 \text{ N/mm.}$$

Yhdelle naulalle tuleva voima on $400 \cdot 0,87 = 348 \text{ N}$ ja yhden naulan vastaava kapasiteetti on edellä lasketun mukainen eli 322 N/mm eli liitos on alimitoitettu.

4.2 Ristikkojen poikittaistuenta

Suunnitteluohjeiden mukaan riittävän luja rakenne puurakenteille saadaan (vrt. kuva 11), kun jäykistävä rakenne mitoitetaan tasaiselle kuormalle, jonka suuruus on

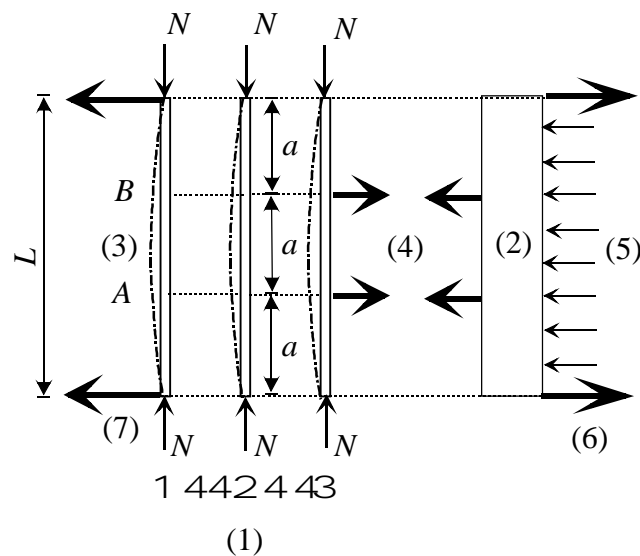
$$q_d = \frac{nN_d}{50L} \tag{13}$$

missä

N_d on keskimääräinen puristusvoiman laskenta-arvo,

n on tuettavien kattorakenteiden lukumäärä ja

L on kattokannattajien jänneväli



Selite:

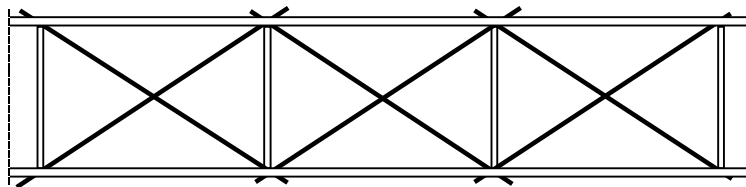
- (1) Ristikkojärjestelmä, jossa on n kpl vierekkäisiä ristikoita
- (2) Poikittaisjäykistysjärjestelmä
- (3) Epätarkkuuksien ja geometrisen epälineaarisuuden aiheuttama ristikkojärjestelmän taipuma
- (4) jäykistävät voimat
- (5) poikittaisjäykistysjärjestelmään vaikuttava ulkoinen kuorma
- (6) ulkoisista kuormista aiheutuvat poikittaistukijärjestelmän tukivoimat
- (7) Jäykistävästä voimista aiheutuvat ristikkojärjestelmän tukivoimat

Kuva 11. Poikittaistuettu palkisto tai ristikkosysteemi.

Jäykistävän rakenteen kokonaistaipuma ei saa ylittää arvoa $L/500$. Tätä taipumaa laskettaessa otetaan siis kaikki kuormat huomioon, myös tuulikuorma. Pelkästään jäykisteen mitoituksessa käytettävän kuorman aiheuttamalle taipumalle ei erikseen aseteta taipumarajaa, vaikka se tarvitaankin kaavoja johdattaessa.

Liitteessä 1 on esitetty johto kuorman suuruuden ja rakenteen jäykkyyden väliselle vuorovaikutukselle, johon vaikuttaa myös ristikon oletettu lapevääryys. Tätä riippuvuutta on havainnollistettu taulukossa 5.

Yläpaarteiden nurjahdustuenta voidaan tehdä rakennuksen kummassakin päässä kahden kehän väliin niiden yläreunaan tehdyllä jäykistysristikolla. Kuvaan 12 piirrettyssä tapauksessa kehien väliset kaksoisviivat kuvaavat puista vertikaalisauvaa ja ohuet viivat vain vetoa ottavia teräsdiagonaaleja, joista toiset toimivat rasituksia kestävinä rakenteina, kun päätyyn tulee painetta ja toiset, kun päätyyn tulee imua. Kuvan 12 katon tuuliristikko tai vastaava muu rakenne pitää olla riittävän luja ja myös riittävän jäykkä. Jäykkyysvaatimus tulee siitä, että liian joustava nurjahdustuki ei pysty estämään puristusvoimasta tulevaa nurjahdusvoimaa ja siirtymän seurauksena nurjahdusvoima tulee suuremmaksi kuin laskentakaavoja määritettäessä on oletettu.



Kuva 12. Yläpaarteiden tason jäykistysristikko, periaate.

Taulukko 5. Tukirakenteen tasaisen kuorman q laskennassa tarvittavat kaavan (13) nimittäjän arvot eri alkukäyryyksillä, kun tukirakenteen sallittu taipuma on L/m .

Parametri m	Alkukäyryyden parametri n , kun alkukäyryys on $e=L/n$									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
100	6	7	8	8	9	9	9	9	9	9
200	8	11	13	15	15	16	17	17	17	18
300	9	14	17	19	21	22	23	23	24	25
400	10	16	20	23	25	27	28	29	30	31
500	10	17	22	26	28	31	32	34	35	36
600	11	18	24	28	31	34	36	38	40	41
700	11	19	25	30	34	37	40	42	44	46
800	11	20	26	31	36	40	43	45	48	50
900	11	20	27	33	38	42	45	48	51	53
1000	11	21	28	34	39	44	48	51	54	57

Taulukosta 5 huomataan, että kaavan (13) parametrin arvoon 50 päästään esimerkiksi siten, että yläpaarteen alkukäyryys on $e=L/1000$ ja tukirakenteen sallittu taipuma on $L/800$.

Muut rakenteet kiinnitetään näihin jäykistäviin rakenteisiin. Jäykistäviä rakenteita on hyvä olla vähintään kaksi. Jos toinen jostain syystä vaurioituu, toinen toimii edelleen. Suurissa halleissa tuentaetäisyys tukevalta rakenteelta kaukaisimmalle tuettavalle rakenteelle voi käytännössä olla niin pitkä, että näiden välille tehty jäykistävä rakenne tulee helposti liian joustavaksi.

Jos hallissa ei ole kuvan 8 mukaisia jäykistäviä kehiä tai mastoja, joudutaan pitkän sivun tuulikuormat viemään päädyille usein kattorakenteiden avulla. Tällöin päätyseinien jäykistävät rakenteet tulevat helposti suuriksi ja ne on ankkuroitava tehokkaasti perustuksiin, koska päädyistä yleensä puuttuu pystykuormista tuleva vakauttava kuorma. Tällöin myös voi olla vaikeuksia saada rakennuksen päätyihin riittävän isoja ovia.

Toinen tapa katon jäykistämiseksi on tehdä kattoelementit jäykistäviksi rakenteiksi, jotka siirtävät tarvittavat voimat.

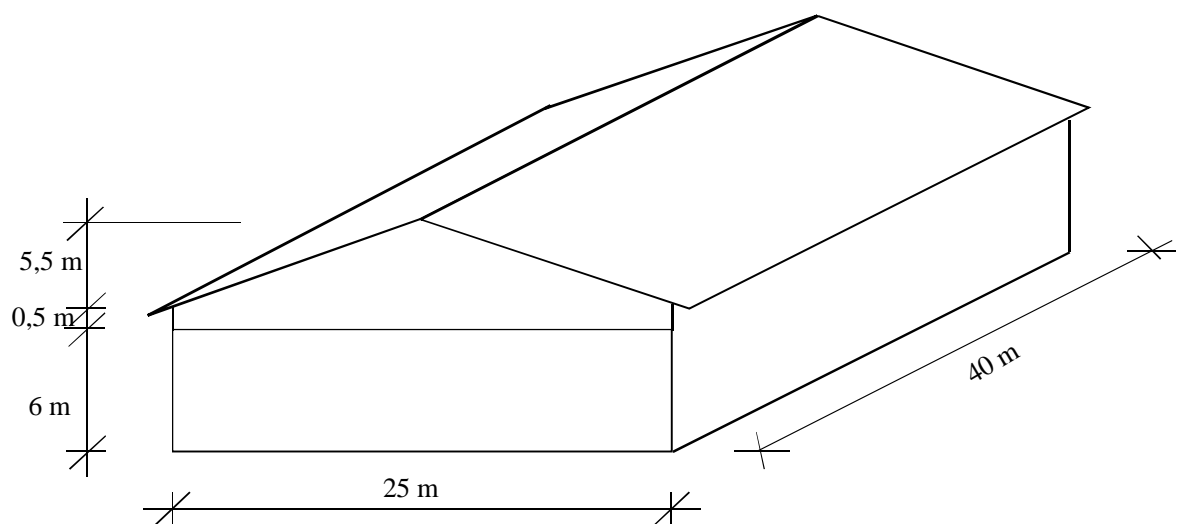
5 MITOITUSESIMERKKI

Tarkastellaan suorakaiteen muotoista hallia, jonka mitat ilmenevät kuvasta 13.

5.1 Jäykistysperiaate

Rakennus jäykistetään seuraavia periaatteita noudattaen:

1. Jäykistyksessä siirretään pitkille seinille tuleva kuorma kattorakenteen kautta päätyseinille ja päättyyn tuleva kuorma kattorakenteen kautta pitkille seinille.
2. Seinät jäykistetään tasojensa suunnassa kuormalle, joka koostuu seinän yläreunan yläpuolista vaakakuormasta ja puolesta seinään kohdistuvasta vaakakuormasta. Toinen puoli seinään kohdistuvasta vaakakuormasta suunnitellaan menevän suoraan perustuksille. Seinät ankkuroidaan tarvittaessa perustuksiinsa siten, että ankkurivoimat estävät seinän irtoamisen alustastaan. Ankkurivoimaa määritettäessä seinään kohdistuvan pystykuorman osuus vähennetään kokonaiskuormasta.
3. Kattorakenteeseen suunnitellaan jäykistävä vaakasuuntainen levyrakenne räystäskorkeudelle. Tämä levyrakenne suunnitellaan palkkirakenteena, jonka korkeus on rakennuksen syvyys ja jänneväli rakennuksen pituus, kun tarkastellaan pitkille seinille kohdistuvaa vaakakuormaa.
4. Kattokannatteina olevien naulalevyristikoiden yläpaarteet jäykistetään yläpaarretasossa rakennuksen kummassakin päässä jäykistysristikoilla. Jäykistysristikoissa on ristikoiden väliin tulevat puiset puristusvertikaalit ja ainoastaan vetoa ottavat diagonaalit.
5. Naulalevyristikoiden kaatuminen sivusuunnassa estetään ristikoiden välille suunniteluilla pystysuuntaisilla jäykistysristikoilla.
6. Ristikoiden nurjahdussidontaa vaativat puristussauvat yhdistetään toisiinsa vaakasuuntaisella vetosauvalla. Vetosauvat tuetaan rakennuksen kummassakin päässä ristikkorakenteella ristikon ylä- ja alapaarretasoon.
7. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota siihen, että liitokset eri rakennusosien välillä siirtävät niille suunnitellut voimat.



Kuva 13. Mitoitettava hallirakennus

5.2 Kuormat

Tarkastellaan seuraavassa rakennukseen kohdistuvaa

- Omaa painoa ja tuulikuormaa ja
- pystykuormien epäkeskisyydestä aiheutuvia vaakakuormia.

5.2.1 Omapaino ja tuulikuorma

Pysyvä kuorma	Kattorakenteen oma paino (kate, lämmöneristeet ja muut katon rakenteet)	g_k	0,9	kN/m
Muuttuva kuorma	Lumikuorma muotokerroin peruslumikuorma katolla	μ_k $q_{k,lumi}$ $\mu_k q_k$	1,0 2,0 2,0	kN/m ² kN/m ²
Tuuli	Tuulikuorma seinät (maaston karheusluokka III) rakennuksen harjan korkeudella tuulen puolella ($c_F=0,8$) suojan puolella ($c_F=-0,35$) Tuulikuorma katto (maaston karheusluokka III) Rakennuksen harjan korkeudella c_F -kertoimella on eri arvoja jopa saman lappeen eri osissa, joten sille ei voida antaa yhtä kerrointa (vrt. taulukko 2)	$q_{k,tuuli}$ $c_F q_{k,tuuli}$ $c_F q_{k,tuuli}$ $q_{k,tuuli}$	0,63 0,50 0,22 0,63	kN/m ² kN/m ² kN/m ² kN/m ²

Pysyvää kuormaa ja lumikuormaa tarvitaan, kun lasketaan pystykuormien epäkeskisyydestä aiheutuvia vaakakuormia. Laskennallisessa tarkastelussa käytetään omalle painolle osavarmuuskerrointa 1,2 ja hyötykuormalle osavarmuuskerrointa 1,5.

5.2.2 Vaakakuormat pystykuormien epäkeskisyydestä

Pystykuormien epäkeskisyydestä aiheutuva vaakakuorma koko rakennukselle on

$$H_L = \frac{B}{L} \frac{P_d}{150} = \frac{25}{40} \frac{(1,2 \cdot 0,9 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 2) \cdot 40 \cdot 25}{150} = 0,625 \cdot 21,2 = 13,3 \text{ kN} > \frac{P_d}{250} = 12,7 \text{ kN}$$

kun tuuli on määräävin kuorma, jolloin lumelle voidaan käyttää yhdistelykerrointa 0,7.

Tämä kuorma vaikuttaa esimerkissämme seiniä mitoitettaessa seinän yläpään tasolla eli korkeudella 6 m maasta.

5.3 Päätysseinän mitoitus

Pitkälle seinälle tuleva tuulikuorma aiheuttaa seinän alareunan eli perustuksen ja seinän liittymän kohtaan taivutusmomentin. Tuulen puoleiseen seinään vaikuttavasta kuormasta tulee momentti (vrt. taulukko 3)

$$M_{t,seinä,1,d} = 1,5 \cdot 0,50 \cdot 6,5 \cdot 40 \frac{6,5}{2} = 634 \text{ kNm}$$

ja vastakkaiseen seinään vaikuttavasta tuulen imusta tulee momentti

$$M_{t,seinä,2,d} = 1,5 \cdot (-0,22) \cdot 6,5 \cdot 40 \frac{6,5}{2} = -279 \text{ kNm}$$

Tuulen puoleiselle kattolapelle tuulikuormasta tulee momentti, kun valitaan kattolappeeseen vaikuttavista kuormista määräävin

$$M_{t,katto,1,d} = 88,42 \left[6,5 + \frac{11 - 6,5}{2} \right] = 773 \text{ kNm}$$

ja suojan puoleiselle lapelle vaikuttavasta tuulikuormasta

$$M_{t,katto,1,d} = -193,73 \left[6,5 + \frac{11 - 6,5}{2} \right] = -1695 \text{ kNm}$$

Näiden momenttien tasapainottamiseksi seinien yläreunan tasossa tarvitaan voima

$$H_{t,s,d} = \frac{634 + 279 + 773 + 1695}{6} = \frac{3380}{6} = 563 \text{ kN}$$

Tämä on sivuseinän pituusyksikköä kohti

$$q_{t,s,d} = \frac{563}{40} \approx 14 \text{ kN/m}$$

Jos tähän lisätään vielä edellä laskettu pystykuormien alkuepäkeskisyydestä aiheutuva lisä, niin saadaan päätyseinää mitoittavaksi vaakakuormaksi

$$H_{päätyseinä,d} = 563 + 13,3 = 576 \text{ kN}$$

Kuten edellä olevasta huomataan, pystykuormien aiheuttama lisä on noin 2 %.

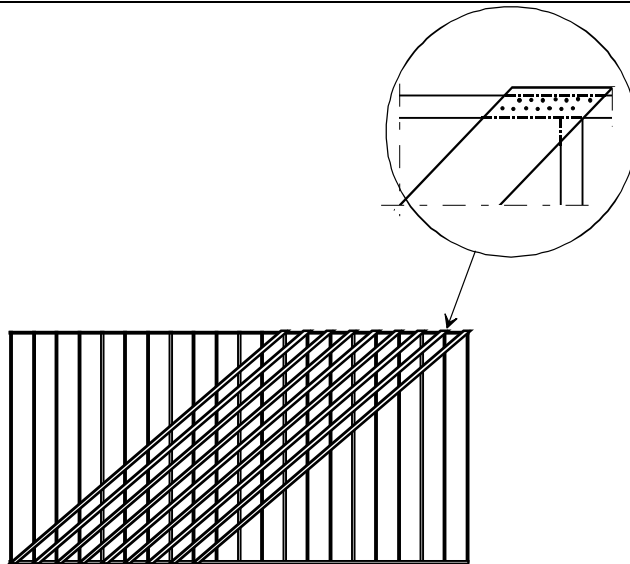
Jos kuorma jaetaan tasan kummallekin seinälle ja tasan päätyseinän pituudelle, niin saadaan yhtä metriä kohti voima

$$q_{päätyseinä,d} = \frac{576}{2 \cdot 25} = 11,5 \text{ kN/m}$$

Sekä päätyseinä, että kattorakenteen ja seinän välinen liitos on mitoitettava tälle voimalle.

Seinän korkeus on 6 metriä, joten periaatteessa puulevyillä tehtävä jäykistys vaatii hieman miettimistä. Konstruktiivisesti voidaan menetellä niin, että ajatellaan olevan kaksi tai useampia seinä päällekkäin ja mitoitetaan kukin päällekkäinen kerros itsenäisenä jäykistysseinänä. Tällöin on päällekkäisten levyjen välillä oltava liitos, jonka kautta ylälevyyn vaikuttava vaakavoima siirtyy alalevyille.

Tehdään jäykistys seuraavassa päätyseinän rungon yläohjauspuuhun naulattavilla vinotuilla (vrt. kuva 14).



Kuva 14. Päätyseinän jäykistys vinolaudoituksella

Käytetään päätyelementin yläohjauspuuna sahatavaraa, jonka paksuus on 50 mm, ja vinotukina lautoja $22 \times 150 \text{ mm}^2$, jotka naulataan 45° :n kulmaan pystytukiin nähden. Tällöin lautojen on yhteensä kestettävä voima

$$F_{\text{laudat päätyseinän ää}} = \frac{576/2}{\cos 45^\circ} = 407 \text{ kN}$$

Jos yksinkertaisuuden vuoksi käytetään nelikulmaisia nauloja 25×60 eli naulan halkaisija on 2,5 mm ja pituus 60 mm, niin yhden laudan pään ja vaakapuun liittymään sopii 14 kpl nauloja. Yhden naulan laskekapasiteetti on $1,2 \cdot 486 = 583 \text{ N}$, koska tuulijäykistyksessä voidaan käyttää 1,2-kertaisia arvoja. Naulaliitoksen kapasiteetti on laskettu EC5:n mukaan ja sahatavaran lujuusluokaksi on oletettu C24. Näin saadaan yhden laudan kapasiteetiksi $14 \cdot 583 = 8160 \text{ N}$. Vinojäykisteiden minimilukumäärä on $407/8,16 = 49$ kpl. Koska vinolaudoitusta sijoitetaan 45° :n kulmaan, niin lähinnä seinän päätä tulevan laudan yläpää on noin 6 m etäisyydellä seinän päästä. Tällöin lautaväli on $(25000 - 6000)/48 = 395 \text{ mm}$ eli käytännössä 400 mm. Jos laudan nurjahduspituus heikommassa suunnassa on korkeintaan 980 mm, niin liitos mitoittaa vinotuen eikä nurjahdus puristetulla rakenteella eli riittää kun kukin lauta naulataan kuhunkin runkotalppaan kahdella 25×60 naulalla. Naulat kannattaa lyödä hieman vinoon tartunnan parantamiseksi.

5.4 Sivuseinät

5.4.1 Voimat

Päädystä tuleva tuulikuorma aiheuttaa seinän alareunan eli perustuksen ja seinän liittymän kohtaan taivutusmomentin. Tämä momentti on tuulen paineen puoleisella seinällä

$$M_{t,3,d} = 1,5 \cdot 0,50 \cdot 25 \cdot \left[\frac{6,5^2}{2} + \frac{11 - 6,5}{2} \left(6,5 + \frac{11 - 6,5}{3} \right) \right] = 734 \text{ kNm}$$

Tämän momentin tasapainottamiseksi räystäätasolla tarvitaan voima

$$H_{t,3,d} = \frac{734}{6} = 122 \text{ kN}$$

Vastaavasti tuulen imun puoleisella seinällä taivutusmomentti ja räystäätason voima ovat

$$M_{t,3,d} = 1,5 \cdot (-0,22) \cdot 25 \cdot \left[\frac{6,5^2}{2} + \frac{11-6,5}{2} \left(6,5 + \frac{11-6,5}{3} \right) \right] = -323 \text{ kNm}$$

$$H_{t,4,d} = \frac{-323}{6} = -54 \text{ kN}$$

Jaetaan kuormat tasan kummallekin sivuseinälle ja suunnitellaan jäykistysseinät siten, että tuulen paineen ottaa vastaan tuulen puoleinen pääty ja imun vastakkainen pääty Näin saadaan

$$H_{t,\text{päätyseinä, paine.d}} = \frac{121}{2} = 61 \text{ kN ja}$$

$$H_{t,\text{päätyseinä, imu.d}} = \frac{-54}{2} = -27 \text{ kN.}$$

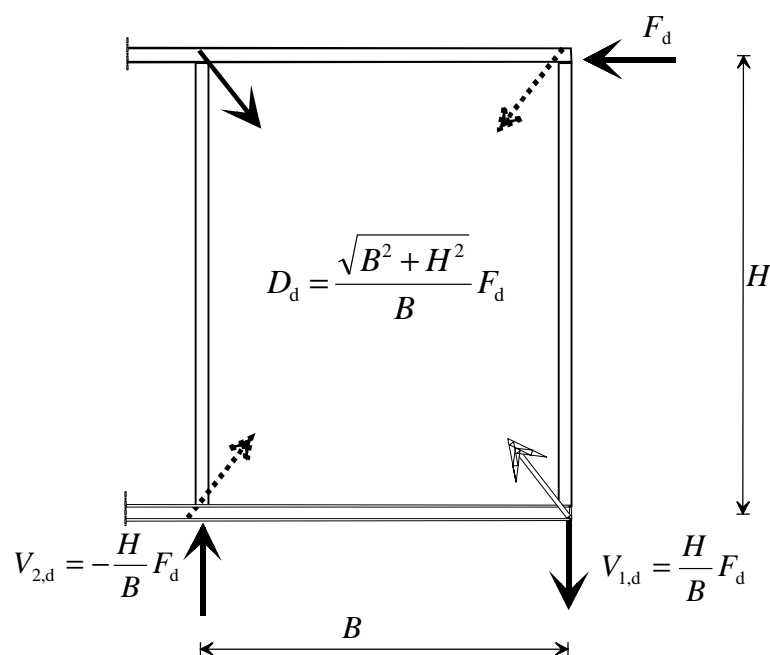
Jos tähän lisätään vielä edellä laskettu pystykuormien alkupäkeskisyydestä aiheutuva lisä, niin saadaan päätyseinää mitoittavaksi vaakakuormaksi

$$H_{\text{päätyseinä, paine.d}} = 61 + \frac{13,3}{2} = 68 \text{ kN}$$

Kuten edellä olevasta huomataan, pystykuormien aiheuttama lisä on noin 10 %.

5.4.2 Jäykisteen mitoitus

Jäykisteen staattinen toimintamalli on esitetty kuvassa 17. Siinä yläreunaan vaikuttaa vaakavoima $V_d=68$ kN. Tästä vaakavoimasta jäykiste pyrkii kääntymään alanurkan ympäri eli päädyn puoleinen vertikaali on ankkuroitava perustukseen. Ankkurivoimaa laskettaessa voidaan vähentää pysyvän pystykuorman osuus, jonka suuruutta laskettaessa käytetään osavarmuuskerrointa 0,9. Kerrointa 1,2 ei voida käyttää, koska isolla pystykuormalla on jäykistettä stabiloiva vaikutus. Taulukkoon 6 on laskettu eri jäykisteen osiin syntyvät voimat, kun pystykuorman stabiloivaa voimaa ei ole otettu huomioon.



Kuva 17. Jäykisteelle tulevat voimat vaakakuormasta F_d . Vinot jäykisteet ottavat vain vetorasituksia.

Taulukko 6. Jäykistysrakenteeseen syntyvät voimat taulukossa annetuilla mitoilla

Suure	Suuruus	Huom !
F_d	68 kN	
H	6,0 m	
B	4,8 m	
D_d	109 kN	
$D_{d,H}$	68 kN	Voiman D vaakakomponentti
$D_{d,V}$	85 kN	Voiman D pystykomponentti
$V_{1,d}$	85 kN	
$V_{2,d}$	-.85 kN	

Huomaa, että ylävaakapuuhun ja alavaakapuuhun tulee puristusvoima, jonka suuruus on $F_d=68$ kN.

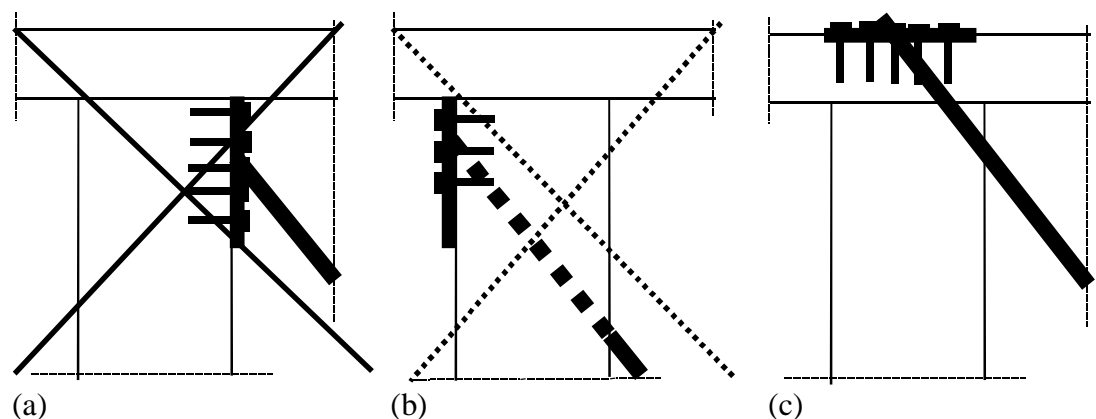
Mitoituksellisesti mielenkiintoisin kohta on terästangon kiinnitys puuhun. kiinnitys vaatii aina terästangon päähän teräsosan, jolla voidaan levittää terästangosta tuleva pistemäinen voima leveämmälle alueelle, jonka puu kestää. Tähän on periaatteessa kuvan 15 mukaiset mahdollisuudet.

Kuvassa 18 on esitetty vaihtoehdot konstruktiivisessa mielessä huonoimmasta (a) parhaaseen (c).

Vaihtoehdossa (a) teräsosan ja puun välille tulee vetoliitos, joka vaatii paljon liittimiä ja lisäksi puuhun syntyy syitä vastaan kohtisuoria vetorasituksia. Myös vaakapuun ja pystypuun välinen liitos pitää mitoittaa vaakasuuntaiselle voimalle F_d . Tästä syystä vaihtoehdosta (a) luovutaan.

Vaihtoehdoissa (b) ja (c) toinen voiman D komponentti voidaan ottaa vastaan puristusrasituksena puun ja teräsosan välillä. Toinen osa otetaan vastaan teräsosan ja puun välisellä leikkausliitoksella. Vaihtoehto (b) on huonompi kuin vaihtoehto (c), koska siinä mekaanisella liitoksella joudutaan ottamaan suurempi voima kuin vaihtoehdossa (c). Siinä myös vaaka ja pystypuun välinen liitos pitää mitoittaa vaakavoimalle kuten vaihtoehdossa (a).

Varsinkin vaihtoehdossa (c) tulee teräsosan ja puun välille pystykuormasta johtuen kitkaa, jota ei kuitenkaan voida mitoituksessa hyödyntää ellei ole luotettavasti tiedossa pintojen välistä kitkakerrointa. Kitkakertoimelle ei voida antaa suositusta. Toinen epävarmaksi jäävä lisäkapasiteetti on terästankoa vastaan kohtisuora puristuskomponentti poratussa reiässä. Koska reikä porataan yleensä melko väljäksi ja sen suunta voi vaihdella satunnaisesti paljonkin, ei tästä syntyvää lisäkapasiteettia voida hyödyntää.



Kuva 18. Terästangon kiinnitys puuhun vaihtoehdot (a)...(c).

Suunnitellaan terästangon päätylaatta siten, että leimapaine ottaa vetotangon pystysuuntaisen puristuskomponentin ja päätylaatan ja yläohjauspuun välinen leikkausliitos vaakakomponentin. Jos yläjuoksu on

sahatavaraa C24, niin sen puristuslujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa on $f_{c,90,k}=2,5 \text{ N/mm}^2$ ja suunnittelulujuus aikaluokassa C (tuulikuorma)

$f_{c,d} = k_{\text{mod}} f_{c,k} / \gamma_M = 0,9 \cdot 2,5 / 1,3 = 1,73 \text{ N/mm}^2$. Näin saadaan tarvittavan päätylaatan kooksi

$A_{\text{laatta}} = \frac{85000}{1,73} = 49100 \text{ mm}^2$ eli esimerkiksi suorakaidelaatta $150 \times 330 \text{ mm}^2$. Poikkileikkaus on niin suuri, ettei korotettua leimapainekestävyyttä voida liitoksessa hyödyntää.

Teräksen ja puun välisessä liitoksessa vaikuttaa puristusjännityksen lisäksi leikkaus vaakasuunnassa. Tämä leikkausvoima on taulukon 6 mukaa 68 kN. Käytännössä ainakin osa voimasta välittyy kitkan avulla. Kitkan suuruus on kuitenkin niin epämääräinen, ettei sitä voida hyödyntää, vaan leikkausvoima otetaan kokonaan mekaanisella liitoksella. Taulukossa 7 on annettu eri mekaanisten liittimien määrät, jotka ottavat mitoitusleikkausvoiman 68 kN.

Taulukko 7. Esimerkkejä mekaanisten liittimien lukumääristä, kun liitoksen mitoitusleikkausvoima on 68 kN.

Liitin	Lukumäärä (kpl)	Huom!
Ankkurinaula 4x40 (∅)	72	Teräslaatan paksuus 12 mm
Naula 3,4x100 (□)	67	Teräslaatan paksuus 12 mm
Pultti 8 mm	19	Teräslaatan paksuus 12 mm

5.5 Jäykistävä levykenttä

Jäykistävän levykentän tehtävänä on siirtää seinille ja kattoon kohdistuvat vaakakuormat päätyseinille. Tämä rakenne voidaan mitoittaa rungon syvyisen korkuisena palkkina, jonka jänneväli (päätyseinien väli) on välillä $2b \dots 6b$, missä b on rungon syvyys. Tämä ehto toteutuu esimerkissämme. Katso kuva 13!

Levykentän sivuseinien suuntaisille reunapalkeille tulee normaalivoima

$$N_d = \frac{q_{t,s,d} L^2}{8B} = \frac{11,4 \cdot 40000^2}{8 \cdot 25000} = 91200 \text{ N} = 91,2 \text{ kN}.$$

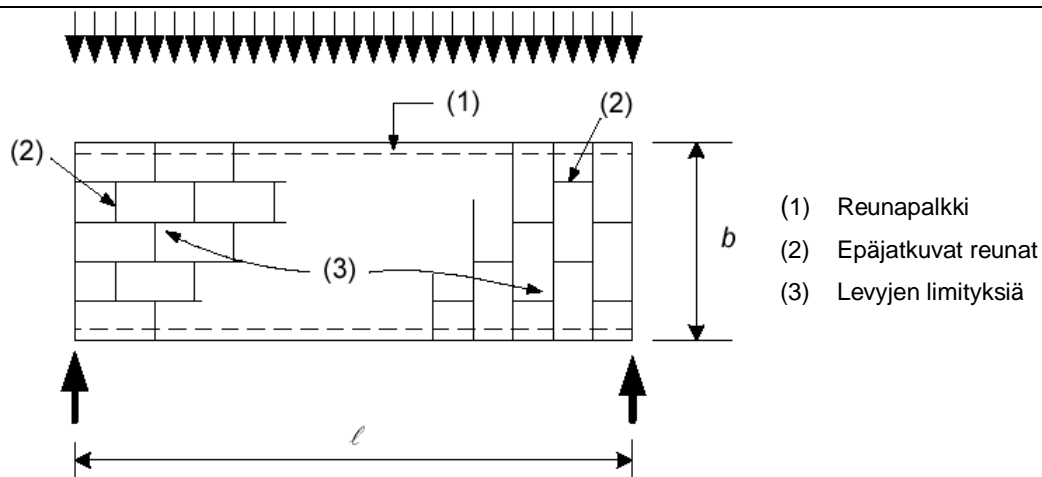
Reunapalkin mitoitus on käytännössä reunapalkin liitosten mitoitusta, sillä esimerkiksi sahatavara C24 olevan reunapalkin kooksi riittää esimerkiksi $50 \times 175 \text{ mm}^2$. Jos kyseinen sahatavara jatketaan esimerkiksi naulauslevyillä, jotka kiinnitetään ankkurinauloilla $4,0 \times 40 \text{ mm}$, niin nauvoja tarvitaan yhtä liitosta kohti 95 kpl eli esimerkiksi 48 kpl kummallekin puolelle.

Taivutusmomentin lisäksi levykenttä on mitoittava leikkausvoimalle. Suurin leikkausvoima on päätyseinien vieressä, jossa se on sama kuin edellä laskettu jäykistysseinälle tuleva tukireaktio eli 228 kN, mikä on päätyseinän pituusyksikköä kohti

$$\frac{228}{25} = 9,1 \text{ kN/m}$$

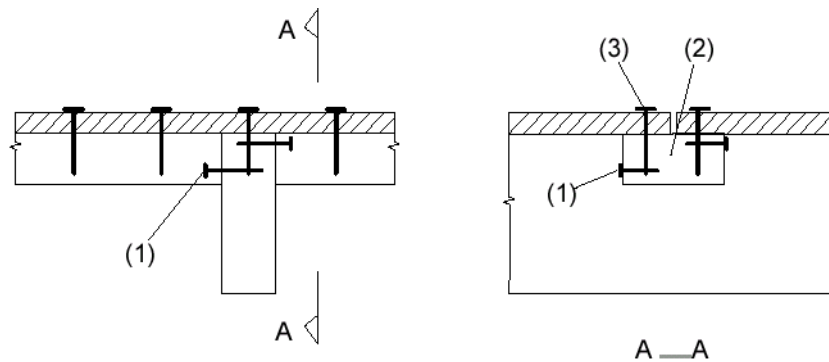
Levykentässä vaikuttavien leikkausvoimien oletetaan olevan tasan jakautuneita levykentän leveydelle.

Levyjen reunoilla olevien liittimien leikkauskestävyyksien mitoitusarvoja voidaan suurentaa kertomalla normien perusarvot arvot luvulla 1,2.



Kuva 15 Levykentän kuormitus ja levyjen limityksiä

Levyreunat, jotka eivät tukeudu palkkeihin, vasoihin tai kattotuoleihin, kiinnitetään toisiinsa esim. apusoirojen avulla kuvan 16 mukaisesti. Levyjen kiinnittämiseen käytetään standardin EN 14592 mukaisia nauloja tai ruuveja. Naulojen tulee olla profiloituja tai poikittaisella kuvioinnilla varustettuja. Suurin liitinväli on levyjen reunoilla 150 mm ja muualla 300 mm.



- (1) Apusoiron kiinnitys vinonaulauksella tai -ruuvauksella katto- tai lattiavasaan
 (2) Apusoiro
 (3) Levyn naulaus tai ruuvaus apusoiroon

Kuva 16 Esimerkki levyjen liitoksesta, kun vasat eivät tue levyä reunaan.

5.6 Päätykolmiot

5.6.1 Voimat

Päätykolmioihin vaikuttava tuulikuorma pyrkii kaatamaan kattoristikot, jotka on tuettava kaatavaa momenttia vastaan. Tuulesta aiheutuva momentti on

$$M_{t, \text{kolmio, paine.d}} = 1,5 \cdot 0,50 \cdot 25 \cdot \left[\frac{0,5^2}{2} + \frac{4,5}{2} \left(0,5 + \frac{4,5}{3} \right) \right] = 86 \text{ kNm}$$

Vastaavasti imupuolelle tulee momentti

$$M_{t, \text{kolmio, imu.d}} = -38 \text{ kNm}$$

eli yhteensä

$$M_{t, \text{kolmio}, d} = 86 + 38 = 124 \text{ kNm.}$$

Lisäksi tulee pystykuormien alkuepäkeskisyydestä aiheutuvat kuormat, joina käytetään samoja arvoja kuin aikaisemmin eli koko katolle arvoa 13,3 kN koko katolle.

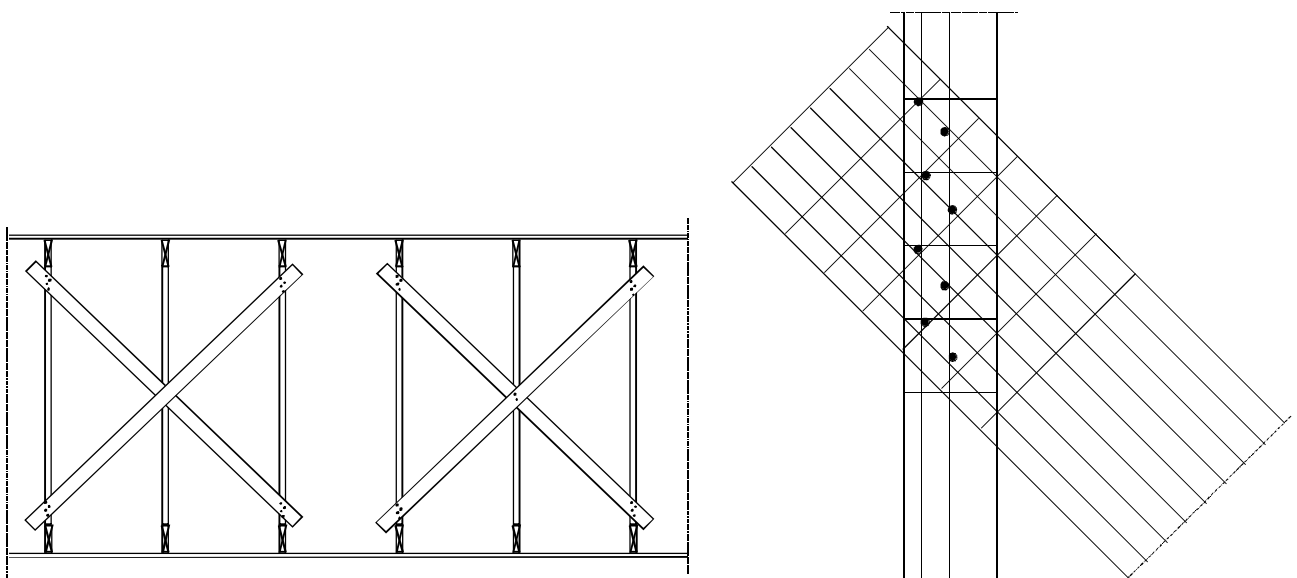
Jos ristikot tuetaan neljänpisteistään, niin yhtä ristikkkoa kohti tarvitaan ristikon yläpaarretasossa voima

$$Q_{\text{yläpaarre}} = \frac{124 + 13}{3 \cdot 2,75} = 16,6 \text{ kN}$$

Tässä on ristikon korkeus jännevälin 1/4 – pisteessä eli 2,75 m.

5.6.2 Tukirakenteet

Yksinkertaisuuden vuoksi tuetaan ristikot laudoista 22x100 tehdyillä ristikoilla kuvan 19 mukaisesti. Kriittiseksi tekijäksi tulee naulojen mahtuminen liitokseen. Jos ristikon diagonaalin leveys on 42 mm, niin liittimet pitää sijoittaa epäkeskisesti uumasauvan keskilinjan suhteen, jotta tarvittava reunaetäisyys uumasauvan reunasta saavutetaan. Jos esimerkiksi ristikkojen k-väli on 1200 mm, ja tukilaudat ovat 45°:n kulmassa uumasauvoihin nähden, on vaadittava etäisyys on 21,3 mm. Naulat kannattaa sijoittaa epäsymmetrisesti uumasauvan keskilinjan suhteen. Tällöin saadaan sopimaan vielä toinenkin rivi nauloja, jos lauta on pelkästään vedetty. Kaiken kaikkiaan liitokseen saadaan sopimaan nauloja 8 kpl. Yhden naulan leikkauskapasiteetti on 583 N ja koko liitoksen $8 \cdot 583 = 4660 \text{ N} \approx 4,7 \text{ kN}$. Täten jokaiseen kolmeen ristikkojen kaatumista estävään tuentariviin tarvitaan viisi laudoista tehtyä ”ristiä”. Väliin jäävät ristikot voidaan tukea periaatteessa ruodelautojen avulla. Tähän kuitenkin sisältyy se riski, että ruodelaudat voidaan jatkaa käytännössä saman ristikon kohdalta. Tällöin naulojen reunaetäisyydet ristikon yläpaarteen reunoista jäävät käytännössä liian pieniksi. Suunnitteluohjeiden minimietäisyys vaatimus $10d$, kummas-takin reunasta edellyttää 50 mm leveää yläpaarretta jatkamattomaltakin ruoteelta, kun käytetään 2,5 mm läpimitaltaan olevia nauloja.



Kuva 19. Ristikkojen kaatumisen estävät tukiristikot

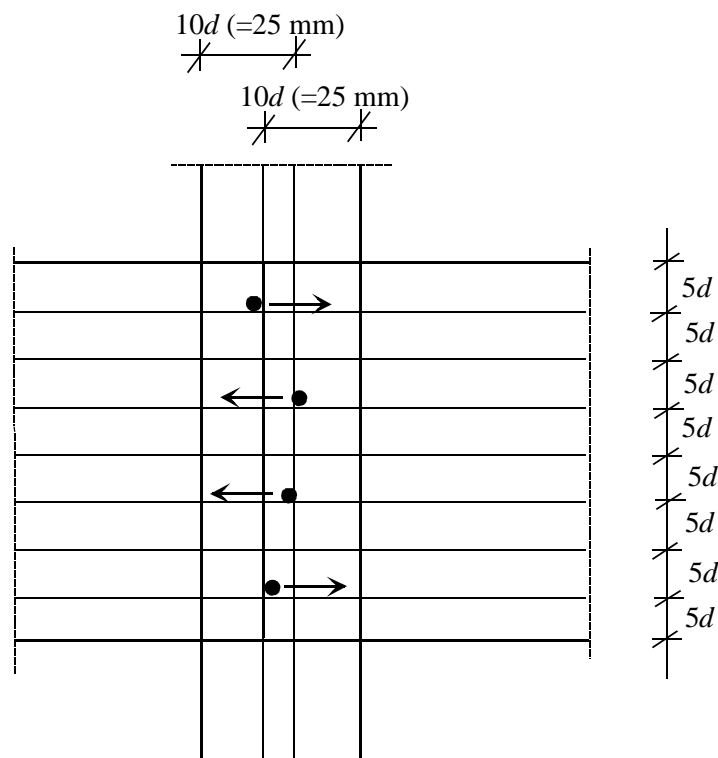
5.6.3 Tukiristikoiden väliin jäävät kattoristikot

Tukiristikoiden väliin jäävät ristikot voidaan tukea periaatteessa ruodelautojen avulla. Tähän kuitenkin sisältyy se riski, että ruodelaudat voidaan jatkaa käytännössä saman ristikon kohdalta. Tällöin naulojen reunaetäisyydet ristikon yläpaarten reunoista jäävät käytännössä liian pieniksi. Suunnitteluohjeiden minimietäisyys vaatimus $10d$, kummastakin reunasta edellyttää 50 mm leveää yläpaarretta jatkamattomaltakin ruoteelta, kun käytetään 2,5 mm läpimitaltaan olevia nauloja. Toinen luotettavampi tapa on tukea nämä ristikot yläpaarteiden alareunaan naulattujen lautojen avulla. Tällöin laudat voidaan limittää vierekkäin eikä niitä tarvitse jatkaa päittäin. Yhden ristikon vaatima tukivoima tässä esimerkissä on

$$Q_{\text{yläpaarre, yksi ristikko}} = \frac{1,2}{40} 16,6 = 0,5 \text{ kN}$$

eli periaatteessa yksikin naula riittää tukemaan yhden ristikon viereisiin. Edellä kerrottua ajattelua soveltaen voidaan kyseiseen liitokseen sijoittaa neljä naulaa, joista aina kaksi toimii rakenteellisesti samansuuntaisen voiman vaikuttaessa. Tämä on esitetty kuvassa 20.

Jatkaminen tuella voidaan tehdä siis limittämällä laudat vierekkäin, jolloin saadaan varmasti riittävät päätte-etäisyydet lautojen päistä nauloihin (kuva 21).



Kuva 20. Naulojen sijoittaminen laudan ja kattotuolin väliseen liitokseen. Kukin naula toimii nuolen suuntaiselle voimalle

5.6.4 Ristikoiden yläpaarteiden sivuttaistuenta

Tässä esimerkissä käytetään yhden ristikon yläpaarten keskimääräisenä puristusvoimana arvoa

$$N_d = 80 \text{ kN.}$$

jota ei ole erikseen laskettu, mutta se on suuruusluokaltaan oikea.

Koska ristikot ovat 1,2 m välein, niin 40 m pitkässä katossa on 33 kpl ristikoita. Jäykistävä rakenne pitää mitoittaa siten kuormalle

$$q_{s,d} = \frac{nN_d}{50L} = \frac{33 \cdot 80}{50 \cdot 25} = 2,1 \text{ kN/m} = 2,1 \text{ N/mm.}$$

Tämän aiheuttama suurin taivutusmomentti on

$$M_{s,d} = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{2,1 \cdot 25^2}{8} = 164 \text{ kNm}$$

ja leikkausvoima

$$Q_{s,d} = \frac{q_d L}{2} = \frac{2,1 \cdot 25}{2} = 26 \text{ kN}$$

Jos sivuttaistuentaan käytettävällä rakenteella otetaan vastaan myös päädyn tuulikuorman tukireaktio, jäykistävälle rakenteelle tulee lisävaakavoima. ”Varmalla puolella” oleva arvo saadaan, jos käytetään harjan kohdalla saatavaa arvoa, joka on

$$q_{t,d} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot \frac{h_{\text{harja}}}{2} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot \frac{11}{2} = 4,125 \text{ kN/m}$$

ja tästä saadaan taivutusmomentti

$$M_{t,d} = \frac{q_{t,d} L^2}{8} = \frac{4,125 \cdot 25^2}{8} = 322 \text{ kNm}$$

Tarkka ratkaisu taivutusmomentille saadaan, kun momenttia laskettaessa seinän korkeutena käytetään arvoa

$$h_{\text{ef, momentti}} = \frac{h_{\text{räystä}} + 2h_{\text{harja}}}{3}$$

missä

h on seinän korkeus räystäällä ja

H on seinän korkeus harjalla.

Tällöin tasainen kuorma on

$$q_{t,d, tarkka} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot \frac{h_{\text{räystä}} + 2h_{\text{harja}}}{6} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot \frac{6,5 + 2 \cdot 11}{6} = 3,56 \text{ kN/m}$$

eli likikaavalla saadaan noin 15 % liian suuria taivutusmomenteja. Tarkka taivutusmomentti on

$$M_{t,d, tarkka} = \frac{q_{t,d} L^2}{8} = \frac{3,56 \cdot 25^2}{8} = 278 \text{ kNm}$$

Suurimmaksi leikkausvoimaksi saadaan likikaavalla

$$V_{t,d} = \frac{q_{t,d} L}{2} = \frac{4,125 \cdot 25}{2} = 51,6 \text{ kN}$$

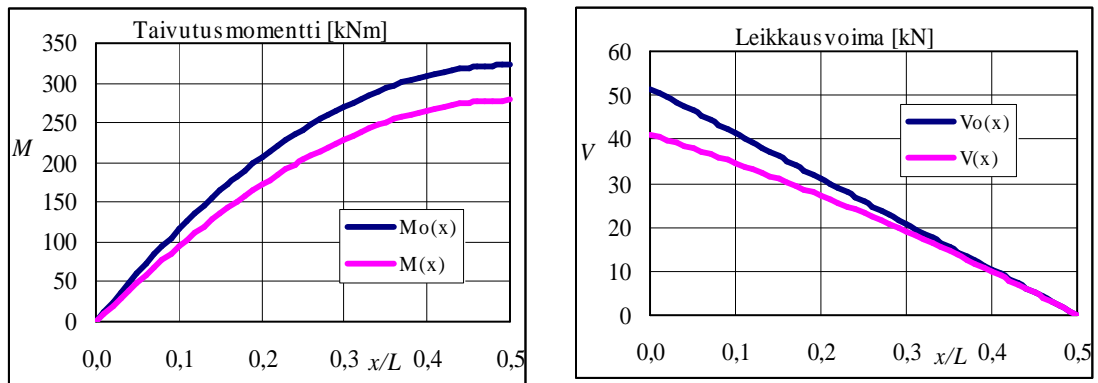
Tarkka suurin leikkausvoima saadaan, kun seinän korkeutena käytetään arvoa

$$h_{\text{ef,leikkausvoimai}} = \frac{h_{\text{räystäs}} + h_{\text{harja}}}{2}$$

ja se on

$$V_{\text{t,d,tarkka}} = \frac{q_{\text{t,d,tarkka}} L}{2} = \frac{3,28 \cdot 25}{2} = 41,0 \text{ kN.}$$

Kuvassa 20 on esitetty tuulikuorman aiheuttamia taivutusmomenteja ja leikkausvoimia eri kohdilla jäneväliä, kun käytetään tarkkoja kaavoja, jolloin kuorman suuruus vaihtelee seinän korkeuden mukaan, ja edellä annettuja likikaavoja, jossa päätyyn vaikuttaa suurin kuorma, joka on siis harjan kohdalla laskettu.



Kuva 21 Ristikon yläpaarteiden kohdalla vaikuttava taivutusmomentti ja leikkausvoima likikaavalla ja tarkalla kaavalla laskettuna. Tarkkojen kaavojen käyrissä on alaindeksi o.

Valitaan jäykistäväksi rakenteeksi kattoristikoiden yläpaarteiden tasoon kattoristikoiden väliin sijoitettavat tukiristikot. Tukiristikoiden paarteet ovat puuta ja diagonaalit vedettyjä terästankoja. Rakenteen periaate on esitetty kuvassa 12 sivulla 19. Taulukossa 8 on esitetty eri vaihtoehdoilla syntyviä voimia.

Taulukosta 8 huomataan, että

- jäykistysristikoiden pitää olla korkeammat kuin ristikkoväli paarevoimien pienentämiseksi,
- paarekoko 42x95 riittää, kun ristikoiden pitää estää vain yläpaarteiden nurjahdus sivulle,
- ristikoita on kaksi päällekkäin kummassakin päässä hallia, kun ristikoiden pitää ottaa vastaan lisäksi päätyyn kohdistuvasta tuulikuormasta puolet ja paarteiden korkeus on 140 mm.
- yksi ristikko rakennuksen keskellä ja yksi ristikko kummassakin päässä ovat riittämättömiä puun lujuuden suhteen.

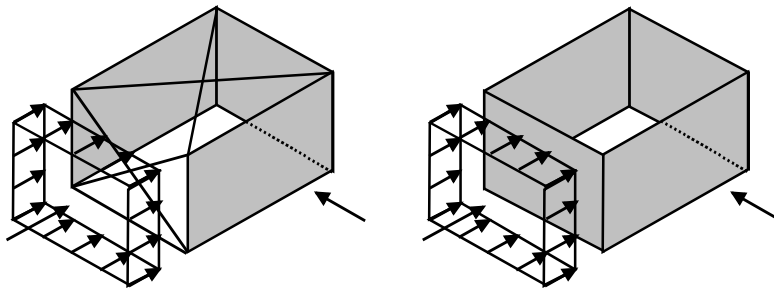
Ristikon korkeuden kasvattaminen pienentää paarevoimia korkeuden suhteessa. Esimerkiksi 2,4 m korkeilla ristikoilla paarevoimat menevät puoleen ja 3,6 m korkeilla ristikoilla kolmannekseen taulukon 8 arvoista. Diagonaalivoimat säilyvät samoina, vaikka ristikon korkeus kasvaa. Diagonaalit mitoittavat käytännössä tuenta puuhun. Tästä on esimerkki kohdassa 5.4.2.

Taulukko 8. Yläpaarten tasoon sijoitettujen ristikoiden eri vaihtoehtoja

	Yläpaarteiden stabiilius	Yläpaarteiden stabiilius ja tuuli
Kuormat		
q_d (N/mm)	2,1	6,2
M_d (kNm)	164	486
V_d (kN)	26	68
Ristikko		
Ristikon korkeus (mm)	1155	1155
Paarreleveys b (mm)	42	2x42
Paarrekoekaus h (mm)	95	140
Yksi ristikko sivuseinän keskellä		
Voimat (kN)		
Paarrevoima	155	479
Diagonaalivoima tuella	37	110
Jännitys $\sigma_{c,d}$ paartessa (N/mm ²)	38,8	40,7
Yksi ristikko kummassakin päässä		
Voimat (kN)		
Paarrevoima	77	240
Diagonaalivoima tuella	19	55
Jännitys $\sigma_{c,d}$ paartessa (N/mm ²)	19,4	20,4
Kaksi ristikkoa kummassakin päässä		
Voimat (kN)		
Paarrevoima	39	120
Diagonaalivoima tuella	13	28
Jännitys $\sigma_{c,d}$ paartessa (N/mm ²)	9,7	10,2
Diagonaalit oletettu olevan 45 ^o :n kulmassa paarteisiin nähden		

Yleistä

Vaakakuormia vastustavat järjestelmät muodostuvat pystyrakenteista tai pysty- ja vaakarakenteiden yhdistelmistä. Vähimmäisvaatimukset on esitetty kuvassa L1.1.



Kuva L1.1. Rakennusjärjestelmän jäykistys - vähimmäisvaatimus

Yleisesti pätee:

- Vaakalevyjärjestelmän lisäksi tarvitaan kolme pystysuuntaista rakenneosaa. Rakenneosat ja niiden voimien vaikutusviivat eivät saa leikata samassa pisteessä. Ne eivät myöskään saa olla yhdensuuntaisia.
- Ilman vaakalevyjärjestelmää tarvitaan neljä pystyosaa, joista vain kaksi saa kohdata samassa pisteessä.

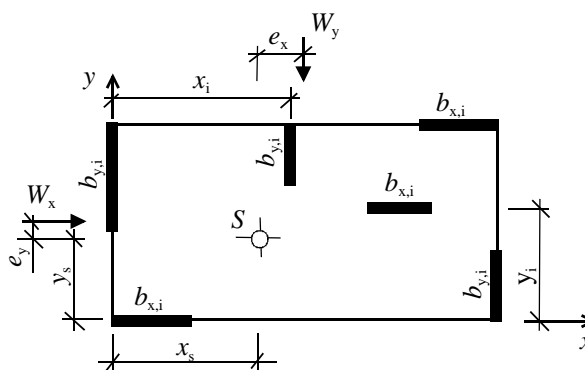
Tähän "peruslaatikkoon" voidaan lisätä enemmän rakenneosia, jolloin laatikko jäykistettynä edellä esitetyllä tavalla sallii vaakakuormien siirtämisen osaksi tai kokonaan perustuksille rakenneosien kautta.

Kuvassa 6 esitetty jäykistys tasapainottaa rakenteen (esimerkiksi, kun rakennuksen lyhyeen sivuun kohdistuu tuulikuorma). Jos vaakakuormat eivät ole keskeisiä, tulee vääntöä, joka johtaa lisäkuormiin ja muodonmuutoksiin.

Jäykisteiden geometrinen sijainti

Rakennusjärjestelmää jäykistävät osat tulee sijoittaa siten, että jäykistysjärjestelmästä tulee symmetrinen. Muutoin tukivoimien resultantti ei ole samassa kohdassa kuin jäykisteiden resultantti ja jäykistysjärjestelmään tulee vääntöä. Tarvittavat laskentakaavat on annettu taulukossa L1.1.

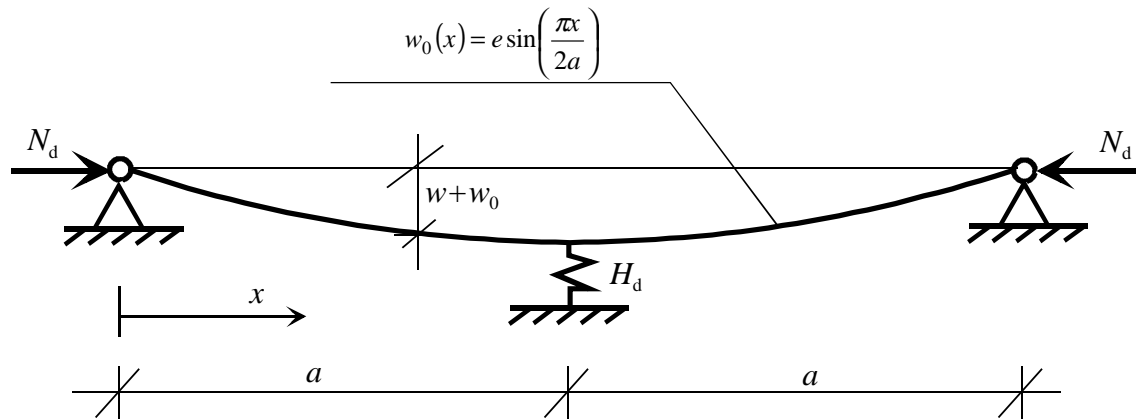
Taulukko L1.1 Jäykisteet ja laskentakaavat.



$x_s = \frac{\sum b_{yi} x_i}{\sum b_{yi}}$	$y_s = \frac{\sum b_{xi} x_i}{\sum b_{xi}}$
$s_{xi} = (x_i - x_s)$	$s_{yi} = (y_i - y_s)$
Tuulen suunta W_x :	Tuulen suunta W_y :
$H_{xi} = \frac{b_{xi}}{\sum_j b_{xj}} W_x + \frac{W_x e_y s_{yi} b_{xi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$	$H_{xi} = \frac{W_y e_x s_{yi} b_{xi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$
$H_{yi} = \frac{W_x e_y s_{xi} b_{yi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$	$H_{yi} = \frac{b_{yi}}{\sum_j b_{yj}} W_y + \frac{W_y e_x s_{xi} b_{yi}}{\sum_j b_{xj} s_{yj}^2 + \sum_j b_{yj} s_{xj}^2}$

Joustava tuki jännevälän keskellä

Tarkastellaan kuvan L2.1 mukaista tapausta, jossa puristussauva on tuettu keskeltä pistemäisellä joustavalla tuella.



Kuva L2.1 Nurjahdustukena pistemäiset kimmoiset tuet

Vasemman puolen taipumalle pätee differentiaaliyhtälö

$$M = N_d(w + w_0) - \frac{H_d}{2}x = -EIw'' \quad (\text{L2.1})$$

missä

N_d on puristusvoima,

w on taipuma voimasta N_d ,

w_0 on sauvan alkutaipuma, jolle käytetään arvoa

H_d on tukivoima taipuneessa tilassa ja

EI on sauvan taivutusjäykkyys.

Yhtälön (L2.1) ratkaisu on

$$w(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) + \bar{A} w_0(x) + \frac{H_d}{2N_d} x \quad (\text{L2.2})$$

missä

$$k = \sqrt{\frac{N_d}{EI}}, \text{ ja}$$

A ja B ovat reunaehdoista riippuvia vakioita.

Jos alkutaipuma on

$$w_0(x) = e \sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right), \quad (\text{L2.3})$$

niin

$$\bar{A} = \frac{k^2 e}{\left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 - k^2}$$

Jos taipuma vasemmalla tuella on nolla, siis reunaehto vasemmalla tuella on $w(0) = 0$, niin yhtälöstä (L2.2) saadaan

$$w_1(x) = A_1 \sin(kx) + \bar{A} e \sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right) + \frac{H_d}{2N_d} x \quad (\text{L2.4})$$

Oikealla puolella saadaan vastaavasti

$$w_2(x) = A_2 \sin[k(2a-x)] + \bar{A}e \sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right) + \frac{H_d}{2N_d}(2a-x) \quad (\text{L2.5})$$

Keskellä kummankin puolen taipumalle ja tukivoimalle sekä jousivakiolle C saadaan yhtälöt

$$w_1(a) = A_1 \sin(ka) + \bar{A}e + \frac{H_d a}{2N_d} = \frac{H_d}{C} \quad A_1 = \frac{H_d}{C} \frac{1}{\sin(ka)} - \frac{\bar{A}e}{\sin(ka)} - \frac{H_d a}{2N_d} \frac{1}{\sin(ka)}$$

ja

$$w_2(x) = A_2 \sin(ka) + \bar{A}e + \frac{H_d a}{2N_d} = \frac{H_d}{C} \quad A_2 = \frac{H_d}{C} \frac{1}{\sin(a)} - \frac{\bar{A}e}{\sin(a)} - \frac{H_d a}{2N_d} \frac{1}{\sin(a)}$$

Taipumille saadaan nyt yhtälöt

$$w_1(x) = \bar{A}e \left[\sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right) - \frac{\sin(kx)}{\sin(ka)} \right] + \frac{H_d}{2N_d} \left[x - a \frac{\sin(kx)}{\sin(ka)} \right] + \frac{H_d}{C} \frac{\sin(kx)}{\sin(ka)} \quad (\text{L2.6})$$

$$w_2(x) = \bar{A}e \left[\sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right) - \frac{\sin[k(2a-x)]}{\sin(ka)} \right] + \frac{H_d}{2N_d} \left[2a - x - a \frac{\sin[k(L-x)]}{\sin\left(\frac{kL}{2}\right)} \right] + \frac{H_d}{C} \frac{\sin[k(2a-x)]}{\sin(ka)} \quad (\text{L2.7})$$

Tuen kohdalla saadaan ehto

$$\frac{d^3 w_2}{dx^3} \Big|_{x=\frac{L}{2}} - \frac{d^3 w_1}{dx^3} \Big|_{x=\frac{L}{2}} = \frac{H_d}{EI} \quad (\text{L2.8})$$

eli sijoituksen jälkeen saadaan

$$\frac{H_d}{N_d} + 2k \cot(ka) \left(-\bar{A} + \frac{H_d}{C} - \frac{H_d a}{2N_d} \right) \quad (\text{L2.9})$$

ja tästä edelleen

$$C = \frac{N_d}{a} \frac{1}{\frac{1}{2} \left[1 - \frac{\tan(ka)}{ka} \right] + \frac{N_d \bar{A}}{H_d a}} \quad (\text{L2.10})$$

Tästä saadaan edelleen muoto

$$C = \frac{N_d}{a} \frac{1}{\frac{1}{2} \left[1 - \frac{\tan\left(\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}}\right)}{\pi \sqrt{\frac{N_d}{N_E}}} \right] + \frac{e N_d}{a H_d} \frac{1}{\frac{N_E}{4N_d} - 1}} \quad (\text{L2.11})$$

missä

N_d on puristusvoima

N_E on nurjahduspituutta a vastaava nurjahduskuorma,

a on vapaa tukiväli,

e on alkutaipuma välillä $2a$

Kaavan (L2.11) käyttöalue on välillä $0,25N_E < N_d < N_E$ sillä. jos $N_d < 0,25N_E$, niin sauva ei tarvitse nurjahdustukea välillä $2a$, ja jos $N_d > N_E$, niin sauva nurjahdusta välillä a nurjahdustuesta riippumatta.

Jos kaavaan (L2.11) nimittäjään sijoitetaan suurin mahdollinen voima N_d eli $N_d=N_E$ ja pienin mahdollinen alkuepäkeskisyyks $e=0$ eli sauva on suora, saadaan Eurocode 5 kaava

$$C = \frac{N_d}{a} \quad (\text{L2.12})$$

Kaavasta (L2.11) huomataan, että tuen vaadittava jäykkyys riippuu edellä mainittujen arvojen lisäksi myös suhteesta N_d/H_d , kun alkukäyryys poikkeaa nolasta. Eurocode 5:ssa annetaan käytettäväksi taulukon L2.1 mukaiset arvot.

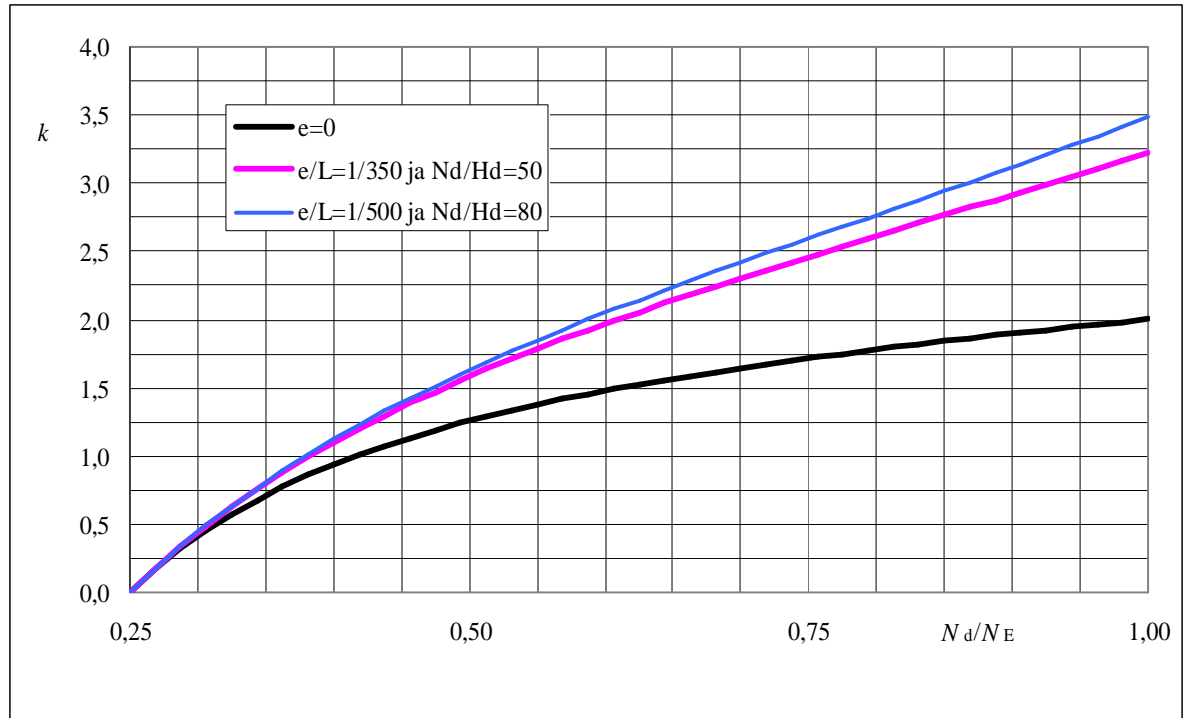
Taulukko L2.1 Eurocode 5:n mukaiset arvot suhteille e/L ($=e/(2a)$) ja N_d/H_d .

	e/L	N_d/H_d
Liimapuu ja Kertopuu	1/500	80
Sahatavara	1/350	50

Kaavan (L2.11) tulosta on havainnollistettu kuvassa L2.2. Siinä annettua kerrointa k käytetään kun vaadittava jäykkyys lasketaan kaavasta

$$C = k \frac{N_d}{a} \quad (\text{L2.13})$$

Kuvassa L2.2 on taulukon L2.1 tapausten lisäksi esitetty myös tapaus, jossa $e=0$ eli sauvan on täysin suora.



Kuva L2.2 Kaavan (L2.11) tuloksen havainnollistaminen. Merkinnät ovat kuvan L2.1 mukaiset.

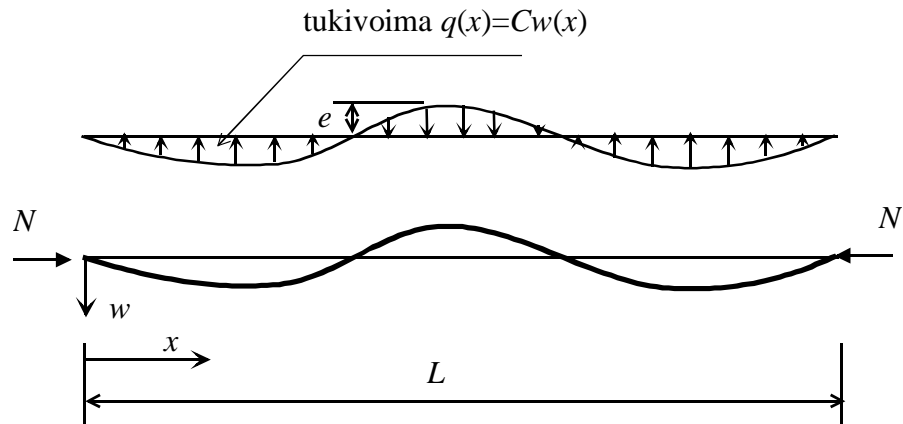
Kuvasta L2.2 huomataan

- kerroin $k=0$, kun suhde $N_d/N_E=0,25$ eli puristusvoima on sama kuin koko välin $2a$ nurjahduskuorma eli tukea ei tarvita,
- jos suhde $N_d/N_E=1$, niin kerroin k on välillä 2-3,5 alkukäyryydestä e ja puristusvoiman N_d ja H_d suhteesta riippuen

Eurocode 5:ssa on annettu kerroin $k=2$ vastaa tapausta, jossa $N_d/N_E=1$ ja alkukäyryys $e=0$.

Nurjahdustukena jatkuva rakenne

Kaavoja johdettaessa on käytetty kuvan L3.1 mukaisia merkintöjä.



Kuva L3.1 Käytetyt merkinnät

Kaavojen johto:

$$M'' = N(w'' + w_0'') + Cw = -EIw^{(IV)} \quad (\text{L3.1})$$

missä

- N on puristusvoima,
- w on taipuma puristusvoimasta N ,
- w_0 on puristussauvan alkutaipuma,
- C on tuentaliitoksen jäykkyys pituusyksikköä kohti ja
- EI on puristetun osan taivutusjäykkyys nurjahdussuunnassa.

Kaavassa (L3.1) termi Cw on siis nurjahdusta vastustava jatkuva kuorma ” q ” pituusyksikköä kohti.

Alkutaipuma w_0 on

$$w_0 = e \sin \frac{m\pi x}{L} \quad (\text{L3.2})$$

missä

- L on sauvan kokonaispituus,
- m on alkutaipuman aaltojen lukumäärä sauvan pituudella L ja
- e on taipuma aallon keskellä.

Ratkaisua varten yhtälö (1) kirjoitetaan muotoon

$$w^{(IV)} + 2k^2 w'' + r^4 w = -2k^2 w_0'' \quad (\text{L3.3})$$

missä siis

$$k^2 = \frac{N}{2EI},$$

$$r^4 = \frac{C}{EI}$$

Yhtälön (L3.3) yleiset ratkaisut ovat:

Tapaus A $k^4 > r^4$:

$$w = A \sin \alpha x + B \cos \alpha x + C \sin \beta x + D \cos \beta x \quad (\text{L3.4})$$

missä

$$\alpha = \sqrt{k^2 + \sqrt{k^4 - r^4}} \quad \text{ja}$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - \sqrt{k^4 - r^4}}.$$

Tapaus B: $k^4 = r^4$:

$$w = (A + Bkx) \sin kx + (C + Dky) \cos kx \quad (\text{L3.5})$$

Tapaus C: $k^4 < r^4$;

$$w = A \sin \alpha x \sinh \beta x + B \sin \alpha x \cosh \beta x + C \cos \alpha x \sinh \beta x + D \cos \alpha x \cosh \beta x \quad (\text{L3.6})$$

missä

$$\alpha = \sqrt{\frac{r^2 + k^2}{2}} \quad \text{ja}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{r^2 - k^2}{2}}$$

Kaikissa kolmessa tapauksessa yksityisratkaisu on

$$\bar{w} = \bar{A} \sin \frac{m\pi x}{L} = \left[\frac{2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 e}{\left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - 2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + r^4} \right] \sin \frac{m\pi x}{L} \quad (\text{L3.7})$$

Vakiot A , B , C ja D määräytyvät reunaehdoista, jotka ovat

$$w(0) = w(L) = 0 \quad \text{ja}$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=0} = \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0$$

Kaikissa tapauksissa reunaehdoista saadaan $A=B=C=D=0$, ja taipuma on siis aina

$$w(x) = \left[\frac{2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 e}{\left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - 2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + r^4} \right] \sin \frac{m\pi x}{L} \quad (\text{L3.8})$$

Tästä saadaan tukivoimaksi sauvan pituusyksikköä kohti sauvan keskellä, jossa $x=L/2$

$$q\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 Ce}{\left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - 2k^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + r^4} \quad (\text{L3.9})$$

Lausekkeen (9) ääriarvo saadaan, kun se derivoidaan aaltojen lukumäärän m suhteen. Derivointi antaa tulokseksi

$$m = \frac{L}{\pi} \sqrt[4]{\frac{C}{EI}} \quad (\text{L3.10})$$

Kaavassa (L3.10) luku m on teoreettisesti ottaen kokonaisluku, joka saadaan, kun m pyöristetään lähimmäksi kokonaisluvuksi. Tässä käytetään kuitenkin kaavasta (L3.10) saatavaa arvoa sellaisenaan, koska tästä epätarkkuudesta aiheutuva virhe on pieni ja tulos on aina varmallalla puolella.

Kun tämä tulos sijoitetaan kaavaan (L3.9), saadaan suurin tasainen kuorma sauvan pituusyksikköä kohti, ja se on

$$q_{\max} = \frac{NCe}{2\sqrt{CEI - N}} \quad (\text{L3.11})$$

missä

- N on puristusvoima,
- C on tuentaliitoksen jäykkyysvakio (N/mm^2),
- e on yhden aallon suurin alkuepäkeskisyyys ja
- EI on sauvan taivutusjäykkyys nurjahdussuunnassa.

Yhden aallon alkuepäkeskisyydelle voidaan sahatavararakenteissa käyttää arvoa

$$e = \frac{L}{300m}$$

ja liimapuurakenteissa arvoa

$$e = \frac{L}{500m}$$

missä m on kaavasta (L3.10) saatava aaltojen lukumäärä ja L on sauvan kokonaispituus.

Jos kaavassa (L3.8) $m=1$, niin saadaan tapaus, jossa nurjahtava rakenne taipuu koko matkallaan samalle puolelle keskilinjaltaan. Tällöin saadaan

$$w(x) = \left[\frac{2k^2 \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 e}{\left(\frac{\pi}{L} \right)^4 - 2k^2 \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 + r^4} \right] \sin \frac{\pi x}{L} = \frac{NN_E e}{N_E^2 - NN_E + CEI} \sin \frac{\pi x}{L} \quad (\text{L3.12})$$

missä

EI sauvan taivutusjäykkyys nurjahdussuunnassa ja

$N_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$, mikä on nurjahduskuorma, kun sauva on koko matkallaan tukematon nurjahduksen suhteen ja

Jos suurimmaksi taipumaksi oletetaan jännevälin keskellä L/n , niin saadaan

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{NN_E e}{N_E^2 - NN_E + CEI} = \frac{L}{n} \quad (\text{L3.13})$$

ja tästä edelleen

$$C = \frac{N_E}{EI} \left[N \left(1 + \frac{ne}{L} \right) - N_E \right] \quad (\text{L3.14})$$

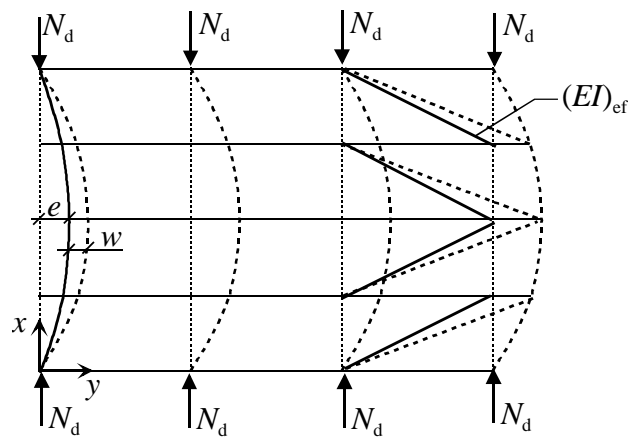
ja jatkuvaksi kuormaksi $q(x)$ kaavasta (L3.8)

$$q(x) = Cw(x) = C \frac{L}{n} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = \frac{\pi^2 N}{L} \left[\frac{1}{n} + \frac{e}{L} - \frac{\pi^2 EI}{nL^2} \right] \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L3.15})$$

ja jännevälin keskellä

$$q\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\pi^2 N}{L} \left[\frac{1}{n} + \frac{e}{L} - \frac{\pi^2 EI}{nL^2} \right] \quad (\text{L3.16})$$

Tarkastellaan kuvan L4.1 mukaista ristikkoryhmän yläpaarteiden tuentaan tarkoitettua vaakaristikkoa



Kuva L4.1 Käytetyt merkinnät

Tasapainoyhtälö taipuneessa tilassa on

$$M = F(y + y_0) = Fy + Fe \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = -(EI)_{ef} y'' \quad (\text{L4.1})$$

missä

$F = nN_d$ on yläpaarteiden keskimääräinen puristusvoima,
 y on kuormien aiheuttama ristikon yläpaarteiden taipuma sivulle,
 y_0 on ristikon yläpaarteiden alkutaipuma sivulle ja
 $(EI)_{ef}$ on ristikon taivutusjäykkyys, kun ristikko ajatellaan palkiksi.

$$(EI)_{ef} y'' + Fy = -Fe \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.2})$$

Taipumayhtälön yleinen ratkaisu on

$$y = A \sin kx + B \cos kx + \frac{F}{F_E - F} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.3})$$

missä

$$k = \sqrt{\frac{F}{(EI)_{ef}}}$$

$$F_E = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{L^2}$$

Taipuman reunaehdot ovat

$$y(0) = y(L) = 0$$

mistä seuraa taipumalle kaava

$$y = \frac{F}{F_E - F} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = \frac{nN_d}{\frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{L^2} - nN_d} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.4})$$

Kokonaistaipuma on siis

$$y + y_0 = \frac{F_E}{F_E - F} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = \frac{1}{1 - \frac{nN_d}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (EI)_{ef}}} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.5})$$

ja taivutusmomentti taipuneessa tilassa

$$M = F(y + y_0) = \frac{nN_d}{1 - \frac{nN_d}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (EI)_{ef}}} e \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.6})$$

Taivutusmomenttia vastaava jakautunut kuormitus on

$$q_d = -M'' = \frac{e \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 nN_d}{1 - \frac{nN_d}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (EI)_{ef}}} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.7})$$

Suurin taipuma lausuttuna poikkisuunnan jakautuneen kuormituksen avulla (Huom!

$EI y^{(IV)} = q_d$) on, kun taipuma rajoitetaan arvoon L/m .

$$\max y = q_d \frac{L^4}{\pi^4 (EI)_{ef}} = \frac{L}{m} \quad \Rightarrow (EI)_{ef} = q_d \frac{mL^3}{\pi^4}$$

$$q_d = \frac{e \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 nN_d}{1 - \frac{nN_d}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (EI)_{ef}}} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = \frac{e \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 nN_d}{1 - \frac{nN_d}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 q_d \frac{mL^3}{\pi^4}}} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (\text{L4.8})$$

Tästä saadaan edelleen

$$q_d = \frac{\pi^2 nN_d}{mL} + e \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 nN_d \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) = \frac{\pi^2 nN_d}{L} \left[\frac{1}{m} + \frac{e}{L} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \right] \quad (\text{L4.9})$$

Vaihtoehto 1: (tasainen tuenta koko jännevälin matkalla)

$$w = \frac{\pi^2 n N_d}{EI} \left[\frac{5L^3}{384m} + \frac{e L^3}{L \pi^4} \right] = \frac{5}{384} \frac{q_q L^4}{EI} \quad (\text{L4.10})$$

$$q_q = \frac{\pi^2 n N_d}{L} \left[\frac{1}{m} + \frac{384 e}{5\pi^4 L} \right]$$

$$m = 800 \quad \frac{e}{L} = \frac{1}{1000} \quad \Rightarrow$$

$$q_q = \frac{\pi^2 n N_d}{L} \left[\frac{1}{800} + \frac{384}{5\pi^4} \frac{1}{1000} \right] \approx 0,020 \frac{n N_d}{L} = \frac{n N_d}{50L} \quad (\text{EC5:n tapaus, jos valitaan } k_{f,3} = 50) \quad (\text{L4.11})$$

Kaavasta (L4.10) huomataan, että ristikot täytyy asentaa todella suoraan, esimerkiksi jännevälillä $L=15$ m saa alkutaipuma sivulle olla korkeintaan $e=15000/1000=15$ mm ja tuentaristikon taipuma jäykistyskuormasta $w_q=15000/900=19$ mm.

Vaihtoehto 2: (Pistemäinen tuenta jännevälin keskellä ja keskipisteen ja päiden välistä tuentaan ei oteta kantaa)

$$w = \frac{\pi^2 n N_d}{EI} \left[\frac{5L^3}{384m} + \frac{e L^3}{L \pi^4} \right] = \frac{1}{48} \frac{F_q L^3}{EI} \quad (\text{L4.12})$$

$$F_q = \pi^2 n N_d \left[\frac{15}{24m} + \frac{48 e}{\pi^4 L} \right]$$

$$m = 700 \quad \frac{e}{L} = \frac{1}{400} \quad \Rightarrow F_q = \pi^2 n N_d \left[\frac{15}{24m} + \frac{48}{\pi^4} \frac{1}{400} \right] = 0,020618 \frac{n N_d}{L} \approx \frac{n N_d}{50L}$$

Numeerisia tuloksia on esitetty taulukossa L4.1

Taulukko L4.1 Tuentavoiman $q_d = \frac{nN_d}{kL}$ nimittäjässä olevan $k:n$ $\left(= \frac{5\pi^4 m}{5\pi^4 + 384m \frac{e}{L}} \right)$

numeeriset arvot, kun tuennan sallittu taipuma = L/m ja ristikon alkukäyryys on e/L

m	L/e									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
100	6	7	8	8	9	9	9	9	9	9
200	8	11	13	15	15	16	17	17	17	18
300	9	14	17	19	21	22	23	23	24	25
400	10	16	20	23	25	27	28	29	30	31
500	10	17	22	26	28	31	32	34	35	36
600	11	18	24	28	31	34	36	38	40	41
700	11	19	25	30	34	37	40	42	44	46
800	11	20	26	31	36	40	43	45	48	50
900	11	20	27	33	38	42	45	48	51	53
1000	11	21	28	34	39	44	48	51	54	57

Yleistä

Rakentamisen aikaisesta jäykistyksestä laaditaan jäykistysuunnitelma soveltuvin osin samalla tavalla kuin rakennuksen käytön aikaisesta jäykistyksestä. Suunnitelmaa laadittaessa on huolehdittava siitä, että suunnitelma käsittää kaikki rakentamisen vaiheet. Suunnitelma sisältää sekä rakentamisaikaisten tukien vaiheittaisen rakentamisen että niiden vaiheittaisen purkamisen rakentamisen edistyessä. Runkokaaviossa voi olla lyhyt periaatekuvaus rakennusaikaisesta jäykistyksestä. (Mietittäväksi Teille: pitääkö todeta, kuka laatii ja kuka hyväksyy, pitääkö ottaa kantaa rakennesuunnitelmassa. Tätä kysyy Asko Keronen ja minulla ei ole kantaa asiaan)

Rakennusaikaisten pystykuormien tunteminen on tarpeen, kun määritetään rakennusaikana tarvittavat stabiiliustuet. Erityisesti on selvitettävä rakennustarvikkeiden painosta kussakin rakennusvaiheessa aiheutuvat kuormat. Suurimmat arvot näille on esitettävä.

Kuormat:

Kuormat käsittävät

- rakenteiden painot kussakin vaiheessa,
- hyötykuormat,
- lumikuorman,
- tuulikuorman ja
- muut kuormat tapauskohtaisesti.

Rakenteiden painot

Rakenteiden omapainojen lisäksi on otettava huomioon myös niihin tukeutuvien muiden rakenteiden painot.

Hyötykuormat

Hyötykuormana käytetään vähintään arvoa samaa hyötykuormaa kuin palomitoituksessa. Hyötykuormaa arvioitaessa on otettava huomioon rakentamiseen käytettävistä materiaaleista aiheutuva kuorma. Hyötykuormaa ei tarvitse ottaa huomioon, jos rakenteeseen ei kohdistu hyötykuormaa kyseisessä rakennusvaiheessa.

Lumikuorma

Lumikuormaksi oletetaan talviaikaan rakennettaessa vähintään $0,6 \text{ kN/m}^2$. Yksittäisessä voimakkaassa lumisateessa satava lumimäärä voi olla $0,3 \text{ kN/m}^2$.

Tuulikuorma

Rakennusaikaisena tuulenpaineena voidaan käyttää arvoa $q_{\text{tuuli,k}}=0,25 \text{ kN/m}^2$. Tämä arvo vastaan tuulen nopeutta 20 m/s . Suuremmilla tuulenopeuksilla rakennustyö on keskeytettävä.

Varmuuskertoimet:

Varmuuskertoimina käytetään normaaleja varmuuskertoimia.

Kuorman aikavaikutuskertoimet

Kuorman aikavaikutuskertoimina voidaan käyttää normaalissa rakentamisessa käytettävistä kertoimista poikkeavia kertoimia. Valintaa voidaan helpottaa alla olevan taulukon avulla, jossa on annettu kunkin aikaluokan mukainen kuorman kesto aika. Jos kuormitusyhdistelmään kuuluu kestoltaan eri aikaluokkiin

sijoittuvia kuormia, valitaan yhdistelmän aikaluokaksi kuormitusyhdistelmään kuuluvan kestoltaan lyhytaikaisimman kuorma aikaluokka.

Taulukko L5.1 Kuormien aikaluokat ja kuorman keston suuruusluokka.

Kuorman aikaluokka	Ominaiskuorman keston suuruusluokka
Pysyvä	Yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kk - 10 v
Keskipitkä	1 viikko - 6 kk
Lyhytaikainen	alle viikko