

Liimapuukäsikirja

OSA 2



SUOMEN LIIMAPUUYHDISTYS RY JA PUUINFO OY

ALKUSANAT

Pohjoismainen Liimapuukäsikirjaprojekti

Ensimmäinen ruotsalainen Limträhandboken julkaistiin 1979. Siitä tuli nopeasti puurakentajien arvostama suunnitteluopas, jonka myöhempiä painoksia käännettiin myös suomeksi ja norjaksi ja muokattiin vastaamaan paikallisia määräyksiä. Edellinen suomenkielinen Liimapuukäsikirja julkaistiin vuonna 2003.

Vuonna 2011 Arbio AB (Sveriges Skogsindustrier ja Svenskt Trä) Ruotsista, Norske Limtreprodusenters Forening Norjasta ja Puuinfo Oy (Puuinfo Oy ja Suomen Liimapuuyhdistys ry) käynnistivät yhteishankkeen, missä Liimapuukäsikirjaa laajennettiin ja se uudistettiin vastaamaan eurokoodijärjestelmää. Yhteishankkeessa laadittiin seuraavat kolme englanninkielistä Liimapuukäsikirjan käsikirjoitusta, joita ei sellaisenaan julkaistu

- Glulam Handbook, Volume I, joka sisältää liimapuutietoutta ja opastaa suunnittelussa
- Glulam Handbook, Volume II, joka antaa perus- ja taustatiedot liimapuurakenteiden mitoituksista
- Glulam Handbook, Volume III, joka esittää mitoitusmenetelmät suppeassa muodossa ja laskentaesimerkein selvennettyinä.

Kukin osallistuva maa muokkasi englanninkielisistä käsikirjoituksista oman kansallisen liimapuukäsikirjansa, joissa on otettu huomioon kunkin maan eurokoodien kansallisissa liitteissä määritellyt parametrit.

Suomen osallistumisen yhteishankkeeseen ja suomenkielisen Liimapuukäsikirjan laatimisen rahoittivat Rakennustuotteiden Laatu Säätiö, Puuinfo Oy, Suomen Liimapuuyhdistys ry ja sen jäsenyritykset, joita ovat

- Anaika Wood Oy Ltd
- Finland Laminated Timber Oy Ltd
- Finnlamelli Oy
- Keitele Engineered Wood Oy
- Kestopalkki LPJ Oy
- Kohiwood Oy Ltd
- Lameco LHT Oy
- Late-Rakenteet Oy
- Metsä Wood, Kuningaspalkki
- Pölkky Oy
- Safewood Oy Ltd
- Stora Enso Wood Products Oy Ltd
- Versowood Oy

Projektin johtoryhmään ja toimitusneuvostoon kuuluivat

- Leif Cederlöf, Setra Trävaror AB, Ruotsi
- Roberto Crocetti, Lundin teknillinen korkeakoulu, Ruotsi
- Mikael Fonselius, Woodvalue, Suomi
- Johan Fröbel, Svenskt Trä, Ruotsi
- Holger Gross, Gross Production AB, Ruotsi
- Jouni Hakkarainen, Metsä Wood, Suomi
- Åge Holmestad, Moelven Limtre AS, Norja

- Thomas Johansson, Moelven Töreboda AB, Ruotsi
- Rune Karlsson, Rune Karlsson Byggprojektering i Hedemora, Ruotsi
- Tomi Koskenniemi, Versowood Oy, Suomi
- Greger Lindgren, Martinson Group AB, Ruotsi
- Harald Liven, Moelven Limtre AS, Norja.
- Päivi Myllylä, Suomen Liimapuuyhdistys ry, Suomi
- Gunnar Utskot, Vestlandske Limtre Industri AS, Norja
- Tero Vesanen, Suomen Liimapuuyhdistys ry, Suomi
- Liimapuukäsikirjan kuvituksesta vastasivat
- Cornelia Thelander, Thelander Arkitektur & Design AB, Ruotsi
- Vendela Martinae, Thelander Arkitektur & Design AB, Ruotsi

Graafisesta muotoilusta vastasivat

- Proservice Reklambyrå i Malmö AB, Ruotsi
- Rakennustuoteteollisuus RTT ry / puutuotejaosto
- Puuinfo Oy

Suomen osaprojektin johtoryhmään ja toimitusneuvostoon kuuluivat

- Tero Vesanen, Suomen Liimapuuyhdistys ry
- Päivi Myllylä, Suomen Liimapuuyhdistys ry
- Tomi Toratti, Rakennustuoteteollisuus RTT ry
- Mikael Fonselius, Woodvalue

Pohjoismaisen projektin tuloksena syntyneiden tiedostojen copyright on projektin osapuolilla

- Föreningen Sveriges Skogsindustrier
- Norske Limtreprodusenters Forening
- Puuinfo Oy ja Suomen Liimapuuyhdistys ry

GLULAM HANDBOOK, VOLUME II

Tämän kirjan pääasiallinen kohderyhmä on suunnittelijat ja opiskelijat, ja sen tarkoitus on antaa perustiedot liimapuurakenteiden mitoituksista. Erityisesti painotetaan seuraavien asioiden ymmärtämistä:

- liimapuurakenteiden suunnittelun perusteet, erityisesti sellaisten rakenteiden suunnittelu joilla on suuri jänneväli
- liimapuurakenteiden liitossuunnittelun perusteet

Kirja viittaa pääasiassa eurooppalaiseen standardiin EN1995-1-1:2004 (eurokoodi 5). Teräsosien ja liitosten tärkeimmät mitoitusäännöt esitetään standardin EN1993-1-1:2005 (eurokoodi 3) mukaan. Tarvittaessa ilmoitetaan käytetty kansallinen liite (Suomen, Ruotsin tai Saksan NA). Kun eurokoodi 5 ei esitä mitoitusmenetelmää tai sen esittämä menetelmä ei kirjoittajien mielestä ole riittävä, on esitetty myös muita menetelmiä. Esimerkiksi reiälliset palkit, kuormien ripustaminen lähelle palkin vedettyä reunaa ja syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten aiheuttaman halkeamisen estäminen vahvistamalla on käsitelty Saksan kansallisen liitteen DIN-EN 1995-1-1/NA mukaisesti. Kirjassa viitataan myös sveitsiläiseen standardiin SIA 265:2003 ja tutkimukseen ja käytännön kokemukseen perustuviin menetelmiin.

Rakennusmääräysten, tutkimusraporttien ja muiden asiakirjojen tulkinta on kirjoittajien tekemä ja niiden tarkoitus on esittää vallitseva pohjoismainen mitoituskäytäntö. Esitetty aineisto on ohjeellinen; rakennesuunnittelija vastaa aina mitoituksesta.

Kirjan koordinaattori on Prof. Roberto Crocetti Lundin Teknillisestä korkeakoulusta. Professori Bo Edlund, Chalmersin Teknillinen korkeakoulu, Ruotsi, on tarkistanut käsikirjoituksen. Eri osien kirjoittajat on lueteltu alla:

- Prof. Roberto Crocetti, Lundin Teknillinen korkeakoulu, luvut 7, 8, 9, 10, 11, 13, 16
- Dr. Henrik Danielsson, Lundin Teknillinen korkeakoulu, luku 5
- Dr. Eva Frühwald Hansson, Lundin Teknillinen korkeakoulu, luvut 3 ja 12
- Dr. Eva Frühwald Hansson ja Prof. Roberto Crocetti, luku 4
- Prof. Robert Kliger, Chalmersin Teknillinen korkeakoulu, luku 2
- Prof. Annika Mårtensson, Lundin Teknillinen korkeakoulu, luku 6
- Prof. Maurizio Piazza, Trenton yliopisto, luku 15
- Prof. Erik Serrano, Linnaeus yliopisto, Växjö, luvut 1 ja 14

LIIMAPUUKÄSIKIRJA OSA 2

Suomenkielinen Liimapuukäsikirja Osa 2 on muokattu pohjoismaisessa projektissa laaditun englanninkielisen julkaisemattoman käsikirjoituksen Glulam Handbook, Volume II pohjalta. Pohjoismaisessa projektissa tehdyt tulkinnat eurokoodista voivat yksityiskohdissaan poiketa julkaisun RIL 205 tulkinnoista. Tekstiä on paikoitellen yksinkertaistettu ja lyhennetty, mutta asiasisältö noudattaa alkuperäistä englanninkielistä käsikirjoitusta. Suomenkielisen käännöksen ja asiasisällön muokkaamisen vastaamaan suomalaisia määräyksiä ja käytäntöjä tekivät

- Kirsti Riipola, Woodvalue
- Mikael Fonselius, Woodvalue

Käsikirjoituksen ovat tarkistaneet Tero Vesanen, Päivi Myllylä, Tomi Toratti sekä Suomen Liimapuuyhdistys ry:n jäsenyritykset.

ISBN 978-952-99868-4-2

Julkaisija ja copyright

- Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy

Suomen Liimapuuyhdistys ry toimii suomalaisen liimapuuteollisuuden kansallisena ja kansainvälisenä yhteistyöelimenä. Yhdistys ylläpitää liimapuun tuotanto- ja toimitustilastoja, osallistuu liimapuun eurooppalaiseen ja kansainväliseen standardisointiin, sekä edistää liimapuun menekkiä, tutkimusta ja kehitystä.

Puuinfon tehtävänä on luoda kysyntää puutuotteille rakentamisessa ja sisustamisessa. Päämääräänsä Puuinfo pyrkii välittämällä tutkittua ja puolueetonta tietoa puun käytöstä käyttäjäystävällisessä muodossa. Puuinfon omistavat perustajaosakkaat Metsäteollisuus ry, Suomen Sahat ry ja Suomen Puutavara- ja Rakennustarvikekauppiasyhdistys SPY ry sekä Maa- ja Metsätaloustuottajain keskusliitto MTK ry.

Tämän kirjan kaikki oikeudet kuuluvat Suomen Liimapuuyhdistykselle ja Puuinfole. Sisältö on kansainvälisen tekijänoikeuslain suojaama. Näiden oikeuksien loukkaaminen on ankarasti kielletty.

Kaiki tekstit, kuvaukset, kuvat ja taulukot edustavat yleistä tasoa eivätkä toimi osana mitään sopimusta. Liimapuukäsikirjassa esitettyyn tietoon tai ratkaisuihin ei saa viitata osana sopimusasiakirjoja. Kirjassa voi esiintyä teknisiä virheitä tai kirjoitusvirheitä tai muun tyyppistä epätarkkuutta. Puuinfo ja Suomen Liimapuuyhdistys eivät ota yhdessä tai erikseen mitään vastuuta näistä mahdollisista virheistä. Annettujen tietojen soveltamisesta ja soveltuvuudesta aiottuun käyttökohteeseen vastaa aina tiedon käyttäjä.

Verkossa julkaistavia Liimapuukäsikirjan osia 1-3 voidaan päivittää ilman eri ilmoitusta, tieto päivityksestä löytyy verkkosivulta www.liimapuu.fi ja www.puuinfo.fi. Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo eivät takaa tietojen virheettömyyttä eivätkä vastaa minkäänlaisista vahingoista, jotka saattavat johtua Liimapuukäsikirjan käytöstä.

Helsinki, helmikuussa 2015

Tero Vesanen ja Mikko Viljakainen

1	LIIMAPUU RAKENNUSAINEENA	2
1.1	Johdanto	3
1.2	Liimapuu osana luonnon kiertokulkua	3
1.3	Liimapuun valmistus	5
	Valmistusmenetelmä	5
	Liimapuun CE-merkintä ja valvonta	8
	Liimattu sahatavara	9
	Lujuus ja jäykkyys	10
	Lujuusluokat	11
	Halkaistut palkit	15
	Liimat	16
1.4	Liimapuisten rakennusosien mitat ja muoto	16
	Varastovalikoima	17
	Suurin poikkileikkauskoko	17
	Suurin pituus	18
	Esikorotus	18
	Toleranssit	18
1.5	Pinnan laatu ja pintakäsittely	19
	Sahatavara	19
	Liimasaumat	19
	Pinnat	20
	Pintakäsittely	20
	Rakenteellinen puunsuojaus	21
1.6	Kuljetus, varastointi ja asennus	22
	Kuljetus	22
	Vastaanotto ja varastointi	23
	Asennus	24
1.7	Tilaaminen ja toimittaminen	25
	Tilauserittely	25
	Mitoitus	25

1 LIIMAPUU RAKENNUSAINEENA

Liimapuu soveltuu hyvin monimuotoisiin kantaviin rakenteisiin. Yksittäiset lujuuslajitellut ja sormijatketut lamellit voidaan liimata yhteen melkein minkä tahansa muotoiseksi tai kokoiseksi rakenteeksi. Liimapuu on ympäristöystävällistä, koska raaka-aine on täysin uusiutuvaa.

Liimapuulla on erinomaiset lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet verrattuna samankokoiseen sahatavaraan. Omaan painoonsa verrattuna liimapuulla on parempi kestävyys kuin teräksellä, ja siksi siitä voidaan tehdä suuria rakenteita. Teknisesti on mahdollista rakentaa liimapuurakenteita, joiden jänneväli on jopa 150 m tai vielä pidempikin. Koska poikkileikkauksen muodon voi valita vapaasti ja palkit voivat olla kapenevia tai kaarevia eikä niiden jänneväli ole rajoitettu, niin liimapuusta on tullut monien arkkitehtonisesti vaativien kohteiden materiaali.

Liimapuuta käytetään monenlaisiin rakenteisiin, kuten omakotitaloihin, kerrostaloihin, hallirakennuksiin, urheiluareenoihin ja tiesiltoihin. Kun rakenne ja sen liitokset muotoillaan sopivasti ja liimapuu suojataan asianmukaisesti sään vaikutukselta (mahdollisesti pintakäsittelyllä), niin liimapuuta voidaan käyttää monenlaisiin rakenteisiin.

Weimarilainen Otto Hetzer (1846–1911) – insinööri, sahanomistaja ja keksijä – sai vuosina 1892–1907 viisi saksalaista patenttia erilaisille insinöörirakenteille. Patentissa numero DRP No. 197773 vuodelta 1906 Hetzer kuvailee liimapuupalkkien valmistamista. Palkkeja kutsuttiin Hetzer-kannattajiksi ja niiden valmistukseen käytettiin maidon valkuaisaineesta tehtyä kaseiiniliimaa. Liimapuun suuri läpimurto vuonna 1910 oli Brysselin maailmannäyttelyn Reichseisenbahnhalle, jonka vetotangollisten liimapuukaarien jänneväli oli peräti 43 m. Hetzer oli silloin rakentanut jo noin 50 kattorakennetta, joilla oli varsin suuret jännevälit.

Liimapuu tuli Pohjoismaihin 1900-luvun alussa. Norjalainen insinööri Guttorm Brekke (1885–1980) oli ollut jonkin aikaa Otto Hetzer AG:n palveluksessa ja hankittuaan oikeudet tuottaa liimapuuta Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa hän perusti vuonna 1918 Kristianiaan, nykyiseen Osloon, yrityksen A/S Trekonstruktioner. Vuonna 1919 perustettiin ruotsalainen tytäryhtiö Törebodaan, missä edelleenkin valmistetaan liimapuuta. Ruotsin ensimmäisiä liimapuuraakenteita olivat 1920-luvulla rakennetut Tukholman (kuva 1-1), Göteborgin ja Malmön rautatieasemat.



KUVA 1-1

Tukholman keskusaseman odotushalli, rakennettu 1925. Arkkitehti: Folke Zettervall.

Pohjoismaissa on nykyisin kymmenkunta suurehkoa valmistajaa. Kaikissa Pohjoismaissa valmistetaan liimapuuta eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin EN 14080 mukaisesti, jossa on annettu sertifiointiin ja CE-merkinnän vaatimukset.

1.1 Johdanto

1960-luvun alkuun asti liimapuuta valmistettiin Pohjoismaissa varsin vähän. Sen jälkeen tuotanto on kasvanut ja kokonaistuotanto vuonna 2012 oli runsaat 200 000 m³ vuodessa. Suunnitteen puolet liimapuusta valmistetaan vientiin.

60 prosenttia pohjoismaisesta liimapuusta päätyy teollisuusrakennusten, koulujen, päiväkotien, pientalojen ja kerrostalojen rakenteisiin. Liimapuuta käytetään lisäksi muotteihin, rakennustelineisiin, leikki paikkojen varusteisiin, pysäköintitaloihin, hyppymäkiin ja voimajohtojen pylväisiin.

Uudenaikainen liimaustekniikka ja hyvät lujuusominaisuudet tekevät liimapuusta ominaisuuksiltaan ainutlaatuisen materiaalin, jolla on

- useimpia ihmisiä miellyttävä ulkonäkö, joka lisää sekä sisä- että ulkotilojen viihtyisyyttä
- omaan painoon nähden suuri lujuus, joka tekee mahdolliseksi suuret jännevälit
- tarkat valmistusmitat ja hyvä muodon pysyvyys tavallisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa
- hyvä palonkestävyys, mitä usein vaaditaan julkisissa rakennuksissa
- hyvä lämmöneristyskyky, mikä pienentää kylmäsiltojen vaikutusta ja kondenssiriskiä
- pienin oma paino, jonka ansiosta kuljetus- ja asennuskustannukset ovat pienet ja rakenteiden perustusten tekeminen on yksinkertaista ja taloudellista
- hyvä kemiallisten aineiden kestävyys
- valmistustekniikka, jonka avulla voidaan tehdä kaarevia rakenteita edullisemmin kuin mistään muusta materiaalista.

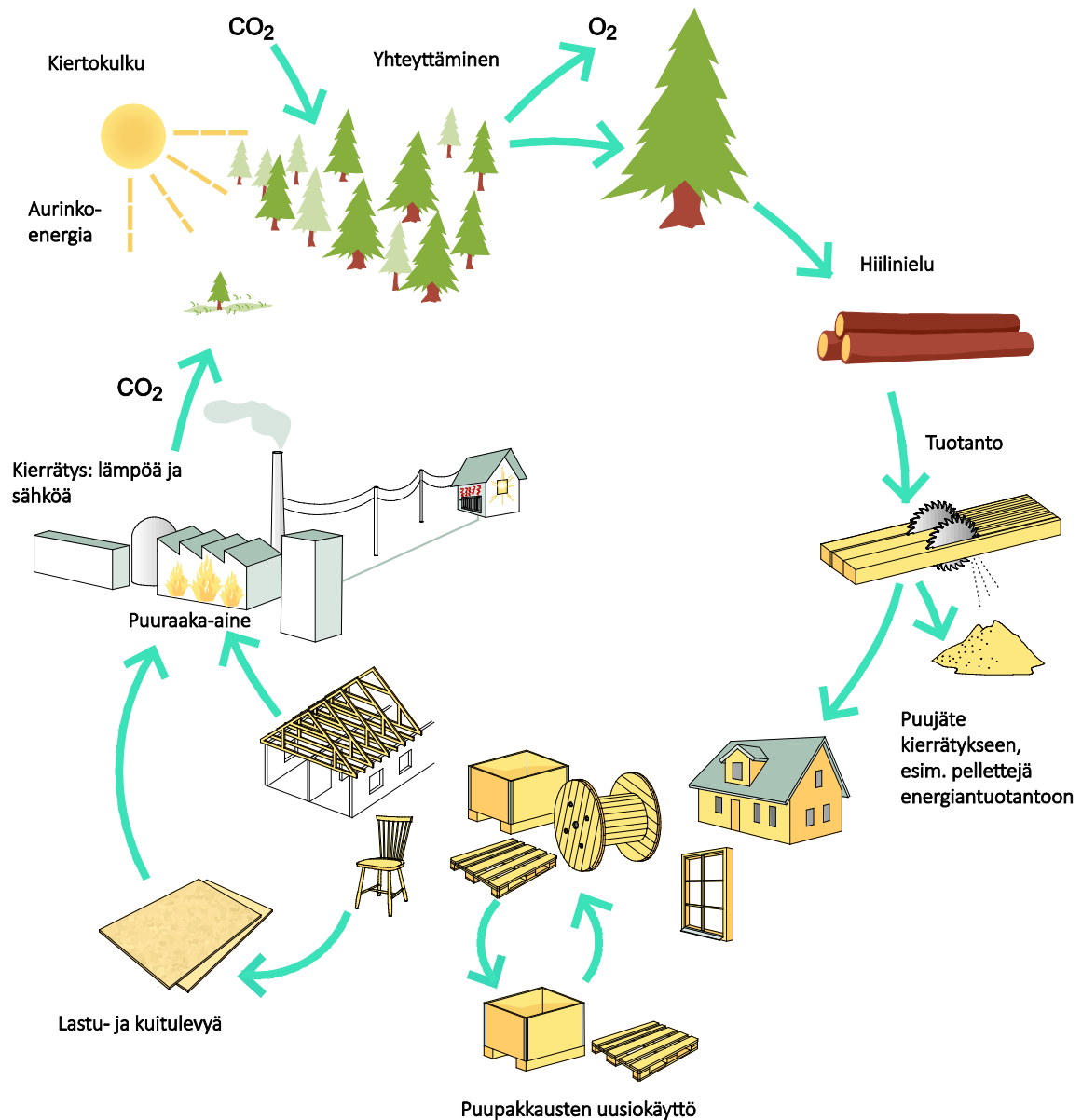
Liimapuulle on tyypillistä esivalmistettujen rakenteiden helppo ja nopea asennettavuus. Osat voidaan liittää yksinkertaisin ja perinteisin menetelmin – naulaamalla ja ruuvaamalla – vuoden ajasta ja säästä riippumatta. Vaativissa rakenteissa voidaan käyttää uudempia liitostekniikoita kuten tappivaarnaliitoksia ja liimaruuveja. Puurakenteisella rakennusrungolla on heti asennuksen jälkeen täysi kestävyys. Asennettaessa voidaan tehdä pieniä korjauksia yksinkertaisilla käsi työkaluilla. Puurakentaminen on kuivaa rakentamista ja työmaa pitää suojata asianmukaisesti, mikä parantaa myös työskentelyoloja ja tuo siten lisäetuja.

Puuta on käytetty rakentamiseen satojen vuosien ajan ja oikein käytettynä sillä on erityisen hyvä säilyvyys. Pohjoismaissa on esimerkkejä puurakennuksista jotka ovat satoja vuosia vanhoja!

1.2 Liimapuu osana luonnon kiertokulkua

Pohjoismaiden metsiä hoidetaan kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti. Sen vuoksi puun käyttö on edullista muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna sekä ympäristö- että ilmastonäkökannasta katsottuna. Liimapuun valmistusprosessi on energiataloudellinen. Kuivaamiseen käytetään polttoaineena mahdollisimman paljon sivutuotteita kuten biomassaa, mikä vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta. Kestävässä metsätaloudessa metsästä otettavan puun määrä ei ylitä kasvua, raaka-aine uudistuu jatkuvasti, ja puu palautetaan kiertokulkuun aiheuttamatta ilmastoon haitallisesti vaikuttavia kasvihuonekaasuja.

Puu sitoo kasvaessaan hiilidioksidia (CO_2) yhteyttämällä. Tällä tavalla puuhun varastoituu hiiltä, joka ei palaa ilmakehään ennen kuin puu käytetään esimerkiksi energian tuotantoon. Jos puuta käytetään entistä enemmän rakenteisiin muiden, vähemmän ympäristöystävällisten rakennusaineiden kustannuksella, muodostuu lisäksi tilapäinen hiilinielu. Ajaltaan rajallisenakin (50...100 v) se on arvokas, koska se pienentää väliaikaisesti kasvihuonekaasujen nettoemissiota. Kuutiometri puuta varastoi noin 750 kg CO_2 . Liimapuun kiertokulku on esitetty kuvassa 1-2.



KUVA 1-2

Puutuotteiden kiertokulku.

Myös liimapuun tuotantotavat ovat ympäristöystävällisiä. Liimapuu valmistetaan lamelleista, jotka liimataan yhteen, ja ne ovat ympäristön kannalta neutraaleja koko elinaikansa. Liimapuuta voidaan myös helposti käyttää uudelleen, uusiokäyttää tai kierrättää energiaksi. Raaka-aineena käytetään pohjoismaista kuusta (*Picea abies*) ja synteettistä liimaa. Liiman raaka-aine ei ole uudistuvaa, mikä vaikuttaa negatiivisesti ympäristöprofiiliin, mutta sitä käytetään vähemmän kuin yksi painoprosentti, joten merkitys lopputuotteen kannalta on häviävän pieni. Valmistusprosessissa syntyy vähäisiä päästöjä, kuten liimauslaitteiston puhdistukseen käytettyä vettä, kovettuneita liimajäänteitä ja pieniä määriä haihtuvia yhdisteitä liiman kovettuessa.

Koska liimapuu valmistetaan yleensä projektikohtaisesti, rakennuspaikalla ei synny merkittäviä määriä jätettä. Myös pakkausmateriaali on kierrätettävää.

Liimapuu ei elinaikanaan vaikuta ympäristöön haitallisesti. Sitä voidaan huoltaa perinteisin menetelmin. Sitä voidaan helposti korjata ja komponenttien osia voidaan helposti korvata. Tarvittaessa sitä voidaan jälkeenpäin työstää monin tavoin, kuten hioa.

Liimapuu palaa kuten muutkin puumateriaalit, ja sillä on sama energiasisältö kuin massiivisella havupuulla. Liimapuuhun voi syntyä biologisia vaurioita, jos sitä käytetään virheellisesti tai jos rakenteen liitokset on huonosti suunniteltu.

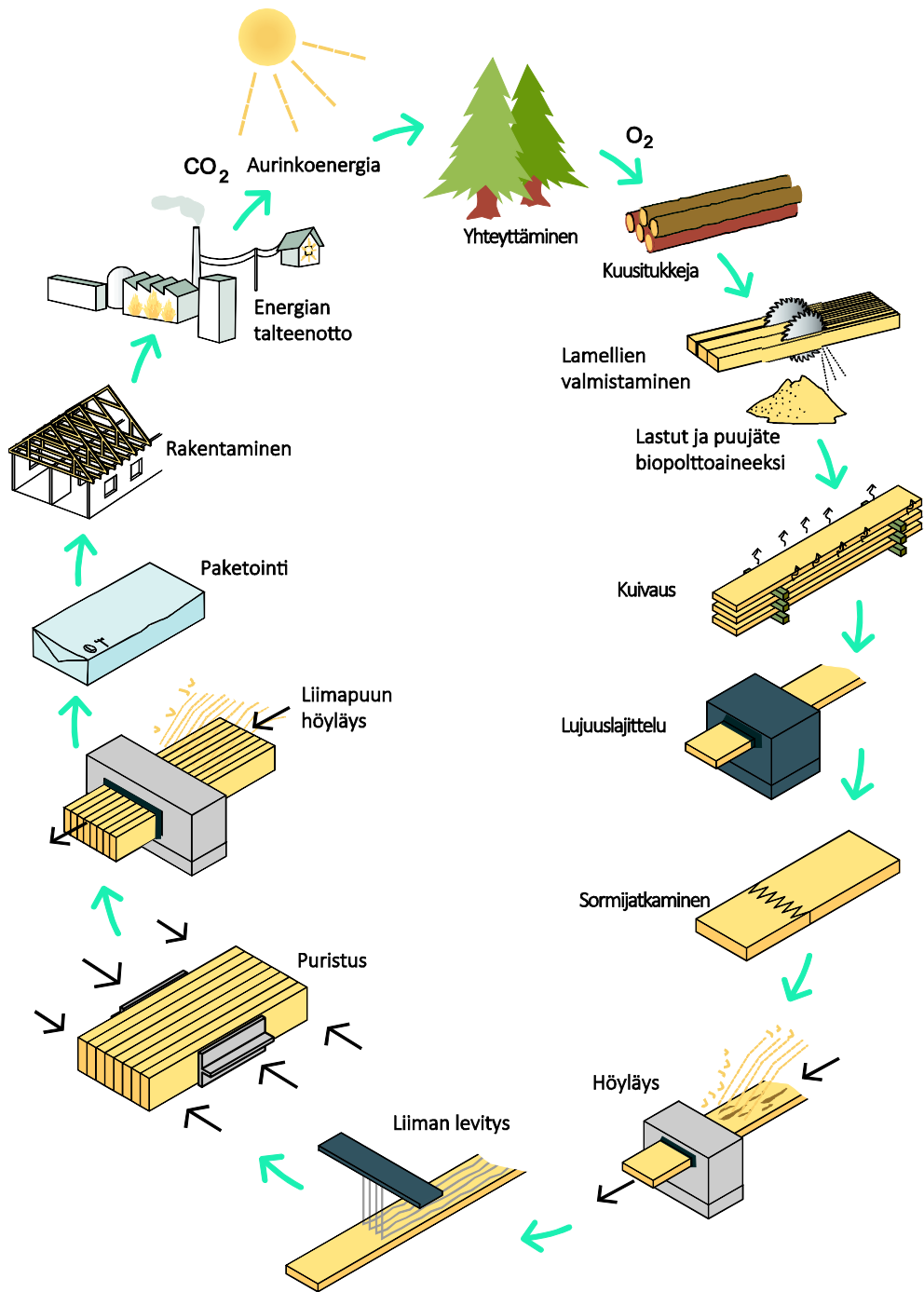
Liimapuuvalmistajilta voi pyytää ulkoasultaan yhtenäisiä yksityiskohtaisia ympäristöselosteita. Niistä käy ilmi kaikki ne valmistuksen ja käytön ympäristövaikutukset, joihin valmistaja voi vaikuttaa. Siten ne käsittelevät valmistuksen kaikki vaiheet alkaen puiden kaatamisesta metsässä kunnes valmis tuote lähtee tehtaan portista ulos.

1.3 Liimapuun valmistus

Seuraavassa käytetään nimitystä liimapuu siinä merkityksessä, kuin sillä on harmonisoidussa tuotestandardissa EN 14080 – kaikkien standardissa esitettyjen vaatimusten edellytetään täyttyvän. Liimapuu on siten rakennusosa, jossa on vähintään kaksi yhteen liimattua havupuulamellia. Lamellin paksuuden pitää olla 6...45 mm ja syiden pitää olla rakennusosan pituussuunnassa. Liimasaumat ovat tavallisesti poikkileikkauksen lyhyemmän sivun suuntaisia.

Valmistusmenetelmä

Liimapuuta valmistetaan kaikkialla suunnilleen samalla tavalla. Kuvassa 1-3 on kaavamainen esitys valmistamisesta.

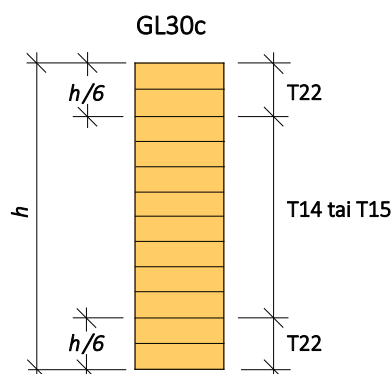


KUVA 1-3

Liimapuun valmistus kaavamaisesti esitettynä.

Liimapuu valmistetaan kuivatusta ja lujuuslajittelusta kuusisahatavarasta. Tuotteen joutuessa kosteisiin olosuhteisiin voidaan käyttää painekyllästettyä mäntyä, joskus voidaan myös käyttää lehtikuusta. Tavallisesti sahatavara tulee suoraan sahalaitokselta liimapuutehtaalle. Lamellien kosteussuhteen pitää olla liimattaessa 6...15 %, ja vierekkäisten lamellien kosteussuhteiden erotus saa olla enintään 5 %. Silloin saadaan optimaalinen liimasauman lujuus ja sopiva loppu-tuotteen kosteussuhde, sekä vältetään haitallinen halkeilu ja pienennetään vääntymisriskiä. Jossain määrin puuaines aina halkeilee, mutta halkeamilla ei ole yleensä haitallista vaikutusta rakenteen kestävyYTEEN.

Liimapuupoikkileikkaus voidaan koota saman lujuusluokan lamelleista, jolloin saadaan ho-mogeenista liimapuuta. Yleensä poikkileikkauksen uloimmille lamelleille tulee suurempi jänni-tyt ja ne valmistetaan sen vuoksi parempaan lujuusluokkaan kuuluvasta puusta. Tällaista tuo-tetta kutsutaan yhdistetyksi liimapuuksi (katso kuva 1-4). Valmistettaessa on sen vuoksi oltava samanaikaiset varastointimahdollisuudet ainakin kahden eri lujuusluokan lamelleille.

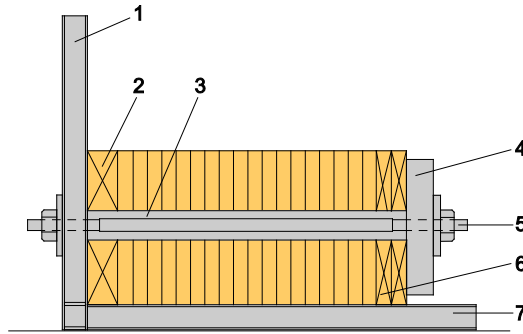


KUVA 1-4

Eräs mahdollinen tapa valmistaa lujuusluokan GL30c yhdistettyä liimapuuta EN 14080 mukaisesti. T14, T15 ja T22 ovat käytettävien lamellien lujuusluokat; numeroarvo ilmoittaa lamellin ominaisvetolujuuden. Sisälamel-lit kuuluvat joko luokkaan T14 tai T15. Jos valitaan luokka T14, pitää ulkolamellien sormijatkosten lujuuden ol-la hiukan parempi kuin jos valitaan luokka T15.

Ensin yksittäiset lamellit sormijatketaan, jolloin saadaan pitkiä lamelleja (30...40 m). Lamellit katkotaan sitten sopivan mittaisiksi ja pinotaan päällekkäin. Yhdistettyä liimapuuta valmistet-taessa otetaan huomioon sisä- ja ulkolamellien keskinäinen järjestys. Kosteuspitoisuuden erois-ta johtuvien sisäisten jännitysten vähentämiseksi lamellien sydänpuoli käännetään aina samaa suuntaan. Uloimmat lamellit käännetään kuitenkin aina sydän ulospäin. Sormijatketut lamellit saavat kovettua muutamia tunteja (liimatyyppin vaatiman ajan) ennen kuin lamellien lapepinnat höylätään ja liimoitetaan välittömästi sen jälkeen.

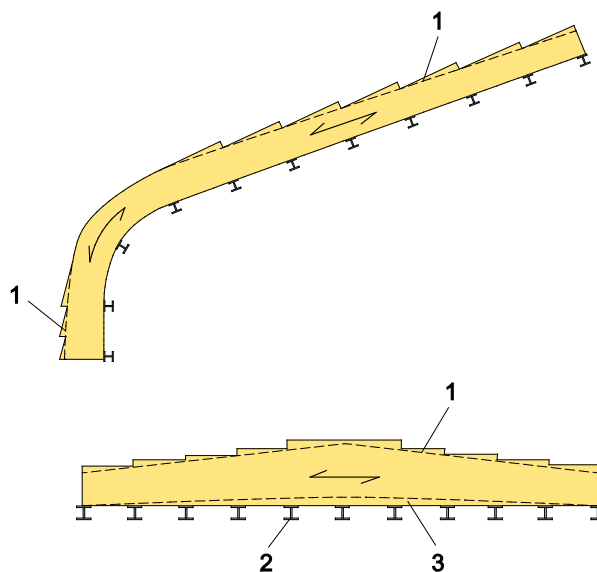
Liimoitettu lamellinippu nostetaan puristimeen ja puristetaan sopivalla paineella (kuva 1-5). Tämä pitää tehdä ennen kuin liima alkaa kovettua, eli noin tunnin kuluessa. Tarkka aika on riippuvainen liimatyyppistä ja hallin lämpötilasta. Esikorotettuja tai kaarevia muotoja voidaan valmistaa taivuttamalla lamellit puristimeen ladottaessa. Liima saa sitten kovettua hallituissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa, puristinta voidaan mahdollisesti lämmittää. Suoria palkkeja valmistetaan myös suurjaksopuristimella.



KUVA 1-5

Kaavamainen esitys liimauspuristimesta. (1) Pystysuora vaste. (2) Painetta tasaava pohjakappale, mahdollisesti esikorotusmalli (3) Välike (4) Kiristyskappale (5) Kiristysruuvi (6) Puristuksen tasauslaudat (7) Vaakasuora vaste.

Liiman kovetuttua puristuspaine poistetaan ja liimapuiset rakennusosat nostetaan puristimesta höylälle, missä ne viimeistellään toivotun laatuluokan mukaisiksi. Tämän jälkeen seuraa lopputyöstö, kuten reunojen sahaus, reikien poraus ja kiinnikkeiden tarvitsemat esiporaukset. Tarvittaessa rakennusosat pintakäsitellään tehtaassa. Lopulta seuraa silmämääräinen tarkistus ja merkkäus, rakennusosat paketoidaan ja lastataan varastoon tai kuljetetaan rakennuspaikalle.



KUVA 1-6

Liimapuinen rakenneos, jolla on muuttuva poikkileikkaus. (1) Reunojen sahaus (2) Pystysuora vaste (3) Painetta tasaava pohjakappale, mahdollisesti esikorotusmalli.

Liimapuun CE-merkintä ja valvonta

EU:n alueella rakennustuotteiden valmistusta säätelee rakennustuoteasetus. Asetus määrittelee keskeiseksi asiakirjaksi valmistajan tekemän suoritustasoilmoituksen. Sellainen on tehtävä kaikista niistä tuotteista, joille on olemassa harmonisoitu tuotestandardi. Jos tuotteelle tehdään suoritustasoilmoitus, se pitää myös CE-merkitä. Menettelyn tarkoituksena on taata tuotteiden vapaa liikkuvuus EU:n alueella, ja tehdä mahdolliseksi eri valmistajien tuotteiden vertaaminen ilmoitettujen ominaisuuksien perusteella.

Liimapuun harmonisoitu tuotestandardi on EN 14080. Siinä kerrotaan yksityiskohtaisesti, mitä ominaisuuksia valmistajan pitää ilmoittaa, kuten lujuusominaisuudet ja paloluokka. Standardissa esitetään myös yleisiä valmistusperiaatteita ja vaatimuksia, joita raaka-aineiden ja valmiiden tuotteiden pitää täyttää. Tärkeä osa standardista kuvaa valmistajan ladunvalvontamenettelyille (FPC) ja ilmoitetun laitoksen toiminnalle asetettuja vaatimuksia. Näiden tarkoituksena on varmistaa, että tuotteiden ominaisuudet vastaavat valmistajan suoritustasoilmoitusta.

Valmistajan oma laadunvalvonta koostuu menettelytavoista, tarkastuksista ja testeistä sekä tulosten seuraamisesta ja arvioinnista ja se kohdistuu raaka-aineisiin, komponentteihin, laitteisiin, valmistukseen ja lopputuotteeseen. Käytetyt menettelyt pitää dokumentoida systemaattisesti kirjallisessa muodossa. Valmistajan laadunvalvontahenkilöstö valvoo valmistusta ja kirjaa kaikki oleellisesti tuotteen laatuun vaikuttavat tiedot, kuten lamellien kosteussuhteen, lämpötilan ja liimaushalliin ilman suhteellisen kosteuden, liimaukseen käytetyn ajan ja rakenneosien nostoajankohdat. Liimasaumojen laatu on valmistuksen kriittisiin kohti. Siksi sormijatkosten ja lamellien liimauksen laatua seurataan huolellisesti ja sitä testataan jatkuvasti sisäisessä laadunvalvonnassa.

Sisäinen laadunvalvonta puolestaan on ulkopuolisen valvontaorganisaation, ilmoitetun laitoksen, valvonnassa. Ilmoitetun laitoksen pitää tehdä alkutyypitestaus (ITT) sekä valmistuksen, laadunvalvonnan ja valmistuspaikan alkutarkastus ennen tuotteen saattamista markkinoille. Alkutyypitestauksen tarkoituksena on varmistaa, että tuotteen liimaus täyttää sille standardissa EN 14080 asetetut vaatimukset. Valmistuksen ja valmistuspaikan alkutarkastuksen avulla ilmoitettu laitos todentaa, että valmistajan valvontamenettelyt (FPC) täyttävät standardin vaatimukset ja että menettelyjä sovelletaan käytännössä. Akkreditointielin valvoo ilmoitetujen laitosten toimintaa.

Ilmoitettu laitos myöntää tuotteelle sertifikaatin suoritustasojen pysyvyydestä, kun kaikkien vaatimusten täytyminen on todettu alkutyypitestauksen ja alkutarkastuksen avulla. Sen jälkeen valmistaja voi tehdä suoritustasoilmoituksen ja CE-merkitä tuotteensa. Ilmoitettu laitos tekee jatkuvaa valvontaa, arviointia ja evaluointia käymällä tehtaassa kaksi kertaa vuodessa tarkastuskäynnillä. Tarkoituksena on varmistaa että valmistaja edelleen noudattaa laadunvalvontajärjestelmäänsä ja että se vastaa valmistuksen vaatimuksia. Kaikki valmistuksessa tapahtuneet muutokset ja valmistajan laadunvalvonnassa tekemien testien tulokset pitää arvioida sen varmistamiseksi, että tuote on edelleenkin vaatimusten mukainen.



KUVA 1-7
CE-merkintä.

Liimattu sahatavara

Liimattu sahatavara on liimattu 2...5 lamellista joiden paksuus on 45...85 mm. Se sisältyy standardiin EN 14080 ja sen ominaisuudet ovat muuten samantapaisia kuin liimapuun ominaisuudet, mutta lujuus on jonkin verran pienempi.

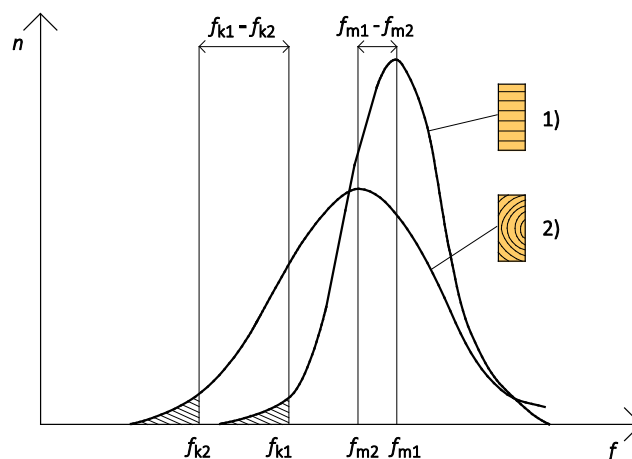
Lujuus ja jäykkyys

Liimapuun lujuudella on samoja piirteitä kuin perinteisen sahatavaran lujuudella

- Lujuus on riippuvainen jännityksen vaikutussuunnasta syiden suunnan suhteen (anisotropia).
- Lujuus pienenee kun kosteussuhde kasvaa.
- Lujuus pienenee kun kuormitusaika kasvaa.
- Lujuus vaihtelee sekä rakenneosan eri kohdissa että rakenneosien välillä.

Liimapuisella rakenneosalla on kuitenkin suurempi keskimääräinen lujuus ja pienempi lujuuden hajonta kuin rakennesahatavarasta tehdyllä vastaavalla rakenneosalla. Tämä niin sanottu lamellivaikutus selitetään tavallisesti seuraavasti:

Rakennesahatavaran suurin lujuus määräytyy sen heikoimman poikkileikkauksen lujuudesta. Tavallisesti heikoin poikkileikkaus on oksan tai sormijatkoksen tai muun heikennyksen kohdalla. Liimapuupalkki koostuu lamelleista joiden lujuus vaihtelee, mutta on epätodennäköistä että useiden lamellien heikoin poikkileikkaus sattuisi täsmälleen samalle kohdalle.

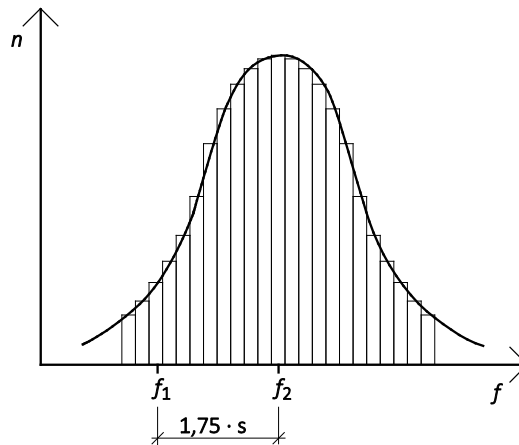


KUVA 1-8

Liimapuisilla rakenneosilla on suurempi keskimääräinen lujuus ja pienempi lujuuden hajonta kuin vastaavilla sahatavarasta tehdyillä rakenneosilla.

Kun liimapuupalkkeja kuormitetaan murtoon laboratorio-olosuhteissa (lyhytaikainen kuormitus, kosteussuhde 12 %), ne murtuvat yleensä hyvin hauraasti. Murtuminen tapahtuu melkein aina vetopuolella olevan oksan tai sormijatkoksen kohdalta. Murtumisen haurasta luonnetta ei muuta palkin satunnainen tyssäytyminen puristuspuolella. Hauraassa murtumisessa jännitykset eivät pysty jakautumaan uudelleen murtumistapahtuman aikana, vaan murtuminen tapahtuu jännityksen ylittäessä tietyn määrävän kohdan lujuuden. Palkin jännitetyn tilavuuden kasvaessa kasvaa myös se mahdollisuus, että tässä tilavuudessa on suuri murtumisen aiheuttava vika, ja sen vuoksi suurilla palkeilla on pienempi lujuus kuin pienillä palkeilla. Tämä tilavuusvaikutus (kokovaikutus tai Weibullin ilmiö) on selvästi havaittu lyhytaikaisissa laboratoriokokeissa, mutta sitä ei ole riittävästi tutkittu pitkäaikaisen kuorman yhteydessä.

Eurokoodi 5:n mitoitusperiaate perustuu liimapuun ominaislujuuteen ja -jäykkyyteen. Nämä ominaisarvot on määritetty fraktiileina, jotka tietty osuus suuresta liimapuupalkkien joukosta täyttää. Ominaislujuusarvot määritetään lujuusjakautumasta (kuva 1-9). Koetuloksiin tai niiden keskeiseen osaan voidaan riittävällä tarkkuudella sovittaa tilastollinen jakautuma – normaalijakautuma tai logaritminen normaalijakautuma.



KUVA 1-9

Esimerkki normaalijakautuman sovittamiseksi koetuloksiin.

Jos yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan että lujuus on normaalijakautunut¹, voidaan ominaisarvo f_k laskea yhtälöstä

$$f_k = f_{mean} - c \cdot s \quad 1-1$$

f_{mean} keskiarvo
 s hajonta

Kertoimen c arvo riippuu siitä, kuinka ominaisarvo on määritetty (esimerkiksi mitä fraktiilia käytetään), mallintamiseen käytettyjen koetulosten määrästä sekä siitä onko hajonta tunnettu vai arvioitu. Hajonta on mitattujen arvojen jakautuman tilastollinen leveysmitta. Materiaalin ominaislujuus on siten riippuvainen sekä keskiarvosta että koetulosten vaihtelusta ja koekappaleiden lukumäärästä. Murtorajatilamitoituksessa käytetään alempaa 5 % fraktiilia vastaavaa arvoa. Tämän arvon alittaa viisi koekappaleita sadasta (tilastollisessa mielessä). Jos koekappaleiden määrä on suuri on c :n arvo 1,75.

Kimmokertoimen ja liukukertoimen ominaisarvoja käytetään käyttörajatilan muodonmuutoksia laskettaessa ja niiden arvoina käytetään keskiarvoja. Kun kimmokertoimen ja liukukertoimen arvoja käytetään lujuuslaskelmissa, esimerkiksi nurjahdustarkasteluissa, käytetään 5 % fraktiilin arvoja.

Lujuusluokat

Standardin EN 14080 mukaan valmistettavalle liimapuulle määritellään tietty lujuusluokka. EN 14080 antaa useita mahdollisuuksia lujuusluokan määrittämiseen:

- laskennallisesti (liimapuun lujuus määritetään sen lamellien lujuudesta)

¹ Standardin EN 14358 mukaan liimapuulle pitää yleensä käyttää logaritmistä normaalijakautumaa. Ominaisarvojen laskentaperusteita koskeva periaate ei ole riippuvainen valitusta jakautumasta.

- palkkien koekuormituksen avulla
- standardissa EN 14080 kuvatun luokittelumenettelyn avulla.

Yleensä liimapuun lujuus määritellään käytetyn sahatavaran lujuudesta, liimapuun poikkileikkauksen koostumuksesta ja sormijatkosten lujuudesta. EN 14080 määrittelee useita lujuusluokkia, mutta valmistaja voi käyttää laskennallista menetelmää tai koekuormitusta määrittelykseen oman lujuusluokan, jos hän esimerkiksi haluaa optimoida paikallisesti saatavana olevan sahatavaran käyttöä. Taulukoissa 1-1 ja 1-2 esitetään standardissa EN 14080² määritellyt lujuus- ja jäykkyysarvot. Taulukko 1-3 esittää oman lujuusprofiilin määrittelemisessä käytettävät yhtälöt.

TAULUKKO 1-1

Standardin EN 14080 mukaiset liimapuun lujuusluokat. Yhdistetty liimapuu. Valmistaja voi myös määrittellä oman lujuusluokan. Lujuusarvot N/mm² ja tiheydet kg/m³.

Ominaisuus ^a	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0,g,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukukerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	542						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys ^b	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440
^a Taulukon ominaisuudet on laskettu standardin kohdan 5.1.5 mukaisesti sen taulukon 2 mukaisille rakenteille. Jos samaan lujuusluokkaan johtaville erilaisille rakenteille saadaan eri arvot, niin on annettu pienin arvo.								
^b Laskettu eri lamellivyöhykkeiden tiheyksien keskiarvona, katso standardin kohta 5.1.5.3 kappale 5.								

² Arvot on annettu liimapuun harmonisoidun tuotestandardin EN 14080:2013 mukaisesti

TAULUKKO 1-2

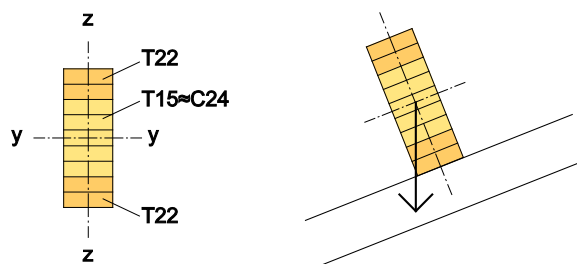
Standardin EN 14080 mukaiset liimapuun lujuusluokat. Homogeeninen liimapuu. Valmistaja voi myös määrittää oman lujuusluokan. Lujuusarvot N/mm² ja tiheydet kg/m³.

Ominaisuus	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukukerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

TAULUKKO 1-3

Homogeenisen liimapuun ominaislujuudet ja –jäykkyyssarvot N/mm² ja tiheydet kg/m³.

Ominaisuus	Ominaisarvo
Taivutuslujuus $f_{m,g,k}$	Taivutuslujuuden ominaisarvo lasketaan yhtälöstä $f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 (f_{m,j,k} / 1,4 - f_{t,0,l,k} + 6)^{0,65}$ Yhtälöä sovelletaan vain jos lamellien sormijatkosten ominaislujuus lape-taivutuksessa on $1,4 f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$ Yhtälöä käytetään myös jatkamattomista lamelleista tehdyn liimapuun lujuudelle jolloin $f_{m,j,k}$ arvona käytetään $f_{m,j,k} = 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$
Vetolujuus $f_{t,0,g,k}$	Vetolujuuden ominaisarvo on 80 % liimapuun taivutuslujuuden ominaisarvosta $f_{m,g,k}$
$f_{t,90,g,k}$	0,5
Puristuslujuus $f_{c,0,g,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo on sama kuin liimapuun taivutuslujuuden ominaisarvo $f_{m,g,k}$
$f_{c,90,g,k}$	2,5
Leikkauslujuus $f_{v,g,k}$	3,5
$f_{r,g,k}$	1,2
Kimmokerroin $E_{0,g,mean}$	Kimmokertoimen keskiarvo lasketaan yhtälöstä $E_{0,g,mean} = 1,05 E_{t,0,l,mean}$
$E_{90,g,mean}$	300
Liukukerroin $G_{g,men}$	650
$G_{r,g,mean}$	65
Tiheys $\rho_{g,k}$	1,1 $\rho_{l,k}$
$\rho_{g,mean}$	$\rho_{l,mean}$



KUVA 1-10

Kahdessa suunnassa taivutettu palkki.

Eurokoodi 5 tai EN 14080 eivät anna erikseen lujuus- tai jäykkyyssarvoja heikomman akselin suuntaan taivutettaessa. Heikomman akselin suuntaisen taivutuksen arvoja tarvitaan mm. kahdessa suunnassa taivutettujen orsien mitoituksessa, kuva 1-10. Eurokoodi 5:n mukaan pitää seuraavien ehtojen täyttyä:

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

1-2

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

$\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$ taivutusjännityksien mitoitusarvot pääakseleiden suhteen
 $f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$ vastaavat lujuuksien mitoitusarvot
 k_m kerroin, liimapuulle $k_m = 0,7$

Halkaistut palkit

Liimapuu voidaan halkaista vannesahalla kahdeksi tai kolmeksi halkaistuksi palkiksi. Näin valmistetaan sellaisia liimapuupalkkeja, joiden leveys on pienempi kuin 90 mm. Standardin EN 14080 mukaan kunkin osan vähimmäisleveys on $b = 38$ mm ja suurin leveys $b \leq h/8$.

Standardin EN 14080 mukaan halkaistujen palkkien lujuus määritetään käytetyn lujuuslajittelumenettelyn ja liimapuupalkin rakenteen mukaisesti joko menettelyllä a) tai b):

- Jos lajittelumenettely on sellainen, että kaikki halkaistun palkin lamellit varmasti täyttävät ilmoitettujen ominaisuuksien edellyttämät arvot (lujuusominaisuudet, kimmokertoimet ja tiheys) niin halkaistun palkin lujuusarvot lasketaan lamellien lujuusarvoista.
- Jos seuraavat vaatimukset täyttyvät, voidaan halkaistun palkin ominaistaivutuslujuus $f_{m,s,k}$ määrittää halkaisemattoman palkin ominaislujuudesta $f_{m,g,k}$ yhtälön 1-3 tai 1-4 mukaisesti:
 - lamellien ominaisvetolujuus on vähintään 18 N/mm^2 ja enintään 30 N/mm^2
 - sisälamellien ominaisvetolujuus on enintään 8 N/mm^2 pienempi kuin ulkolamellien lujuus.

$$f_{m,s,k} = f_{m,g,k} - \frac{96}{f_{t,0,l,k} - 6} + 4 \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad \text{halkaistaessa kahdeksi} \quad 1-3$$

$$f_{m,s,k} = f_{m,g,k} - \frac{96}{f_{t,0,l,k} - 6} \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad \text{halkaistaessa kolmeksi} \quad 1-4$$

missä:

$f_{m,s,k}$ halkaistun palkin ominaistaivutuslujuus
 $f_{m,g,k}$ halkaisemattoman palkin ominaistaivutuslujuus
 $f_{t,0,l,k}$ ulkolamellien ominaisvetolujuus

Halkaistun palkin syiden suuntaisen kimmokertoimen keskiarvo $E_{0,s,mean}$ määrittyy halkaisemattoman palkin kimmokertoimesta $E_{0,g,mean}$ yhtälön 1-5 mukaan

$$E_{0,s,mean} = E_{0,g,mean} - 500 \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad 1-5$$

Muut mekaaniset ominaisuudet määrittyvät taulukosta 1-3. Tiheys on sama kuin halkaisemattomalla palkilla.

Liimat

Käytetyillä liimoilla on tutkitut ominaisuudet. Erityisesti lujuus ja pitkäaikaisen kuormituksen kestävyys tunnetaan hyvin. Vain sellaisia liimoja käytetään, joista on pitkä käytännön kokemus. Liimoille asetetut vaatimukset annetaan standardissa EN 14080 ja sen viitestandardeissa EN 301 ja EN 302. PUR-liimoja (polyuretaaniliimoja) koskevat viitestandardit ovat EN 15416-5 ja EN 15425; tätä sovelletaan myös EPI-liimalle (emulsiopolymeeri-isosyanaattiliimalle). Liimoille on määritelty soveltuvien käyttöolosuhteiden mukaisesti liimatyyppi, joko I tai II. EN 14080 mukaan tyyppin II liimaa saa käyttää vain käyttöluokassa 1 ja tyyppin I liimaa myös käyttöluokissa 2 ja 3. Liimapuun merkinnästä pitää ilmetä käytetyn liiman tyyppi, I tai II.

Aikaisemmin liimapuun valmistuksessa käytettiin pääasiassa PRF-tyyppisiä synteettisiä liimoja (fenoli-resorsinoli-formaldehydiliimoja). Kaikki käytettävät PRF-liimat ovat tyyppin I liimoja ja ne on hyväksytty käytettäväksi kaikissa käyttöluokissa sisällä ja ulkona. PRF-liimalla liimatun liimapuun saumat ovat tumman punaruskeita.

Nykyisin käytetään tavallisimmin MUF-liimoja (melamiini-urea-formaldehydiliimoja). Myös tällä liimatyyppillä saadaan lujia ja kestäviä liimasaumojia ja liimaa voidaan käyttää kaikissa käyttöluokissa sisällä ja ulkona. MUF-liimalla liimatun liimapuun saumat ovat vaaleita. Vanhempia MUF-liimoja käytettäessä liimasaumat saattoivat ajan myötä tummuu.

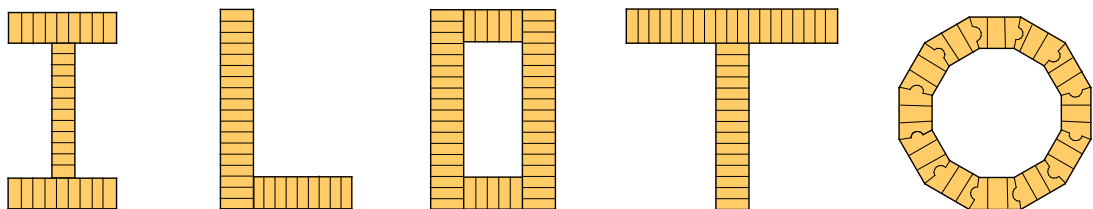
Lamellien sormijatkamiseen käytetään MUF-liimaa.

Liimat kehittyvät jatkuvasti ja uusia liimatyppejä hyväksytään käytettäväksi liimapuun valmistukseen. Uusimpia liimoja ovat PUR- ja EPI-liimat, joita voidaan käyttää sormijatkosten ja lamellien liimaamiseen, mutta ei kokonaisten liimapuupoikkileikkausten jatkamiseen tai yhdistettyjen poikkileikkauksen kokoamiseen. Myös PUR- ja EPI-liimoissa on tyyppin I liimoja.

Liimoja käytetään liimapuun valmistamisen lisäksi myös liitosten tekemiseen (liimaruuviliitokset ja liimatuin teräslevyin tehdyt liitokset) sekä vanhojen rakennuksissa olevien rakenteiden korjaamiseen. Näihin käytetään yleisesti PUR- tai epoksiliimaa.

1.4 Liimapuisten rakennusosien mitat ja muoto

Liimapuisten rakennusosien muotoa ja kokoa voidaan vaihdella; rajoituksena on vain tuotantohallin ja -laitteiston koko, kuljetusmahdollisuudet ja muut vastaavat seikat. Useimmiten poikkileikkaukset ovat suorakulmaisia, mutta muitakin muotoja voidaan valmistaa kuten I-, T- ja L-poikkileikkauksia ja ontelopoikkileikkauksia. Suorakulmaisista poikkileikkauksista voidaan myös koota yhdistettyjä poikkileikkauksia. Erilaisia vaihtoehtoja esitetään kuvassa 1-11.



KUVA 1-11

Esimerkkejä yhdistetyistä poikkileikkauksista.

Varastovalikoima

Liimapuu valmistetaan tavallisesti 45 mm paksuiksi höylätyistä lamelleista, joiden leveys vastaa sahojen vakiovalikoimaa. Tämän vuoksi liimapuupoikkileikkauksen korkeus on yleensä 45 mm:n kerrannainen. Paineekyllästetyt mäntylamellit höylätään yleensä 33 mm paksuiksi. Myös kaarevat palkit valmistetaan ohuemmista lamelleista, joiden paksuus vastaa valittua kaarevuussädettä.

Sivujen höyläyksen jälkeen vakioleveydet ovat 90, 115, 140, 165, 190, 215 ja 240 mm. Mittoihin vaikuttaa se, ovatko sivut sekä höylätyt että hiottut vai vain höylätyt, jolloin vähäisiä osa sivuista voi jäädä höyläämättä.

Varastokoot on annettu taulukossa 1-4. Annettu koko vastaa ulkonäköluokkaa puhtaaksi höylätyt, viimeistellyt pinnat (kuva 1-13) kun kosteussuhde on 12 %. Varastopalkkien lisäksi on saatavissa myös erikoiskokoja.

TAULUKKO 1-4

Suomalaisen liimapuun varastokoot. Alemmassa taulukossa halkaistut liimapuut. Suurin tavallinen varastopituus on 12 m.

		KORKEUS												
		90	115	140	180	225	270	315	360	405	450	495	540	585
LEVEYS	90	x				x	x	x	x	x				
	115		x			x	x	x	x	x	x	x		
	140			x			x	x	x	x				
	165								x		x			
	190													
	215													
	240													

		KORKEUS						
		225	270	280 ^(*)	300 ^(*)	315	360	405
LEVEYS	42	x	x	x	x	x	x	
	56	x	x			x	x	x
	66					x	x	x

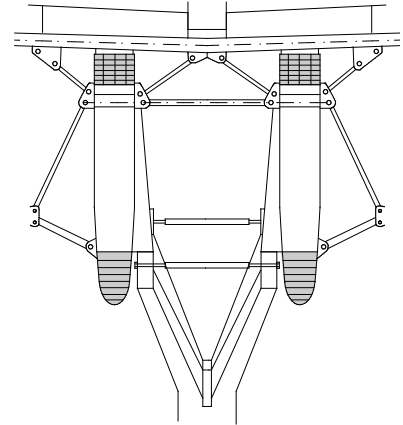
^(*) Toimitetaan erikoistilauksesta.

Suurin poikkileikkauskoko

Palkin leveyttä rajoittaa saatavana olevan sahatavaran suurin leveys, mikä yleensä on 225 mm. Joskus voi saada jopa 275 mm leveää sahatavaraa. Höyläyksen jälkeen nämä mitat vastaavat nimellislevyksiä 215 ja 265 mm. 700–800 mm leveitä rakennusosia voidaan valmistaa liimamalla yhteen kapeampia liimapuuosia (esimerkiksi 190+190+190+190=760 mm). Toinen mahdollisuus on latoa useampi lamelli vierekkäin; jos näitä ei liimata syrjistäan yhteen niin vierekkäisten lamellien syrjien väliset saumat pitää porrastaa.

Palkin suurin korkeus on noin 2 m, mitä rajoittaa käytössä oleva höyläyskalusto. Suurempia korkeuksia voidaan valmistaa esimerkiksi siten että harjapalkin harjaosa liimataan paikoilleen myöhemmin, höyläyksen jälkeen. Tällä tavalla on valmistettu jopa 3 m korkeita liimapuupalkkeja.

Materiaalin tehokkaan hyväksikäytön näkökulmasta palkkien pitäisi olla kapeita ja korkeita, mutta sellaisia on vaikea käsitellä työmaalla. Käytännön syistä palkin korkeuden ei pitäisi olla suurempi kuin 10 kertaa sen leveys.



KUVA 1-12

Esimerkkejä suurista liimapuupoikkileikkauksista. Norjalaisen Tynsetin sillan kaareva ristikko (vasemmalla) ja Oslon lentokentän Gardermoenin kattopalkkien poikkileikkaus (oikealla).

Suurin pituus

Osa pohjoismaisista valmistajista voi toimittaa jopa 40 m pitkiä liimapuisia rakennusosia. Käytännössä pituutta rajoittavat kuljetusmahdollisuudet (katso luku 1.6. > Kuljetus)

Esikorotus

Taipumisesta aiheutuvien ongelmien pienentämiseksi vapaasti tuetut pitkät liimapuupalkit (jänneväli yli 10 m) voivat tarvita esikorotusta. Valmistettaessa voidaan helposti saada aikaan 200 mm esikorotus. Esikorotusta koskevia suosituksia annetaan luvussa 3.3.

Toleranssit

Liimapuun valmistustoleranssit ovat samaa suuruusluokkaa kuin valssattujen teräsprofiilien tai betonielementtipalkkien toleranssit. Taulukossa 1-5 annetut toleranssit ovat standardin EN 14080 mukaiset.

TAULUKKO 1-5

Liimapuun toleransseja.

Suure		Suurin poikkeama
Mittaluku b		± 2 mm
Mittaluku h	≤ 400 mm	+ 4 mm / -2 mm
	> 400 mm	+ 1 % / - 0,5 %
Pituus L	$\leq 2,0$ m	± 2 mm
	2,0 ... 20 m	$\pm 0,1$ %
	> 20 m	± 20 mm
Kulmat	Poikkileikkaus saa poiketa suorakulmaisesta enintään 1:50 (noin 1°)	
Suoran palkin suoruus	Millä tahansa palkin syrjällä 2 m matkalla nuolikorkeus saa olla enintään ± 4 mm. Ei koske esikorotettuja palkkeja.	
Kaarevan palkin muoto	≤ 6 lamellia, nuolikorkeuksien erotus / 1 m palkin kaarevaa pituutta	± 4 mm
	> 6 lamellia, nuolikorkeuksien erotus / 1 m palkin kaarevaa pituutta	± 2 mm

1.5 Pinnan laatu ja pintakäsittely

Liimapuu on ensisijaisesti kantavien rakenteiden materiaali ja sen vuoksi sen tärkeimmät ominaisuudet ovat lujuus, jäykkyys ja säilyvyys. Liimapuisten rakennusosien pinnan laatu ei yleensä täytä puusepäntuotteille ja huonekaluille asetettavia vaatimuksia. Suurin osa tuotteista täyttää kuitenkin tavanomaiset ulkonäkövaatimukset, kunhan niitä käsitellään riittävän huolellisesti kuljetettaessa ja rakennuspaikalla.

Sahatavara

Liimapuu valmistetaan lujuuslajitellusta sahatavarasta, minkä ansiosta siinä olevien oksien kooka on jossain määrin rajoitettu. Lujuuslajittelu ei kuitenkaan merkitse sitä, että puu olisi oksatonta. Liimapuulla voi olla suuri lujuus vaikka siinä olisi suuriakin oksia – sisälamelleissa oksien koko voi olla yhtä suuri kuin lamellin paksuus.

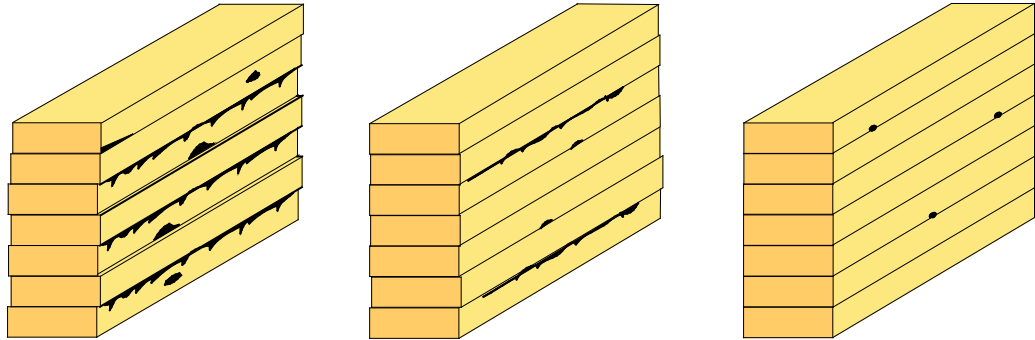
Liimasaumat

Kuten aikaisemmin mainittiin niin fenoli-resorsinoliimalla saadaan tummia saumoja ja muilla liimoilla vaaleita liimasaumoja. Jos liimattaessa on käytetty tummaa tai tummuvaa liimaa, niin sormijatkokset näkyvät tummina laikkuina tai sahalaitekuviaina lamellien sivuilla.

Rakennusosat joiden leveys on alle 90 mm valmistetaan tavallisesti paksummasta liimapuusta halkaisemalla. Sahan terä voi kulkea avoimien tai liiman täyttämien halkeamien kautta, minkä vuoksi sivuista voi lohjeta paloja ja tummalla liimalla liimattaessa näkyy sahatulla pinnalla selviä liimajälkiä. Halkaistuja palkkeja ei sen vuoksi pitäisi käyttää jos ulkonäölle asetetaan vaatimuksia.

Pinnat

Puristimesta otetun liimapuisen rakennusosan sivut ovat epätasaiset ja niissä näkyy liimapur-seita. Käytännön syistä ja ulkonäön parantamiseksi kaikki neljä sivua höylätään ennen toimitus-ta. Asiakkaan asettamat ulkonäkövaatimukset määräävät höyläystarpeen. Erityistapauksissa arkkitehdin ja rakennesuunnittelijan pitää yhdessä sopia kuinka paljon palkin sivuja höylätään. Rakennesuunnittelija voi siten suunnitella rakenteen käyttämällä sen todellisia mittoja.



KUVA 1-13.

Esimerkkejä ulkonäköluokista. Vasemmalta oikealle: Mitallistetut pinnat, höylätyt pinnat ja puhtaaksihöylätyt pinnat.

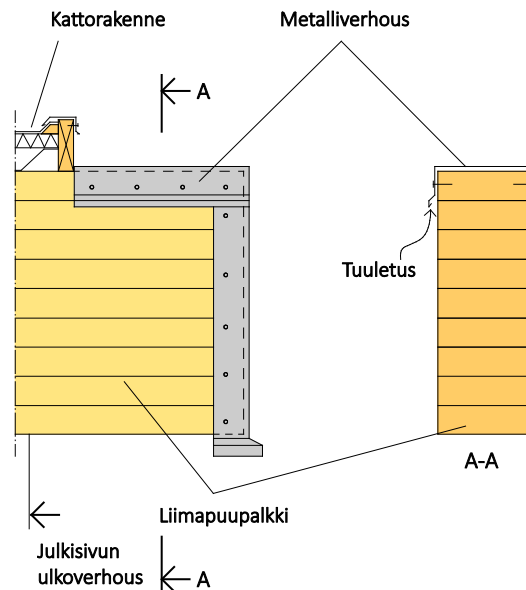
Pintakäsittely

Pintakäsittelyn tarkoituksena on antaa liimapuun pinnalle tietty, haluttu ulkonäkö ja suojella materiaalia nopeilta kosteuden vaihteluilta ja estää siten halkeamien muodostuminen. Kalvon muodostavat pintakäsittelyt, kuten maalit ja lakat, tekevät myös pinnan puhdistamisen yksin-kertaisemmaksi ja suojaavat myös jossain määrin mekaanisia vaurioita vastaan. Palotilanteen aiheuttaman palon leviämisen ja savun kehittymisen estämiseksi voidaan käyttää erikoispinta-käsittelyjä.

Liimapuuta voidaan pintakäsitellä samoilla tuotteilla ja menetelmillä kuin muutakin puuta. Tällaisia ovat kuullotteet, peittomaalit ja lakat. Valintaan vaikuttavat tekniset, taloudelliset ja esteettiset vaatimukset. Liimapuiset rakenneosat toimitetaan pintakäsittelemättöminä ellei toisin sovita.

Erityisten ulkonäkövaatimuksien puuttuessa liimapuu ei tarvitse sisätiloissa mitään pintakä-sittelyä. Rakenne on silloin suojattava rakennusvaiheessa jollain muulla tavalla haitallista kos-teutta ja likaantumista vastaan. Ulkona säältä suojassa on usein riittävää käyttää pohjustusta värittömällä tai pigmenttipitoisella kuullotteella, joka voi myös sisältää kemiallisia suoja-aineita sinistäjäsieniä vastaan. Kun liimapuun ulkonäölle asetetaan erityisvaatimuksia, niin voidaan tarvita yksi tai useampia peittomaalauskerroja.

Ulkona oleva liimapuu on alttiina suurille kosteusvaihteluille ja se pitää sen vuoksi suojata niin ettei muodostu haitallisia halkeamia. Suoja kostumista vastaan voi myös sisältää kemialli-sen puunsuoja-aineen. Pysyvää suojaa lahottajia vastaan ei kuitenkaan voi saada pelkästään puun pintakäsittelyllä (katso alla oleva kuva puun suojauksesta). Ulkona oleva liimapuu pitää, jos mahdollista, suojata katolla tai tuuletetulla suojaverhouksella (kuva 1-14).



KUVA 1-14

Esimerkki julkisivun ulkopuolelle tulevan liimapuupalkin pään suojauksesta.

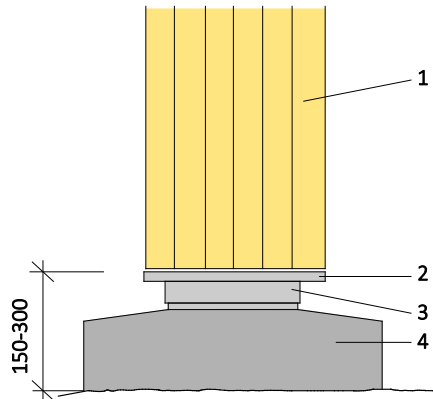
Ilman suojausta materiaali vanhenee sään vaikutuksesta ja saa ajan myötä vanhoille puurakennuksille tyypillisen samettimaisen harmaan pinnan, joka voi aurinkoisella sijaintipaikalla olla myös tervanruskea. Toistaiseksi ei tunneta mitään pintakäsittelyä, joka säilyttäisi ulkona tuoreen puun "valkoisen" ulkonäön kohtuullisin huoltotoimenpitein. Jos ulkona olevan rakenteen luonnollista vanhenemista ei hyväksytty, niin pitää valita pigmentoitu pintakäsittely.

Kaikkia ulkona olevia pintakäsittelyjä pitää huoltaa. Huoltoväli ja menetelmät riippuvat rakenteen sijainnista ja alun perin valitusta pintakäsittelystä. Kuullotteet vaativat useammin huoltoa kuin peittomaalit, mutta niitä on yksinkertaisempaa huoltaa. Uusintakäsittelyt voidaan tehdä värittömällä tai alkuperäistä vaaleammalla kuullotteella, jotta estetään pinnan tummuminen.

Rakenteellinen puunsuojaus

Orgaanisena aineena puu voi tietyissä olosuhteissa altistua sienille tai tuhohyönteisille. Vaurioitilanteessa tämä on tietenkin haitallista, mutta ekologisesta näkökulmasta tämä on yksi materiaalin suurimpia etuja. Elinaikanaan rakennus pitää suojata sienten ja tuhohyönteisten aiheuttamilta vaurioilta. Tärkeintä on suunnitella rakenteen yksityiskohdat siten, että estetään biologisille vaurioille altistavien olosuhteiden muodostuminen.

Kuiva puu ei lahoa. Rakenteellisen puunsuojauksen periaate onkin rakenteen pitäminen niin kuivissa olosuhteissa kuin mahdollista (kosteussuhde < 20 %). Toissijaisesti rakenne suunnitellaan siten, että se pääsee mahdollisesti kastuttuaan kuivumaan. Kun yksityiskohdat suunnitellaan oikein, voidaan lahovauriot estää. Erityisesti liitoksissa pitää estää veden kulkeutuminen puuhun; minimoida vedelle alttiin päätypuun määrä ja välttää kapeita kapillaarisesti vettä johtavia rakoja. Esimerkiksi siltarakenteissa voi olla yksinkertaisinta suojata liimapuurakenne kauttaaltaan laudoituksella tai puulevyllä, joka myöhemmin voidaan kokonaisuudessaan uusia. Kevyen liikenteen sillat katetaan usein, mikä lisää käyttömukavuutta ja suojaa rakenteen säältä.



KUVA 1-15

Pilarin jalan rakenteellinen suojaus. 1. liimapuupilari 2. kosteuseristys 3. välike (teräs, betoni tai kyllästetty puu) 4. betoniperustus.

Puu voidaan suojata tehokkaasti lahoamista vastaan myös painekyllästämällä se jollain sopival- la aineella. Paineekyllästys ei voi kuitenkaan koskaan korvata detaljien asianmukaista suunnitte- lua ja sitä voidaan pitää vain täydentävänä toimenpiteenä. Jos puurakenne kastuu, niin siitä on myös muuta haittaa kuin rakenteen lahoaminen. Nykyiset painekyllästysaineet voivat lisäksi kemialliselta koostumukseltaan olla sellaisia, että niiden käyttö edellyttää ruostumattomasta teräksestä tehtyjä liitoselimiä. Useat lait ja standardit sääntelevät kemiallisten puunsuoja- aineiden käyttöä.

Liimapuu voidaan valmistaa lamelleista, jotka on kyllästetty ennen höyläystä ja liimausta. Liimauksen jälkeen voidaan sivut joko jättää höyläämättä tai höylätä kuten tehtaassa tavallises- ti on tapana. Kummassakin tapauksessa suojavaikutusta voidaan parantaa sopivalla pintakäsit- telyllä.

Liimapuu voidaan kyllästää myös liimauksen jälkeen, mutta paineastian koko rajoittaa siinä tapauksessa rakennusosan koon. Halkeamistaipumuksen vuoksi kyllästämiseen pitää käyttää vain öljypohjaisia tuotteita. Työterveysnäkökulmasta pitää kreosoottiin perustuvia tuotteita kä- sitellä erityisen huolellisesti.

1.6 Kuljetus, varastointi ja asennus

Kuljetus, varastointi ja asennus ovat liimapuurakentamisen viimeiset vaiheet ja niitä saatetaan pitää vähemmän tärkeinä. Niissä on kuitenkin noudatettava samaa huolellisuutta kuin edeltä- vissäkin työvaiheissa ja niillä voi olla ratkaiseva merkitys rakenteen kestävyydelle ja projektin onnistumiselle. Kuljetusongelmat voidaan toisinaan ratkaista siten, että rakenne jaetaan sopi- viin kuljetusyksiköihin, jotka yhdistetään toisiinsa rakennuspaikalla.

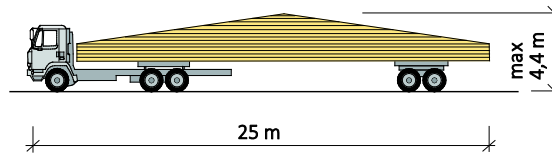
Kuljetus

Liimapuiset rakennusosat kuljetetaan pääasiassa maanteitse. Kuljetuksia koskevat säännöt vaihtelevat eri maissa. Sen vuoksi seuraavat kokorajoitukset ovat vain suuntaa-antavia ja ne tu- lee tarvittaessa tarkistaa paikallisilta viranomaisilta.

Tavallisella kuorma-autolla voi kuljettaa 9...10 m pitkiä liimapuuosia. Telikuljetuksena voi- daan kuljettaa jopa 35 m pitkiä rakennusosia. Jos liimapuun määrä on pieni, muodostuu tällai- sen kuljetuksen kustannusten osuus suureksi. Sen vuoksi olisi edullisempaa suunnitella rakenne lyhyemmistä rakennusosista, jotka mahtuvat tavalliseen kuorma-autoon.

Yli 25 m pitkät kuljetukset voivat tarvita viranomaisten myöntämän erikoiskuljetusluvan. Yleensä sellaisen saa helposti alle 30 m pitkille kuljetuksille. Erikoiskuljetuksia ovat myös 2,6 m leveämmät tai 4,4 m korkeammat kuljetukset. Kaaret ja kehät ylittävät usein nämä mitat.

Rautatie- ja merikuljetuksilla on omat mittarajansa, jotka pitää tarkistaa näitä kuljetustapoja käytettäessä.



KUVA 1-16

Erikoiskuljetuksen luvanvaraisuus ja sallitut mitat vaihtelevat maittain.

Vastaanotto ja varastointi

Toimitusta vastaanotettaessa pitää tarkistaa, että liimapuuosat ja kiinnikkeet vastaavat tilausta.

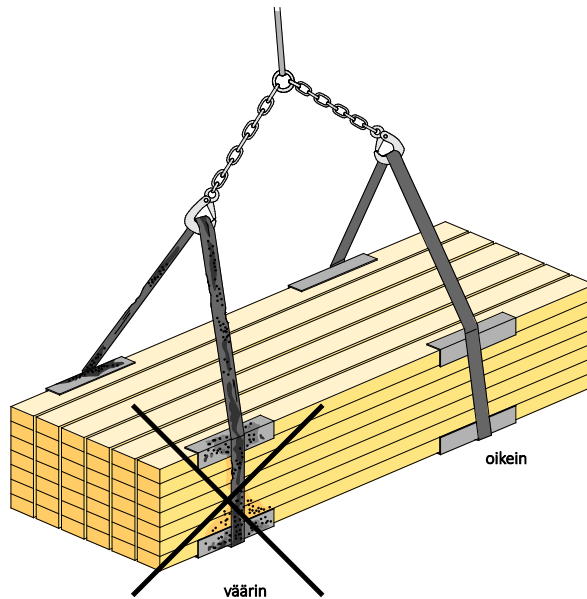
Näkyviksi tarkoitetut liimapuuosat toimitetaan paketoituina. Liimapuuosat paketoidaan joko yksitellen tai nippuina. Paketoinnin tarkoitus on suojata sateelta, lumelta ja lialta, jolle liimapuuosat altistuvat hetkellisesti kuljetuksen, varastoinnin ja asennuksen aikana.

Paketointi ei ole riittävä suoja kosteutta vastaan. Epäsuotuisissa olosuhteissa paketin sisällä voi jopa tapahtua kondensoitumista. Kondensoitunut vesi johdetaan pois siten että paketti avataan.

Liimapuun työmaavarastoinnissa on huomattava seuraavaa:

- Älä koskaan aseta liimapuuta suoraan maata vasten.
- Käytä puhtaita vähintään 250 mm korkeita aluspuita, että saat aikaan hyvän tuuletuksen.
- Huolehdi että alusta on kuiva ja tasainen, etteivät liimapuiset rakennusosat väännä tai kuormitu epätasaisesti.
- Käytä liimapuisten rakennusosien välissä puhtaita välipuita, jotka sijoitetaan pystysuoraan riviin toistensa päälle.
- Suojaa ulkoavarastoinnissa liimapuiset rakennusosat esimerkiksi suojapeitteillä, jotka asetetaan puhtaiden soirojen varaan niin, että suojapeitteen alla on hyvä tuuletus. Suojapeite ei saa ulottua maahan asti.
- Vältä pitkäaikaista ulkoavarastointia rakennuspaikalla.

Haluttaessa liimapuiset rakennusosat voidaan toimittaa kulmasuojattuina, jotta varastoinnin ja asennuksen aikaisia kolhuja voidaan välttää. Nostettaessa osia nosturilla pitää käyttää leveitä nostoliinoja ja suojata liimapuisten rakennusosien syrjät peltikulmin tai muilla kulmasuojilla nostojälkien välttämiseksi. Työssä pitää käyttää puhtaita työkasineita, nostoliinoja ja muita nostovälineitä. Näkyviin jäävillä liimapuupinnoilla ei saa kävellä!



KUVA 1-17

Huolehdi että työkäsineet, nostoliinat ja muut nostovälineet ovat puhtaita.

Asennus

Liimapuurakenteiden asentaminen edellyttää lähes aina, että käytettävissä on jonkunlainen nostolaite, yleensä autonosturi. Liimapuiset rakennusosat pitäisi mieluiten voida nostaa suoraan kuorma-autosta paikoilleen rakennukseen. Tämä on kuitenkin harvoin mahdollista, ja sen vuoksi pitää yleensä varautua varastoimaan tuotteita jonkun aikaa rakennuspaikalla.

Asennustyö pitää suunnitella jo ennen lastin purkamista kuljetusautosta, jotta vältetään aikaa vieviä siirtoja. Selkeä ja järjestelmällinen yksittäisten rakennusosien ja liittimien merkkkaus on myös ratkaisevaa onnistuneelle asennukselle.

Rungon kestävyys tuulta ja muita rakennusaikaisia rasituksia vastaan pitää varmistaa väliaikaisilla tuennoilla, kunnes rakennuksen jäykistysjärjestelmä on kokonaisuudessaan valmis. Kehä- ja kaarirakenteet varmistetaan parhaiten teräsvaijereilla, jotka kiristetään vanttiruuvein. Vaijereita käytetään myös pitämään rakenteet oikeassa asemassaan, kunnes tuuliristikko tai muu jäykistysrakenne on asennettu.

Yleensä on hyvä avata kääre niin pian kuin mahdollista asennuksen jälkeen. Katon pitää kuitenkin olla paikoillaan ja rakennuksessa pitää saada aikaan sopivat ilmasto-olosuhteet. Tällä tavoin minimoidaan pintojen haitallinen värjäntyminen, mikä on erityisen tärkeää jos rakennukseen halutaan näkyviä puupintoja. Kääre voidaan poistaa myös kokonaan, jos varotaan, etteivät näkyviin jäävät rakennusosat likaannu työn aikana. Erityisen alttiita ovat sellaiset kattorakenteet, joiden päälle tulevan poimulevyn saumoista valuva sadevesi voi liata palkkien sivut ennen eristeen ja kattuhuovan asentamista.

Kolminivelkehät ja -kaaret muodostuvat kahdesta osasta, jotka kiinnitetään betoniperustuksen tai pilareiden varaan ja kiinnitetään teräksisillä liitososilla harjalta. Suuret rakenteet asennetaan helpoimmin ja turvallisimmin autonosturin avulla siten, että harjan alla käytetään siirrettävää asennustornia. Asennettaessa kumpikin kehän tai kaaren puolikas nostetaan paikoilleen autonosturilla. Kehän jalka tai kaaren alapää kiinnitetään perustuksessa olevaan kiinnikkeeseen tai pilarin yläpäähän, harjakappale asetetaan asennustornin päälle ja osat kiinnitetään yhteen. Kun rakenne on tuettu sivusuunnassa paikoilleen, siirretään asennustorni seuraavalle linjalle.

1.7 Tilaaminen ja toimittaminen

Tilauserittely

Suunniteltaessa ja asiakirjoja laadittaessa pitää antaa seuraavat tiedot:

- rakennusosien tunnistusmerkintä (esimerkiksi B1, P2)
- rakennusosan tyyppi (esimerkiksi suora palkki, pilari, harjapalkki tai viittaus kuvaan)
- nimellimitat (leveys x korkeus x pituus mm). Korkeuden vaihdellessa annetaan korkeudet seuraavasti: vasemmassa päässä / keskellä (suurin korkeus) / oikeassa päässä. Erikoisrakenteiden kuten epäsymmetristen harjapalkkien mitat annetaan piirustuksissa.
- lujuusluokka EN 14080 mukaan
- liimatyypin EN 14080 mukaan. Tavallisesti käytetään liimatyyppeä I.
- ulkonäkölaatu, tarvittaessa ilmoitetaan mitkä pinnat ovat näkyviä.
- mahdollisesti haluttu pintakäsittely
- mahdollisesti haluttu esikorotus
- mahdollisesti haluttu muu puulaji kuin kuusi
- tavallisesta poikkeavat plus- ja miinustoleranssit.

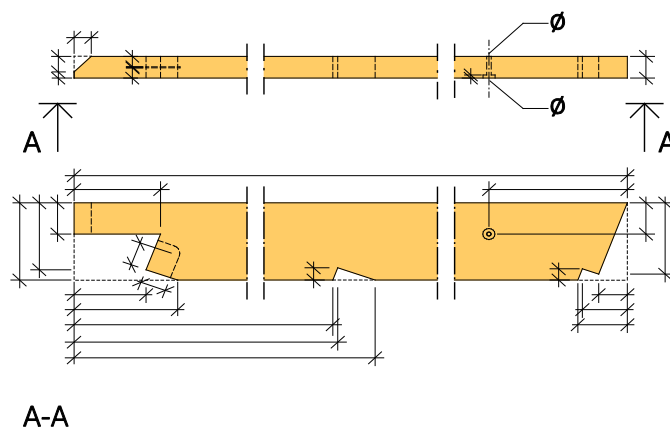
Esimerkki tilauserittelystä: 4 harjapalkkia 165 x 680/1370/680 x 22000 mm, GL30c/liimatyypin I, puhtaaksihöylätyt pinnat – esikorotus 120 mm.

Tarjouspyynnössä on lisäksi ilmoitettava:

- samanlaisten rakennusosien lukumäärä (lukumäärässä on otettava huomioon että kolminivelkehä tai kolminivelkaari muodostuu kahdesta rakennusosasta)
- tarvittaessa viittaus kuviin, joissa työstöt, esimerkiksi loveukset ja sahaukset, on esitetty
- pakkaamista koskevat erityistoivomukset, esimerkiksi paketointi kappaleittain, kulmasuojattuina nosturiasennusta varten
- toimitusaikataulu
- kuorman purkamistapa
- rakennuskohteen nimi ja osoite.

Mitoitus

Selkeä, oikea ja yksiselitteinen liimapuisen rakennusosan mittojen esittäminen nopeuttaa valmistusta ja vähentää toimituksen virhemahdollisuuksia.



KUVA 1-18

Esimerkki mitoituksesta.

2	PUU- JA LIIMAPUURAKENTEIDEN MITOITUS	2
2.1	Rakenteiden mitoituksen yleiset periaatteet	2
	Esisuunnittelu ja alustava mitoitus	2
	Rakenteen yksityiskohtainen mitoittaminen ja kestävyys osoittaminen	3
2.2	Eurokoodien soveltaminen	4
	Eurokoodit ja yleiset vaatimukset	4
	Vaatimusten täytyminen eri mitoitusilanteissa	4
	Rajatilamitoituksen periaatteet	6
	Kuorman vaikutukset ja kuormayhdistelmät	8
	Luotettavuusluokat	9
2.3	Liimapuun ja puun erityispiirteitä	9
	Kosteussuhteen vaikutus ja käyttöluokka	10
	Kuormien aikaluokat	10
	Liimapuun mitoittaminen murtorajatilassa	12
	Liimapuun mitoittaminen käyttörajatilassa	12
2.4	Suosittelun esikoroitus ja taipumien rajoittaminen	12
	Esikoroitus	13
	Taipuma	13

2 PUU- JA LIIMAPUURAKENTEIDEN MITOITUS

2.1 Rakenteiden mitoituksen yleiset periaatteet

Kantavien rakenteiden mitoittaminen tarkoittaa ensisijaisesti sen riskin rajoittamista, että rakenteen kestävyysden menettäminen johtaisi vakaviin henkilövahinkoihin, ja lisäksi rakenteen tyydyttävän toiminnan varmistamista tavanomaisissa käyttöolosuhteissa.

Mitoittaminen tehdään osoittamalla, että valitut materiaalit, mitat ja rakenneratkaisu täyttävät asetetut vaatimukset. Osoittaminen voidaan tehdä laskemalla tai testaamalla tai näiden yhdistelmänä. Kantava rakenne pitää mitoittaa siten, että materiaalin lujuudelle, rakenteiden ominaisuuksille ja säilyvyydelle asetetut vaatimukset täyttyvät aiotun käyttöiän ajan.

Aiottu käyttöikä on se ajanjakso jona rakennetta oletetaan käytettävän aiottuun tarkoitukseensa. Käyttöaikana huolehditaan normaalista kunnossapidosta, mutta mitään suurehkoja korjauksia ei oleteta tehtävän. Rakennusten aiotuksi käyttöiäksi suositellaan usein 50 vuotta ja siltojen 100 vuotta.

Esisuunnittelu ja alustava mitoitus

Rakennusprojektin ensimmäinen vaihe on esisuunnittelu. Tässä vaiheessa tunnistetaan ja tutkitaan tarpeet, asetetaan mahdollisten ratkaisujen vaatimukset, arvioidaan ja hyväksytään esitetyt ratkaisut ja valitaan sopiva rakenneratkaisu jatkosuunnitteluun. Kun rakenneratkaisu on valittu, määritelty ja hyväksytty aloitetaan toinen vaihe, jossa osoitetaan että rakenne täyttää voimassaolevat rakentamismääräykset.

Ensimmäiseen vaiheeseen kuuluu intuitiivinen osa, jossa määritellään projektikohtaiset tavoitteet ymmärtämällä vaatimusluetteloksi muokatut asiakkaan toivomukset ja ottamalla huomioon voimassaolevien määräysten muodossa esitetyt yhteiskunnan vaatimukset. Tuloksena on yksinkertaisia luonnoksia erilaisista rakenneratkaisuista ja jokaisen ratkaisun alustava arviointi. Mitoitusehdot pitää muotoilla niin yksinkertaisesti kuin mahdollista, ja niiden pitää ottaa kantaa vaadittuihin ominaisuuksiin, laatumittareihin, luotettavuuteen, turvallisuuteen, tuotteen elinkaareen, estetiikkaan, ergonomiaan, taloudellisiin näkökohtiin ja käytönaikaiseen huoltoon. Systemaattisen analyysin päätarkoitus on synnyttää suuri määrä mahdollisia rakenneratkaisuja. Uusien ratkaisujen kehittämisessä paras tapa on yhdistää intuitiivisia ja systemaattisia menetelmiä – systemaattisella tarkastelulla luodaan uusia ratkaisuja intuitiivisen ajatusprosessin tuloksista.

Alustavan arvion päätarkoituksena on rajoittaa rakenneratkaisujen määrää. Tämä voidaan tehdä keskustelemalla tai arviointiin kehitettyjen matriisien avulla. Päätöksenteon perusteet kirjataan, jotta niitä voidaan mahdollisesti harkita myöhemmin uudelleen. Arviointivaiheeseen kuuluu hyväksytyjen rakenneratkaisujen asettaminen paremmuusjärjestykseen, jokaisen ratkaisun yksinkertaistettu riskianalyysi ja lopullinen ratkaisujen arviointi. Paremmuusjärjestykseen asettaminen voi tapahtua siten, että etuja ja haittoja sekä erilaisia vaatimuksia tarkastellaan systemaattisesti ratkaisu ratkaisulta. Tämän tuloksena oleva matriisi osoittaa, kuinka eri ratkaisut täyttävät asetetut vaatimukset. Kunkin vaatimuksen parhaiten täyttävä ratkaisu saa sen kohdan parhaan arvosanan.

Riskianalyysi on tärkeä osa esisuunnittelua. Kaikki mahdolliset riskit pitää kirjata muutaman parhaaksi arvioidun ratkaisun osalta. Riskit voivat esimerkiksi liittyä rakenteeseen, kuljetukseen ja valmistukseen, talouteen, onnettomuuksiin tai säähän.

Esisuunnittelun tarkoituksena on arvioida rakennuksen kantavien rakenteiden mitat. Kantavia rakenteita ovat esimerkiksi ristikot, palkit, pilarit seinä- ja lattiarakenteet.

Esisuunnitteluun kuuluu usein laskelmia, joissa arvioidaan eri kuormayhdistelmien aiheuttamia tarkasteltavan rakenteen poikkileikkauksille tulevia voimasuureita. Poikkileikkauksen koko arvioidaan

- kokemuksen ja suositusten avulla
- alustavien mitoittavien voimalaskelmien avulla (rakenteiden vuorovaikutus huomioon otettuna)
- alustavien mitoittavien jännityslaskelmien avulla
- alustavien taipumalaskelmien avulla.

Rakenteen yksityiskohtainen mitoittaminen ja kestävyys osoittaminen

Tulos ja prosessi

Yksityiskohtaisen mitoittamisen aikana tehdään kaikki lopulliset tärkeät ratkaisut. Yksityiskohtaisen mitoittamisen tuloksena tiedetään, että

- rakenne on kokonaisuudessaan yksikäsitteisesti määritelty ja se täyttää vaatimukset
- kaikki oleelliset rakenneratkaisut on määritelty
- kaikki osat on täydellisesti suunniteltu yksityiskohtiaan myöten ja ne sopivat yhteen
- kustannukset on tarkkaan arvioitu ja rakennustapa on määritelty
- asianosaisten välillä on yhtenäinen käsitys toleransseista, jotta varmistetaan rakennettavuus, esivalmistuksen aste ja kuljetettavuus
- vaaditut laatuasteet on määritelty
- rakenteiden määrittelyt vastaavat niille etukäteen annettuja rajoituksia.

Rakenteiden mitoitus perustuu niihin tulevan rakennuksen sijaintipaikassa voimassa oleviin rakentamista koskeviin määräyksiin. Eri maissa rakentamismääräykset voivat perustua erilaisille periaatteille, kuten rajatilamenettely, luotettavuustarkastelut tai sallittujen jännitysten menettely. Koko tarkasteltava rakenne pitää mitoittaa käyttäen yhtenäistä mitoitusjärjestelmää.

Vaatimusten täyttäminen

Suuriin osa rakenteiden mitoittamisesta muodostuu sen osoittamisesta että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset. Vuodesta 2010 lähtien koko EU:ssa ja useissa muissakin euroopan maissa käytetään rakenteiden mitoituksessa yhteistä EU:n komission vahvistamaa määräyskoelmaa, eurokoodeja. Rakenteen tai sen osan kestävyys osoitetaan murtorajatilatarkastelulla, kun taas sen soveltuvuus käyttötarkoitukseen osoitetaan käyttörajilatarkastelulla. Murtorajatilatarkastelua käytettäessä rakennesuunnittelijan pitää luoda rakenteen ja sille tulevien kuormien staattinen malli käyttämällä kuormien ja materiaali- sekä tuoteominaisuuksien mitoitusarvoja ja rakenteen geometrisia suureita. Kuormayhdistelmät pitää valita siten, että samanaikaiset kuormat ja niiden mahdolliset toisistaan poikkeavat vaikutussuunnat ja -kohdat otetaan huomioon. Tarvittaessa otetaan myös huomioon rakenteiden muodon poikkeamat suunnitellusta, kuten alkupäikeskeisyydet, ja kuormista aiheutuvat muodonmuutokset.

2.2 Eurokoodien soveltaminen

Eurokoodit ja yleiset vaatimukset

Eurokoodien tarkoituksena on muodostaa yhtenäiset, EU-maiden kansalliset säännökset korvaavat säännöt rakenteiden mitoittamiselle. Eurokoodijärjestelmän osia sovelletaan aina yhdessä ja siihen kuuluu seuraavat standardit, joista useat ovat moniosaisia

EN 1990	eurokoodi 0:	Rakenteiden suunnitteluperusteet
EN 1991	eurokoodi 1:	Rakenteiden kuormat
EN 1992	eurokoodi 2:	Betonirakenteiden suunnittelu
EN 1993	eurokoodi 3:	Teräsrakenteiden suunnittelu
EN 1994	eurokoodi 4:	Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu
EN 1995	eurokoodi 5:	Puurakenteiden suunnittelu
EN 1996	eurokoodi 6:	Muurattujen rakenteiden suunnittelu
EN 1997	eurokoodi 7:	Geotekninen suunnittelu
EN 1998	eurokoodi 8:	Rakenteiden suunnittelu maanjäristyksen kestäviksi
EN 1999	eurokoodi 9:	Alumiinirakenteiden suunnittelu

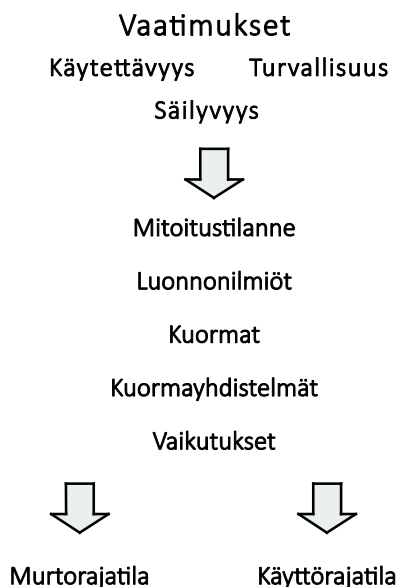
Kaikissa eurokoodeihin kuuluvissa standardeissa on kahdenlaisia kappaleita. Osa kappaleista on merkitty kirjaimella "P" (sanasta "principle", periaate). Tämä tarkoittaa että merkityssä kappaleessa oleva vaatimus on täytettävä. Nämä ovat yleensä sellaisia vaatimuksia ja määritelmiä joille ei ole annettu vaihtoehtoa. Kappaleet joita ei ole merkitty kirjaimella "P" ovat yleisesti hyväksytyjä neuvoja ja suosituksia määräyksien soveltamisesta, mutta vaihtoehtoisiaakin tapoja voidaan hyväksyä. Eurokoodi 0 esittää rajatilamenettelyn periaatteet ja rakenteiden turvallisuudelle, käytettävyydelle ja pysyvyydelle asetetut vaatimukset. Eurokoodi 0 edellyttää rakentamisprosessilta seuraavaa:

- rakenneratkaisun valinnan ja rakenteiden mitoituksen tekee riittävästi koulutettu ja kokenut henkilöstö
- rakentamisen tekee riittävän taitava ja kokenut henkilöstö
- rakentamisen eri vaiheissa järjestetään riittävä valvonta ja laadunvalvonta; suunnittelu- toimistoissa, työpajoissa, tehtaissa ja rakennuspaikalla
- rakentamisessa käytetään sellaisia rakennusaineita ja tuotteita, jotka on kuvattu eurokoodeissa tai asianmukaisissa rakentamista koskeissa standardeissa tai viiteaineistoissa tai tuotekuvauksissa
- rakennetta huolletaan asianmukaisesti
- rakennetta käytetään suunnitteluvaiheessa tehtyjen oletusten mukaisesti.

Vaatimusten täytyminen eri mitoituslaitanteissa

Suunnittelijan pitää osoittaa että rakenne tai sen osa täyttää sille asetetut vaatimukset kaikissa asianmukaisissa mitoitus- ja kuormituslaitanteissa. Mitoituslaitanteita selventää taulukko 2-1 ja kuormituksia ja niiden vaikutuksia kuva 2-1. Painovoima, tuuli, lumi, auringon säteily ja maanjäristys ovat luonnonilmiöitä, jotka aiheuttavat kuormia kuten oma paino, tuulenpaine, lumi-kuorma, lämpötilakuorma ja kiihtyvyysskuorma. Kuormayhdistelmät muodostuvat samanaikaisesti vaikuttavista kuormista. Kuormayhdistelmien vaikutus rakenteeseen ovat esimerkiksi jännitys, sisäinen voima tai momentti, kiertymä ja siirtymä.

Eurokoodit käyttävät rajatilamitoitusta. Rajatila määrittelee olosuhteet joiden ylittämisen jälkeen rakenne ei enää täytä sille asetettuja vaatimuksia. Rajatilat ovat joko murtorajatiloja tai käyttörajatiloja. Murtorajatila (ULS) liittyy turvallisuuteen; rakenteen kestävyysmenettämiseen tai muunlaiseen rakenteessa tapahtuvaan murtumaan. Käyttörajatila (SLS) tarkoittaa tilannetta, jossa rakenteen käyttäytyminen ei enää täytä asetettuja taipuma- ja värähtelyvaatimuksia, vaikkakin se vielä kantaa kaikki sille tulevat kuormat.



KUVA 2-1

Mitoitusprosessin vaatimukset ja terminologiaa.

TAULUKKO 2-1 Mitoitustilanteet ja käytettävät rajatilat.

Mitoitustilanne		Käytettävät rajatilat
Normaali	Tavanomainen käyttö	ULS, SLS
Tilapäinen	Asennusaikaiset tilanteet, tilapäiset huollon ja korjauksen aikaiset tilanteet	ULS, SLS
Onnettomuus	Tavanomainen käyttö	ULS
	Asennusaikainen tilanne	ULS
Seisminen	Tavanomainen käyttö	ULS, SLS
	Asennusaikainen tilanne	ULS, SLS

Liimapuurakenteet mitoitetaan ja niiden yksityiskohdat suunnitellaan eurokoodi 5 mukaisesti. Sitä käytetään yhdessä perusosan eurokoodi 0 ja kuormitusosan eurokoodi 1 kanssa, jonka eri osissa on annettu kaikki eri kuormatyyppit. Eurokoodi 5 muodostuu kolmesta osasta

- EN 1995-1-1 Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- EN 1995-1-2 Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus
- EN 1995-2 Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2: Sillat

Eurokoodeissa on säilytetty mahdollisuus tiettyjen mitoitusääntöjen ja lukuarvojen kansalliseen valintaan. Nämä kansalliset parametrit (NDP) esitetään kunkin eurokoodin kansallisessa liitteessä. Suomessa ne on esitetty Ympäristöministeriön antamina eurokoodien soveltamista koskevinä asetuksina.

Rajatilamitoituksen periaatteet

Eurokoodi 0 kuvaa kaksi rajatilamitoitusmenetelmää, jotka ovat todennäköisysteorian mukainen menetelmä ja osavarmuuskerroinmenetelmä.

Todennäköisysteorian mukainen menetelmä

Todennäköisysteorian mukainen rajatilamitoitus perustuu tilastolliseen tarkasteluun, missä arvioidaan tietyn rajatilan saavuttamisen todennäköisyys ja asetetaan tälle todennäköisyydelle hyväksyttävä arvo. Tarkastellaan erityistapausta missä murtorajatilaa voidaan kuvata kahdella satunnaissuureella, kuorman vaikutuksella E ja kestävyydellä R . Rakenne menettää kestävytensä kun E on suurempi kuin R (niin kutsuttu perustapaus). Kuorman vaikutus E on tavallisesti tietyn vertailuajanjakson T aikana esiintyvä suurin arvo. Varmuusmarginaali määritellään suureena

$$Z = R - E \quad 2-1$$

Z on myös satunnaissuure. Jos sekä R ja E oletetaan normaalijakautuneiksi suureiksi joiden keskiarvot ovat μ_R ja μ_E , ja keskihajonnasta σ_R ja σ_E , voidaan kestävyuden menettämisen todennäköisyys P_f ilmaista yhtälöllä

$$P_f = P(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad 2-2 (a)$$

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_E \quad 2-2 (b)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_E^2 \quad 2-2 (c)$$

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad 2-2 (d)$$

$\phi(\cdot)$ standardisoidun normaalijakautuman frekvenssifunktio

Luotettavuusindeksi β on varmuustason mitta ja se ilmoittaa keskihajonnalla mitattuna miten kaukana keskiarvosta alkaa vyöhyke, jossa kestävyys menetetään ($Z < 0$). β ja P_f välinen yhteys on esitetty taulukossa 2-2.

TAULUKKO 2-2 Luotettavuusindeksi β ja kestävyuden menettämisen todennäköisyys P_f .

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1.28	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20

Rajatilamenetelmään perustuvat rakentamismääräykset, kuten eurokoodi 0, määrittelevät tavallisesti muodollisen varmuustason luotettavuusindeksin pienimmän ohjearvon β_{target} avulla (suurin sallittu kestävyysmenettämisen todennäköisyys). Standardissa eurokoodi 0 on valittu luotettavuusindeksin pienimmäksi arvoksi yhden vuoden vertailuajalle 4,7 ja viidenkymmenen vuoden vertailuajalle 3,8. Kansallisissa määräyksissä voidaan edellyttää, että β_{target} on riippuvainen kestävyysmenettämisen seurauksista, mikä otetaan huomioon luotettavuusluokkien avulla. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että jos rakenteen sortuessa ihmishenkien menettämisen riski on pieni, niin voidaan käyttää pienempää β_{target} arvoa kuin jos ihmishenkien menettämisen riski on suuri. Todennäköisyysteoreettiset menetelmät eivät sovellu tavanomaiseen mitoittamiseen, mutta niitä voidaan käyttää määräysten kalibroimiseen ja rakenteiden luotettavuustasojen vertailuun. Tavanomaiseen mitoittamiseen soveltuu paremmin osavarmuuseroinmenetelmä.

Osavarmuuseroinmenetelmä

Tavanomaisessa insinöörimäisessä mitoituksessa luotettavuusindeksi on epäkäytännöllinen arviointiväline. Sen sijaan käytetään osavarmuuseroinmenettelyä. Menettelyssä käytetään useita eri varmuuskertoimia, osavarmuuskertoimia, joista jokainen erikseen ottaa huomioon erityyppisiä laskelmiin vaikuttavia epävarmuuksia. Tällaisia ovat:

- kuormien edustavia arvoja koskeva epävarmuus (γ_f)
- materiaaliominaisuuksia koskeva epävarmuus (γ_m)
- kestävyysmenettämisen seuraamukset (γ_d)¹.

Osavarmuuseroinmenetelmän peruskäsite on ominaisarvo, jonka määritelmä on tilastollinen. Kuormien ominaisarvot on annettu eurokoodi 1:n eri osissa. Kuormien mitoitusarvot saadaan kun ominaisarvot kerrotaan osavarmuuskertoimella γ . Sekä kuormien että materiaaliominaisuuksien osavarmuuserointien arvot ovat riippuvaisia ominaisarvon määrittelytavasta. Ajasta riippuvaisille kuormille (kuten lumi- ja tuulikuormille) ominaisarvo Q_k määritellään tavallisesti siten, että sen ylittämisen todennäköisyys vuoden aikana on 2 %. Tämä tarkoittaa että Q_k :n arvo toistuu joka 50. vuosi, tai että ominaisarvoa vastaava kuorman arvo ylittyy vain kerran joka 50. vuosi.

Luvussa 2.2.3 kuvattuun murtorajatilanteen perustapaukseen viitaten pitää osoittaa, että tarkasteltavana olevan rakenteen kestävyysmitoitusarvo R_d ylittää kuorman vaikutuksen mitoitusarvon E_d

$$R_d > E_d \quad 2-3$$

Tämän ehdon täyttyminen pitää osoittaa kaikille murtumistavoille ja useille kuormayhdistelmille, joiden valinta on riippuvainen mitoitusolanteesta. Kuorman vaikutuksen mitoitusarvo E_d määritetään pysyvistä kuormista G , ajan mukana vaihtelevista (muuttuvista) kuormista Q ja onnettomuuskuormista. Pysyvien kuormien mitoitusarvo G_d määritetään yhtälöstä

$$G_d = \gamma_G \cdot G_k \quad 2-4$$

¹ Ruotsissa käytetään merkintää γ_d joka vastaa eurokoodi 0 liitteessä B ja Suomessa käytettyä merkintää K_{FI} . Liimapuukäsikirjassa käytetään ruotsalaista merkintätapaa.

missä γ_G on pysyvän kuorman G osavarmuuskerroin ja G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo, yleensä se määritellään 50 % fraktiilina eli keskiarvona.

Muuttuvien kuormien mitoitusarvo Q_d määritetään yhtälöstä

$$Q_d = \gamma_Q \cdot Q_k \quad 2-5$$

γ_Q muuttuvan kuorman Q osavarmuuskerroin

Q_k muuttuvan kuorman ominaisarvo, yleensä vuotuisen suurimman arvon 98 % fraktiili

Kestävyyden mitoitusarvo R_d määritetään pääasiassa materiaaliominaisuuksien ja mittojen avulla. Lujuuden f mitoitusarvo f_d määritetään yhtälöstä

$$f_d = \eta \frac{f_k}{\gamma_m} \quad 2-6$$

γ_m materiaalin osavarmuuskerroin

f_k materiaaliominaisuuden ominaisarvo, tavallisesti 5 % fraktiili

η olosuhteista kuten kuormitusajasta ja käyttöluokasta riippuvainen kerroin

Kerroin η ottaa huomioon sen, että rakenne on erilaisissa olosuhteissa kuin missä materiaaliominaisuudet on määritetty. Käyttörajatilassa kriittinen ehto muotoillaan tavallisesti siten, että lasketun taipuman, värähtelyn tai liitoksen siirtymän pitää olla enintään yhtä suuri kuin annettu absoluuttinen tai suhteellinen arvo.

Osavarmuuskerroinmenetelmää voidaan soveltaa eri tavoin eri maissa. Esimerkiksi Pohjoismaissa otetaan myös kestävyyden menetyksen seuraamukset huomioon luotettavuusluokkien avulla (katso luku 2.2. > Luotettavuusluokat).

Kuorman vaikutukset ja kuormayhdistelmät

Kuorman vaikutuksella tarkoitetaan sisäisiä voimia ja momenteja, mutta myös kuormien aiheuttamia taipumia. Yleensä rakennetta ei mitoiteta yhden ainoan kuorman perusteella, vaan erilaisten kuormayhdistelmien perusteella, kuten oman painon ja lumikuorman yhdistelmän perusteella. Jokaisen tilanteen mitoittava kuormayhdistelmä etsitään asettamalla kukin kuorma vuorollaan määrääväksi kuormaksi (täysimääräisenä), ja muut kuormat yhdistetään sen kanssa yhdistelyarvoisina. Yhdistelyarvo saadaan kertomalla ominaisarvo Q_k pienennyskerroinella ψ_0 , ψ_1 tai ψ_2 , joita voidaan kuvailla seuraavasti:

- *Ominaisyhdistelmän kuorman arvoa* ($\psi_0 Q_k$) käytetään osoitettaessa rakenteen kestävyys murtorajatilassa (ULS) ja palautumattoman käyttörajatilan ominaisyhdistelmissä (rajan ylittävien kuormien seuraamukset ovat pysyviä vaikka kuormat poistettaisiinkin).
- *Tavallisen yhdistelmän arvoa* ($\psi_1 Q_k$) käytetään osoitettaessa rakenteen kestävyys murtorajatilassa (ULS) kun kysymyksessä ovat onnettomuuskuormat ja palautuvan käyttörajatilan ominaisyhdistelmissä. Tavallisen yhdistelmän arvo ylitetään noin 1 % ajasta.
- *Pysyväksi muunnetun yhdistelmän arvoa* ($\psi_2 Q_k$) käytetään arvioitaessa käyttörajatilassa (SLS) ajan vaikutusta taipumiin tai halkeaman muodostumiseen ja kun otetaan huomioon muuttuva kuorma murtorajatilan (ULS) onnettomuusyhdistelmässä. Pysyväksi muunnettu arvo vastaa muuttuvan kuorman keskimääräistä arvoa pitkänä ajanjaksona.

Kerroin ψ_2 voidaan myös tulkita kertoimeksi, joka muuntaa lyhytaikaisen kuorman sellaiseksi pysyväksi kuormaksi, jolla on samanlainen laskennallinen viruman pitkäaikaisvaikutus.

EN 1990 määrittelee taulukon 2-1 mitoitustilanteiden kuormien yhdistelysäännöt. Nämä säännöt määrittelevät kuinka pysyvät kuormat ja muuttuvat kuormat pitää ottaa huomioon laskettaessa kuormayhdistelmän kuormien yhteisvaikutusta. Seuraava yleinen yhtälö pätee esimerkiksi normaaleissa ja tilapäisissä mitoitustilanteissa murtorajatilassa

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad 2-7$$

missä alaindeksit j ja i viittaavat järjestyksessä j olevaan pysyvään kuormaan ja järjestyksessä i olevaan muuttuvaan kuormaan. Q_{k1} on määräävän kuorman ominaisarvo ja $\gamma_{Q,1}$ on kuorman Q_{k1} kanssa käytettävä varmuuskerroin.

Luotettavuusluokat

Erilaisilla rakennuksilla ja rakennuksen osilla on erilainen todennäköisyys sille että rakenteen kestävyys menettäminen johtaisi vakaviin henkilövaurioihin. Siten henkilövaurioiden riski on suurempi, jos kattopalkki menettää kestävyytensä kuin jos väliseinätolppa tekisi sen. Myös käyttötarkoitus vaikuttaa riskiin. Siten henkilövaurioiden riski on suurempi, jos kattopalkki tukee urheiluhallin kattoa kuin jos se tukee sisääntulokatosta.

Pohjoismaissa tämä otetaan huomioon niin, että kantavat rakenteet luokitellaan luotettavuusluokkiin kestävyysmenettämisestä aiheutuvien seuraamusten mukaan. Luotettavuusluokka voi vaikuttaa tarvittavan laadunvalvonnan määrään tai murtorajatilassa käytettävän osavarmuuskertoimen γ_d arvoon. Kun luotettavuusluokan käsite lisätään yleiseen yhtälöön 2-7 kerrotaan kuorman yhdistelmäarvo osavarmuuskertoimella γ_d , katso yhtälö 2-8. Luotettavuusluokkia on kolme: luokka 1 ($\gamma_d=0,9$) missä vakavien henkilövahinkojen tai materiaalien menetysten riski on vähäinen, luokka 2 ($\gamma_d=1,0$) missä on keski-suuri vakavien henkilövaurioiden tai materiaalien menetysten riski ja luokka 3 ($\gamma_d=1,1$) missä vakavien henkilövahinkojen tai materiaalien menetysten riski on suuri. Käyttörajoissa ei tehdä eroa luotettavuusluokkien välillä.

$$E_d = \gamma_d \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_d \cdot \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_d \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad 2-8$$

2.3 Liimapuun ja puun erityispiirteitä

Liimapuu ja puu eroavat muista rakennusaineista kuten teräksestä, teräsbetonista ja muista komposiittimateriaaleista monin tavoin. Puu on biologinen luonnonmateriaali jonka ominaisuudet vaihtelevat runsaasti. Puu on ortotrooppista, mikä tarkoittaa että sen ominaisuudet ovat erilaisia eri suunnissa, ja se on hygroskooppista, mikä tarkoittaa että sen kosteussuhde muuttuu ympäristön suhteellisen kosteuden muuttuessa. Muutamia mitoituksessa huomioon otettavia, puulle tyypillisiä piirteitä ovat:

- Puun kosteuspitoisuuden vaikutus lujuuteen otetaan huomioon käyttöluokan avulla.
- Kuorman aikaluokka vaikuttaa kestävyysluokkaan.
- Materiaaliominaisuuksien osavarmuuskertoimilla ja muuntokertoimilla on määritetty arvot.
- Rakenteen koko vaikuttaa taivutus- ja vetolujuuden mitoitussarvoihin.
- Lujuus on riippuvainen voiman vaikutussuunnasta.

Kosteussuhteen vaikutus ja käyttöluokka

Kosteussuhteella ja sen vaihtelulla on suuri vaikutus liimapuun ja muiden puumateriaalien kaikkiin ominaisuuksiin, sekä lujuuteen että jäykkyyteen. Tämän vaikutuksen huomioonottamiseksi eurokoodi 5 määrittelee kolme käyttöluokkaa:

- Käyttöluokalle 1* on tunnusomaista että useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus ei ylitä 12 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus yltää 65 % vain muutamana viikkona vuodessa.

Käyttöluokkaan 1 kuuluu puurakenne, joka on lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa kosteusoloissa. Käyttöluokkaan 1 voidaan yleensä lukea myös lämpöeristekerroksessa olevat rakenteet sekä palkit, joiden vetopuoli on lämmöneristeen sisällä.

Myös pysyvästi lämmitetyn rakennuksen seinärakenteet jotka on suojattu tiiviillä ja tuuletetulla verhouksella kuuluvat käyttöluokkaan 1.

Uimahallien rakenteiden ja ratsastusmaneesien eristettyjen kattorakenteiden katsotaan kuuluvan tähän käyttöluokkaan.
- Käyttöluokalle 2* on tunnusomaista että useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus ei ylitä 20 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus yltää 85 % vain muutamana viikkona vuodessa.

Käyttöluokkaan 2 kuuluu ulkoilmassa kuivana oleva puurakenne. Rakenteen tulee olla katetussa ja tuuletetussa tilassa sekä alta ja sivuilta hyvin kastumiselta suojattu. Tähän käyttöluokkaan kuuluvat yleensä esimerkiksi rossipohjan ja kylmän ullakkotilan puurakenteet.

Myös ajoittain kylmillään olevien tuuletettujen rakennusten rakenteet joissa ei säilytetä kosteutta muodostavia aineita, kuten kesämökit, lämmittämättömät varastot ja autotallit ja maatalousrakennukset kuuluvat käyttöluokkaan 2.

Uimahallien huonosti tuuletettujen rakenteiden, ratsastusmaneesien eristämättömien kattorakenteiden ja maatalousrakennusten rakenteiden katsotaan kuuluvan tähän käyttöluokkaan.
- Käyttöluokalle 3* on tunnusomaista että useimpien havupuulajien kosteuspitoisuus yltää 20 %, eli ne ovat kosteampia kuin käyttöluokassa 2.

Käyttöluokkaan 3 kuuluu ulkona säälle alttiina, kosteassa tilassa tai veden välittömän vaikutuksen alaisena oleva puurakenne. Arvioitaessa puurakenteen säilyvyyttä käyttöluokka 3 jaetaan vielä kahteen erilaiseen kosteusaltistumisastetta kuvaavaan alaluokkaan (ks. EN 335-1:2006). Käyttöluokkaan 3 kuuluvat sellaisten tilojen rakenteet, joissa tapahtuvan toiminnan tai varastoinnin seurauksena muodostuu kosteutta.

Kuormien aikaluokat

Puuaines kestää pitkäaikaista kuormaa merkittävästi huonommin kuin lyhytaikaista. Lujuuden pieneneminen otetaan huomioon mitoitusprosessissa käytettävien kuorman aikaluokkien avulla. Kuorman aikaluokat ottavat huomioon käytännössä esiintyvien kuormien erilaiset vaikutusajat. Kuormien jako aikaluokkiin on esitetty taulukossa 2-3. Kuorman aikaluokan vaikutus otetaan huomioon muunnoskertoimella k_{mod} joka on riippuvainen käyttöluokasta ja aikaluokasta. Yleensä kerroin k_{mod} pienentää liimapuun, puun ja muiden puumateriaalien lujuutta ja sen arvot on taulukossa 2-4. Jos kuormayhdistelmän kuormat kuuluvat useampaan aikaluokkaan käytetään sitä k_{mod} arvoa joka vastaa lyhintä vaikutusaikaa.

TAULUKKO 2-3 Kuorman aikaluokat.

Kuorman aika-luokka		Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka	Kuormitukset
Pysyvä	P	yli 10 vuotta	Oma paino Pysyvästi rakenteeseen kiinnitetyt koneet, laitteet ja kevyet väliseinät Maanpaine
Pitkäaikainen	L	6 kuukautta – 10 vuotta	Varastotilojen tavarakuormat (luokka E), vesisäiliökuorma
Keskipitkä	M	1 viikko – 6 kuukautta	Lumi Lattioiden ja parvekkeiden hyötykuorman pintakuormat luokissa A – D Autotallien ja liikennöintialueiden hyötykuormat (luokat F ja G) Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormitukset
Lyhytaikainen	S	alle yksi viikko	Portaiden hyötykuormat Hyötykuorman pistekuorma (Q_k) Väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat Kunnossapito- tai henkilökuorma katolla (luokka H) Ajoneuvokuormat luokassa E Kuljetusvälinekuormat Asennuskuormat
Hetkellinen	I		Tuuli Onnettomuuskuorma

TAULUKKO 2-4.

Liimapuun, kertopuun ja sahatavaran sekä vanerin lujuuden muunnoskertoimet k_{mod} eri käyttöluokissa ja aikaluokissa.

Materiaali	Käyttö-luokka	Kuorman aikaluokka				
		P	L	M	S	I
Liimapuu, kertopuu, sahatavara	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Vaneri	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Jos liitoksien materiaaleilla on erilaiset k_{mod} arvot (k_{mod1} ja k_{mod2}) käytetään näiden keskiarvoa

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} k_{mod,2}}$$

2-9

Liimapuun mitoittaminen murtorajatilassa

Liimapuun kestävyysmitoitussarvo määräytyy sen lujuuden mitoitussarvosta. Tarvittavan lujuuden ominaisarvo valitaan taulukoista 1.1 - 1.3 missä on annettu lujuus- ja jäykkyysarvot [N/mm^2] sekä tiheydet [kg/m^3]. Sitten näistä lasketaan mitoitussarvo f_d yhtälön 2-6 avulla joka liimapuulle saa yhtälössä 2-10 esitetyn muodon. Ominaisarvo f_k kerrotaan taulukon 2-4 mukaisella aikaluokan ja käyttöluokan huomioonottavalla kertoimella k_{mod} ja jaetaan materiaalin osavarmuuskertoimella γ_m joka on liimapuulle 1,25. Koska liimapuun ominaisuuksien vaihtelu on vähäisempää kuin sahatavaran, niin sen varmuuskerroin γ_m on pienempi kuin sahatavaran.

$$f_d = k_{mod} k_h \frac{f_k}{\gamma_m} \quad 2-10$$

Kun suorakulmaisen liimapuupoikkileikkauksen korkeus on alle 600 mm voidaan taivutuslujuuden $f_{m,k}$ ja syiden suuntaisen vetolujuuden $f_{t0,k}$ ominaisarvoa kasvattaa yhtälön 2-11 mukaisella kokovaikutuskertoimella k_h . Muille lujuusarvoille k_h on 1.

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0.1}, 1.1 \right\} \quad 2-11$$

h poikkileikkauksen korkeus mm

Leikkauslujuuden osalta on myös otettava huomioon halkeilun vaikutus kestävyysarvoon, mikä tehdään pienentämällä leikkauslujuutta halkeilukertoimella k_{cr} . Kertoimen k_{cr} arvo Suomessa on yleensä 0,67. Kertopuulle ja vanerille voidaan käyttää arvoa 1,0 ja myös sellaiselle puulle ja liimapuulle joka on käsitelty kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä².

Liimapuun mitoittaminen käyttörajatilassa

Käyttörajatilamitoituksessa osoitetaan että rakenne on riittävän jäykkä estämään epämiellyttävät värähtelyt tai haitalliset taipumat. Liiallinen taipuma voi esimerkiksi estää katolla olevan lumen sulamisesta syntyvien vesien valumisen suunnitellusti. Liimapuun muodon lisäksi sen jäykkyyteen vaikuttaa ennen kaikkea kuorman aikaluokka ja materiaalin kosteussuhde. Yleensä käyttörajatilassa käytetään materiaalin osavarmuuskertoimen arvoa $\gamma_m = 1,0$.

Muodonmuutosta laskettaessa pitää määritellä käytettävät kuormat. Mitoitustilanteet voidaan määritellä kolmen eurokoodi 0:ssa esitetyn kuormayhdistelmän avulla. Liimapuisten rakennusosien ja niiden liitosten alkutaipuman ja lopullisen taipuman laskenta esitetään luvussa 6.

2.4 Suositeltu esikorotus ja taipumien rajoittaminen

Kattopalkkien taipumaa rajoitetaan jo pelkästään ulkonäöllisistä syistä. Niinkin pieni taipuma kuin 1/300 jännevälillä on täysin nähtävissä, erityisesti jos silmälle on tarjolla vaakasuoria vertailulinjoja. Visuaaliset vaatimukset pitää kuitenkin asettaa eri tavoin erilaisille rakennuksille – näyttelyhallille asetettavat vaatimukset ovat suuremmat kuin varastorakennukselle asetettavat.

² Myös käsittelemättömälle liimapuulle pyritään saamaan arvo 1,0.

Esikorotus

Taipumasta aiheutuvaa haittaa voidaan jossain määrin pienentää, jos rakenteille suunnitellaan jonkin verran esikorotusta. Esikorotus valitaan usein yhtä suureksi kuin laskennallisen oman painon ja tavallisen muuttuvan kuorman yhdessä aiheuttama taipuma. Käytännössä näin saadaan lopputulokseksi kutakuinkin suora palkki. Esikorotus on syytä tehdä kaikille vapaasti tuetuille palkeille joiden jänneväli on yli 6 m. Jatkuvat palkit eivät yleensä tarvitse esikorotusta.

Esikorotusta pitää käyttää aina kun katon kaltevuus on pieni. Katon mitoituksen pitää olla sellainen, että vesi valuu kattokaivoihin myös silloin kun katon lumikuorma on suurimmillaan. Seisova sulavesi, lumi ja jää voivat muuten saada aikaan jatkuvasti kasvavan kuorman ja aiheuttaa kattopalkkien murtumisriskin. Sitä paitsi voi aiheutua vuotoja ja vesivaurioita. Kattojen kaltevuuden pitäisi olla aina vähintään 3 °.

Taipuma

Kansallisissa rakentamismääräyksissä esitetään yleensä myös sallitut taipumarajat. Osan 6 taulukossa 6-1 ehdotetaan muutamien suorien rakennusosien suositeltavia taipumarajoja. Vastavia rajoja voidaan käyttää myös kaarille, kehille ja muille rakenteille.

Palkisto pitää aina suunnitella siten, että se ei missään tilanteessa tukeudu rakennuksessa oleviin keveisiin väliseiniin. Virheellisesti suunnitellun liitoksen kautta kuormat voivat siirtyä sellaisille rakenteille, joita ei ole suunniteltu niitä kantamaan aiheuttaen väliseinän ja muiden rakenteiden vaurioitumisen.

Sekundääriset rakenteet saavat yleensä taipua enemmän kuin pääkannattajat. Tämä ei kuitenkaan saa johtaa kokonaisuuden huonompaan toimintaan, esimerkiksi sellaiseen tilanteeseen että katemateriaalin muodonmuutoskyky ylittyy.

3	LIIMAPUURAKENTEIDEN RAKENNEJÄRJESTELMIÄ	2
3.1	Palkit ja pilarit	3
3.2	Jatkuvat palkit	5
3.3	Ristikot	5
3.4	Kolminivelkattotuoli	6
3.5	Kaaret	10
3.6	Kehät	11
3.7	Ulokkeet	12
3.8	Kuorirakenteet	12
3.9	Yhdistetyt rakenteet	13
3.10	Liimapuusillat	13
	Poikittain jännitetty liimapuulaatta	14
	Palkkisillat	15
	Riippuansaat ja ponsiansaat	16
	Kaarisillat	16
	Riippusillat ja vinokaapelisillat	16
	Jännitetyt nauhasillat	16
3.11	Liitokset	17
3.12	Yhteenvetotaulukko	17

3 LIIMAPUURAKENTEIDEN RAKENNEJÄRJESTELMIÄ

Liimapuuta voidaan käyttää erilaisiin rakennejärjestelmiin. Tässä luvussa esitellään hallien ja kerrostalojen liimapuurunkojen toteuttamistapoja – yksinkertaisista pilari-palkki järjestelmistä kehä-, kaari- ja kuorirakenteisiin. Niissä hyödynnetään monin tavoin liimapuutekniikan mahdollisuuksia.

Rakennejärjestelmä valitaan käytettävissä olevan rahoituksen rajoissa ennen kaikkea rakennuksen toiminnan ja arkkitehtonisten vaatimusten mukaan, kuten tarvittava vapaa korkeus, katon kaltevuutta koskevat rajoitukset, päivänvalon tarve (kuva 3-1). Joissain tapauksissa tuotantotekniset tai kuljetuksiin liittyvät rajoitukset voivat olla ratkaisevia (katso luvun 1 kohta 1.6).

Tehokkaan materiaalin käytön edellytyksenä on:

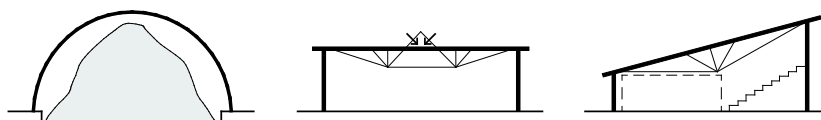
- Rakenneosien sisäiset voimat ovat pääasiassa aksiaalisia (puristus- ja vetovoimia).
- Suuria taivutusmomenteja ja kiepahdusriskiä (hoikkia palkkeja) vältetään.
- Leikkausvoimia tarkastellaan kriittisesti.
- Epäkeskeisyyttä ja vääntöä vältetään.
- Kuormien tai kutistumisen aiheuttamaa vetoa puun syitä vastaan kohtisuoraan välteään.
- Käytetään jäykkyyttä ja turvallisuutta parantavia kolmiulotteisia rakennejärjestelmiä kun se on mahdollista.

Rakennejärjestelmien optimoinnissa otetaan huomioon:

- Poikkileikkauksen mitat ovat sopusoinnuissa jännitysten kanssa (esimerkiksi harjapalkki, katso kuva 3-5).
- Tuet sijoitellaan sopivasti (jatkuvien palkkien välituet).
- Nivelet sijoitellaan sopivasti (esimerkiksi Gerber-palkissa).
- Jänneväliä lyhennetään vitaposkin ja ponsiansain (katso kuva 3-2).
- Muodostetaan joustavia tukia kuten alapuolelta jännitetyissä rakenteissa (katso kuvat 3-11 ... 3-13).

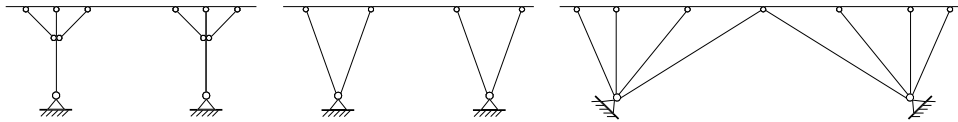
Vaippaa muodostavat rakenteet ovat usein itsessään optimoituja, koska ne toimivat samanaikaisesti kantavina, jäykistävinä ja tilaa muodostavina rakenteina (kuva 3-3).

Tämän luvun lopussa oleva taulukko 3-1 esittää tavallisimmin käytetyt liimapuiset rakennejärjestelmät. Valinnan helpottamiseksi esitetään taulukossa eri rakenteiden suositellut jännevälit ja likimääräiset rakennekorkeudet. Mitat vastaavat keskimääräisiä arvoja tavanomaisissa olosuhteissa. Pienet kuormat tai rakenneosien pienet keskinäiset etäisyydet pienentävät jossain määrin tarvittavaa rakennekorkeutta ja päinvastoin.



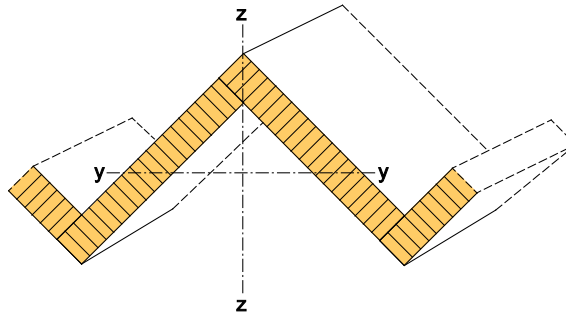
KUVA 3-1

Rakennuksen muodon sopeuttaminen käyttötarkoitukseen, kun sitä käytetään irtotavaran varastointiin, siihen halutaan päivänvaloa katon läpi tai vapaan korkeuden pitää olla määräysten mukainen.



KUVA 3-2

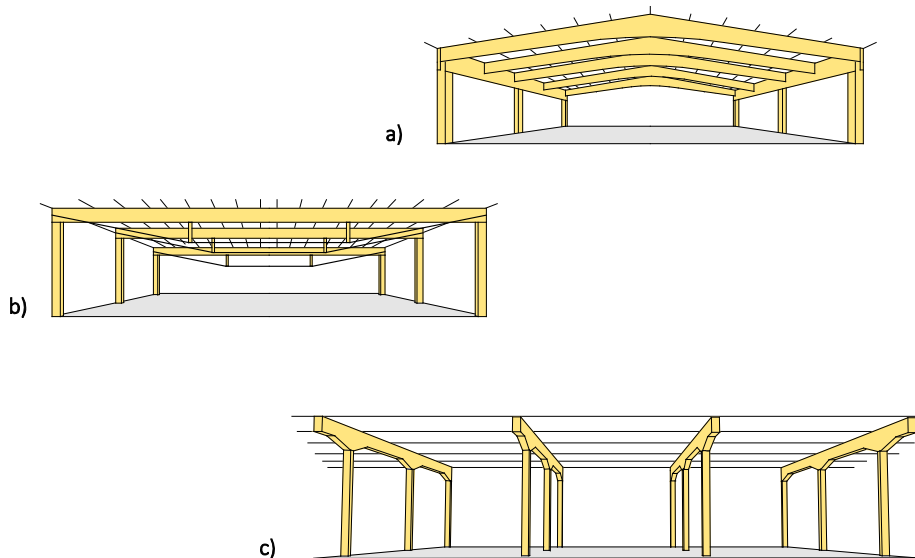
Vitaposket ja ponsiansaat pienentävät palkin vapaata jänneväliä.



KUVA 3-3

Vaippaa muodostava murtoviivarakenne, joka toimii monipuolisesti: muodostaa tilaa, kantaa kuormaa ja toimii jäykistävänä rakenteena.

3.1 Palkit ja pilarit

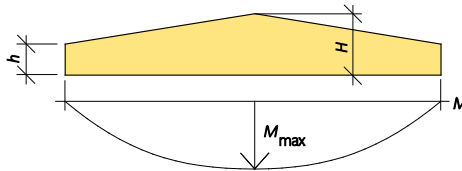


KUVA 3-4

Rakennejärjestelmä joka koostuu palkeista ja pilareista. (a) kaarevat harjapalkit (b) suorat alapuolelta jännitetyt palkit (c) palkit joiden korkeus tuella on suurempi.

Yksinkertaisin ja tavallisin liimapuurakenne muodostuu vapaasti tuetuista palkeista jotka on tuettu kahdella pilarilla. Lyhyillä jänneväleillä käytetään useimmiten tasakorkeita palkkeja, mutta suurehkoilla jänneväleillä voi olla taloudellista käyttää palkkeja joiden poikkileikkaus muuttuu palkin voimasuureiden mukaisesti. Palkin ja pilarin liitos voidaan muotoilla siten, että palkin kiepahtaminen estyy (esimerkiksi haarukkatuki, katso luku 14).

Esimerkki tästä on harjapalkki, jonka korkeus on suurin jännevälin keskellä, missä taivutusmomentti on suurin (kuva 3-5). Palkin muoto aiheuttaa puristusjännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan sen kaltevaan yläpintaan. Kuvan 3-5 palkille tämä ei ole erityisen kriittistä, mutta jos palkki käännettäisiin ylösalaisin on vino reuna vedetty ja siihen muodostuu vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Tämä voi aiheuttaa palkin halkeamisen. Siksi harjapalkkeja pitää käyttää niin, että vino reuna on puristettu (yläpuoli). Jos halutaan käyttää mahapalkkia, niin pitää ottaa huomioon sen oikea muotoilu, joka on esitetty luvussa 7.



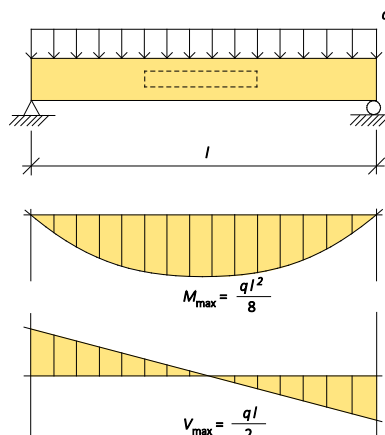
KUVA 3-5

Symmetrisen harjapalkin muoto seuraa varsin hyvin tasaisesti kuormitetun, vapaasti tuetun yksiaukkoisen palkin momenttipintaa. Sen vuoksi siihen tarvitaan vähemmän materiaalia kuin tasakorkeaan palkkiin.

Usein palkin poikkileikkauksen korkeuden valintakriteeri on kuitenkin suurin sallittu taipuma eikä vaadittu kestävyys.

Liimapuupalkit muotoillaan yleensä alareunaltaan suoriksi, mutta ne voidaan esteettisistä tai toiminnallisista syistä muotoilla kaareviksi. Tavallinen muoto on kaareva harjapalkki – ns. bumerangipalkki (kuva 3-4 a). Kaarevissa palkeissa muodostuu vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan, mitkä pitää ottaa huomioon mitoituksessa. Hyvin usein nämä palkit vahvistetaan syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan liimaruuvein, itseporautuvien puuruuvein tai vanerilevyin (katso luku 7).

Laiteasennukset ovat olennainen osa rakennuksen toiminnallisuutta, ja ne vaikuttavat arkkitehtoniseen vaikutelmaan. Usein kysytäänkin voiko liimapuisiin rakennusosiin tehdä reikiä ja lovia. Tavallisessa liimapuupalkissa koko poikkileikkaus kantaa sille tulevia leikkausvoimia, jotka ovat suurimmillaan tuilla. Sen vuoksi ei yleensä ole suositeltavaa tehdä tukialueelle reikiä eikä lovia. Reiät pitää sijoittaa palkin poikkileikkauksen keskiosiin, missä taivutusjännitykset ovat pienimmillään. Kuva 3-6 esittää mille alueelle vapaasti tuetussa palkissa mahdollisesti voidaan tehdä reikä. Yksityiskohtaiset ohjeet reikien mitoittamisesta ja muotoilusta annetaan luvussa 5. Reikiä ei koskaan pidä tehdä sellaisiin kohtiin, missä esiintyy vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan, kuten harjapalkkien, kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien tiettyihin osiin.



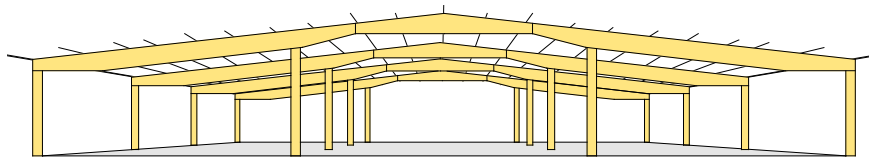
KUVA 3-6

Tasaisesti kuormitetun, vapaasti tuetun palkin momentti- ja leikkausvoimapinnat. Reikiä voidaan mahdollisesti tehdä palkin keskiosaan katkoviivoilla rajattuun kohtaan.

Liimapuupilareilla on yleensä hyvä kestävyys. Jäykästi kiinnitetyllä pilarilla, jonka yläpää voi vapaasti liikkua sivusuunnassa, on pilarin korkeuteen verrattuna suunnilleen kaksinkertainen nurjahduspituus. On kuitenkin lähes mahdotonta tehdä pilarin kiinnityksestä täysin jäykkää, joten nurjahduspituus on todellisuudessa hiukan pidempi (katso luku 4). Tavallisen, molemmista päistään nivelellisen pilarin nurjahduspituus on sama kuin pilarin pituus.

Rakennuksen muoto antaa usein luonnollisen mahdollisuuden jäykistää pilareiden yläpäät, esimerkiksi kattorakenteen avulla. Matalissa, enintään 4 m korkuisissa rakennuksissa on taloudellisinta käyttää perustukseen jäykästi kiinnitettyjä pilareita rakennuksen jäykistämiseen. Perustusrakenne pitää silloin mitoittaa kiinnitysmomentille. Korkeammissa rakennuksissa on edullisempaa käyttää ristiksidejäykistystä tai tuuliristikoita, katso luku 13.

3.2 Jatkuvat palkit



KUVA 3-7

Jatkuvia palkkeja kattorakenteena.

Jatkuvien palkkien ja ulokepalkkien taivutusmomentti on tasaisemmin jakautunut palkin pituudelle kuin yksiaukkoisten palkkien. Sen vuoksi materiaalin käyttöaste on parempi. Käyttöastetta voidaan vielä parantaa siten että palkin välituet tehdään viisteellisinä.

Jatkuvat palkit ovat erityisen edullisia jos ne tehdään niin sanottuina Gerber-palkkeina. Jatkokset tehdään silloin nivelellisinä ja sijoitetaan siten, että saadaan suotuisa momenttijakautuma ja sopivat kuljetuspituudet. Tasaisella kuormalla kuormitettujen jatkuvien palkkien Gerber-nivelten sijoittelua käsitellään luvussa 12.

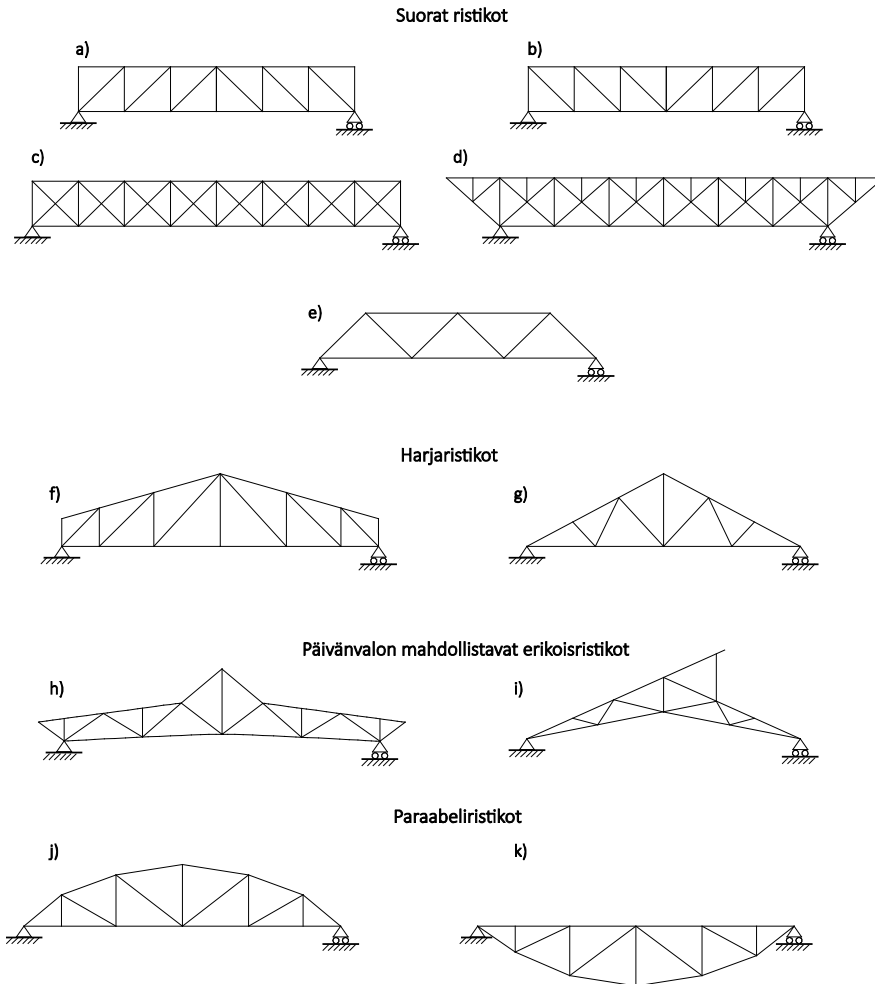
Jatkuvat palkit sopivat erityisen hyvin kattorakenteiden pääpalkeiksi. Sekundääripalkit on parempi toteuttaa yksiaukkoisina vapaasti tuettuina palkkeina, koska siten voidaan pienentää etenevän sortuman riskiä (katso luku 12).

3.3 Ristikot

Ristikko sopii hyvin suurten jännevälien rakenteeksi sillä tavalliset palkit tulisivat liian raskaiksi ja materiaalia vaativiksi (kuva 3-8). Ristikot sopivat erityisesti silloin kun halutaan pieni katto- kaltevuus ja rakennekorkeutta on riittävästi käytettävissä.

Ristikot voidaan koota työmaalla tehtaalla esivalmistetuista osista joiden koko suunnitellaan kuljetuksen kannalta sopivaksi. Haittana on suuri määrä kustannuksia lisääviä nurkkaliitoksia, jotka voivat olla monimutkaisiakin. Arkkitehdin on syytä osallistua ristikkojen suunnitteluun, erityisesti nurkkien ja yksityiskohtien osalta. Suunnittelussa optimoidaan rakennetta tutkimalla erilaisia diagonaalien sijoituksia (kuva 3-8). Kohtaavien sauvojen keskilinjoihin pitää joka nurkassa kulkea saman pisteen kautta, jotta vältetään sekundäärimomenteja aiheuttava sauvavoimien epäkeskeisyys.

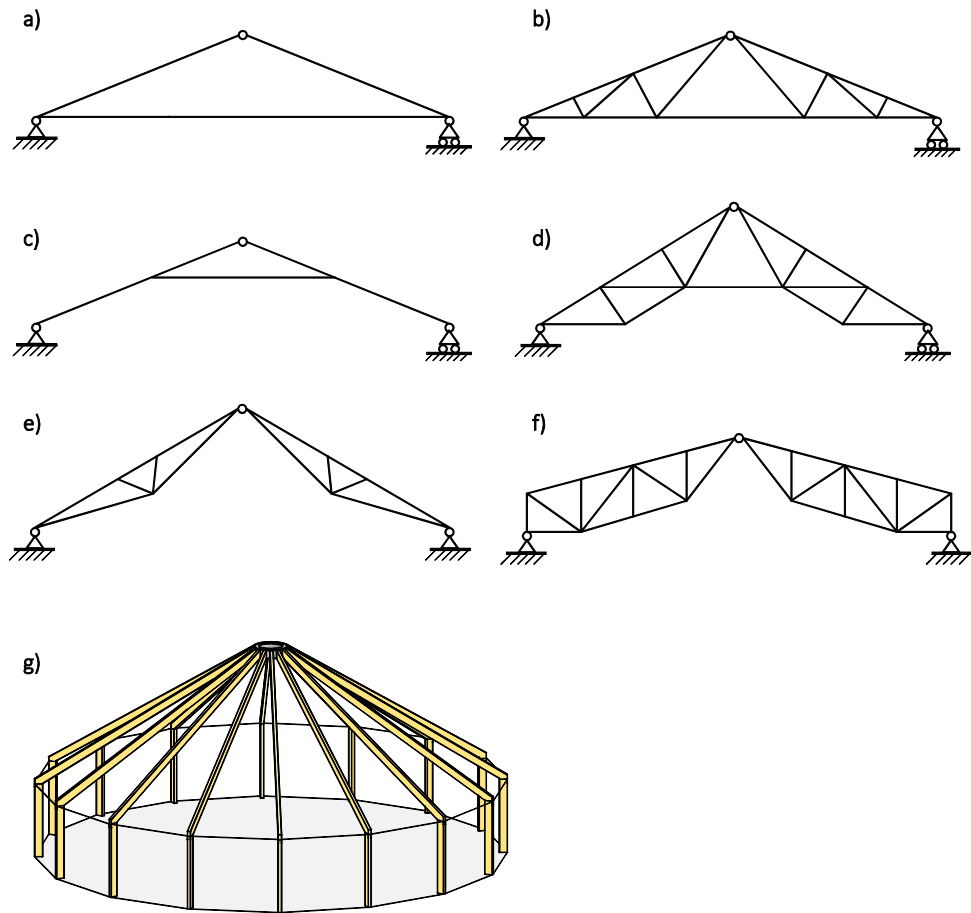
Putket ja muut asennukset voidaan usein sijoittaa lähelle ristikon yläpaartetta tai alapaarteen yläpuolelle. Puristussauvat tehdään liimapuusta ja vetosauvat teräksestä tai teräsvaljeista. Ristikon sisäinen momenttivarsi on ala- ja yläpaarteen keskilinjojen välinen etäisyys. Se voi olla vakio koko ristikon pituudelta tai noudattaa taivutusmomentin jakautumaa (kuva 3-8 f-k). Ristikko sopii hyvin jänneväleille 30...85 m.



KUVA 3-8

Ristikkoita jotka soveltuvat yläpaarteelle tulevien pystykuormien (oma paino, lumikuorma) kannattamiseen. (a-e) suoria ristikoita: (a) puristetut diagonaalit (b) vedetyt diagonaalit (c) kaksoisdiagonaalit (d) lisätuettu puristuspaarre (e) puristetut ja vedetyt diagonaalit, optimoitu nurkkien lukumäärä. (f-g) harjaristikkoita: (f) katkaistu (g) tavallinen. (h-i) päivänvalon mahdollistavia erikoisristikoita. (j-k) paraabeliristikkoita: (j) pystysauvat ja pääasiassa vedetyt diagonaalit (k) puristetut pystysauvat ja vedetyt diagonaalit.

3.4 Kolminivelkattotuoli

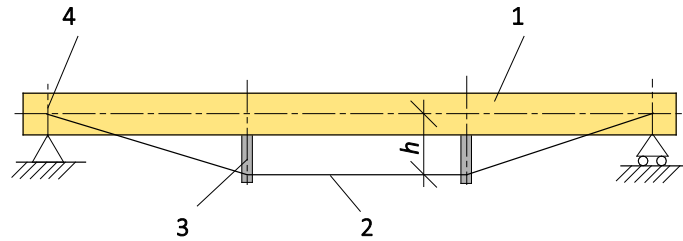


KUVA 3-9

Kolminivelkattotuoleja. (a) vetotangollinen kolminivelkattotuoli (b) vetotangollinen kolminivelkattotuoli jossa on käytetty alapuolelta jännitettyjä palkkeja (c) kolminivelkattotuoli jonka vetotanko on korotettu (d) kolminivelkattotuoli jonka vetotanko on korotettu ja jossa on käytetty alapuolelta jännitettyjä palkkeja (e, f) vetotangottomia kolminivelkattotuoleja, joissa on käytetty alapuolelta jännitettyjä palkkeja (kaksi kiinteää tukea) (g) säteittäisiä kolminivelkattotuoleja, jotka on räystäältä yhdistetty monikulmion muotoisella vetorenkkaalla.

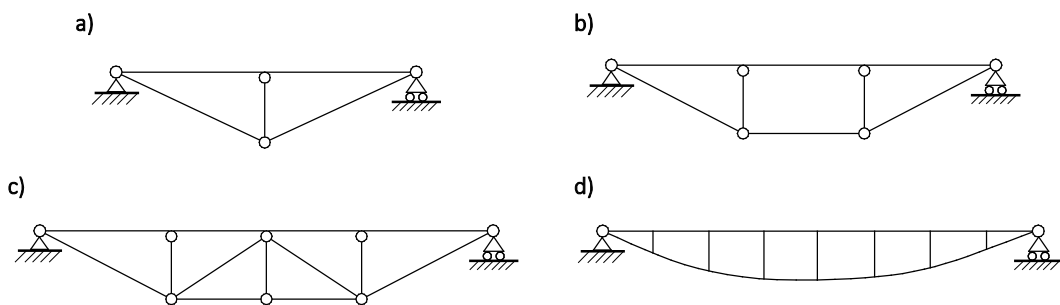
Kolminivelkattotuolit ja muut jännitetyt rakenteet ovat edullisia ja kestäviä, kun jänneväliväimien vuoksi ei voida käyttää massiivipalkkeja, ja kun kaaria tai kehiä ei jostain syystä voida käyttää. Yksinkertaisimmillaan kolminivelkattotuolin muodostaa kaksi toisiinsa nojaavaa palkkia, jotka on yhdistetty harjanivelellä. Palkkien alapäissä on myös nivelkiinnitys perustuksiin, tai ne on yhdistetty toisiinsa vetotangolla, joka on tavallisesti terästä (kuva 3-9). Vetotankoa käytettäessä kattotuoli on yleensä pilareiden varassa, mutta vetotanko voi myös sijaita lattiarakenteiden alle valetussa putkessa. Palkit ovat tavallisesti suoria ja tasakorkeita, mutta niiden muoto voi vaihdella ja alapuolelta jännitettyjä palkkejakin voidaan käyttää.

Alapuolelta jännitetty palkki on eräänlainen massiivipalkin ja ristikon välimuoto (kuvat 3-10 ja 3-11). Nurkkia on kuitenkin vähemmän ja ne ovat yksinkertaisemmat kuin ristikossa. Sopivia vetotankoja ja niiden kiinnityksiä on saatavana valmisosina. Vetotangon jännittämisellä on suotuisa vaikutus puristussauvan nurjahtamiseen (kuva 3-12). Kun puristussauva alkaa pyrkiä pois tasostaan, niin siinä oleva voima muuttaa vetotangon vaikutuksesta suuntaansa pystysuorasta vinoksi ja suuntautuu edelleen puristussauvan ja palkin liitokseen. Voimien resultantti pisteessä A on vaakavoima P_1 , joka tekee rakenteesta itsestään stabiloituvan ja pienentää pisteen A siirtymää (kuva 3-12 a). Rakenne stabiloituu itsestään niin kauan kuin palkin ja puristussauvan välinen liitos on palkin ja vetotangon liitoksen yläpuolella (kuva 3-12). Tämän varmistamiseksi alapuolelta jännitetyllä palkilla pitää olla riittävä esikorotus, jotta se täydellä kuormallakin on vähintään $L/200$. Esikorotuksen asemesta voidaan käyttää muitakin stabilisointimenetelmiä. Puristussauvan alapään poikkeama rakenteen tasosta voidaan estää, tai sen ja palkin liitos voivat olla momenttijäykkiä (kuva 3-13). Jäykistäminen kuvan 3-13 b mukaisilla vinosauvoilla ei ole suositeltavaa epäsymmetrisessä kuormituksessa (esimerkiksi jos kuormaa on vain pääpalkin toisella puolella). Siinä tapauksessa vinosauva voi painaa pääpalkkia sivusuunnassa ja lisätä sen nurjahduserhkyyttä. Kuorman ollessa epäsymmetrinen on turvallisempaa käyttää vetotankoja stabilisointiin (kuva 3-13 c).



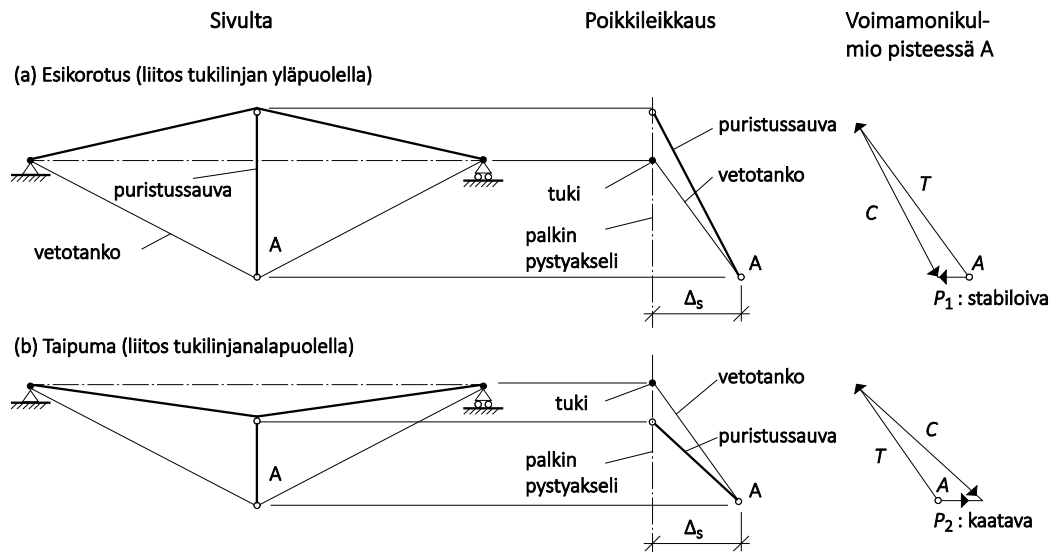
KUVA 3-10

Esimerkki alapuolelta jännitetystä palkista jonka momenttivarsi on h . (1) palkki (2) vetotanko (terästä) (3) puristussauva (4) palkkiin upotetut tai sen pinnalla olevat teräksiset kiinnikkeet.

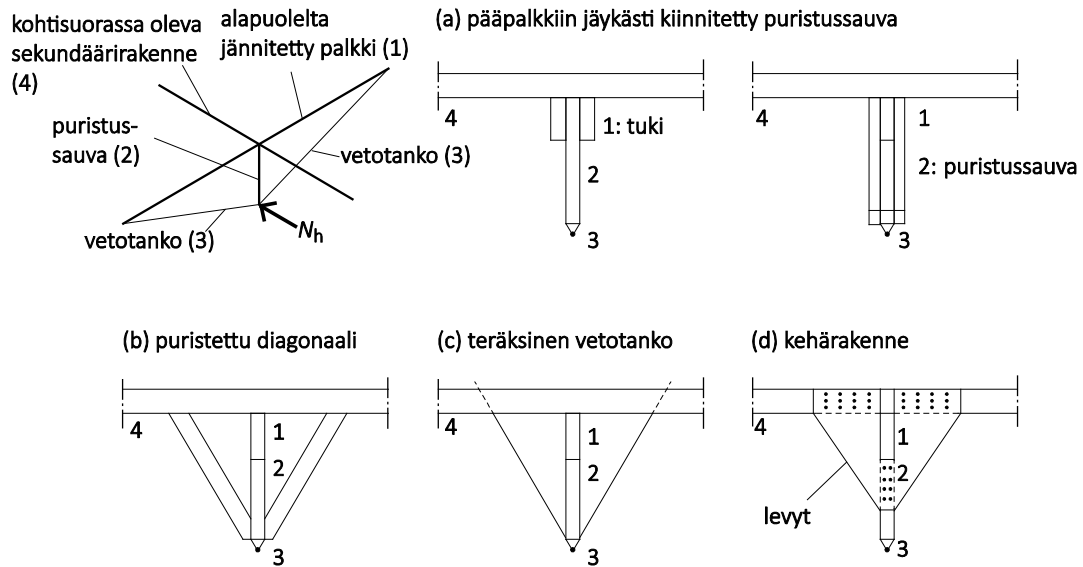


KUVA 3-11

Alapuolelta jännitettyjä palkkeja (a-c) puristussauvojen lukumäärä vaihtelee (d) paraabelinmuotoinen jänne.


KUVA 3-12

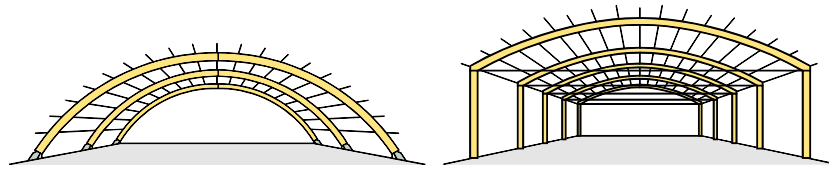
(a) Itsestabiloituva esikorotettu alapuolelta jännitetty palkki. (b) Palkin alkutaipuman aiheuttama nurjahdusherkkä tila.


KUVA 3-13

Stabiloituva, alapuolelta jännitetty palkki. (a, d) erilaisia momenttijäykkiä kiinnityksiä palkin ja puristussauvan välillä (b, c) puristussauvan alapään siirtyminen rakenteen tasosta on estetty.

Kolminivelkattotuoleja voidaan helposti yhdistellä kolmiulotteisiksi rakenteiksi sijoittamalla kattopalkit säteittäisesti yhteisestä harjapisteestä, jolloin vetotangot korvautuvat palkkien alapää yhdistävällä monikulmion muotoisella vetorengaalla (kuva 3-9 g).

3.5 Kaaret

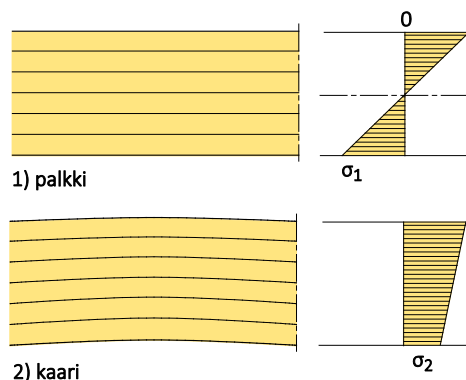


KUVA 3-14

Kaaria. (a) perustuksen varassa olevia kolminivelkaaria (b) pilareiden varassa olevia vetotangollisia kaaria.

Liimapuu on monipuolinen rakennusaine ja siitä on helppo tehdä kaarevia rakenteita, kaaria ja kehiä. Jokaiselle kuormitusyhdistelmälle on olemassa puristusviivaa noudattava tarkoituksenmukaisin muoto. Tällainen puristusviivaa noudattava kaari on puristettu koko pituudeltaan eikä sille tule lainkaan taivutusmomenttia. Tasaisen kuorman vaikuttaessa puristusviiva on paraabeli, pistekuormien vaikuttaessa monikulmio. Useimpien rakenteiden kuormat ja kuormitusyhdistelmät kuitenkin vaihtelevat (oma paino, lumikuorma, tuuli, epäsymmetrinen tai epäkeskeinen lumikuorma ja tuuli). Koska kaikille yhdistelmille yhteistä oikeaa puristusviivaa ei yleensä ole, niin muoto valitaan suurimpien kuormien tai pitkäaikaisten kuormien mukaan, jolloin kaarelle tulee eri kuormitusyhdistelmistä sekä puristusvoimia että taivutusmomenttia.

Kaareissa materiaalia hyödynnetään tehokkaasti ja sen vuoksi tarvittava poikkileikkauksen korkeus on pienempi kuin samalla jännevälillä samat kuormat kantavaa palkkia käytettäessä. Palkin ja kaaren toimintaa esittää kuva 3-15.



KUVA 3-15

Palkin ja kaaren jännitysjakautumat.

Muotoilumahdollisuuksien ja suuren lujuuden ansiosta pitkien jänneväliden liimapuukaaret ovat erityisen kilpailukykyisiä. Liimapuusta on rakennettu kaaria joiden jänneväli on yli 100 m.

Käytännössä lyhyillä jänneväleillä tavallisin muoto on ympyränkaari. Suurilla jänneväleillä paraabeli voi olla edullisempi. Jos tuilla tarvitaan enemmän vapaata korkeutta voidaan käyttää ellipsin kaarta tai jotain muuta muotoa. Vapaata korkeutta saadaan lisää myös nostamalla kaari pilareiden päälle (kuva 3-14 b).

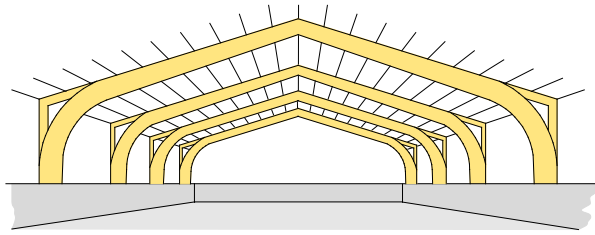
Kaaren tukien pitää olla liikkumattomat. Ne voivat muodostua liittyvistä rakenteista, perustuksesta tai erityisistä vetotangoista. Vetotangot voivat olla näkyvissä tai ne voivat sijaita hallirakennuksen lattiarakenteiden alla (kuva 3-14).

Kaari valmistetaan yleensä siten että sillä on kantanivelet ja tavallisesti myös lakinivel. Suurilla jänneväleillä voidaan kuljetussyistä tarvita useampikin liitos. Nämä tehdään momentti-jäykiksi ja sijoitetaan alueelle, missä taivutusmomentti on pieni.

Kominivelkaari on staattisesti määrätty, sen mitoittaminen on helppoa eikä se ole herkkä tukien painumiselle. Se on stabiili tasossaan, minkä ansiosta perustusrakenteelle ei tule kiinnitysmomenttia. Kaaret eivät ole stabiileja kohtisuoraan tasoon vastaan ja ne voivat nurjahtaa tai kiepahtaa. Siksi niiden ei pidä olla liioitellun hoikkia (ohuita) ja ne pitää jäykistää huolellisesti (katso luku 13).

Kun kaaria yhdistellään säteittäisesti, saadaan kupolimainen rakennuksen muoto. Aidossa kupolissa hyödynnetään myös kuorivaikutusta. Suurilla jänneväleillä kupoli voi olla hyvä mahdollisuus.

3.6 Kehät



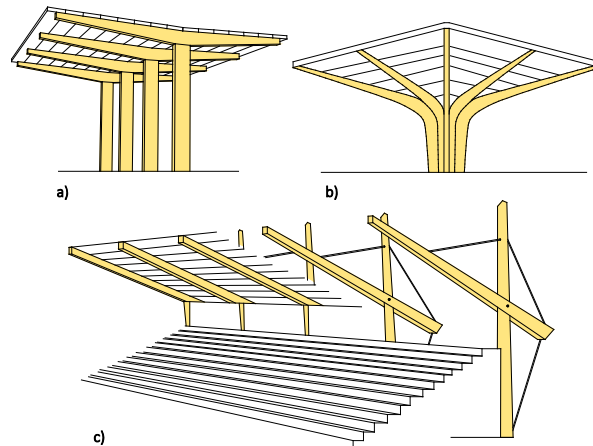
KUVA 3-16

Kaarevanurkkaisia kehiä.

Toiminnallisista, esteettisistä tai taloudellisista syistä voi joku muu kaareva muoto olla parempi kuin materiaalia säästävä paraabelinkaari tai ympyrän kaari. Kaarevanurkkainen kolminivelkehä valitaan usein silloin, kun koko rakennuksen pinta-alalle vaaditaan tietty vapaa korkeus. Tämä on liimapuurakenteen tyypillinen muoto (kuva 3-16). Terävänurkkainen kehä voidaan valita, jos koko rakennusala halutaan käyttää hyväksi. Rakennuksen toiminnallisuus paranee tällöin hienon epätaloudellisemman materiaalinkäytön kustannuksella. Muissa suhteissa kolminivelkeällä on samat edut kuin kolminivelkaarella – yksinkertainen mitoitus ja yksinkertainen perusrakenne. Tämä rakennetyyppi on erityisen sopiva kun perusmaan kantokyky on huono, sillä perustuksille ei synny mitään kiinnitysmomenttia.

Perinteinen muoto on tasosymmetrinen, mutta kiinnostavia tiloja saadaan aikaan yhdistelemällä kehiä ja muun tyyppisiä rakennusosia – kaarevia ja suoria – tai jos kehän puolikkaat yhdistetään kolmiulotteisesti.

3.7 Ulokkeet

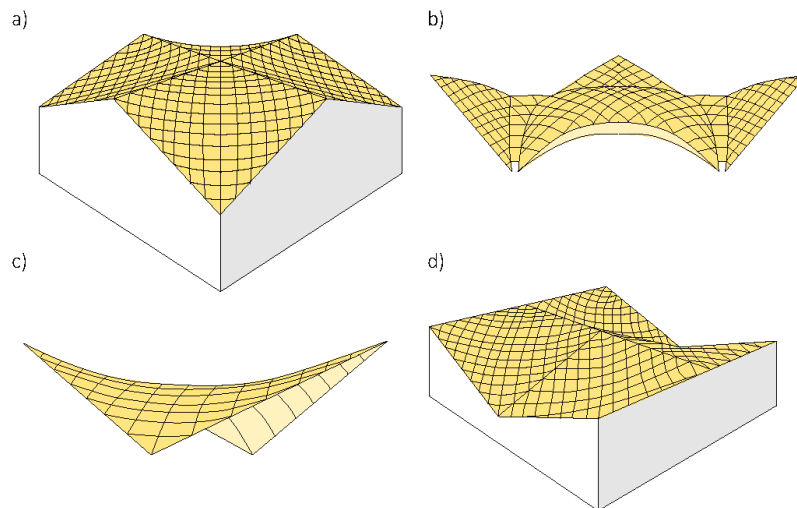


KUVA 3-17

Ulokkeita (a, b) katoksia jäykästi kiinnitettyjen pilarien varassa (c) katsomorakenne taaksepäin jännitettyjen ulokepalkkien varassa.

Usein vaaditaan että toinen tai molemmat rakennuksen pitkät sivut ovat avoimia ja ilman pila-reita. Sellaisia rakenteita ovat ulkoilmanäyttämöt, laiturikatokset ja katsomot (kuva 3-17). Nämä voidaan tehdä liimapuusta käyttämällä suoria ulokepalkkeja tai kaarevia konsoleja tai puolikehiä. Kummassakin tapauksessa syntyy liittyville rakenteille suuria taivutusmomentteja, joille nämä on mitoitettava.

3.8 Kuorirakenteet

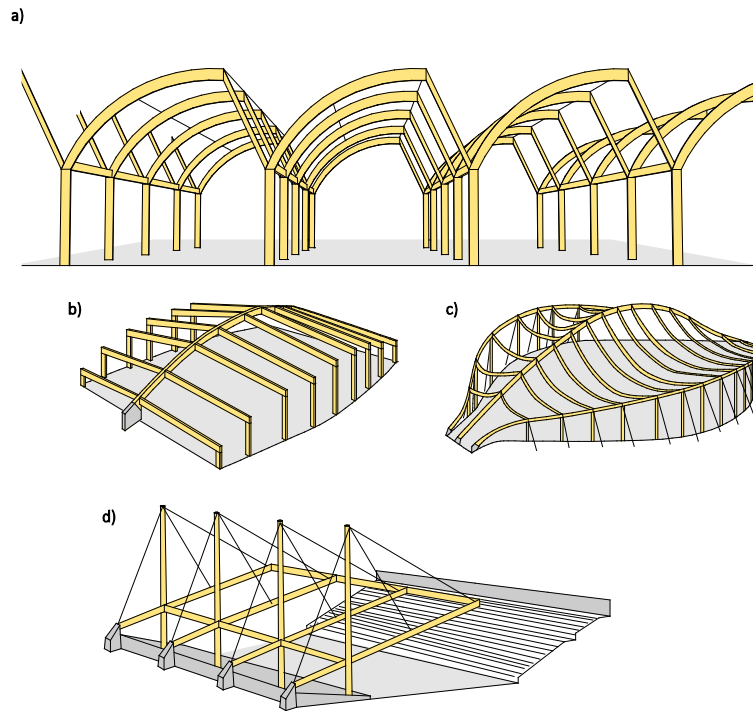


KUVA 3-18

Kuorirakenteita (c) satulapinta eli hyperbolinen paraboloidi (a, b, d) toisensa leikkaavia kuoria.

Kuorirakenteilla voidaan toteuttaa erikoisia muotoja ja suuria pilarittomia tiloja. Yhdistelemällä useampia samantyyppisiä kuoren osia saadaan aikaan monenlaisia erilaisia kattomuotoja. Kupolin lisäksi käytetään usein kartionmuotoisia kuoria tai satulapintakuoria (kuva 3-18). Nämä ovat viivotinpinnoja ja ne voidaan siten rakentaa käyttämällä risteäviä lautakerroksia tai muotopeltiä.

3.9 Yhdistetyt rakenteet



KUVA 3-19

Yhdistettyjä rakenteita (a) sahakatto (b, c) kaari- ja palkkiyhdistelmä (d) riippurakenne.

Yhdistämällä erilaisia rakennejärjestelmiä saadaan tyylikkäitä ratkaisuja. Jos rakennukseen halutaan runsaasti päivänvaloa voidaan käyttää sahakattoja joka muodostuu kolminivelkatto-tuoleista ja jatkuvista palkeista (kuva 3-19 a). Hankalissa maasto-olosuhteissa tukireaktiot kannattaa keskittää muutamiin tukipisteisiin, joissa kussakin on vahvistettu peruslaatta. Kuvien 3-19 b ja c rakenteissa kaaret kantavat suurimman osan kattokuormista.

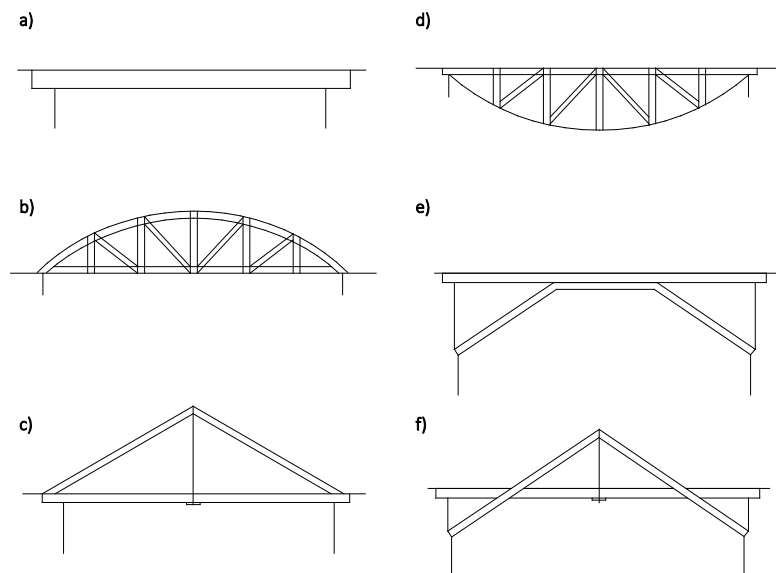
3.10 Liimapuusillat

Pohjoismaissa liimapuusta rakennetaan pääasiassa kevyen liikenteen siltoja. Viime vuosina on kuitenkin kiinnostus puisia tiesiltoja kohtaan lisääntynyt ja useita sellaisia on rakennettu.

Sillan rakenne jaetaan kahteen osaan, tukirakenteeseen ja päällysrakenteeseen. Päällysrakenteen muodostaa esteen (kuten vesistön) ylittävä, yleensä vaakasuora kantava osa. Päällysrakenteeseen kuuluu kansilaatta, palkit jotka kannattavat kansilaattaa ja varsinainen kantava rakenne kuten palkit tai kaaret, jotka kantavat kaikki kuormat (oma paino, liikennekuorma, lumikuorma ja tuulikuorma) ja siirtävät ne tukirakenteelle. Tukirakenteet vievät kaikki kuormat perustuksille, joita ovat maatuot ja erilaiset välituet. Nykyisin nämä rakennetaan pääasiassa teräsbetonista, mutta aikaisemmin käytettiin yleisesti myös kiveä, tiiliä tai puuta.

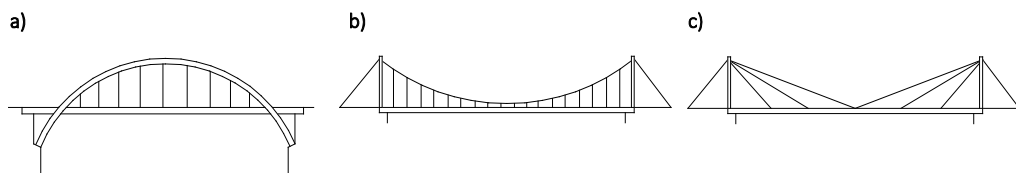
Palkkisillat, kaarisillat ja köysisillat (riippusillat ja vinokaapelisillat) ovat tavallisimmat päällysrakennetyypit (kuvat 3-20 ja 3-21). Palkkisiltoihin luetaan tavallisesti myös laattasillat, ristikot ja muut sauvoista yhdistetyt rakenteet (kuva 3-20). Eri tyyppien yhdistelmiäkin esiintyy. Koska aikaisemmin kuvatut kattoihin käytettävät rakennejärjestelmät eivät merkittävästi eroa siltoihin käytettävistä, käsitellään seuraavassa vain puusilloille ominaisia rakennetyyppejä.

Kussakin yksityistapauksessa rakennetyypin valinta on riippuvainen kulloisistakin erityisolosuhteista, esimerkiksi millainen vapaa jänneväli ja korkeus tarvitaan, paljonko rakennekorkeutta on käytettävissä ja minkälaiselle liikenteelle silta on tarkoitettu. Usein ulkonäöllä on suuri merkitys, koska suuresta sillasta muodostuu hallitseva maisemaelementti. Muita valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat perustusolosuhteet ja mahdolliset rakennusmateriaaleja koskevat toivomukset.



KUVA 3-20

Palkkisilloja (a) yksinkertainen palkki (b) ristikko sillan kannen alla (c) riippuansas (d) ristikko (e) ponsiansas (f) riippuponsiansas.



KUVA 3-21

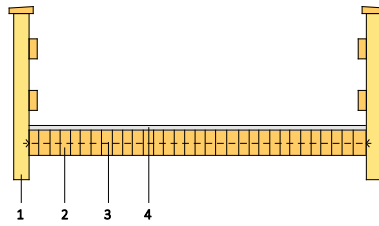
Pitkien jännevälien siltoja (a) kaarisilta (b) riippusilta (c) vinokaapelisilta.

Poikittain jännitetty liimapuulaatta

Yksinkertaisin puusilta on syrjälleen asetetuista yhteen naulatuista laudoista tehty sillan kansi. Siinä yhdistyvät sekä ajorata että kantava rakenne. Poikittain jännitetty liimapuulaatta on tämän saman siltatyyppin uudenaikainen muoto (kuva Kuva 3-22).

Siltalaatta rakennetaan liimapuupalkeista, jotka jännitetään yhteen jänneteräksillä. Rakennus on helppo asentaa ja laatta jakaa kuormaa tehokkaasti. Se on sivusuunnassa jäykkä, eikä siksi tarvita erityisiä tuulisiteitä. Yleensä laatan päälle tehdään vesieristys ja päällyste, joka suojaa puuta ylhäältä päin tulevalta kosteudelta. Kosteusmuutoksille altis puupinta jää siten pieneksi, ja kosteusmuutokset ja -liikkeet ovat myös pieniä.

Siltalaatta voidaan helposti tehdä jatkuvaksi useiden aukkojen yli. Poikittain jännitettyä liimapuulaattaa voidaan myös käyttää ristikon ylä- tai alapaarteena.



KUVA 3-22

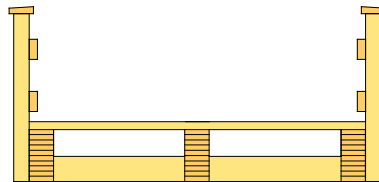
Poikittain jännitetty liimapuulaattasilta (1) kaide (2) syrjällään olevat liimapuupalkit (3) jänneteräks (4) pinnoite.

Palkkisillat

Palkkisillan kantavan rakenteen muodostaa tavallisesti vähintään kaksi pituussuuntaista liimapuupalkkia. Palkit voivat ulottua yhden tai useamman aukon yli. Sillan kansilankut voivat tukeutua suoraan palkkeihin, kun niiden välinen etäisyys on pieni (kuva 3-23).

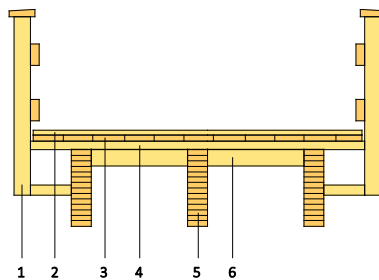
Pienten siltojen kansi voi toimia levynä ja kantaa vaakasuorat kuormat kuten tuulikuorman ja estää palkkien kiepahduksen. Suuret sillat tarvitsevat erilliset tuulisiteet jotka yleensä tehdään pääpalkkien välissä niiden ylä- tai alareunassa olevina vaakasuorina ristikoina.

Jos pääpalkkien välinen etäisyys on suurehko käytetään kohtisuorassa pääpalkkeja vastaan olevia sekundääripalkkeja siirtämään kuorma pääpalkkeille. Sekundääripalkkien päällä on yleensä lankuista tehty asfaltoitu sillan kansi (kuva 3-24). Kun jänneväli tai liikennekuorma on suuri käytetään usein poikittain jännitettyä liimapuulaattaa, joka toimii yhdessä pääpalkkien kanssa ja muodostaa T-poikkileikkauksen tai kotelopalkin. Sellainen sillan kansi kantaa myös vaakavoimat eikä erillisiä tuulisiteitä tarvita.



KUVA 3-23

Palkkisilta jossa lankut ovat suoraan pääpalkkien päällä.



KUVA 3-24

Palkkisilta jossa on pääpalkkeja vastaan kohtisuoraan olevat sekundääripalkit ja lankkukansi (1) kaide (2) päällyste (3) lankut (4) sekundääripalkit pääpalkkeja vastaan kohtisuoraan (5) liimapuupalkit (6) tuulisiteet.

Riippuansaat ja ponsiansaat

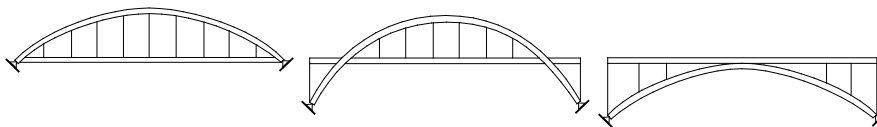
Aikaisemmin käytettiin riippu- ja ponsiansassiltoja (kuvat 3-20 c, e ja f), kun jänneväli oli liian pitkä tavallisille palkeille. Pääpalkit saivat siten useampia tukia, minkä ansiosta materiaalia käytettiin tehokkaammin. Vetotangot ovat tavallisesti terästä. Mitoituksessa on otettava huomioon, että puulla ja teräksellä on erilaiset lämpölaajenemiskertoimet ja kimmokertoimet.

Ponsiansassilta voi olla hyvä ratkaisu jos ylitettävänä on esimerkiksi syvä rotko, missä sivusauvat voidaan tukea rotkon kylkiin. Ponsiansassiltaa voidaan pitää kaarisillan ja palkkisillan välimuotona.

Kaarisillat

Kaarisilloissa on yleensä kaksi rinnakkaista kaarta. Ajoin voi olla kaaren alla, päällä tai keskellä (kuva 3-25). Kaaret tuetaan sivusuunnassa ristikoin tai kehin. Sillan kannen kanssa nämä rakennusosat kantavat myös tuulikuormat ja muut vaakasuorat kuormat joita rakenteelle tulee.

Valmistaminen ja kuljettaminen helpottuvat jos kaaret tehdään kolminivelkaarina, erityisesti jos jänneväli on yli 20 m. Kolminivelkaarella on myös se etu, että se on staattisesti määrätty ja sietää verrattain suuria perustusten siirtymiä. Momenttijäykkiä liitoksia voidaan tarvittaessa tehdä työmaalla, jos kaksinivelkaari muista syistä on sopivampi.



KUVA 3-25

Kaarisiltoja, missä ajorata on kaaren alla, keskellä tai päällä.

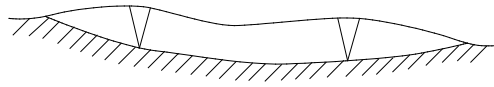
Riippusillat ja vinokaapelisillat

Riippusilta muodostuu jäykästä sillan kannesta, joka on ripustettu pystysuorien terästankojen avulla siltaa kannattaviin kaapeleihin. Kaapelit on jännitetty kahden pylonin väliin, joille ne siirtävät kuorman (kuva 3-21 b).

Vinokaapelisilta muodostuu kahden tai useamman tuen varassa olevasta palkkisillasta. Tukien välillä palkkia kannattaa yhdestä tai useammasta pylonista lähtevät vinot kaapelit. Kaapelit muodostavat kimmoisia tukia, ja niiden vinot voimat aiheuttavat sillan palkeille aksiaalisia voimia. Mitoituksessa pitää ottaa huomioon puun ja teräksen erilaiset lämpölaajenemiskertoimet ja kimmokertoimet.

Jännitetyt nauhasillat

Jännitetty nauhasilta on eräänlainen riippusilta, jonka kansi toimii kahdella tavalla. Se on aaltoileva ajorata keveille ajoneuvoille ja jalankulkijoille ja samalla jännitetty, vedetty kantava rakenne (kuva 3-26). Sillan muoto määräytyy osittain kunkin kuormitusyhdistelmän köysikäyrän muodosta. Muoto poikkeaa tästä, koska sillan kannella on tietty jäykkyys ja kuormitus voi olla epäsymmetrinen. Suuret vakavoimat pitää siirtää perustuksille. Kutistumisen ja turpoamisen ja osittain myös lämpötilanmuutosten vuoksi rakenteen pituus muuttuu, mikä pitää ottaa huomioon mitoituksessa.



KUVA 3-26

Jännitetty nauhasilta.

3.11 Liitokset

Liimapuurakenteet ovat usein näkyviä ja ne ovat sen vuoksi oleellinen osa rakennuksen arkkitehtuuria. Tämä koskee erityisesti liitoksia ja rakenteiden liittymistä toisiinsa. Arkkitehdin on sen vuoksi kiinnitettävä erityistä huomiota näiden muotoiluun.

Vanhoissa puurakenteissa liitokset muotoiltiin tavallisesti siten että ne siirsivät pääasiassa puristusvoimia ja vain rajoitetusti vetovoimia. Nykyisin liitokset tehdään pääasiassa nauloin, ruuvein ja erilaisin teräsosiin ja ne siirtävät sekä puristus- että vetovoimia. Liitoksien suunnittelua käsitellään perusteellisesti luvussa 14.

Teräksiset liitososat siirtävät voimia keskitetympin ja niiden staattinen toiminta on selkeämpi kuin vanhempien liitostyyppien. Esimerkiksi nivel voidaan muotoilla todelliseksi niveleksi, joka ei siirrä taivutusmomenttia.

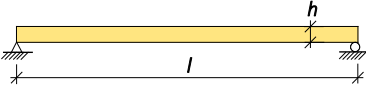
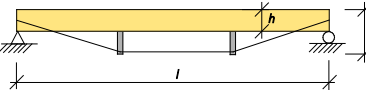
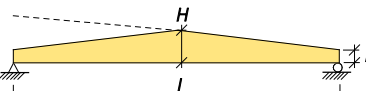
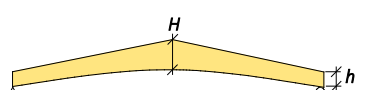
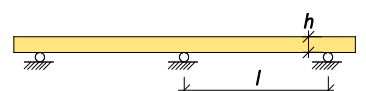
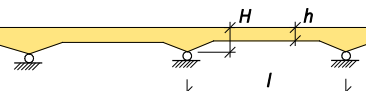
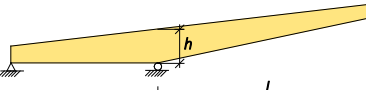
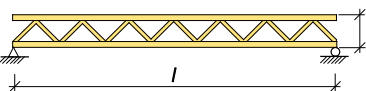
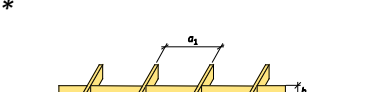
3.12 Yhteenvetotaulukko

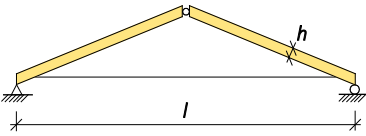
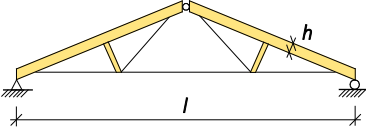
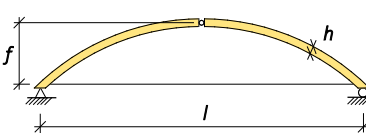
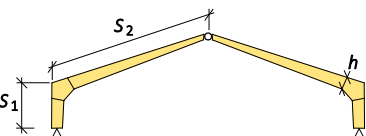
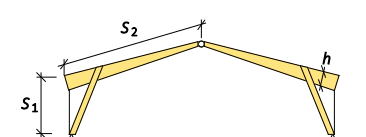
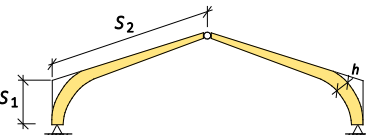
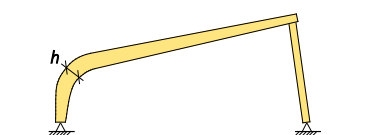
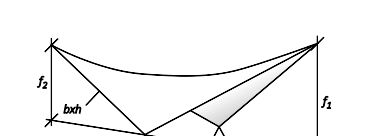
Taulukossa 3-1 esitetään vain tavallisimmin käytetyt liimapuiset rakennejärjestelmät. Valinnan helpottamiseksi esitetään rakenteiden suositellut jännevälit ja likimääräiset rakennekorkeudet. Mitat vastaavat keskimääräisiä arvoja tavanomaisissa olosuhteissa. Pienet kuormat tai rakenteiden pienet keskinäiset etäisyydet pienentävät jossain määrin tarvittavaa rakennekorkeutta ja päinvastoin. Poikkileikkauksen korkeuden h ja leveyden b välinen suhde voidaan usein valita arvoksi $h/b = 5$. Valmistustekniikka ja kuljetusmahdollisuudet vaikuttavat usein rakennejärjestelmän valintaan.

Taulukon 3-1 arvot eivät ole lopullisia vaan suunnittelun lähtökohta. Rakennesuunnittelijan pitää mitoittaa rakenne yksityiskohtaisesti sekä murtorajatilassa että käyttörajatilassa lopullisten mittojen selvittämiseksi. Tarvittaessa voidaan käyttää esikoronusta kompensoimaan tulevia taipumia. Erityisesti kaarevissa rakenteissa on tärkeää tarkistaa vetojännitykset syitä vastaan kohtisuoraan. Myös eri kattotyyppien erimuotoiset lumikuormat pitää ottaa huomioon. Kaikki rakenteet pitää jäykistää sivusuunnassa tapahtuvan kiepahtamisen estämiseksi ja vaakavoimien siirtämiseksi. Näitä asioita käsitellään perusteellisesti luvuissa 4 ja 13.

TAULUKKO 3-1

Liimapuurakenteiden rakennejärjestelmät. Suositeltu katon kaltevuus ja jänneväli. Likimääräinen poikkileikkauksen korkeus kun rakenteiden välinen etäisyys on noin 6 m, muuttuva kuorma noin $3,0 \text{ kN/m}^2$ ja kattorakenteen oma paino $0,5 \text{ kN/m}^2$. Kursivoidut ja asteriskilla * merkityt rakenteet eivät ole kovin tavallisia.

Rakennetyyppi	Nimi	Katon kaltevuus	Jänneväli l [m]	Poikkileikkauksen korkeus h [m]
	Kaksitukinen palkki	$\geq 3^\circ$	< 24	$h \sim \frac{l}{14}$
	Kaksitukinen alapuolelta jännitetty palkki	$3 - 30^\circ$	< 50	$h \sim \frac{l}{33}$ $H \sim \frac{l}{12}$
	Kaksitukinen harjapalkki	$1,4 - 6^\circ$	$10 - 25$	$h \sim \frac{l}{20}$ $H \sim \frac{l}{14}$
	Kaksitukinen kaareva harjapalkki	$3 - 15^\circ$	$10 - 20$	$h \sim \frac{l}{30}$ $H \sim \frac{l}{16}$
	Jatkuva suora palkki	$\geq 3^\circ$	< 25	$h \sim \frac{l}{14}$
* 	* Jatkuva suora viisteellinen palkki	$\geq 3^\circ$	< 25	$h \sim \frac{l}{18}$ $H \sim \frac{l}{14}$
	Kaksitukinen ulokepalkki	$< 10^\circ$	< 12	$h \sim \frac{l}{7}$
	Kaksitukinen suora ristikkopalkki	$\geq 3^\circ$	$25-85$	$h \sim \frac{l}{12}$
* 	* Ortogonaalinen palkkiarina	$\geq 3^\circ$	$12-25$	$h \sim \frac{l}{20}$ ($a=2,4-7,2\text{m}$)

	Vetotangollinen tai vetotangoton kolminivelkattotuoli	$\geq 14^\circ$	15 - 30	$h \sim \frac{l}{28}$
	Vetotangollinen kolminivelkattotuoli alapuolelta jännitetyin palkein	$\geq 14^\circ$	25 - 80	$h \sim \frac{l}{45}$
	Vetotangollinen tai vetotangoton kolminivelkaari (kaksinivelkaari)	$\frac{f}{l} \geq 0,14$	20 - 100	$h \sim \frac{l}{50}$
	Kolminivelkehä, nurkka sormijatkettu	$\geq 14^\circ$	15 - 25	$h \sim \frac{s_1 + s_2}{13}$
	*Kolminivelkehä, osista koottu nurkka	$\geq 14^\circ$	10 - 50	$h \sim \frac{l}{30}$
	Kaarevanurkkainen kolminivelkehä	$\geq 14^\circ$	15 - 50	$h \sim \frac{s_1 + s_2}{15}$
	*Nivelpilarilla tuettu puolikehä	$\geq 20^\circ$	10 - 25	$h \sim \frac{l}{25}$
	*Satulapintakuori	$\frac{f_1 + f_2}{l_1 + l_2} \geq 0,2$	$l_1 \sim l_2$ 15 - 60	$h \sim b \sim \frac{l}{70}$ (reunapalkit)

4	SUORAT RAKENNUSOSAT	2
4.1	Palkit	2
	Taivutus ja leikkaus	2
	Aksiaalinen rasitus ja yhdistetty veto ja taivutus	4
	Kiepahdus	5
	Puristus kohtisuoraan syitä vastaan	9
	Puristus vinosti syiden suuntaa vastaan	12
4.2	Nurjahdus	13
	Nurjahduspituus	13
	Pilari jonka poikkileikkaus tai kuormitus tai molemmat ovat muuttuvia	14
	Mitoitusmenetelmät	16
	Puhdas aksiaalinen puristus - eurokoodi 5:n mukainen menettely	17
	Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus	19

4 SUORAT RAKENNUSOSAT

4.1 Palkit

Palkit ovat taivutusmomentin rasittamia rakenneosia, jotka ovat useimmiten suoria ja joiden poikkileikkaus on tavallisesti suorakaide. Palkkeja käytetään siltoihin sekä katto- ja lattiarakenteisiin. Rakenteita joiden poikkileikkaus ei ole vakio käsitellään luvuissa 7 ja 11.

Palkkien mitoituksessa tarkistetaan taivutusmomentin ja leikkausvoiman kestävyys sekä taipuma ja värähtelyt. Kohtisuoran puristusvoiman kestävyys tarkistetaan tukialueen osalta. Palkin pituus vaikuttaa siihen, mikä kriteeri on mitoittava. Kun jänneväli on korkeuteen verrattuna lyhyt, on leikkausvoima mitoittava. Jännevälin kasvaessa taivutusmomentti tulee ensin mitoittavaksi, kunnes pitkällä jänneväleillä käyttörajatila (taipuma ja värähtelyt) tulee mitoittavaksi (katso luku 6). Taivutusmomentin mitoittaessa vapaasti tuetun, tasaisella kuormalla kuormitetun palkin korkeus on noin 1/20 jännevälistä.

Taivutus ja leikkaus

Taivutusmomentin M rasittaessa massiivista suorakaidepalkkia jäykemmän (y - y) akselin suhteen on kimmoteorian mukainen taivutusjännitys σ etäisyydellä z neutraaliakselista

$$\sigma = \frac{M \cdot z}{I_y} \quad 4-1$$

I_y on poikkileikkauksen hitausmomentti y - y akselin suhteen.

Poikkileikkauksen itseisarvoltaan suurimmat jännitykset esiintyvät ylä- ja alareunassa

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M}{W_y} \quad 4-2$$

Taivutusvastus W_y jäykemmän akselin suhteen määritellään yhtälöllä

$$W_y = \frac{I_y}{h/2} = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad 4-3$$

b palkin leveys
 h palkin korkeus

Vastaavat yhtälöt voidaan johtaa myös heikomman akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle.

Jos palkkia taivutetaan samanaikaisesti kummankin akselin suhteen, pitää seuraavien mitoitusehtoien täyttyä

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad 4-4$$

$\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$ taivutusjännityksien mitoitusarvot pääakselien suhteen
 $f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$ vastaavat taivutuslujuuksien mitoitusarvot

Liimapuun lujuus vähemmän jäykän akselin suunnassa ei laskennallisesti ole sama kuin jäykemmässä suunnassa, vaan se määräytyy lamellien erilaisista lujuusluokista ja kuorman jakautumisesta. Suomessa kuitenkin käytetään samaa ominaislujuutta myös vähemmän jäykässä suunnassa, mutta sitä ei korjata kokovaikutuskertoimella k_h . Kerroin k_m ottaa huomioon jännitysten tasoittumisen ja materiaalin epähomogeenisuuden. Suorakulmaisille liimapuupoikkileikkauksille k_m on 0,7. Muille poikkileikkauksille k_m on 1,0.

Kaikissa taivutetuissa rakenneosissa syntyy myös leikkausjännityksiä. Leikkausjännitys on suurimmillaan neutraaliakselilla ja häviää poikkileikkauksen reunoilla. Suorakaidepoikkileikkauksen suurin leikkausjännitys τ on neutraaliakselilla

$$\tau = \frac{3V}{2 \cdot b \cdot h} \quad 4-5$$

V leikkausvoima
 b palkin leveys
 h palkin korkeus

Seuraavan mitoitusehdon pitää täyttyä

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad 4-6$$

τ_d leikkausjännityksen mitoitusarvo
 $f_{v,d}$ leikkauslujuuden mitoitusarvo

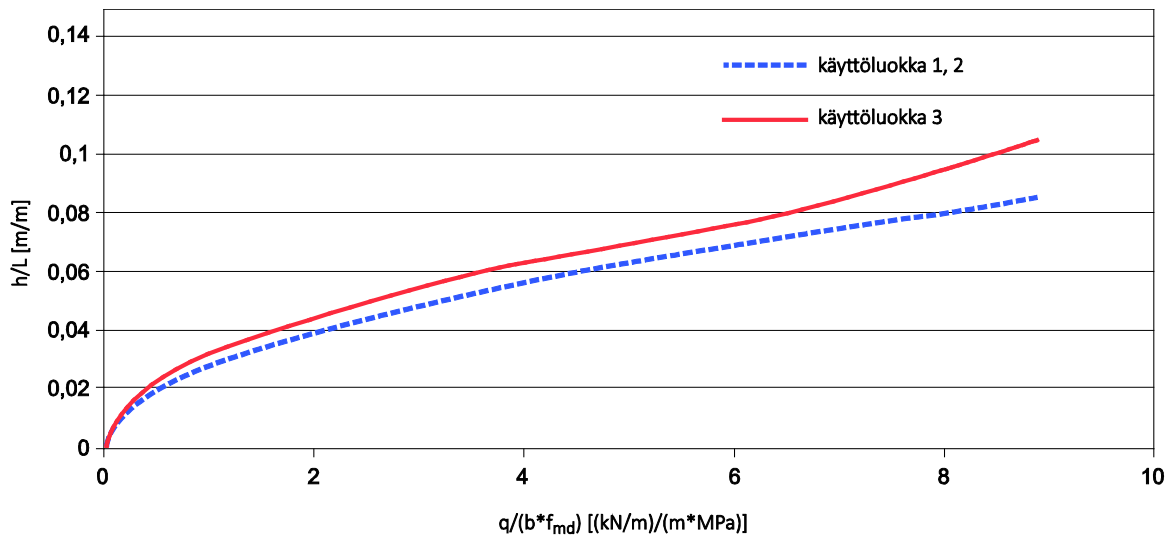
Koska kosteuden vaihtelu aiheuttaa puun halkeamista, suosittelee eurokoodi 5 että yhtälössä 4-5 käytetään liimapuun koko leveyden b asemesta tehollista leveyttä $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$. Kertoimen k_{cr} arvo on erilainen eri materiaaleille ja eri maissa käytettävät arvot on annettu eurokoodi 5:n kansallisissa liitteissä. Suomessa k_{cr} on riippuvainen materiaalista ja kosteusolosuhteista ja sen arvo on annettu taulukossa 4-1.

TAULUKKO 4-1

Halkeamakertoimen k_{cr} arvot

Materiaali ja olosuhde	k_{cr}
Sahatavara ja liimapuu yleensä	0,67
Kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä käsitellylle puulle	1,0
Standardien EN 13986 ja EN 14374 mukaisille puutuotteille	1,0
Pysyvästi käyttöluokan 2 tai 3 olosuhteissa oleville puurakenteille	1,0

Taivutusmomentin mitoittaessa palkin likimääräinen tarvittava korkeus saadaan kuvasta 4-1. Esitetyillä kuormituksilla ja jänneväleillä taivutusjännitykset määräävät palkin korkeuden.



KUVA 4-1

Eri kuormitusasteilla tarvittava palkin korkeus palkin korkeuden ja jännevälin suhteena. Käyttöluokat 1 sekä 2 ja 3, liimapuuluokka GL30c. f_{md} on laskettu yhtälöstä 2-9. Taivutusmomentti on mitoittava, kuvassa käytetty kertoimen k_{cr} arvoa 0,8. Kiepahtaminen on estetty.

Aksiaalinen rasitus ja yhdistetty veto ja taivutus

Taivutuksen lisäksi suorille liimapuurakenteille voi tulla aksiaalisia rasituksia – vetoa tai puristusta. Kestävyys vetoa vastaan on riippuvainen tilavuudesta (Weibullin heikomman lenkin teorian mukaan) ja sen vuoksi palkin tilavuus pitää ottaa huomioon. Lyhyet puristetut sauvat murtuvat puristumalla, kun taas pitkät nurjahtavat. Puristettuja rakenneosia käsitellään enemmän kappaleessa 4.2.

Vedettyjen sauvojen ja vedettyjen ja taivutettujen palkkien pitää täyttää seuraavat mitoitus ehdot

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

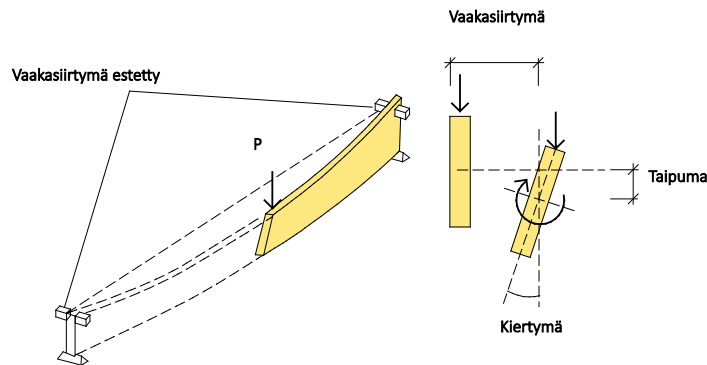
$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

4-7

$\sigma_{t,0,d}$	syiden suuntaisen vetojännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$	taivutusjännitysten mitoitusarvot pääakseleiden suhteen
$f_{t,0,d}$	vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$	taivutuslujuuksien mitoitusarvot
k_m	kerroin, suorakulmaisille liimapuupoikkileikkauksille k_m on 0,7 ja muille poikki-leikkauksille 1,0.

Kiepahdus

Hoikat palkit kiepahtavat, jos niiden puristetun reunan siirtyminen tasostaan ei ole estetty, katso kuva 4-1. Palkki kiepahtaa puristuslujuutta pienemmällä puristusjännityksen arvolla. Todellisuudessa suorat palkit eivät ole täydellisen suoria, mikä lisää kiepahdusriskiä. Kiepahdusriskiinkin vaikuttaa myös tuentatapa (vapaasti tuettu, nivelellinen tai kiinteä tuentatapa), kuormituksen tyyppi ja tapa millä kuormat tulevat palkille (palkin yläreunassa tai neutraaliakselilla), yläreunan jäykistystapa ja jäykistyskohtien keskinäinen etäisyys. Nämä vaikuttavat mitoitusyhtälöissä käytettävään kiepahduspituuteen.



KUVA 4-2

Vapaasti tuetun palkin kiepahtaminen.

Kiepahtavan, poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen massiivisen palkin kriittinen taivutusjännitys $\sigma_{m,crit}$ on

$$\sigma_{m,crit} \approx \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05}$$

4-8

b palkin leveys

h palkin korkeus

l_{ef} tehollinen pituus, jossa on otettu huomioon taivutusmomentin jakautuma ja palkin tuenta- ja jäykistystapa

$E_{0,05}$ syiden suuntaisen kimmokertoimen 5 % fraktiilia vastaava ominaisarvo

Kun palkki on vapaasti tuettu ja kuorma vaikuttaa neutraaliakselilla, on l_{ef} yhtälössä 4-8 yhtä suuri kuin palkin jänneväli. Eri tuentatavoille käytettävä suhde l_{ef}/l on annettu taulukossa 4-2. Annetut arvot koskevat palkkeja, joiden sivusiirtymä on estetty tuella ja kuorma vaikuttaa neutraaliakselilla. Jos kuorma vaikuttaa puristetulla reunalla, arvoon l_{ef} lisätään $2h$, ja jos kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, arvosta l_{ef} vähennetään $0,5h$. Jos palkin puristetun reunan sivusiirtymä on estetty sivutuvin, joiden keskinäinen etäisyys on a , niin tehollinen pituus l_{ef} on a .

TAULUKKO 4-2

Palkin tehollisen pituuden suhde jänneväliin. Palkit on kuormitettu neutraaliakselilla. Jos kuorma vaikuttaa puristetulla reunalla, arvoon l_{ef} lisätään $2h$, ja jos kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, arvosta l_{ef} vähennetään $0,5h$.

Palkin tyyppi	Kuormitustapa	l_{ef}/l
Vapaasti tuettu	Vakiomonentti	1,0
	Tasainen kuorma	0,9
	Pistekuorma jänteen keskellä	0,8
Uloke	Tasainen kuorma	0,5
	Pistekuorma jänteen keskellä	0,8

Suhteellinen hoikkuusluku kiepahduksessa $\lambda_{rel,m}$ voidaan laskea taivutuslujuuden ominaisarvosta $f_{m,k}$ ja kriittisestä taivutusjännityksestä $\sigma_{m,crit}$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

4-9

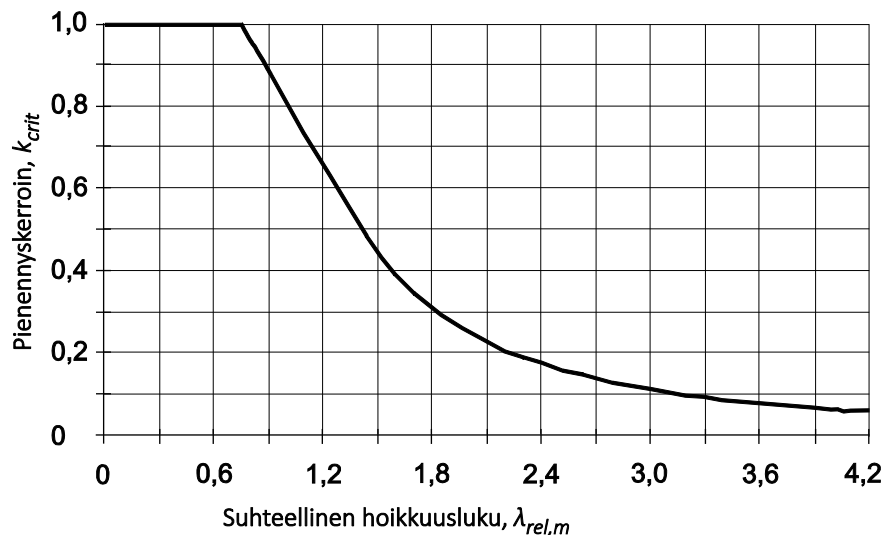
Palkit ovat stabiileja eivätkä kiepahda kun suhteellinen hoikkuusluku $\lambda_{rel,m}$ on pienempi kuin 0,75. Kestävyys määräytyy kiepahduksesta kun $\lambda_{rel,m}$ on suurempi kuin 1,4. Kun suhteellisen hoikkuusluku on näiden arvojen välissä, palkin taivutusmomentinkestävyys ylittyy sen jälkeen kun on tapahtunut suuria siirtymiä sekä vaakasuorassa että pystysuorassa suunnassa. Kiepahdusriskin vuoksi käytettävän pienennyskertoimen k_{crit} arvoja on annettu taulukossa 4-3 ja kuvassa 4-3, ja se on riippuvainen suhteellisesta hoikkuusluvusta.

Kaarien ja poikkileikkaukseltaan muuttuvien palkkien kiepahdusta käsitellään luvuissa 7 ja 11.

TAULUKKO 4-3

Pienennyskertoimen k_{crit} arvoja eri $\lambda_{rel,m}$ -arvoille.

k_{crit}	Suhteellinen hoikkuusluku kiepahduksessa $\lambda_{rel,m}$
1	$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$
$1,56-0,75\lambda_{rel,m}$	$0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$
$1/(\lambda_{rel,m})^2$	$\lambda_{rel,m} > 1,4$



KUVA 4-3

k_{crit} -arvojen riippuvaisuus suhteellisesta hoikkuusluvusta $\lambda_{rel,m}$.

Jos palkkia taivutetaan vain jäykemmän akselin suhteen, taivutusjännityksen pitää täyttää seuraava mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d}$$

4-10

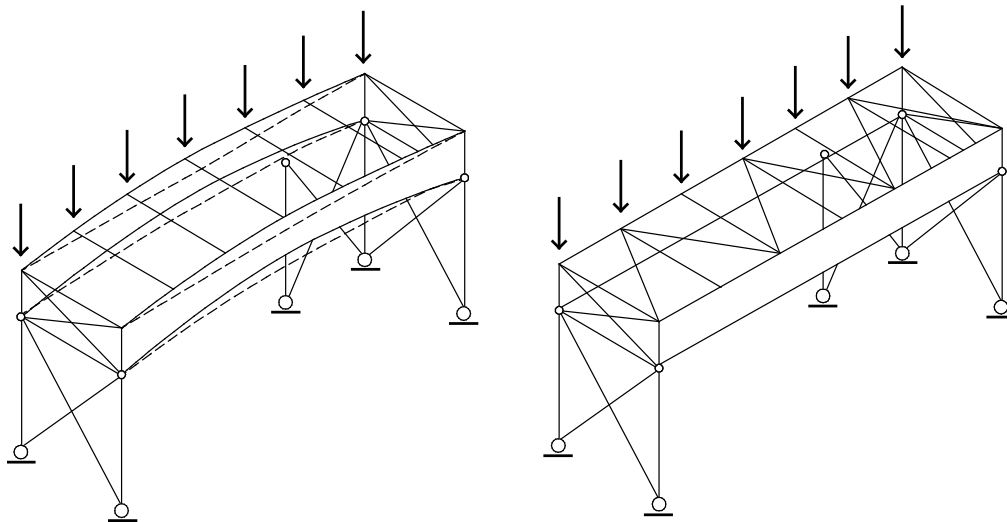
$\sigma_{m,d}$ taivutusjännityksen mitoitusarvo

$f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo

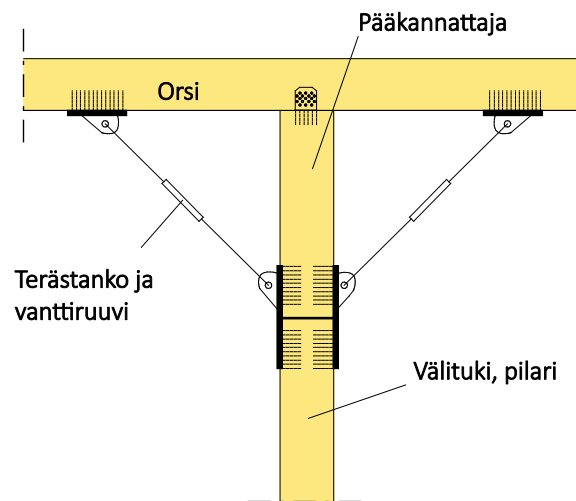
k_{crit} taulukossa 4-3 ja kuvassa 4-3 annettu kiepahduksessa käytettävä pienennyskerroin

Taivutusmomentin ja puristuksen rasittamia palkkeja käsitellään luvussa 4.2. > Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus, ja palkkeja joissa vaikuttaa puristusvoima kohtisuoraan syiden suuntaan vastaan luvussa 4.1. > Puristus kohtisuoraan syitä vastaan.

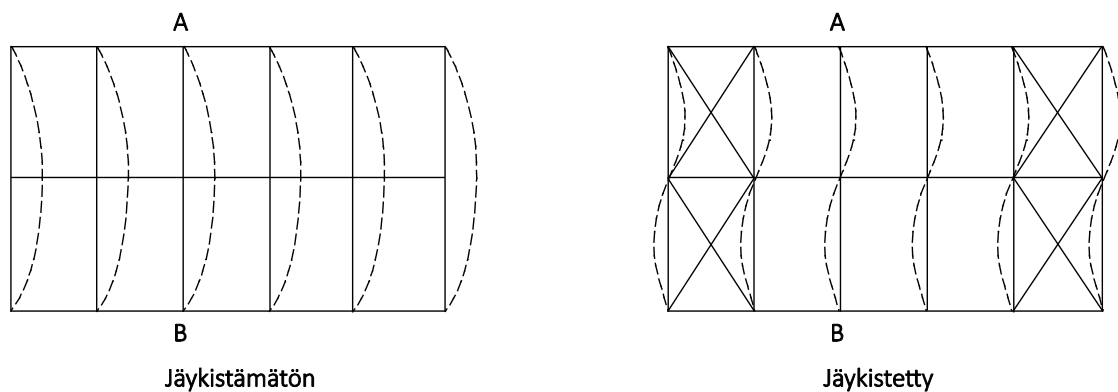
Hoikkien palkkien puristettu reuna pitää jäykistää joko jatkuvasti tai sopivan etäisyyden päässä toisistaan olevin jäykistein, kuva 4-4. Jatkuva jäykistys muodostuu esimerkiksi palkin yläreunaan kiinnitetystä vesikattorakenteeseen kuuluvasta levystä. Jatkuvien palkkien välituilla pitää jäykistää palkin puristettu alareuna, kuva 4-5. Jäykistys voidaan tehdä vaijerein, jotka kulkevat katosta palkin alareunaan. Vaijerit eivät siirrä puristusvoimia ja estävät siten palkin alareunan sivusiirtymän epäsymmetrisistä kattokuormista ja niiden aiheuttamista muodonmuutoksista. Suunnittelijan pitää aina tarkastella palkin jäykistämistä kiepahtamista vastaan osana koko rakenteen jäykistämistä ja ottaa huomioon jäykisteen jäykkyys. Kuva 4-6 osoittaa, että kiepahduspituus on riippuvainen koko rakenteen jäykistämisestä. Epäselvissä tapauksissa on parasta olettaa, ettei jäykistystä ole tai että se on kimmoinen. Kiepahduksen estäminen on tärkeää, sillä useita kattoja on sortunut riittämättömän jäykistykseen vuoksi. Vaurioita on tapahtunut sekä rakennusvaiheessa, ennen kuin jäykistys on saatu valmiiksi, mutta myös valmiissa rakennuksissa. Liian jäykkä jäykistys voi puolestaan aiheuttaa etenevän sortuman, jos kantokykyä menettänyt palkki vetää muita mukaansa. Jäykistystä tarkastellaan enemmän luvussa 13.


KUVA 4-4

Hoikkien palkkien sivuttaisjäykistys.


KUVA 4-5

Hoikan jatkuvan palkin alareunan jäykistäminen välitueella. Jäykistys on kiinnitetty kattorakenteisiin, eikä se voi välittää puristusvoimia. Jos kattoa kuormitetaan epäsymmetrisesti, niin katon toisen puolen taipuma voisi aiheuttaa palkin alareunan siirtymän pois paikoiltaan, jos jäykistys välittäisi puristusvoimia.


KUVA 4-6

Katto- tai lattiarakenteen kiepahtaminen.

Puristus kohtisuoraan syitä vastaan

Puisten palkkien tukialueet ja usein myös puukerrostalojen rakenteet ovat puristettuja kohtisuoraan syitä vastaan. Puun kimmokerroin syitä vastaan kohtisuoraan on pieni. Lisäksi kosteusmuutokset aiheuttavat puulle tässä suunnassa suuria muodonmuutoksia, kutistumista ja turpoamista. Kerrostaloissa tällä voi olla suuri merkitys, jos useamman kerroksen muodonmuutokset kasaantuvat. Erilaisilla tuentaolosuhteilla esiintyvät murtumistavat on esitetty kuvassa 4-7. Kuorma ei siirry pelkän todellisen tukipinnan kautta, vaan tukipinnan ala- ja yläpuolella olevat puun syyt siirtävät kuormaa laajemmalle alueelle.

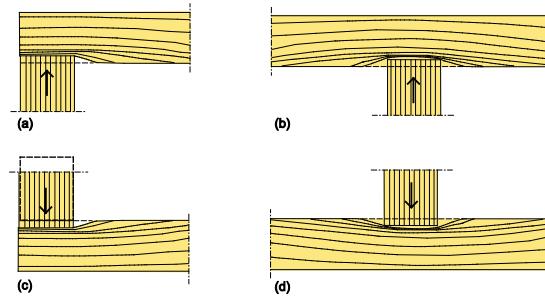
Puristus syitä vastaan kohtisuoraan aiheuttaa muodonmuutoksia, mutta ei varsinaista murtumaa. Siten sitä pitäisi tarkastella käyttörajatilassa, vaikka määräykset käsittelevätkin syitä vastaan kohtisuoraa puristusta murtorajatilassa. Mitoituksessa tarkastellaan syitä vastaan kohtisuoraa jännitystä eikä sen aiheuttamaa muodonmuutosta. Puristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan on standardin EN 408 mukaan kuitenkin määritelty jännityksenä, jolla koekappaleeseen syntyy 1 % plastinen muodonmuutos.

Tätä muodonmuutokseen perustuvaa lujuusarvoa pienennetään laskennallisesti käyttöluokan ja kuorman vaikutusajan huomioonottavalla kertoimella k_{mod} , katso luvut 2.3. > Kosteussuhteen vaikutus ja käyttöluokka ja 2.3. > Kuormien aikaluokat, yhtälöt 2-9 ja 4-12. (Koko ei vaikuta syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden arvoon joten k_h on 1.) Kuitenkin kimmokerroin syitä vastaan kohtisuoraan on lähes vakio, ja puristuslujuus vaihtelee vain vähän rakennuksissa käytännössä esiintyvällä kosteusalueella (kosteussuhde 10...20 %). Tätä ei oteta huomioon mitoituksessa, mikä johtaa suuriin tukipintoihin, jotta mitoitusehto täytyisi. Suuret tukipinnat puolestaan muuttavat muotoaan epätasaisesti, mikä johtaa epäkeskeiseen puristukseen, mitä ei oteta huomioon laskelmissa (kuva 4-8).

Tämän vuoksi suositellaan mitoitusyhtälössä 4-11 käytettäväksi syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvon asemesta sen ominaisarvoa. Tämä tarkoittaa sitä, että kertoimen k_{mod} ja osavarmuuskertoimen γ_m arvoksi valitaan 1,0. Tämä menettely sopii kuitenkin vain sellaisiin puurakenteisiin, missä oman painon suhde hyötykuormaan g_k/q_k on enintään 0,4. Jos tarkastellaan tavallista puurakennetta missä g_k/q_k on enintään 0,4, kuorman aikaluokka on keskipitkä ja käyttöluokka 1 tai 2, niin tällä menettelyllä tarvittava tukipinta pienenee 36 % ($k_{mod}/\gamma_m=0,8/1,25=0,64$) verrattuna siihen että käytettäisiin lujuuden mitoitusarvoa. Syitä vastaan kohtisuoran lujuuden mitoitusarvoa pitää kuitenkin käyttää sellaisille puurakenteille, missä oman painon osuus on suuri (g_k/q_k suurempi kuin 0,4).

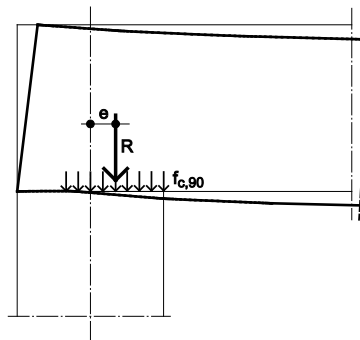
Palkin ja pilarin välinen liitos tehdään nykyisin usein vahvistettuna. Vahvistus voidaan tehdä liimaruuvein, puuruuvein tai liitoksen ulkopuolisin naulauslevyin, katso kuva 4-9. Vahvistus pienentää muodonmuutosta ja lisää siten kestävyyttä vahvistamattomaan liitokseen verrattuna. Puuruuvien murtumistapoja on kolme; ruuvit voivat painua puuhun tai nurjahtaa tai puristuslujuus syitä vastaan kohtisuoraan voi ylittyä ruuvien kärkien määrittelemässä tasossa.

Eurokoodi 5 ei esitä mitään mitoitusyhtälöitä kohtisuoraan syitä vastaan rasitettujen rakennusosien vahvistamisesta. Käytössä on kuitenkin menetelmiä, joissa kestävyys lasketaan puun kestävyuden ja vahvistuksen kestävyuden summana. Vahvistuksen kestävyys pitää laskea siten, että kaikki mahdolliset murtumistavat otetaan huomioon. Murtumistavat ovat riippuvaisia palkin geometriasta ja vahvistavien ruuvien tai levyjen määrästä. Jos vahvistukseen käytetään muutamia lyhyitä ruuveja, niin kestävyyteen vaikuttaa eniten ruuvien puristuminen puun sisään samalla kun tukipinnassa saavutetaan syitä vastaan kohtisuoraa puristuslujuutta vastaava jännitys. Ruuvien kestävyuden katsotaan olevan yhtä suuri niiden puristuessa puuhun kuin ulos vedettäessä. Jos vahvistukseen käytetään pitkiä ja hoikkia ruuveja, niin ne nurjahtavat. Kuten ensimmäisessäkin tapauksessa, niin samalla tukipinnassa saavutetaan syitä vastaan kohtisuoraa puristuslujuutta vastaava jännitys. Jos tukipinta vahvistetaan useilla lyhyillä ruuveilla, niin puristusjännitys ruuvien kärkien määrittelemässä tasossa on ratkaiseva kestävyydelle.



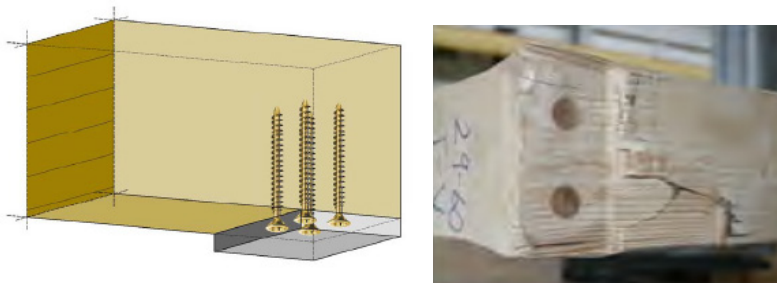
KUVA 4-7

Kohtisuoraan syitä vastaan puristavan voiman aiheuttama murtuma (a, c) rakennusosan tuella rajoitettu pituus (b, d) tuki jatkuu rakennusosan molemmilla puolilla.



KUVA 4-8

Suuri tukipinta johtaa epätasaiseen muodonmuutokseen ja aiheuttaa kuorman epäkeskeisyyden.



KUVA 4-9

Esimerkki palkin tukipinnan vahvistamisesta puuruuveilla (vasen kuva) ja liimatuilla puutapeilla (oikea kuva), kun rasituksena on syitä vastaan kohtisuora puristus.

Mitoitusmenetelmä

Syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen pitää täyttää ehto

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \leq k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}$$

4-11

missä on käytetty seuraavia merkintöjä:

$\sigma_{c,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen mitoitusarvo tehollisessa tukipinnassa
$F_{c,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran puristusvoiman mitoitusarvo
A_{ef}	tehollinen tukipinta-ala johon syitä vastaan kohtisuora puristusjännitys vaikuttaa

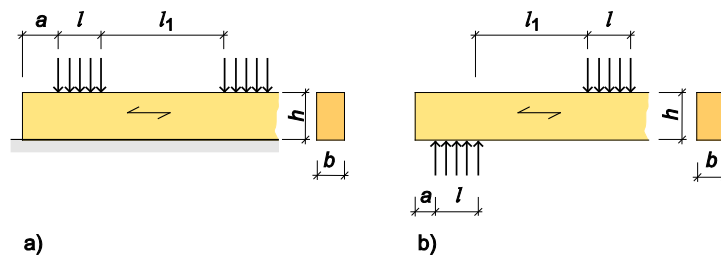
- $k_{c,90}$ kerroin joka ottaa huomioon kuormitustavan, halkeamisriskin ja puristuksen aiheuttaman muodonmuutoksen
- k_1 kerroin joka ottaa huomioon pysyvän ja muuttuvan kuorman välisen suhteen g_k/q_k . Huomaa että eurokoodin 5 mukaan k_1 on 1 kaikille suhteen g_k/q_k arvoille. k_1 arvot ovat
- $g_k/q_k \leq 0,4$: $k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}}$
- $g_k/q_k > 0,4$: $k_1 = 1$
- $f_{c,90,d}$ syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo yhtälön 4-12 mukaisesti

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_m} \quad 4-12$$

Laskelmissa tarvittava tehollinen tukipinta-ala A_{ef} lasketaan tehollisesta pituudesta l_{ef} :

$$l_{ef} = l + 2 \cdot l^* \quad \text{missä} \quad l^* = \min \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ a \\ l \\ l_1 / 2 \end{cases} \quad 4-13$$

Merkinnät on annettu kuvassa 4-10. Eri kuormitustapauksissa käytettävät $k_{c,90}$ arvot on annettu taulukossa 4-1.



KUVA 4-10

Syitä vastaan kohtisuoraan puristettu rakennusosa (a) jatkuva tuki (b) pituudeltaan rajoitettu tuki.

TAULUKKO 4-4

$k_{c,90}$ arvot tuentatavan ja tukien välisen etäisyyden funktiona. Suluissa olevia arvoja käytetään rakennesahatavaralle, muita liimapuulle. Merkinnät ovat kuvan 4-10 mukaiset.

	$l_1 < 2 \cdot h$	$l_1 \geq 2 \cdot h$
Jatkuvasti tuettu rakennusosa	1,0	1,5 (1,25)
Pituudeltaan rajoitetut tuet	1,0	1,75 (1,5) kun $l \leq 400 \text{ mm}^*$

* Jos $l_{sup} > 400 \text{ mm}$, voidaan teholliseksi pituudeksi l_{ef} olettaa $400 \text{ mm} + l_r$, ja korotuskertoimen $k_{c,90}$ arvoksi 1,75. Pidempää tukea kuin 600 mm ei suositella. (Huomaa että eurokoodi 5 suosittelee käytettäväksi $k_{c,90}$ arvoa 1,75 vain jos l_{sup} on enintään 400 mm . Jos l_{sup} on yli 400 mm , eurokoodi 5 suosittelee käytettäväksi arvoja $l_{ef} = l_{sup}$ ja $k_{c,90} = 1$)

Kun useampi pistekuorma vaikuttaa lähellä toisiaan (esimerkiksi palkit tai orret joiden keskinäinen välimatka on $< 610 \text{ mm}$), niin niitä voidaan pitää tasaisena kuormana.

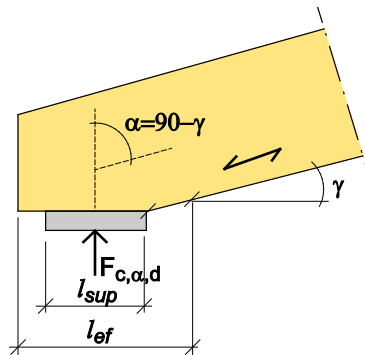
Puristus vinosti syiden suuntaa vastaan

Puristuksen kulmassa α syiden suuntaa vastaan pitää täyttää mitoitusehto

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{c,\alpha,d}}{A_{ef}} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot k_1 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad 4-14$$

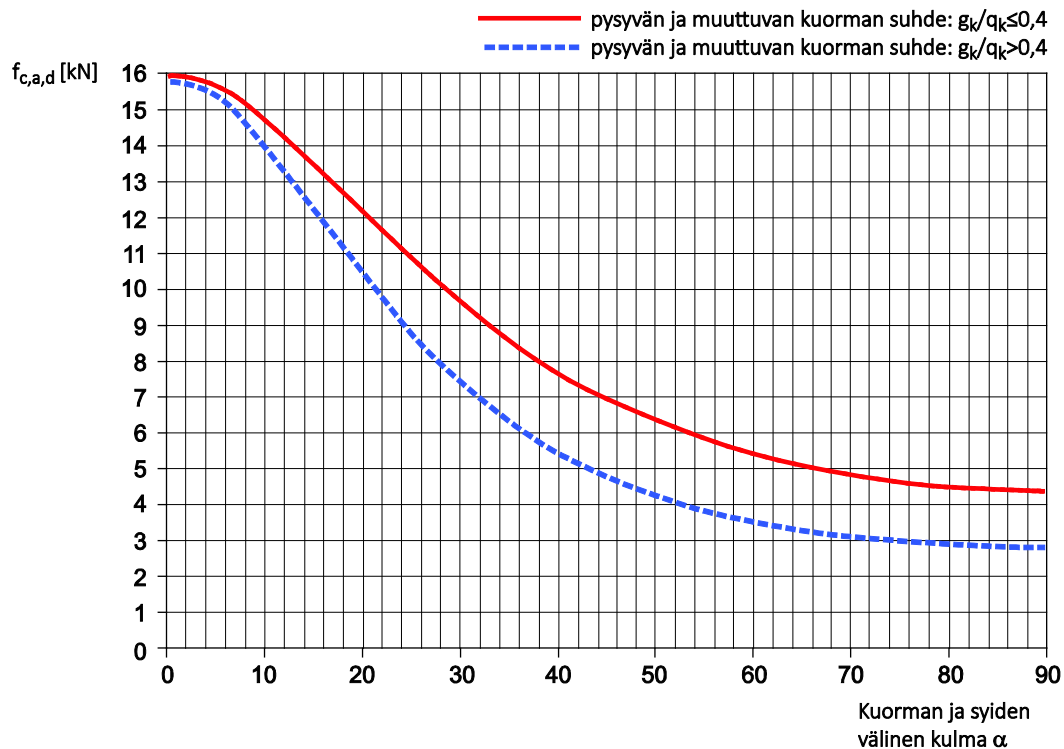
missä on käytetty seuraavia merkintöjä:

- $\sigma_{c,\alpha,d}$ syitä vastaan kulmassa α olevan puristusjännityksen mitoitusarvo
- $f_{c,\alpha,d}$ syitä vastaan kulmassa α olevan puristuslujuuden mitoitusarvo
- $f_{c,90,d}$ syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo
- $f_{c,0,d}$ syidensuuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo
- $F_{c,\alpha,d}$ syitä vastaan kulmassa α olevan puristusvoiman mitoitusarvo
- $k_{c,90}$ kerroin joka ottaa huomioon kuormitustavan, halkeamisriskin ja puristuksen aiheuttaman muodonmuutoksen
- k_1 kerroin joka ottaa huomioon pysyvän ja muuttuvan kuorman välisen suhteen g_k/q_k . Huomaa että eurokoodin 5 mukaan k_1 on 1 kaikille suhteen g_k/q_k arvoille. k_1 arvot ovat
 - $g_k/q_k \leq 0,4$: $k_1 = \frac{f_{c,90,k}}{f_{c,90,d}}$
 - $g_k/q_k > 0,4$: $k_1 = 1$



KUVA 4-11

Syitä vastaan kulmassa α kuormitettu rakennusosa.



KUVA 4-12

Liimapuisen rakennusosan puristuslujuus kun kuorman ja syiden välinen kulma on α . Liimapuuluokka GL30c. Käyttöluokka 1. Kuorman aikaluokka keskipitkä.

4.2 Nurjahdus

Pilarien laskenta perustuu Eulerin nurjahdusteoriaan. Sen mukaan matemaattisesti suoran, molemmista päistään nivelellisesti kiinnitetyn ja keskeisesti kuormitetun hoikan nurjahtavan tasapaksun sauvan nurjahduskuorma on

$$P_E = \pi^2 \frac{E \cdot I}{L^2} \quad 4-15$$

$E \cdot I$ sauvan jäykkyys
 L sauvan pituus.

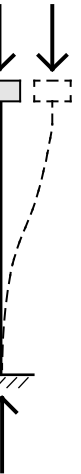
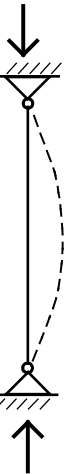
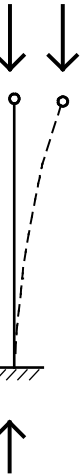
Nurjahduspituus

Pilarien nurjahduskuormaa ilmoitetaan tavallisesti Eulerin nurjahduskuorman P_E kerrannaisena. Jos pilarin päät on kiinnitetty jollain muulla tavalla kuin täydellisesti kitkattomin nivelin käytetään yhtälöä

$$P_{cr} = \pi^2 \frac{E \cdot I}{(\beta \cdot L)^2} \quad 4-16$$

$\beta \cdot L$ on nurjahduspituus joka on nurjahtaneen muodon kahden nollakohdan välinen etäisyys. Toisin sanoen $\beta \cdot L$ on sen täydellisesti kitkattomin nivelin kiinnitetyn pilarin pituus, joka nurjahtaa samalla kuormalla kuin tarkasteltavalla tavalla kiinnitetty pilari.

Kuvassa 4-13 annetaan teoreettiset β -arvot ideaalisille tuentatavoille, joissa pilarin päiden kiertymä tai siirtymä on joko täydellisesti tai ei lainkaan estetty. Kuvan 4-13 a, b, c ja e-tapauksien esittämä täysin jäykkä alapään kiinnitys tarkoittaa, että pilari on kiinnitetty perustuksiin niin jäykästi, että sen kiertymä voidaan jättää ottamatta huomioon. Pilarin yläpäähän kiinnitys tapauksissa a, c ja f vastaa tilannetta, missä pilari on jäykästi kiinnitetty palkkiin jonka jäykkyys on useita kertoja pilarin yläpäähän jäykkyyttä suurempi. Tapaus a eroaa tapauksesta c siten, että pilarin yläpää ei voi siirtyä tai siirtymä on minimaalinen. Tapaus f eroaa tapauksesta c siten että pilarin alapää voi kiertyä vapaasti. Suositellut β -arvot on annettu ideaalisten arvojen perusteella ja niissä on otettu huomioon että ideaalisia kiinnitysolosuhteita ei esiinny käytännössä.

	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Palkin nurjahdus on esitetty katkoviivalla						
Teoreettinen β arvo	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Suosittelun β arvo	0,7	0,85	1,2	1,0	2,25	2,25

KUVA 4-13

Teoreettiset ja käytännössä sovellettavat nurjahduspituudet eri kiinnitystapauksille.

Nurjahduspituus voidaan määrittellä myös sellaisille pilareille jotka eivät ole tasapaksuja, joiden kuorma ei ole vakio koko pilarin pituudelta tai jotka ovat päistään kimmoisesti kiinnitettyjä.

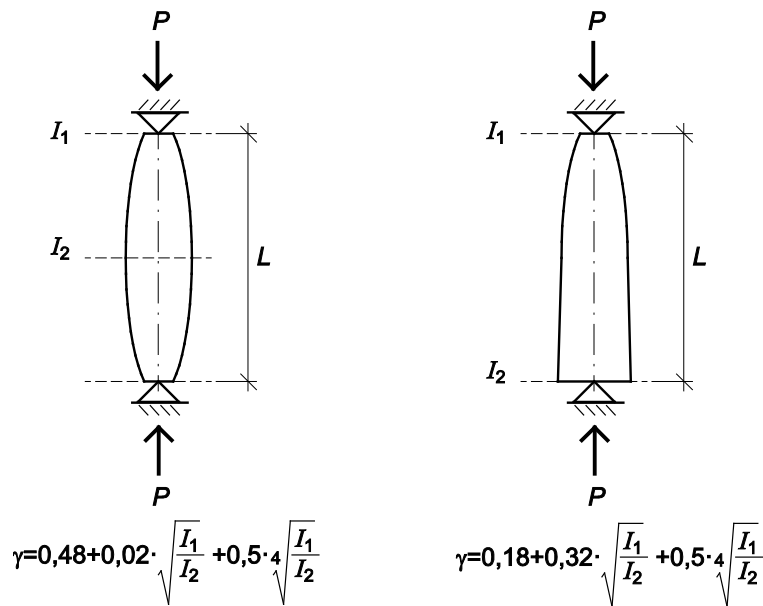
Pilari jonka poikkileikkaus tai kuormitus tai molemmat ovat muuttuvia

Poikkileikkaukseltaan muuttuvan pilarin nurjahduskuorma voidaan likimäärin esittää muodossa

$$P_{cr} = \gamma \cdot \pi^2 \frac{E \cdot I_2}{L^2}$$

4-17

I_2 on poikkileikkauksen suurin hitausmomentti. Jos pilarin poikkileikkauksen korkeus noudattaa paraabelia, niin kerroin γ voidaan määrittellä kuvan 4-14 avulla, jolloin yhtälö 4-17 pätee alueella $0,1 \leq I_1/I_2 \leq 1,0$.

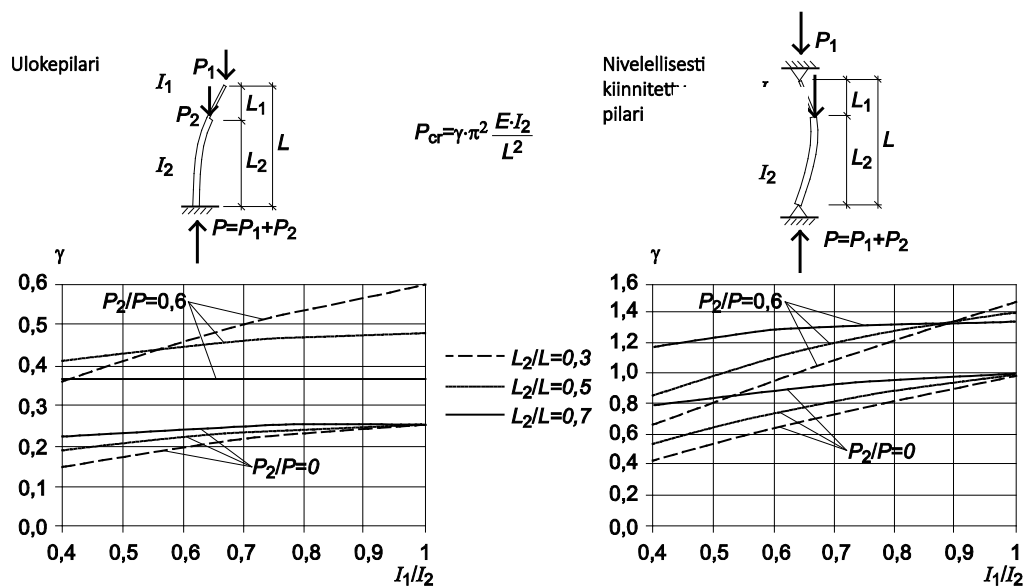


KUVA 4-14

Kerroin γ jota käytetään nurjahduskuorman laskemiseen pilarin poikkileikkauksen noudattaessa paraabelia.

Yhtälöä 4-17 voidaan myös käyttää sellaisen pilarin nurjahduskuorman laskemiseen, jonka poikkileikkaus muuttuu lineaarisesti.

Kuvaa 4-15 voidaan käyttää sellaisen pilarin nurjahduskuorman arviointiin, jonka puristusjännitys ei ole vakio. Kerroin γ on pilarin pienimmän ja suurimman hitausmomentin suhde.



Kuva 4-15

Kerroin γ jonka avulla arvioidaan sellaisen pilarin nurjahduskuorma, jonka puristusjännitys ei ole vakio.

Mitoitusmenetelmät

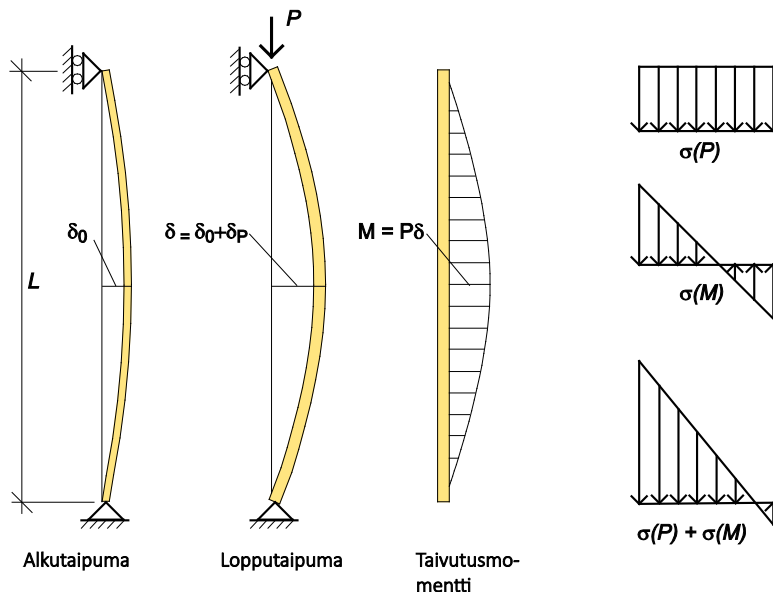
Todellisuudessa pilareiden muoto ja kuorman keskeisyys poikkeavat ideaalisesta, mikä aiheuttaa taivutusmomenttia heti kuormituksen alusta alkaen. Pilari murtuu ulkoisen taivutusmomentin (puristusvoiman ja taipuman tulon) saavutettua heikoimman poikkileikkauksen kestävyys. Murtumisen aiheuttavan kuorman suuruus on siten riippuvainen pilarin akselin suoruudesta. Yleensä pilarin kestävyys laskemisessa pitää ottaa huomioon sekä suoruus että materiaalin ominaisuuksien vaihtelu, kuten oksien sijainti ja kosteussuhde.

Pilarin kestävyys voidaan arvioida yksinkertaistetun toisen kertaluokan analyysin avulla. Aluksi määritellään alkukaarevuuden δ_0 arvo. Tyypillinen δ_0 arvo liimapuurakenteille on $L/500$, missä L on pilarin pituus. Jos molemmista päistään nivelellisesti kiinnitettyä pilaria kuormitaan keskeisellä puristusvoimalla P , tarkastellaan mitoituksessa puristusjännitysten $\sigma(P)$ ja taivutusjännitysten $\sigma(M)$ yhteisvaikutusta, katso kuva 4-16. Voiman P aiheuttamaa lisätaipuma on δ_p , katso 4-16. Kokonaistaipuma δ_{tot} on siten

$$\delta_{tot} = \delta_0 + \delta_p = \frac{\delta_0}{1 - P/P_{cr}} \quad 4-18$$

P_{cr} on (teoreettinen) nurjahduskuorma. Taivutusmomentti voidaan laskea aksiaalisen voiman P ja lopputaipuman tulona

$$M = P \cdot (\delta_0 + \delta_p) \quad 4-19$$



KUVA 4-16

Pilarin nurjautaminen tarkasteltuna toisen kertaluokan (epälineaarilla) teoriolla.

Pilaria mitoitettaessa tarkistetaan ettei puristusjännityksen ja taivutusjännityksen yhteisvaikutus ylitä liimapuun lujuutta. Menettely ei kuitenkaan ota huomioon esimerkiksi puun plastisoitumista kun puristusjännitys on suuri.

Puhdas aksiaalinen puristus – eurokoodi 5:n mukainen menettely

Liimapuupilarin pienin tarvittava lujuus voidaan määrittää eurokoodi 5:n mukaan käyttämällä lineaarista nurjahdusteoriaa. Epälineaariset (toisen kertaluokan) vaikutukset otetaan huomioon mitoituksessa lujuuden pienennyskerroinella k_c . Jännityksen pitää täyttää ehto

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \leq k_c \cdot f_{c,d} \quad 4-20$$

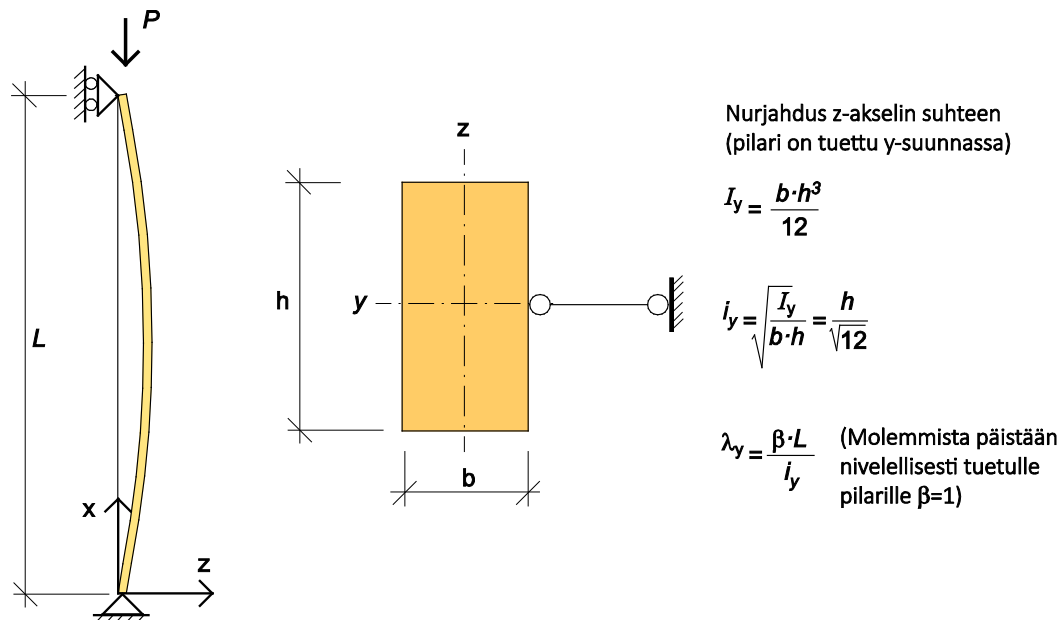
$f_{c,d}$	puristuslujuuden mitoitusarvo
A	pilarin poikkileikkauksen koko pinta-ala
k_c	nurjahduksen huomioonottava kerroin

k_c :n laskemisessa käytettävä yhtälö johdettiin simuloimalla suuria määriä pilareita, joilla oli erilaisia todellisiin havaintoihin perustuvia geometrisiä poikkeamia ja materiaaliominaisuuksia. Simuloinnissa otettiin myös huomioon puun plastisoituminen puristuspuolella.

Uusissa suunnitteluohjeissa annetaan k_c :n arvot muunnetun hoikkuusluvun λ_{rel} avulla, joka määritellään seuraavasti

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{P_c}{P_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k} \cdot A}{\pi^2 \frac{E_{0,05} \cdot I}{(\beta \cdot L)^2}}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 4-21$$

$f_{c,0,k}$	puun syidensuuntaisen puristuslujuuden ominaisarvo
$E_{0,05}$	syidensuuntaisen kimmokertoimen 5% fraktiili
λ	pilarin tai puristussauvan kuvassa 4-17 määritelty hoikkuusluku



KUVA 4-17

Puupilarin nurjahdaminen: hitausmomentin (I), hitaussäteen (i) ja hoikkuusluvun (λ). määritelmät.

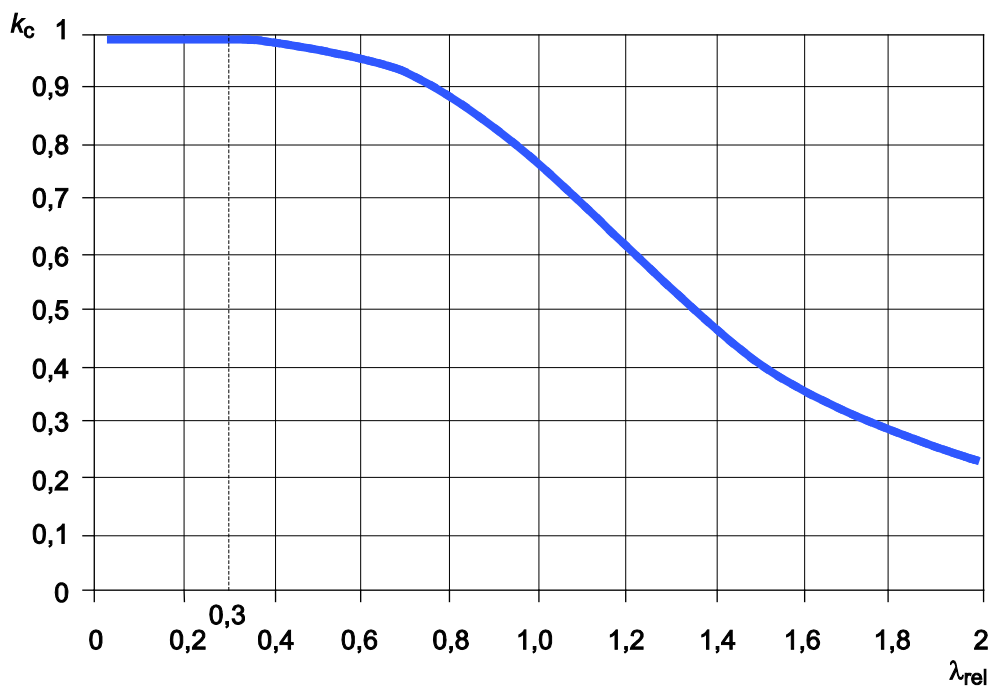
Nurjahduskertoimen k_c riippuvaisuus yhtälön 4-21 mukaan lasketusta hoikkuusluvusta λ_{rel} on eurokoodi 5:n mukaan

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{for } \lambda_{rel} \leq 0,3 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} & \text{for } \lambda_{rel} > 0,3 \end{cases} \quad 4-22$$

missä

$$k = 0,5 \cdot [1 + 0,1(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2] \quad 4-23$$

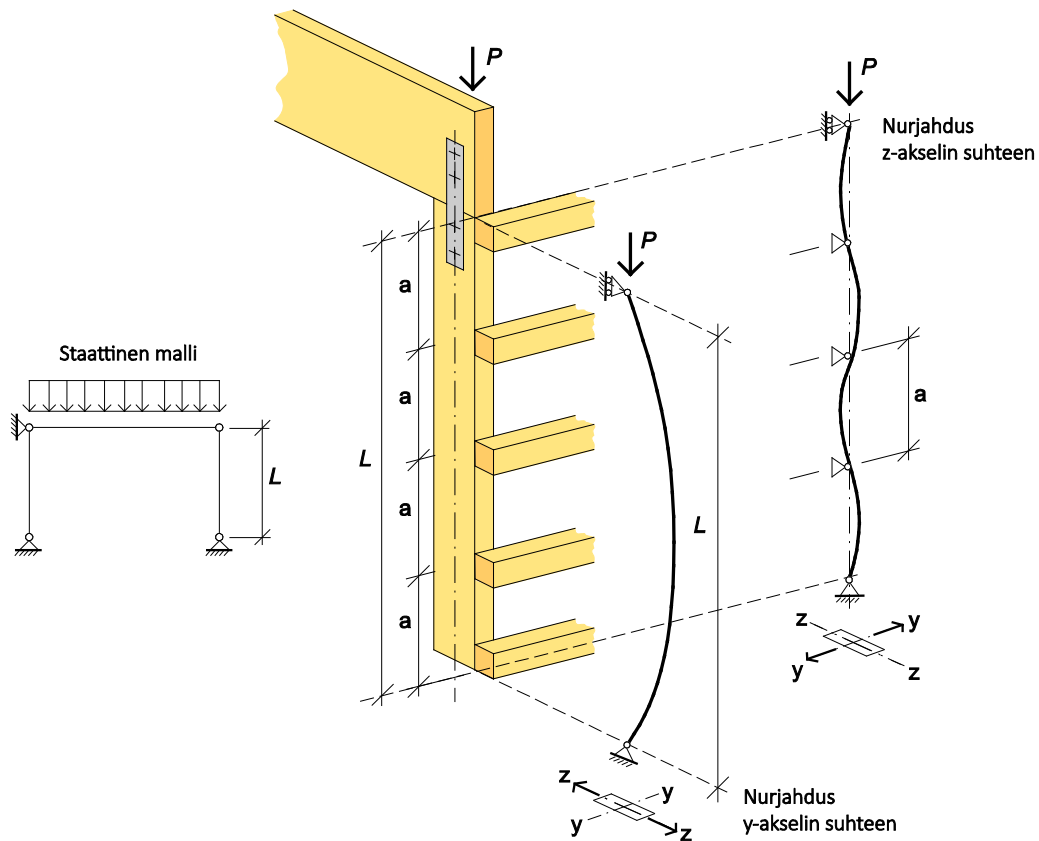
Käytännössä on syytä välttää suurempaa muunnettua hoikkuuslukua λ_{rel} kuin 2,0. k_c :n ja muunnetun hoikkuuden λ_{rel} välinen yhteys, nurjahduskäyrä, on esitetty kuvassa 4-18.



KUVA 4-18

Nurjahduskerroin k_c muunnetun hoikkuuden λ_{rel} funktiona eurokoodi 5:n mukaan.

Ulkoseinän pilarit mitoitetaan usein niin, että ne oletetaan jäykistetyiksi vähemmän jäykässä suunnassa (katso kuva 4-19), kun taas rakennuksen sisällä olevat vapaat pilarit ovat koko pituudeltaan jäykistämättömiä.



KUVA 4-19

Ulkoseinässä olevan pilarin nurjautuminen.

Pilarin ylä- ja alapäässä ja muissa kiinnikkeiden reikien heikentämissä poikkileikkauksissa on lisäksi osoitettava että

$$\sigma_c = \frac{P}{A_{net}} \leq f_{c,d}$$

4-24

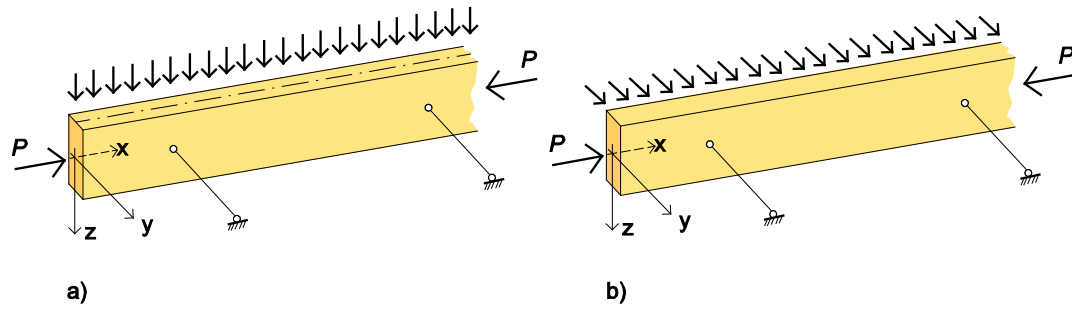
missä A_{net} on pilarin poikkileikkauksen nettopinta-ala.

Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus

Jos kiepahdus on estetty voi esiintyä kaksi murtumistapaa:

- $\lambda_{rel} \leq 0,3$ - nurjautamista ei voi tapahtua ja murtuminen tapahtuu rakennusosan puristuslujuuden ylittyessä.
- $\lambda_{rel} > 0,3$ – rakennusosa voi nurjautaa ja murtuminen tapahtuu puristusjännityksen ylittäessä nurjhduskertoimella k_c kerrotun puristuslujuuden.

Aksiaalista puristusta voi esiintyä myös molempiin suuntiin taivutetuissa rakennusosissa. Seuraavassa tarkastellaan kuitenkin vain kuvan 4-20 mukaisia tapauksia, jotka ovat tavallisimmat.



KUVA 4-20

Taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen yhteisvaikutus. (a) Taivutus jäykemmän y-akselin suhteen. (b) Taivutus vähemmän jäykän z-akselin suhteen.

Nurjahtamaton rakenne

Kun λ_{rel} on enintään 0,3 niin sauva ei nurjahda ja puristuslujuutta ei sen vuoksi tarvitse pienentää. Puun plastisoituminen puristuspuolella voidaan hyödyntää, ja mitoitusyhtälöt ovat

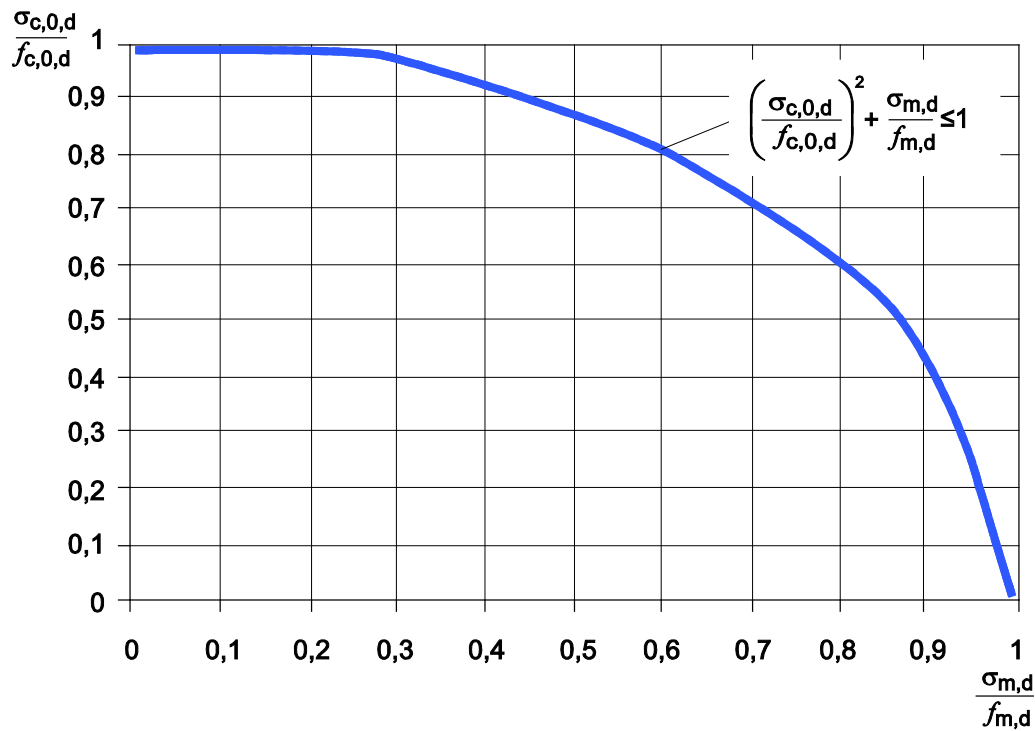
$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 4-25 \text{ (a)}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 4-25 \text{ (b)}$$

missä on käytetty seuraavia merkintöjä:

$\sigma_{c,0,d}$	syiden suuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$	taivutusjännityksen mitoitusarvo y- ja z-akselien suhteen
$f_{c,0,d}$	syiden suuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo y- ja z-akselien suhteen. Suomessa käytetään samaa lujuuden ominaisarvoa kummassakin suunnassa.

Kuvassa 4-21 on esitetty plastisuusteorian mukainen yhdistetyn taivutusjännityksen ja puristusjännityksen vuorovaikutusdiagrammi. Puu plastisoituu kun sen puristuslujuus saavutetaan, jolloin puristuslujuutta vastaava jännitys vaikuttaa suuremmalla osalla poikkileikkauksen pinta-alaa ja rakenteella on suurempi kestävyys.



KUVA 4-21

Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen plastisuusteorian mukainen vuorovaikutusdiagrammi kun $\lambda_{rel} \leq 0,3$. Indeksä m,d käytetään yleisessä merkityksessä ja se viittaa sekä taivutusjännitykseen että taivutuslujuuteen joko y tai z-akselin suhteen. Indexi $c,0,d$ viittaa aksiaaliseen puristukseen.

Nurjahtava rakenne

Kun $\lambda_{rel} > 0,3$ niin puun plastisoitumista ei voida hyödyntää, sillä nurjahdus pitää ottaa huomioon. Rakenteen kestävyys saavutetaan kun jännitys poikkileikkauksen reunalla saavuttaa materiaalin lujuuden. Mitoitusyhtälö on

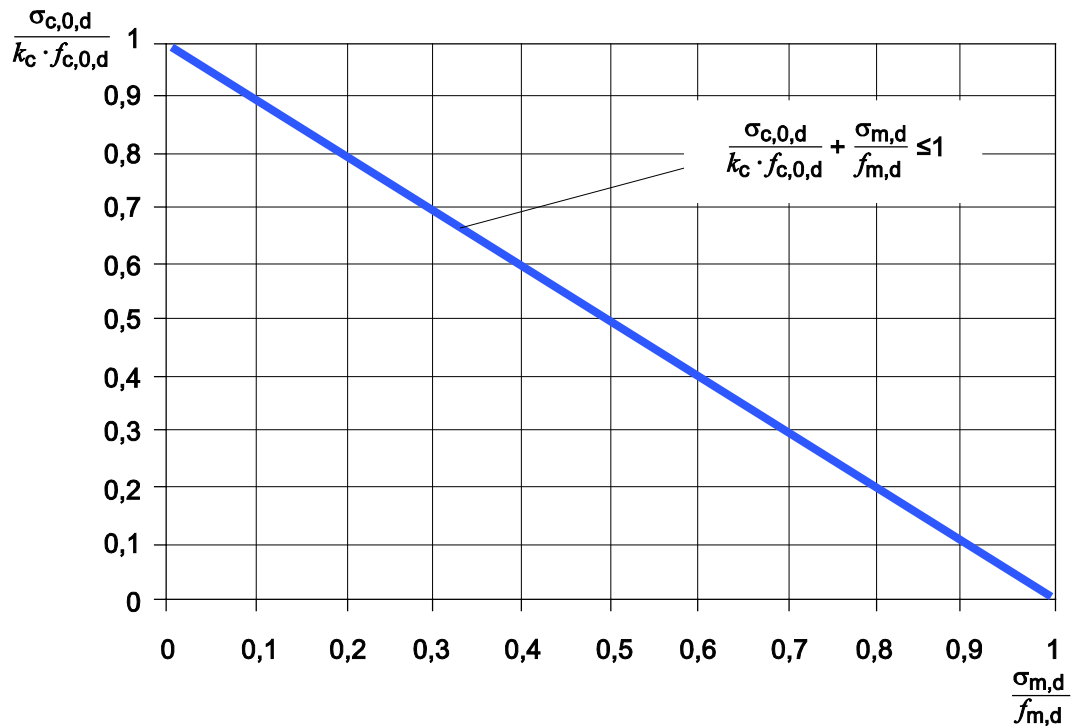
$$\begin{cases} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \end{cases} \quad 4-26 \text{ (a)}$$

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \end{cases} \quad 4-26 \text{ (b)}$$

missä $k_{c,y}$ ja $k_{c,z}$ ovat nurjahduksen huomioonottavat pienennyskertoimet (katso yhtälö 4-22). Alaindeksit "y" ja "z" viittaavat siihen akseliin jonka suhteen nurjahtaminen tapahtuu. Muut merkinnät ovat samanlaiset kuin yhtälöissä 4-25 a ja b. Kerroin 0,7 ottaa huomioon että puristusvoima P aiheuttaa nurjahdamisen tämän akselin suunnassa, jolloin vastaavaa taivutusjännitystä saa pienentää.

Puristuslujuuden pienennyskerroin k_c määritetään epäedullisemman suunnan hoikkuusluvun avulla, riippumatta siitä kumman akselin suhteen taivutusmomentti vaikuttaa. Ulkoseinién pilareissa pitää siten tarkistaa, että jäykistyspisteiden välisen osan hoikkuusluku sivusuunnassa on suurempi kuin seinän nurjahtaessa pois tasostaan.

Kuvassa 4-22 on esitetty kimmoteorian mukainen yhdistetyn taivutusjännityksen ja puristusjännityksen vuorovaikutusdiagrammi.



KUVA 4-22

Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen kimmoteorian mukainen vuorovaikutusdiagrammi kun $\lambda_{rel} > 0,3$. Indeksä m, d käytetään yleisessä merkityksessä ja se viittaa sekä taivutusjännitykseen että taivutuslujuuteen joko y- tai z-akselin suhteen. Indeksä $c, 0, d$ viittaa aksiaaliseen puristukseen.

5	REIÄT JA LOVET	2
5.1	Päästään lovettu palkki	2
5.2	Päästään lovetun palkin vahvistaminen	3
	Päästään lovetun palkin sisäinen vahvistaminen	4
	Päästään lovetun palkin ulkoinen vahvistaminen	5
5.3	Reiällinen palkki	6
5.4	Reiällisen palkin vahvistaminen	10
	Reiällisen palkin sisäinen vahvistaminen	10
	Reiällisen palkin ulkoinen vahvistaminen	11

5 REIÄT JA LOVET

Rakenteeseen tehty reikä tai lovi aiheuttaa äkillisen poikkileikkauksen muutoksen, mistä syntyy rakenteen kestävyyttä merkittävästi heikentävä jännitystila. Epäjatkuvuuskohta vaikuttaa sekä syiden suuntaisiin normaalijännityksiin että leikkausjännityksiin. Reiän tai loven läheisyyteen syntyy paikallisesti suuria puun syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä, jotka voivat johtaa halkeamiseen jo varsin pienen ulkoisen kuorman vaikutuksesta. Halkeama kasvaa tavallisesti hyvin hauraasti. Koetulosten mukaan reiällisten tai lovettujen palkkien kestävyys on merkittävästi riippuvainen palkin koosta, kuten muissakin kuormitustilanteissa missä syntyy vetojännityksiä.

Vahvistamattomien päästään lovettujen tai reiällisten palkkien mitoitusta käsitellään luvuissa 5.1 ja 5.3. Palkin keskialueelle ei pidä tehdä lainkaan vahvistamattomia lovia. Reiät ja lovet heikentävät palkkia niin paljon, että yleensä suositellaan käytettäväksi jotain vahvistusmenetelmää. Päästään lovetun palkin vahvistamista käsitellään luvussa 5.2 ja reiällisen palkin vahvistamista luvussa 5.4.

5.1 Päästään lovettu palkki

Päästään lovettu palkki pitää mitoittaa huolellisesti, sillä pienikin lovi lisää halkeamisriskiä ja heikentää siten oleellisesti kestävyyttä. Palkissa jonka syiden suunta on neutraaliakselin suuntainen, syntyy loven läheisyyteen paikallisesti suuria syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä ja leikkausjännityksiä. Kimmoteorian mukaan nämä ovat suorakulmaisen loven nurkassa ääretömän suuria. Murtumistapa on yleensä hyvin hauras; halkeama alkaa nurkasta ja etenee syiden suunnassa. Puristuspuolella oleva lovi pienentää kestävyyttä vähemmän kuin vetopuolella oleva lovi.

Jos lovia ei voi välttää, niin ne pitää ainakin vetopuolella sahata vinosti tai pyöristää vähintään 25 mm pyöristyssäteellä. Suurempia lovia kuin 0,5h tai 500 mm ei pidä tehdä vahvistamattomina. Erityistä varovaisuutta pitää noudattaa, jos rakenne voi joutua alttiiksi suurille kosteusvaihteluille. Kaikki loven pinnat pitää pintakäsitellä.

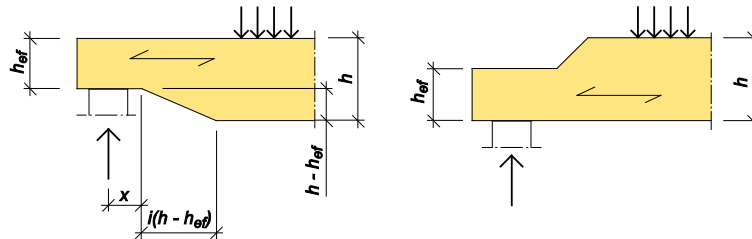
Vahvistamattomien lovettujen palkkien kestävyys voidaan laskea seuraavalla eurokoodi 5:ssä olevalla menettelyllä, merkinnät on esitetty kuvassa 5-1. Menettely perustuu Gustafssonin (1988) esittämään suorakulmaisten lovien murtumismekaaniseen analyysiin. Vaikkakin mitoitusehto on muotoiltu nimellisen leikkausjännityksen ja pienennetyn leikkauslujuuden avulla, niin yhtälö ottaa huomioon sekä syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen että leikkausjännityksen. Murtumismekaniikassa tarkastellaan murtumisenergiaa, kun kappaleessa on kohtisuoraan syitä vastaan olevia vetojännityksiä, sekä palkin taivutus- ja leikkausjäykkyyttä. Nämä otetaan mitoitusyhtälössä huomioon leikkauslujuuden kertoimella k_v . Loven kaltevuuden i huomioonottava termi on lisäys alkuperäiseen ja perustuu Riberholtin ja muiden (1992) tekemiin kokeisiin. Kun poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen palkin syiden suunta on palkin akselin suunnassa, mitoitusehto on

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{bh_{ef}} \leq k_v f_v \quad 5-1$$

$k_v = 1,0$ kun lovi on puristetulla puolella. Kun lovi on vedetyllä puolella niin

$$k_v = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ k_n \left(1 + \frac{1,1i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \end{array} \right. \quad 5-2$$

V	leikkausvoima
b	palkin leveys
h, h_{ef}	palkin kokonaiskorkeus ja tehollinen korkeus mm
x	tukireaktion resultantin ja loven nurkan välinen etäisyys mm
i	loven kaltevuus, katso Kuva 5-1
α	palkin tehollisen korkeuden ja koko korkeuden välinen suhde, $\alpha = h_{ef}/h$
k_n	kerroi, liimapuulle 6,5 (kertopuulle 4,5 ja sahatavaralle 5,0)



KUVA 5-1

Lovi palkin päässä. Eurokoodi 5:n mukaiset merkinnät.

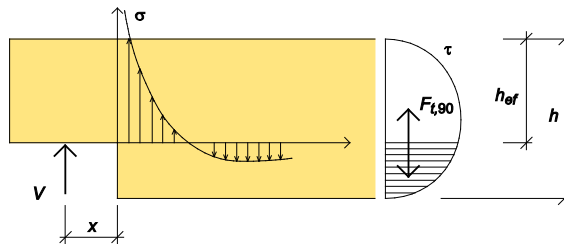
5.2 Päästään lovetun palkin vahvistaminen

Päästään lovetun palkin kestävyttä voidaan parantaa ulkoisella tai sisäisellä vahvistuksella. Poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen ja suorakulmaisesti lovetun palkin ($i = 0$, katso kuva 5-1) vahvistuksen mitoitusmenettely esitetään eurokoodi 5:n saksalaisen kansallisen liitteen mukaan (DIN EN 1995-1-1/NA). Perusajatus on että vahvistus siirtää koko syitä vastaan kohtisuoraan syntyviä vetojännityksiä vastaavan voiman, kun jännityshuippu aiheuttaa halkeaman etenemisen loven nurkasta mahdollista halkeamistasoa pitkin. Palkin omaa kestävyttä syitä vastaan kohtisuoraa vetoa vastaan ei oteta huomioon. Syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten resultantin $F_{t,90}$ laskennassa otetaan huomioon palkkiteorian mukaisesti loven kohdalla vaikuttavat leikkausjännitykset, katso kuva 5-2. Palkkiteorian mukaisten oletusten ja todellisen kestävyden yhteensovittaminen tehdään kertoimen 1,3 avulla, jolloin vetojännitysten summaksi saadaan

$$F_{t,90} = 1,3V \left(3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right) \quad 5-3$$

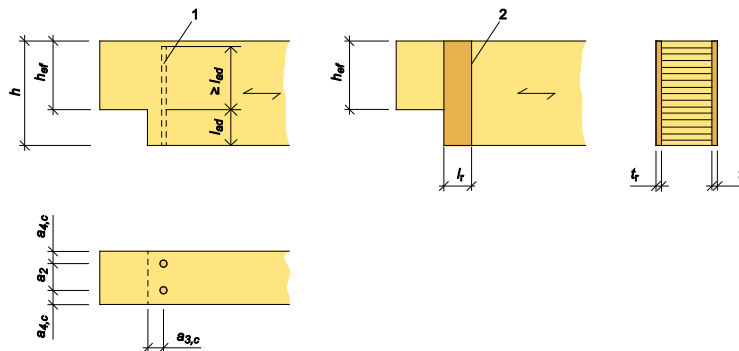
V	leikkausvoima
α	palkin tehollisen korkeuden ja koko korkeuden välinen suhde, $\alpha = h_{ef}/h$

Kerroin 1,3 antaa riittävän tarkan tuloksen kun x on pienempi kuin $h_{ef}/3$. Kun x on suurempi, voi yhtälö 5-3 johtaa epävarmalla puolella oleviin $F_{t,90}$ arvoihin. Tässä tapauksessa voidaan voimana $F_{t,90}$ käyttää koko leikkausvoiman arvoa V .



KUVA 5-2

Kaavamainen esitys loven nurkan jännitusjakautumasta ja syntyvästä vetovoimasta $F_{t,90}$.



KUVA 5-3

Palkin päässä olevan loven vahvistuksen yhteydessä käytettävät merkinnät (1) sisäinen vahvistus (2) ulkoinen vahvistus (DIN EN 1995-1-1\NA).

Päästään lovetun palkin sisäinen vahvistaminen

Sisäinen vahvistus voidaan tehdä liimaruuvein tai täyskierteisin puuruuvein. Liimaruuvissa oletetaan vaikuttavan tasan jakautunut leikkausjännitys τ_{ef} liimasauman muodostaman lieriön pinnalla. Leikkausjännityksen pitää täyttää ehto

$$\tau_{ef} = \frac{F_{t,90}}{n \cdot d_r \cdot \pi \cdot l_{ad}} \leq f_{k,1} \quad 5-4$$

$F_{t,90}$	syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso 5-3
n	liimaruuvien lukumäärä, vain yksi rivi palkin pituussuunnassa on toimiva
d_r	ruuvien ulkohalkaisija, $d_r \leq 20$ mm
l_{ad}	tehollinen ankkurointipituus, katso kuva 5-3
$f_{k,1}$	liimasauman leikkauslujuus, ominaisarvot $f_{k,1,k}$ on annettu taulukossa 5-1

TAULUKKO 5-1

Vahvistamiseen käytettävien liimaruuvien liimasauman ominaisleikkauslujuus. Arvoja saa käyttää, jos käytettävien liimaruuvien toiminta on kokeellisesti osoitettu (DIN EN 1995-1-1/NA).

Ruuvien tehollinen ankkurointipituus l_{ad} [mm]	≤ 250	$250 < l_{ad} \leq 500$	$500 < l_{ad} \leq 1000$
Liimasauman ominaisleikkauslujuus $f_{k,1,k}$ [MPa]	4,0	$5,25 - 0,005 l_{ad}$	$3,5 - 0,0015 l_{ad}$

Lisäksi on tarkistettava ruuvien aksiaalisen vedon kestävyys.

Vain yhden ruuvirivin oletetaan toimivan palkin pituussuunnassa. Ruuvien pienin pituus on $2l_{ad}$ ja suurimman ulkohalkaisijan d_r pitää olla alle 20 mm. Reunaetäisyyksien ja ruuvien keskinäisten etäisyyksien pitää täyttää ehdot

$$3d_r \leq a_2 \quad 5-5 \text{ (a)}$$

$$2,5d_r \leq a_{3,c} \leq 4d_r \quad 5-5 \text{ (b)}$$

$$2,5d_r \leq a_{4,c} \quad 5-5 \text{ (c)}$$

merkinnät on selitetty kuvassa 5-3. Koska syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on suurimmillaan lähellä loven nurkkaa, niin reunaetäisyyden $a_{3,c}$ pitää olla mahdollisimman pieni; minimietäisyyttä ei kuitenkaan saa alittaa. Vahvistuksen nettopinta-alaa pienentävä vaikutus pitää ottaa huomioon, jos rakennusosalla on vetorasitusta syiden suunnassa. Täyskierteisiä puuruuveja voidaan myös käyttää, ja ne on mitoitettava vetovoimalle $F_{t,90}$ sekä ruuvien ulosvedon että sen aksiaalisen vetovoiman kestävyyskannalta.

Vahvistuksen kestävyyskannalta pitää osoittaa heikentyneen poikkileikkauksen leikkausvoiman kestävyys yhtälön 5-1 mukaan kun $k_v = 1,0$. Loven nurkan jännityshuippu pitää myös ottaa huomioon käytettäessä sisäistä vahvistusta.

Päästään lovetun palkin ulkoinen vahvistaminen

Ulkoinen vahvistus voidaan tehdä liimaamalla palkin pintaan kertopuuta, vaneria tai puuta, tai puristamalla pintaan naulalevy. Käytettäessä päälle liimattua vahvistusta pitää osoittaa että liimasaumassa oleva tasan jakautunut leikkausjännitys τ_{ef} täyttää ehdon

$$\tau_{ef} = \frac{F_{t,90}}{2 \cdot (h - h_{ef}) \cdot l_r} \leq f_{k,2} \quad 5-6$$

$F_{t,90}$	syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso (5-3)
h, h_{ef}	palkin koko korkeus ja tehollinen korkeus, katso kuva 5-3
l_r	vahvistuksen pituus palkin suunnassa, katso kuva 5-3
$f_{k,2}$	liimasauman leikkauslujuus. DIN EN 1995:1-1-1/NA antaa ominaisarvon $f_{k,2,k} = 0,75$ MPa jos liimauksen toiminta on osoitettu.

Levyyn syntyvän vetojännityksen σ_t pitää täyttää ehto

$$\sigma_t = \frac{F_{t,90}}{2 \cdot t_r \cdot l_r} \leq \frac{f_t}{k_k} \quad 5-7$$

$F_{t,90}$	syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso (5-3)
t_r	vahvistuksen paksuus, katso kuva 5-3
l_r	vahvistuksen pituus palkin suunnassa, katso kuva 5-3
f_t	vahvistukseen käytetyn levyn vetolujuus voiman $F_{t,90}$ vaikutussuunnassa
k_k	kerroin joka ottaa huomioon jännitysjakautuman epätasaisuuden. DIN EN 1995:1-1/NA mukaan arvoa $k_k = 2,0$ saa käyttää ilman erityistä selvitystä.

Vahvistamiseen käytettävät levyt pitää liimata palkin molemmin puolin kuvan 5-3 mukaan. Levyn pituuden palkin pituussuunnassa pitää täyttää ehto

$$0,25 \leq l_r / (h - h_{ef}) \leq 0,5$$

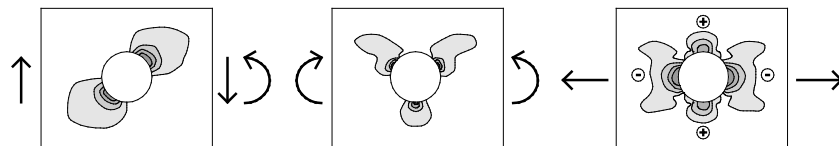
5-8

ja sen paksuuden t_r pitää olla vähintään 10 mm. Riittävä puristuspaine voidaan aikaansaada esimerkiksi tiheään naulatuin ankkurinauloin tai sopivan pitkin ruuvein. Naulalevyjä voidaan myös käyttää ulkoisena vahvistuksena, ja ne mitoitetaan edellä kuvatun mukaisesti.

Vahvistuksen kestävyys lisäksi pitää osoittaa heikentyneen poikkileikkauksen leikkausvoiman kestävyys yhtälön 5-1 mukaan kun k_v on 1,0. Loven nurkan jännityshuippua ei tarvitse erikseen ottaa huomioon käytettäessä edellä kuvatulla tavalla mitoitettua ulkoista vahvistusta.

5.3 Reiällinen palkki

Reikien tekemistä palkkeihin pitää välttää. Reikä muuttaa palkin poikkileikkausta äkillisesti, ja häiritsee taivutus- ja leikkausjännitysten siirtymistä rakenteessa ja pienentää kestävyyttä. Reiän läheisyyteen syntyy paikallisesti suuria syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä ja leikkausjännityksiä. Samankaltaisia jännityshuippuja syntyy myös akselinsa suunnassa puristetuissa ja vedetyissä sauvoissa joissa on reikiä. Epäedullisen jännityskentän muoto ja syntyvien jännityshuippujen suuruus on riippuvainen kuormitustavasta, reiän muodosta, suuruudesta ja sijainnista palkin korkeuden suhteen. Kaavamainen syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten jakautuma esitetään kuvassa 5-4 palkille, jossa on pyöreä reikä ja jota kuormitetaan eri tavoin. Halkeaman muodostuminen ja sen kasvu syiden suunnassa aiheuttavat hauraan murtumistavan.



KUVA 5-4

Kaavamainen esitys syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten jakautumasta. Vasemmalla reikä on alueella, missä leikkausjännitys on vallitseva, keskellä puhtaan taivutuksen alueella ja oikealla aksiaalisesti rasitetulla alueella.

Jos reikää ei voida välttää, niin sen muodon ja sijoituksen pitää olla yleisten suositusten mukainen. Reikä pitää mieluiten sijoittaa lähelle palkin neutraaliakselia, erityisesti jos se on alueella missä taivutusmomentti on vallitseva rasitusmuoto. Suorakulmaisten ja neliömaisten reikien asemesta suositellaan käytettäväksi pyöreitä reikiä. Reiän pinnat pitää käsitellä kosteusmuutosten aiheuttaman halkeiluriskin vähentämiseksi. Reiissä kulkevat kuumat putket ja tuuleuskanavat pitää eristää. Ulkona oleviin tai suurille kosteusvaihteluille alttiisiin rakenteisiin ei saa tehdä reikiä. Erityisesti pitää varoa reikien tekemistä rakenteisiin, joiden geometrinen muoto jo aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan, kuten harjapalkin harjan alueelle. Kehän nurkkiin tai kaareviin harjapalkkeihin tai muihin kaareviin rakennusosiin ei pidä tehdä lainkaan reikiä.

Suuriin rakenteisiin saa tehdä reikiä vain huolellisen harkinnan perusteella. Koska vetojännitykset syitä vastaan kohtisuoraan eivät rajoitu vain reiän välittömään läheisyyteen, niin reikien tekemistä lähelle toisiaan pitää välttää.

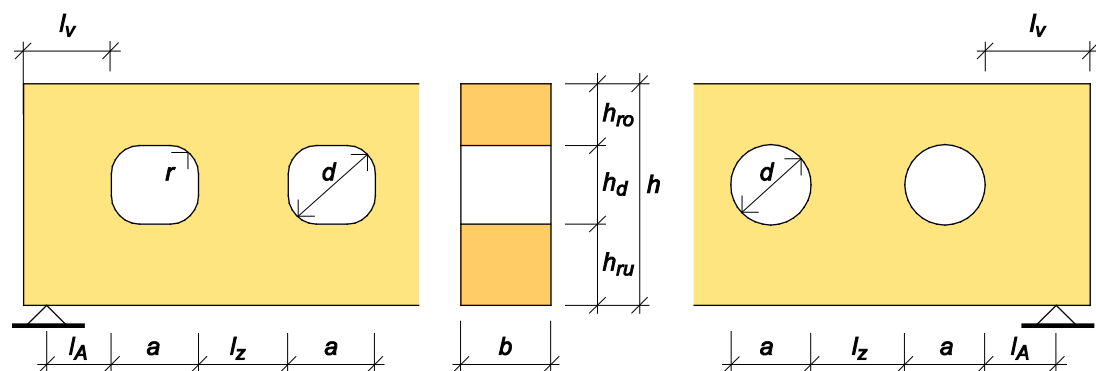
Vahvistamattomien reikien vaikutusta palkkien kestävyys on vaikea arvioida. Tutkimus ei ole toistaiseksi voinut tuottaa kaikkien hyväksymää ja luotettavaa mitoitusmenetelmää, joka perustuisi täysin selkeään ja rationaaliseen mekaaniseen analyysiin. Eurokoodi 5:n Saksan kansallinen liite (DIN EN 1995-1-1/NA) esittää kuitenkin vahvistamattomien reiällisten palkkien mitoitusyhtälöt. Menetelmä perustuu lineaarisen kimmoteorian mukaiseen jännitysanalyysiin ja tasapainotarkasteluihin, ja sen ovat alun perin esittäneet Kolb ja Epple (1985). Menettelyä on ajan myötä yksinkertaistettu. Kestävyys ja mitoitus liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi suositellaan, että reiälliset palkit aina vahvistetaan. Vahvistamattomia reiällisiä palkkeja saa käyttää vain käyttöluokissa 1 ja 2, mutta asianmukaisesti vahvistettuja reiällisiä palkkeja voidaan käyttää myös käyttöluokassa 3. Palkkien vahvistamista käsitellään luvussa 5.4.

Reikien kokoa ja sijoittelua koskevat säännöt esitetään taulukossa 5-2, merkinnät ovat kuvan 5-5 mukaiset. Neutraaliakselin lähellä olevan reiän vaikutusta voidaan tarkastella pienentyneen poikkileikkauksen avulla, jos sen halkaisija tai lävistäjä on $d \leq 50 \text{ mm}$ ja korkeus $h_d \leq 0,15h$.

TAULUKKO 5-2

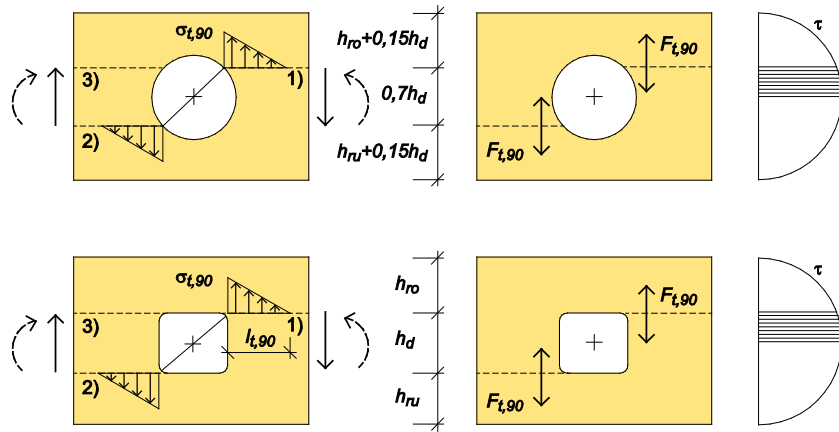
Neliömäisen tai pyöreän reiän kokoa ja sijoittelua koskevat säännöt DIN EN 1995-1-1/NA mukaan. Annettu suositus poikkeaa kulman pyöristyssäteen r ja reiän korkeuden h_d osalta, missä DIN EN 1995-1-1/NA:n mukaan r pitää olla vähintään 15 mm ja h_d ei saa olla suurempi kuin $0,15h$.

$l_v \geq h$	$l_z \geq 1,5h$ tai vähintään 300 mm	$l_A \geq 0,5h$	$h_{ro} \geq 0,35h$ $h_{ru} \geq 0,35h$	$a \leq 0,4h$	$h_d \leq 0,3h$	$r \geq 25 \text{ mm}$
--------------	---	-----------------	--	---------------	-----------------	------------------------



KUVA 5-5 Reiällisen palkin mitoituksessa tarvittavat suureet; neliömäinen reikä ja pyöreä reikä.

Yhtälön 5-9 mitoitusehto vertaa syitä vastaan kohtisuoraa vetojännitystä vastaavaan lujuuteen, jota muunnetaan palkin korkeuden huomioonottavalla kokeellisella kertoimella. Reiän molemmiin puolin syntyy vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan, mutta eri kohtiin jännityksen tyypin ja reiän muodon mukaan. Pyöreän ja neliömäisen reiän aiheuttaman halkeaman sijainti esitetään kuvassa 5-6. Vetojännitysten jakautuman oletetaan olevan kolmiomainen näissä kohdissa. Syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen suuruus määritetään syntyvien jännityksen resultantin $F_{t,90}$ avulla, joka puolestaan lasketaan leikkausvoimasta ja taivutusmomentista. Leikkausvoiman aiheuttava osuus vetovoimasta $F_{t,90,V}$ määritetään palkkiteorian mukaisten leikkausvoiman V aiheuttamien leikkausjännitysten summana neutraaliakselin ja halkeaman sijaintitasoon välisessä alueessa. Tämä esitetään kaavamaisesti kuvassa 5-6. Momentin M aiheuttama komponentti $F_{t,90,M}$ määritetään kokeellisesti.



KUVA 5-6

Neliömäisten ja pyöreiden reikiä aiheuttama halkeaminen. Tasot 1) ja 2) koskevat reikiä jotka ovat leikkausvoiman hallitsemalla alueella ja tasot 1) ja 3) koskevat reikiä jotka ovat positiivisen taivutusmomentin hallitsemalla alueella.

Mitoitusehto voidaan standardia DIN EN 1995-1-1/NA mukaillen muotoilla syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen $\sigma_{t,90}$ ja vastaavan lujuuden $f_{t,90}$ avulla

$$\sigma_{t,90} = \frac{F_{t,90}}{0,5l_{t,90}b} \leq k_{t,90}f_{t,90} \quad 5-9$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r} \quad 5-10$$

Yhtälössä 5-10 käytetään pyöreille rei'ille h_d :n arvona $0,7h_d$ ja h_r :n arvona neliömäisille rei'ille

$$h_r = \min \begin{cases} h_{ru} \\ h_{ro} \end{cases} \quad 5-11$$

pyöreille rei'ille

$$h_r = \min \begin{cases} h_{ru} + 0,15h_d \\ h_{ro} + 0,15h_d \end{cases} \quad 5-12$$

Mitta $l_{t,90}$ joka on oletetun kolmiomaisen syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten jakautuman pituus on neliömäisille rei'ille

$$l_{t,90} = 0,5(h_d + h) \quad 5-13$$

pyöreille rei'ille

$$l_{t,90} = 0,35h_d + 0,5h \quad 5-14$$

Palkin korkeuden aiheuttama lujuuden pienentyminen on (h :n yksikkö on mm)

$$k_{t,90} = \min \begin{cases} 1 \\ (450/h)^{0,5} \end{cases} \quad 5-15$$

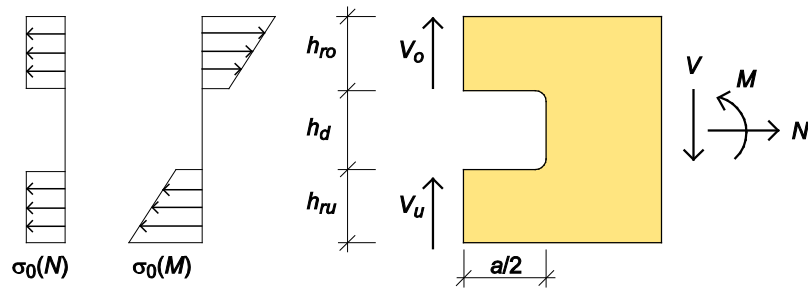
Mitoituksessa on yleensä tärkeintä tarkastella syitä vastaan kohtisuoria jännityksiä. Sen lisäksi syntyy erityisesti suorakulmaisen reiän läheisyydessä leikkausjännityshuippuja. Eurokoodi 5:n Saksan kansallinen liite ei esitä miten nämä otetaan huomioon. Blaß & Bejtka (2003) ovat osoittaneet, että kulmassa syntyvän leikkausjännityksen maksimiarvona voidaan käyttää

$$\tau_{corner} \approx \kappa_{corner} \cdot \frac{3V}{2bh} \quad 5-16 (a)$$

$$\kappa_{corner} = 1,84 \cdot \frac{1 + a/h}{1 - h_d/h} \cdot \left(\frac{h_d}{h} \right)^{0,2} \quad 5-16 (b)$$

κ_{corner} ilmaisee suurimman leikkausjännityksen suhteen tavallisen palkkiteorian mukaan laskettuun reiättömän palkin leikkausjännitykseen. Tarkka arvo on riippuvainen reiän pyöristyssäteestä – pienempi pyöristyssäde kasvattaa jännityshuippua. Tietyillä reikiä muodoilla ja sijainneilla sekä kuormitustapauksilla yhtälö 5-16 voi johtaa epävarmalla puolella oleviin arvoihin.

Pienentyneen poikkileikkauksen kestävyys tarkistetaan taivutusmomentin M aiheuttaman syiden suuntaisen normaalijännityksen σ_o suhteen (mahdollinen normaalivoima N otetaan huomioon). Suorakulmaisille rei'ille pitää ottaa huomioon, että leikkausvoimat V_o ja V_u lisäävät taivutusmomenttia; voimien momenttivarsi on $a/2$ (katso kuva 5-7).



KUVA 5-7

Reiällisen palkin syiden suuntaiset normaalijännitykset.

5.4 Reiällisen palkin vahvistaminen

Yleensä reiälliset palkit vahvistetaan siksi, että reikä heikentää palkkia oleellisesti ja vahvistamattomien palkkien laskentamenetelmät ovat epävarmoja. Reiällisten palkkien vahvistusten mitoitusmenetelmät esitetään seuraavassa eurokoodi 5:n saksalaisen kansallisen liitteen mukaan (DIN EN 1995-1-1/NA). Mitoitusmenettely on analoginen lovettujen palkkien vahvistuksen luvussa 5.2 esitetyn mitoitusmenettelyn kanssa. Perusajatus on, että vahvistus siirtää koko syitä vastaan kohtisuoraan syntyviä vetojännityksiä vastaavan voiman, kun jännityshuippu aiheuttaa halkeaman etenemisen loven nurkasta mahdollista halkeamistasoa pitkin. Palkin omaa kestävyyttä syitä vastaan kohtisuoraan vetoa vastaan ei oteta huomioon. Syitä vastaan kohtisuora vetovoima $F_{t,90}$ voidaan arvioida yhtälön 5-10 mukaisesti ja halkeamisen oletetaan tapahtuvan kuvan 5-6 mukaisia tasoja pitkin. Vahvistetun palkin reiän kokoa ja sijaintia koskevat säännöt on annettu taulukossa 5-3 kuvan 5-5 mukaisin merkinnöin.

TAULUKKO 5-3

Vahvistetun palkin neliömäisen tai pyöreän reiän kokoa ja sijoittelua koskevat säännöt DIN EN 1995-1-1/NA mukaan. Annettu suositus poikkeaa kulman pyöristyssäteestä r ja reiän korkeuden h_d osalta, missä DIN EN 1995-1-1/NA:n mukaan r pitää olla vähintään 15 mm ja h_d ei saa olla suurempi kuin $0,30h$.

$l_v \geq h$	$l_z \geq 1,0h$ tai vähintään 300 mm	$l_A \geq 0,5h$	$h_{ro} \geq 0,25h$ $h_{ru} \geq 0,25h$	$a \leq 1,0h$ $a \leq 2,5h_d$	$h_d \leq 0,4h$	$r \geq 25 \text{ mm}$
--------------	---	-----------------	--	----------------------------------	-----------------	------------------------

Reiällisen palkin sisäinen vahvistaminen

Sisäinen vahvistus voidaan tehdä liimaruuvein tai täyskierteisin puuruuvein. Palkin vahvistamisessa pitää ottaa huomioon kaikki sen jännitystilän mukaiset, kuvassa 5-6 esitetyt mahdolliset halkeaman sijainnit. Sisäistä vahvistusta käytettäessä pitää osoittaa reiän molemmilla puolilla, että liimasaumaan syntyvä tasan jakautunut leikkausjännitys τ_{ef} täyttää ehdon

$$\tau_{ef} = \frac{F_{t,90}}{n \cdot d_r \cdot \pi \cdot l_{ad}} \leq f_{k,1} \quad 5-17$$

$F_{t,90}$	syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso 5-10
n	liimaruuvien lukumäärä, vain yksi rivi palkin pituussuunnassa on toimiva
d_r	ruuvien ulkohalkaisija, $d_r \leq 20 \text{ mm}$
$f_{k,1}$	liimasauman leikkauslujuus, ominaisarvot $f_{k,1,k}$ on annettu taulukossa 5-1
l_{ad}	mitta h_{ru} tai h_{ro} neliömäisille rei'ille, katso kuva 5-8

l_{ad} mitta $h_{ru}+0,15h_d$ tai $h_{ro}+0,15h_d$ pyöreille rei'ille, katso kuva 5-8

Lisäksi on tarkistettava ruuvien aksiaalisen vedon kestävyys.

Vain yhden ruuvirivin oletetaan toimivan palkin pituussuunnassa. Ruuvien pienin pituus on $2l_{ad}$ ja suurin ulkohalkaisija d_r ei saa ylittää 20 mm. Reunaetäisyyksien ja ruuvien keskinäisten etäisyyksien pitää täyttää ehdot

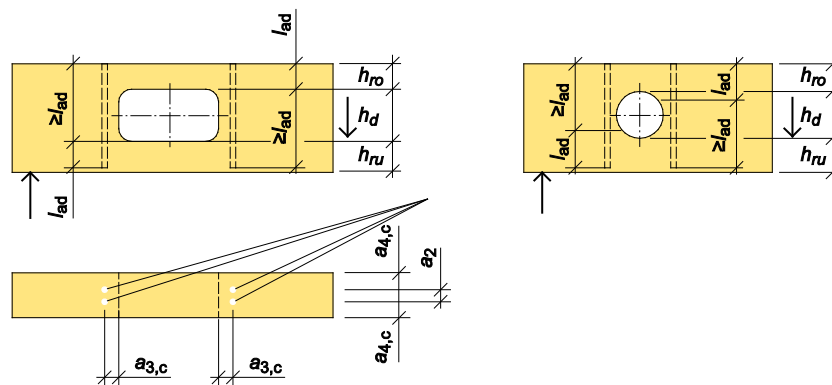
$$3d_r \leq a_2 \quad 5-18 (a)$$

$$2,5d_r \leq a_{3,c} \leq 4d_r \quad 5-18 (b)$$

$$2,5d_r \leq a_{4,c} \quad 5-18 (c)$$

merkinnät on selitetty kuvassa 5-8. Koska syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on suurimmillaan lähellä loven nurkkaa, niin reunaetäisyyden $a_{3,c}$ pitää olla mahdollisimman pieni; minimietäisyyttä ei kuitenkaan saa alittaa. Täyskierteisiä puuruuveja voidaan myös käyttää ja ne on mitoitettava vetovoimalle $F_{t,90}$ sekä ruuvien ulosvedon että sen aksiaalisen vetovoiman kestävyden kannalta.

Lisäksi pitää ottaa huomioon neliömäisen reiän nurkassa syntyvä jännityshuippu luvun 5.3 mukaan. Reiän keskellä pitää tarkistaa pienentyneen poikkileikkauksen syiden suuntaisten jännitysten kestävyys, katso luku 5.3.



KUVA 5-8

Reiällisen palkin sisäisen vahvistuksen mitoituksessa käytettävät merkinnät. Halkeamistasot vastaavat tilannetta, missä leikkausjännitys on vallitseva.

Reiällisen palkin ulkoinen vahvistaminen

Ulkoinen vahvistus voidaan tehdä liimaamalla palkin pintaan kertopuuta tai vaneria. Mitoitettaessa pitää osoittaa että liimasaumassa oleva tasan jakautunut leikkausjännitys τ_{ef} täyttää ehdon

$$\tau_{ef} = \frac{F_{t,90}}{2 \cdot a_r \cdot h_{ad}} \leq f_{k,2} \quad 5-19$$

$F_{t,90}$ syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso 5-10

a_r vahvistukseen käytetyn levyn pituus, katso kuva 5-9

h_{ad} mitta h_1 neliömäisille rei'ille, h_1 katso kuva 5-9

h_{ad} mitta $h_1 + 0,15h_d$ pyöreille rei'ille, h_1 ja h_d katso kuva 5-9
 $f_{k,2}$ liimasauman leikkauslujuus. DIN EN 1995:1-1-1/NA antaa ominaisarvon $f_{k,2,k} = 0,75$ MPa jos liimauksen toiminta on kokeellisesti osoitettu.

Levyyn syntyvän vetojännityksen σ_t pitää täyttää ehto

$$\sigma_t = \frac{F_{t,90}}{2 \cdot t_r \cdot a_r} \leq \frac{f_t}{k_k} \quad 5-20$$

$F_{t,90}$ syitä vastaan kohtisuora vetovoima, katso 5-10
 t_r vahvistuksen paksuus, katso kuva 5-9
 a_r vahvistukseen käytetyn levyn tehollinen pituus, katso kuva 5-9
 f_t vahvistukseen käytetyn levyn vetolujuus voiman $F_{t,90}$ vaikutussuunnassa
 k_k kerroin joka ottaa huomioon jännitysjakautuman epätasaisuuden. DIN EN 1995:1-1-1/NA mukaan arvoa $k_k = 2,0$ saa käyttää ilman erityistä selvitystä.

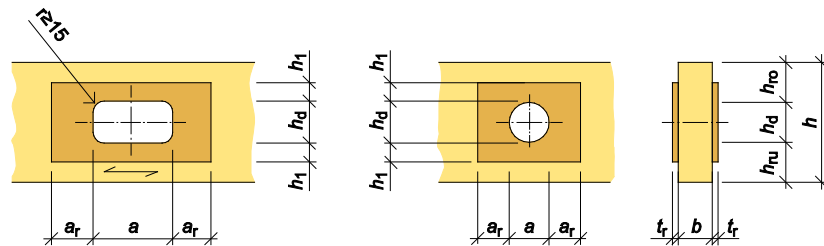
Vahvistamiseen käytettävät levyt pitää liimata palkin molemmin puolin kuvan 5-9 mukaan. Levyjen mittojen pitää täyttää ehdot

$$0,25a \leq a_r \leq 0,3(h_d + h) \quad 5-21 (a)$$

$$h_1 \geq 0,25a \quad 5-21 (b)$$

Levyn paksuuden t_r pitää olla vähintään 10 mm. Riittävä puristusaine voidaan aikaansaada esimerkiksi tiheään naulatuin ankkurinaulojin tai sopivan pitkin ruuvein.

Reiän keskellä pitää tarkistaa heikentyneen poikkileikkauksen syiden suuntaisten jännitysten kestävyys, katso luku 5.3. Reiän nurkan jännityshuippua ei tarvitse erikseen ottaa huomioon käytettäessä edellä kuvatulla tavalla mitoitettua ulkoista vahvistusta.



KUVA 5-9

Reiällisen palkin ulkoisen vahvistuksen mitoituksessa käytettävät merkinnät.

6	KÄYTTÖRAJATILA	2
6.1	Toiminnalliset vaatimukset	2
6.2	Staattiset muodonmuutokset	3
	Muodonmuutokset	4
	Kuormitusajan ja käyttöluokan vaikutus	5
	Kuormitusyhdistelmät	7
	Muodonmuutosten rajoittaminen	8
	Muodonmuutosten aiheuttamien ongelmien välttäminen	9
	Erilaisten liimapuurakentiedien taipumia	10
6.3	Värähtelyt	15
	Dynaamiset vaikutukset	16
	Liimapuurakenteisten lattioiden värähtelyn rajoittaminen	17
	Värähtelyn aiheuttamien ongelmien välttäminen	20
6.4	Kosteusvaihteluiden aiheuttamat muodonmuutokset	20

6 KÄYTTÖRAJATILA

Murtorajatilan ylittäminen voi johtaa rakenteen tai sen osan kestävyysmenettämiseen mutta käyttörajatilan ylittämisellä on vain harvoin sellaisia seuraamuksia. Käyttörajatila liittyy rakennuksen toimintaan ja ulkonäköön sekä käyttömukavuuteen, mitkä myös monista syistä ovat tärkeitä ottaa huomioon mitoituksessa. Käyttörajatilatarkasteluun tarkoituksena on

- säilyttää rakennuksen tai rakennusosan ulkonäkö ja toiminta hyväksytyissä rajoissa
- estää halkeamisherkkien pintamateriaalien, kuten rappauksen, tapettien ja maalauksen vaurioitumista
- estää kattorakenteiden ylisuuria taipumia niin ettei muodostu sadevesilammikoita jotka voivat aiheuttaa katon vuotamista
- rajoittaa virumisen vaikutuksia
- lisätä tarvittaessa rakenteen jäykkyyttä etteivät värähtelyt huononna käyttömukavuutta.

6.1 Toiminnalliset vaatimukset

Rakenteen taipumia ja muita muodonmuutoksia pitää rajoittaa ettei niistä aiheudu käytön aikaista vahinkoa ja haittaa. Rakennuksella pitää olla riittävä kestävyys, jotta se kantaa riittävällä varmuudella sille elinaikanaan tulevat kuormat. Murtorajatilan perusteella mitoitettujen rakenteiden ovat usein verrattain hoikkia, mikä tarkoittaa sitä että niillä voi olla taipumus suuriin muodonmuutoksiin. Käyttörajatilan vaatimuksilla on kuitenkin usein ratkaiseva merkitys etenkin keveiden rakenteiden, kuten puun ja liimapuun mitoituksiin. Siksi on tärkeää ennakoida tulevat muodonmuutokset riittävän tarkasti ja muotoilla vaatimusrajat oikein. Vaikeutena on kuitenkin että sekä tieto vaatimuksista että muodonmuutosten arviointimenetelmien hallinta on usein puutteellista.

Pitkäaikaiset kuormat aiheuttavat puurakenteille suuria muodonmuutoksia. Koska puu on ortotrooppinen aine, niin erilaiset kuormitustapaukset aiheuttavat erilaisia vaikutuksia. Liimapuurakenteiden muodonmuutokseen vaikuttaa myös kosteuden muutokset. Sekä viruminen että kosteusolosuhteiden vaikutus pitää ottaa huomioon liimapuurakenteiden käyttörajatilatarkasteluissa.

Asiakkaan ja rakentajan pitäisi sopia käyttörajatilan vaatimuksista keskenään mutta nykyisin ne asetetaan määräyksissä. Määräykset muodostavat joka tapauksessa käyttörajatilamitoituksen perustan, kun ne antavat yleiset periaatteet kuormille, materiaaliominaisuuksille ja laskentamenetelmille. Liian suuret taipumat voivat aiheuttaa kantavien ja ei-kantavien rakenteiden vaurioita, haitata käyttöä ja aiheuttaa erilaisia rakennuksen käyttäjän haitallisiksi kokemia ilmiöitä.

Rakennusosan taipuma ei yleensä johda sen kantokyvyn menettämiseen, paitsi jos rakennusosa menettää stabiiliutensa taipuman vuoksi. Jos useammalla rakennusosalla on suurehko taipuma tai jos yhden osan muodonmuutos johtaa muiden osien suuriin liikkeisiin, voi rakenteen toiminta muuttua. Pahimmillaan koko rakenne muuttuu epästabiiliksi. Heijastusvaikutukset voivat olla myös käyttäjän kannalta ei-toivottuja. Muodonmuutosanalyysissä ei pitäisikään tarkastella vain yhden yksittäisen rakennusosan toimintaa, vaan koko rakennejärjestelmän ja sen liitosten käyttäytymistä. Tällainen analyysi on kuitenkin melko työläs ja tehdään vain erikoistapauksissa.

Muodonmuutokset voivat haitata rakennuksen käyttöä monin tavoin. Seurauksena voi olla esimerkiksi riittämätön katon kaltevuus tai vaikeus avata ovia ja ikkunoita. Taipuma voi aiheuttaa ongelmia kuntosaleissa tai tiloissa missä asetetaan suuria vaatimuksia lattiapintojen vaakasuoruudelle. Käyttörajatilatarkastelun tarkoituksena on myös estää kevyiden väliseinien muuttuminen kantaviksi.

Rakenteet joiden taipumat ovat suuret näyttävät rumilta ja ne tuntuvat vaarallisilta. Vaikka nämä kokemukset ovat subjektiivisia ja vaikka rakenteen kantokyky ei ole vaarantunut tai sen elinikä lyhentynyt, niin taipumia on kuitenkin syytä rajoittaa käyttäjien luottamuksen säilyttämiseksi. Erityisesti tämä koskee pitkäaikaisia taipumia. Tilapäisten kuormitushuippujen aiheuttamat taipumat ovat lyhytaikaisia ja ohimeneviä.

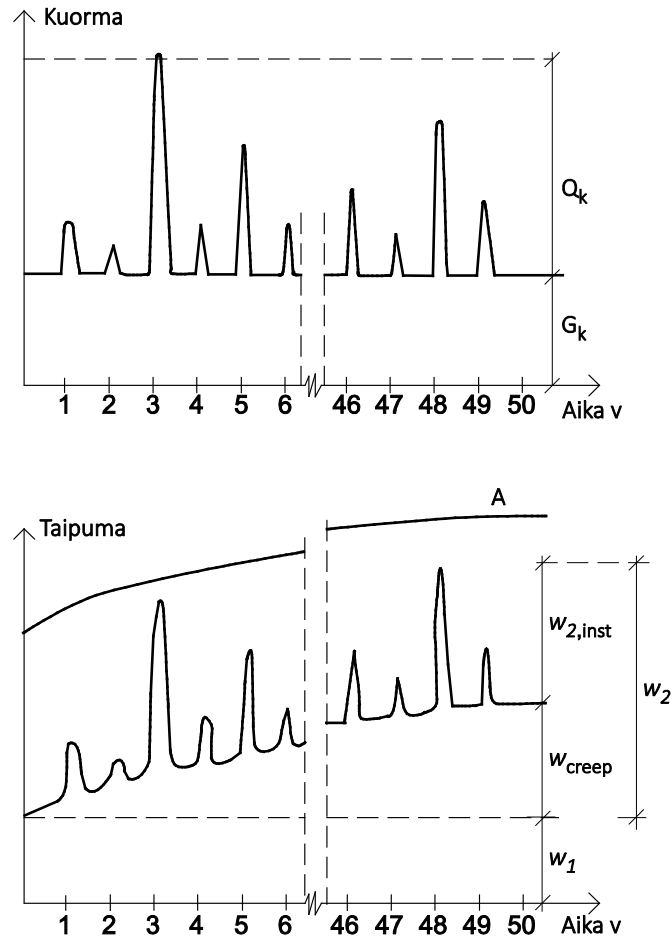
Muodonmuutosten rajoittaminen on siten monista syistä tarpeellista. Käytännön mitoituksessa on tarkoituksenmukaista määritellä kaksi luonteeltaan erilaista syytä rajoittaa taipumia, pysyvien vaurioiden välttäminen ja halutun ulkonäön ja yleisen käytettävyyden varmistaminen. Suunnittelija voi yksittäisessä mitoitusilanteessa viitata aina jompaankumpaan näistä.

Käytettävyyteen liittyvät ongelmat sisältävät myös eri syistä aiheutuvat värähtelyt. Askelten tai erilaisten koneiden käynnin aiheuttamat värähtelyt voivat aiheuttaa epämukavuutta ihmisille, mutta ne voivat myös aiheuttaa haittaa herkille laitteille ja rakenteen toiminnalle. Näissä tapauksissa vaatimukset ovat jopa monimutkaisemmat kuin staattista taipumaa tarkasteltaessa. Usein haittaa koskevat tarkastelut ovat samanlaisia kuin staattisen taipuman tapauksessa, sillä rakennuksen käyttö on ratkaisevaa sille millaisia värähtelyjä voidaan sallia.

6.2 Staattiset muodonmuutokset

Useimpien rakenteiden kuormitus muodostuu pysyvästä osasta G_i ja muuttuvasta osasta Q_i . Käytön aikainen taipuma vaihtelee paljon puu- ja liimapuurakenteissa, missä muuttuvien kuormien osuus on suurempi.

Kuva 6-1 esittää pysyvän kuorman G ja lumikuorman Q kuormittaman palkin taipumaa ajan funktiona. Kokonaistaipuma voidaan jakaa välittömästi kuormituksen alkaessa tapahtuvaan pysyvän taipuman aiheuttamaan osaan w_1 ja osaan w_2 joka vaihtelee ajan mukana. Vaihteleva osa w_2 muodostuu palautuvasta osasta $w_{2,inst}$, joka esiintyy vain muuttuvan kuorman vaikuttaessa, ja jatkuvasti kasvavasta virumasta, joka on käytännössä palautumaton. Kuvassa 6-1 esitettyjä lyhytaikaisia kuormitushuippuja esiintyy useimmissa rakennuksissa, ja ne aiheutuvat lumikuormasta ja liikkuvista hyötykuormista.



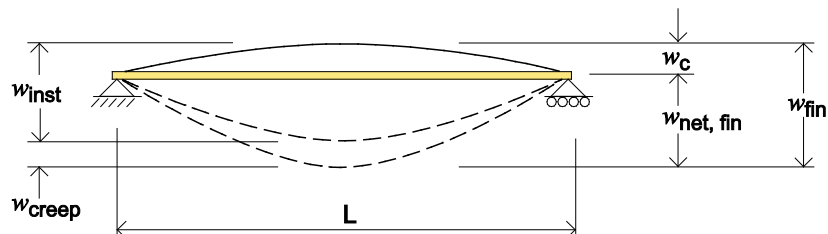
KUVA 6-1

Taipuman vaihtelu ajan funktiona kun palkkia kuormittavat ylemmän kuvan mukaiset pysyvät ja muuttuvat kuormat. Käyrä A esittää sitä virumaa mikä syntyi, jos kuorma $G_k + Q_k$ kuormittaisi koko ajan palkkia.

Muodonmuutokset

Kuva 6-2 esittää kuinka liimapuupalkin kuormitus jaetaan eri osiin. Liimapuupalkilla voi olla esikorotus w_c . Palkin lyhytaikaiset kuormitushuiput aiheuttavat suuren lyhytaikaisen taipuman w_{inst} . Tällainen taipuma voi esiintyä milloin tahansa palkin käyttöaikana.

Osa kuormasta vaikuttaa pidemmän ajan ja aiheuttaa taipuman asteittaisen kasvun w_{creep} . Palkin pitkäaikainen taipuma $w_{net,fin}$ määritetään laskemalla esikorotuksen w_c ja osataipumien w_{inst} ja w_{creep} summa. Taipumia laskettaessa käytetään käyttörajatilassa kimmokertoimen ja liukukertoimen keskiarvoja.



KUVA 6-2

Taipumien määritelmät.

Taivutetun rakenteen taipumat aiheutuvat taivutusmomentin lisäksi leikkausvoimista. Leikkausmuodonmuutoksen osuus on riippuvainen rakennusosan kimmokertoimen E ja liukukertoimen G suhteesta ja palkin korkeuden ja jännevälin suhteesta. Tarkastellaan keskeltä jänneväliä pistekuormalla kuormitetun yksiaukkoisen palkin taipumaa jännevälin keskellä. Palkin korkeus on h ja jänneväli L . Leikkausvoiman aiheuttaman alkutaipuman, $w_{inst,s}$, ja taivutusmomentin aiheuttaman alkutaipuman, $w_{inst,m}$, suhde on

$$\frac{w_{inst,s}}{w_{inst,m}} = 1,2 \frac{E}{G} \left(\frac{h}{L} \right)^2$$

6-1

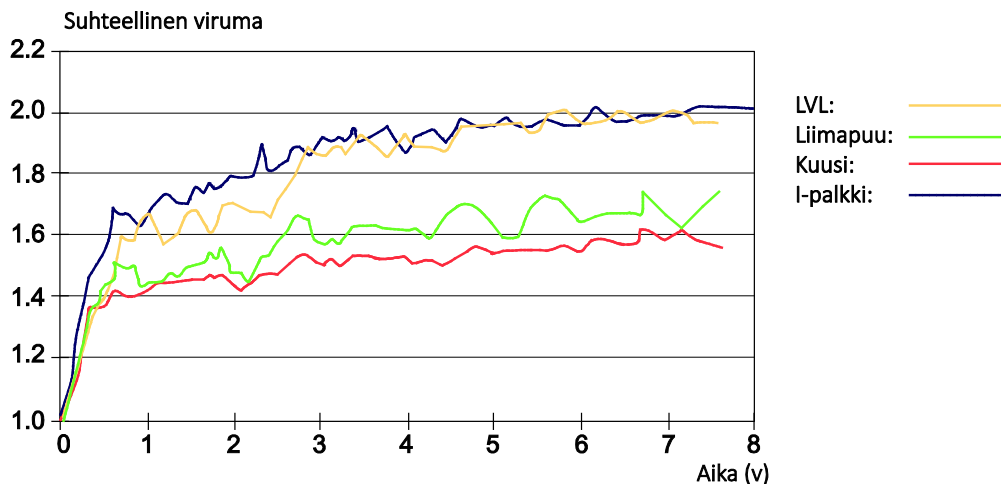
Liimapuulle suhde E/G on noin 20 ja käytännössä h/L on noin 0,1...0,05, mistä seuraa että leikkausvoiman aiheuttama taipuma on noin 5...20 % taivutusmomentin aiheuttamasta taipumasta. Liimapuurakenteiden mitoituksessa on siis aiheellista ottaa huomioon leikkausvoiman aiheuttama taipuma.

Rakenteiden kokoonpuristuminen on eräs muodonmuutoksen muoto. Tätä tarkastellaan usein murtorajatilana ja eurokoodi 5:n mukaan osoitetaan että puristuslujuus kohtisuoraan syiden suuntaa vastaan ei ylitä tukipinnassa. Käytännössä tarkastelu on käyttörajatilanomainen, koska pikemminkin on kysymys liitoskohdan muodonmuutoksesta kuin sen murtumisesta. Kerrostalojen alimmissa kerroksissa ja perustustasossa voi esiintyä hyvin suuria voimia. Puristus syitä vastaan kohtisuoraan voi aiheuttaa varsin suuria muodonmuutoksia, erityisesti jos niitä verrataan vastaavan jännityksen aiheuttamiin muodonmuutoksiin syiden suunnassa.

Kuormitusajan ja käyttöluokan vaikutus

Puun ja puutuotteiden virumisella tarkoitetaan muodonmuutoksen kasvamista ajan mukana, ja siihen vaikuttavat monet eri tekijät. Erityisesti viruman suuruuteen vaikuttaa kosteussuhde; mitä kosteampaa puu on sitä enemmän se viruu.

Käytännössä myös ympäristön kosteuden vaihtelu vaikuttaa virumisen määrään, katso kuva 6-3. Kosteussuhteen vaihtelut aiheuttavat suuremman virumisen kuin tasainen suuri kosteussuhde, vaikka kosteussuhteen keskiarvo olisi pieni. Siksi on tärkeää yrittää arvioida kosteussuhteen vaihtelu rakenteen elinaikana.



KUVA 6-3

Suhteellinen viruma vakioilmastossa (suhteellinen viruma on palkin taipuman suhde sen alkutaipumaan) ajan funktiona. Jännitys 2 N/mm². Ranta-Maunus & Korttesmaa, 2000.

Virumaan vaikuttaa kosteusvaihteluiden lisäksi myös kuorman vaihtelu rakenteen elinaikana, mikä myös pitää ottaa huomioon.

Kun puuta kuormitetaan syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, niin muodonmuutos on periaatteessa samanlainen kuin palkin muodonmuutos. Lisäksi on kuitenkin otettava huomioon että puun kuivuessa sen kutistuminen syitä vastaan kohtisuoraan on huomattavasti suurempi kuin syiden suuntainen kutistuminen, mikä on häviävän pieni. Viruminen syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa on myös suurempi kuin taivutetun palkin taipuman kasvu.

Vakiokuormalla kuormitetun rakenteen pitkäaikainen taipuma (w_{creep}) on riippuvainen alkutaipumasta (w_{inst}) seuraavasti

$$w_{creep} = k_{def} w_{inst} \quad 6-2$$

k_{def} on virumaluku, jonka arvo on riippuvainen kuormitetusta materiaalista, sen kosteussuhteesta ja kosteussuhteen vaihtelusta.

Yllä olevat ehdot täyttävien rakenteiden lopputaipuma w_{fin} on

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = w_{inst} (1 + k_{def}) \quad 6-3$$

Lopputaipuma on siten pysyvistä kuormista, G

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} + w_{creep,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad 6-4$$

muuttuvista kuormista, Q_i

$$w_{fin,Q_i} = w_{inst,Q_i} + w_{creep,Q_i} = w_{inst,Q_i} (1 + \psi_2 k_{def}) \quad 6-5$$

k_{def} on riippuvainen käyttöluokasta. Viruminen on myös riippuvainen kuorman vaikutusajasta, tai toisin sanoen kuorman pysyväksi muunnetusta arvosta, mikä otetaan huomioon kertoimella ψ_2 (vakiokuormalle ψ_2 on 1). k_{def} ja ψ_2 -arvot on määriteltä kokeellisesti, mutta epävarmuus on kuitenkin aika suuri. k_{def} kasvaa kun ympäristön suhteellinen kosteus kasvaa. ψ_2 kasvaa kun kuorman vaikutusajan osuus rakenteen elinajasta kasvaa. On tärkeää huomata etteivät vain suurimmat tai keskimääräiset ilman suhteellisen kosteuden arvot ole kiinnostavia, vaan suhteellisen kosteuden vaihteluilla on myös merkitystä. Jos suuria kosteuden vaihteluita on odotettavissa, on syytä soveltaa ankarampaa käyttöluokkaa kuin pelkästään suurimman kosteuden mukaan arvioituna.

Lopputaipuman laskennassa käytetään samaa kuormaa kuin alkutaipuman laskennassa. Virumisen vaikutus otetaan huomioon pienentämällä kimmokerrointa

$$E_{fin} = \frac{E}{1 + k_{def}} \quad 6-6$$

E_{fin}	kimmokertoimen lopullinen keskiarvo
E	kimmokertoimen keskiarvo
k_{def}	puun tai puutuotteen virumaluku

Kuormitusyhdistelmät

Käytettävät kuormien arvot pitää määritellä laskettaessa taipumaa edellisen kohdan mukaisesti. Käyttörajatilassa on määritelty kolme eri kuormitusyhdistelmää, joista valitaan tarkoitukseen sopivin. Kuormitusyhdistelmät annetaan yleisessä muodossa ja niihin kuuluu yksi tai useampia muuttuvia kuormia $Q_{k,i}$.

Ominaisarvojen yhdistelmä määritellään yhtälöllä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad 6-7$$

$\psi_{0,i} Q_{k,i}$ on muuttuvan kuorman $Q_{k,i}$ ominaisyhdistelyssä käytettävä arvo. Tällä yhdistelmällä saadaan suurehko kuorman arvo ja sitä käytetään yleensä lyhytaikaista taipumaa $w_{2,inst}$ laskettaessa.

Tavallinen yhdistelmä määritellään yhtälöllä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad 6-8$$

$\psi_{1,1} Q_{k,1}$ on muuttuvan kuorman $Q_{k,1}$ tavallisesti toistuva arvo ja $\psi_{2,i} Q_{k,i}$ on muuttuvan kuorman $Q_{k,i}$ pysyväksi muunnettu arvo. Tätä yhdistelmää käytetään arvioitaessa palautuvia muodonmuutoksia; kuormitusyhdistelmä toistuu tietyin väliajoin, mutta muodonmuutos pienenee kun kuorma taas pienenee.

Pysyväksi muunnettu yhdistelmä määritellään yhtälöllä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad 6-9$$

$\psi_{2,i} Q_{k,i}$ on muuttuvan kuorman $Q_{k,i}$ pysyväksi muunnettu arvo. Tätä yhdistelmää käytetään pitkäaikaisen muodonmuutoksen (viruman vaikutuksen) arviointiin.

Sovellettaessa yllä olevia yhtälöitä 6-7, 6-8 ja 6-9 saadaan lopulliseksi muodonmuutokseksi pysyvistä kuormista, G

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} + w_{creep,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad 6-10$$

määräävästä muuttuvasta kuormasta, Q_1

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} + w_{creep,Q_1} = w_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) \quad 6-11$$

samanaikaisesti vaikuttavista muista muuttuvista kuormista, Q_i

$$w_{fin,Q_i} = w_{inst,Q_i} + w_{creep,Q_i} = w_{inst,Q_i} (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def}) \quad 6-12$$

Lopullinen yhtälö pysyvän kuorman ja sen kanssa samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien (n kappaletta) aiheuttamalle taipumalle on

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + \sum_{i=2}^n w_{fin,Q_i} \quad 6-13$$

Tämä kuormitusyhdistelmä antaa suuria lopullisen muodonmuutoksen arvoja, koska määräävän muuttuvan kuorman aiheuttama muodonmuutos lasketaan kuorman ominaisyhdistelyssä käytettävästä arvosta. Tämä laskentatapa on syytä valita tarkasteltaessa suuren kuorman aiheuttamia lyhytaikaisia muodonmuutoksia, joista voi seurata pysyviä vaurioita.

Jos muodonmuutostarkastelulla halutaan arvioida ulkonäköä tai käytettävyyttä, voi olla sopivampaa käyttää muodonmuutosten laskemisessa yhtälön 6-8 tavallista kuormitusyhdistelmää tai yhtälön 6-9 pysyväksi muunnettua kuormitusyhdistelmää. Muuttuvien kuormien aiheuttaman lopullisen taipuman laskennassa käytettäviä yhtälöitä 6-11 ja 6-12 pitää näissä tapauksissa hiukan korjata. Jos lähtökohtana käytetään esimerkiksi tavallista kuormitusyhdistelmää saadaan taipuma määräävästä muuttuvasta kuormasta, Q_1

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} + w_{creep,Q_1} = w_{inst,Q_1} (\psi_{1,1} + \psi_{2,1} k_{def}) \quad 6-14$$

taipuma samanaikaisesti vaikuttavista muuttuvista kuormista, Q_i

$$w_{fin,Q_i} = w_{inst,Q_i} + w_{creep,Q_i} = w_{inst,Q_i} (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} k_{def}) \quad 6-15$$

Muodonmuutosten rajoittaminen

Toiminnallisin tai visuaalisin perustein voidaan valita mikä tahansa taipumaraja. Kokemus on esimerkiksi osoittanut, että jos palkin taipuma ei ylitä arvoa $L/300$ niin palkin ulkonäköä pidetään hyväksyttävänä. Tätä arvoa käytetäänkin usein käyttörajatilamitoituksessa. Käyttörajatila-tarkastelua tehtäessä pitää harkita miksi se tehdään, minkälaisille rakenteille ja mille kuormille. Esimerkiksi esikorotetun palkin tapauksessa taipumarajaa sovelletaan vain hyötykuorman aiheuttamaan taipumaan.

Varastojen ja kattojen mitoituksessa on usein riittävää käyttää taipumarajan arvona $L/200$ - $L/150$. Taulukossa 6-1 on annettu esimerkkejä eri tilanteisiin sopivista taipumarajoista. Arvoja sovellettaessa on otettava huomioon tilanteen vaatimukset ja mahdolliset kansalliset määräykset.

TAULUKKO 6-1

Esimerkkejä eri kuormitusyhdistelmille sovellettavista taipumarajoista.

Rakennusosa	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Eurokoodi 5:n taipumarajat			
Kaksitukinen palkki	$L/500 \dots L/300$	$L/350 \dots L/250$	$L/300 \dots L/150$
Ulokepalkki	$L/250 \dots L/150$	$L/175 \dots L/125$	$L/150 \dots L/75$
Kirjallisuuteen ja kokemukseen perustuvia taipumarajoja			
Kattopalkit	$L/375 \dots L/300$	$L/300 \dots L/250$	$L/200 \dots L/160$
Lattiapalkit	$L/600 \dots L/400$	$L/300$	$L/250 \dots L/200$

Taipumarajaa määrittäessä pitää ottaa huomioon

- jänneväli
- rakenteen tyyppi ja käyttö
- mahdollinen alakaton ja pintamateriaalien vaurioitumisriski
- esteettiset vaatimukset

- suurimman taipuman esiintymistiheys ja kulloinenkin kesto aika
- katon vedenpoisto
- vaikutus ei-kantaviin seiniin taipuvan rakennusosan ylä- ja alapuolella ja muut vastaavat ilmiöt.

Eri tilanteissa pitää selvittää aiheuttaako taipuma ulkonäköhaitan vai muuta vahinkoa. Seuraavassa esitetään muutamia rajatilatarkasteluja ja niiden yhteydessä käytettävät kuormitusyhdistelmät:

- Palkin alapuolella oleva ei-kantavaksi tarkoitettu väliseinä voi vahingoittua, jos palkin taipuma on niin suuri että seinä muuttuu kantavaksi. Määrittele palkin ja seinän väliin helposti järjestettävissä oleva tila ja käytä sitä taipumarajana. Taipuman mitoitusarvo voidaan laskea yhtälön 6-7 kuormitusyhdistelmästä. Tässä tapauksessa taipumarajan ylittäminen johtaa pysyvään vahinkoon.
- Olohuoneen lattian pintamateriaalit eivät ole erityisen herkkiä ja liittyvien rakenteiden vahinkoriskiä ei ole. On riittävää että lattian taipuma tarkistetaan vain pitkäaikaisilla kuormilla, sillä lyhytaikaiset suuret taipumat eivät aiheuta haittaa. Tässä tapauksessa lasketaan taipuma pysyväksi muunnetusta kuormitusyhdistelmästä, siis

$$w_{fin,qp} = w_{inst,G} + w_{creep,G} + w_{creep,Q_1} + \sum_{i=2}^n w_{creep,Q_i} =$$

6-16

$$w_{inst,G} (1 + k_{def}) + \sum_{i=1}^n \psi_{2,i} k_{def} w_{inst,Q_i}$$

- Joskus voi olla aiheellista tarkistaa vain pitkäaikaisvaikutus, eli siis ajan myötä tapahtuva taipuman kasvu, ja jättää alkutaipuma huomioonottamatta. Näin voidaan menetellä jos palkin esikorotus on riittävä kompensoimaan pysyvien kuormien aiheuttaman alkutaipuman. Edellytyksenä on että rajatilatarkastelu tehdään ulkonäön ja käytettävyyden vuoksi eikä mahdollisten vaurioiden vuoksi.
- Tukipaineen aiheuttama kokoonpuristuminen tarkistetaan käyttörajan kuormitusyhdistelmällä. Koska kimmoisen muodonmuutoksen on useimmissa tapauksissa todettu muodostavan vain pienen osan kokonaismuodonmuutoksesta, niin suuret lyhytaikaiset kuormat eivät juurikaan vaikuta kokoonpuristumiseen. Suurin osa muodonmuutoksesta aiheutuu virumisesta, ja siksi on luonnollista käyttää mitoituksessa pysyväksi muunnettua kuormitusyhdistelmää. On myös aiheellista käyttää suurempaa k_{def} arvoa kuin taipumaa laskettaessa, sillä viruminen syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa on suurempi kuin syiden suunnassa. Tässä tapauksessa on myös syytä ottaa huomioon puristetun rakennusosan vapaa kutistuminen.

Muodonmuutosten aiheuttamien ongelmien välttäminen

Muodonmuutoksia on mahdoton välttää kokonaan käytettäessä liimapuuta rakennusmateriaalina. Parempien laskentamenetelmien kehittyessä voidaan kuitenkin estää ongelmia aiheuttavat ylisuuret taipumat. Hyvä suunnittelija ei pelkästään laske muodonmuutoksia, vaan valitsee sellaisia rakenneratkaisuja joilla taipumat jäävät mahdollisimman pieniksi. Ympäristön kosteusvaihtelulla on suuri merkitys palkkien taipumalle. Suunnittelijan pitää siksi olla tietoinen niistä kosteusolosuhteista joihin rakenne joutuu. Erityisen tärkeää on ottaa huomioon tilanne, missä liimapuurakenteen molemmiin puolin vallitsee erilaiset kosteusolosuhteet, kun rakenne on esimerkiksi osa ulkovaippaa. Tällaisessa tilanteessa taipumista aiheutuvat ongelmat voivat olla suurempia.

Puristetuissa liitoksissa on tärkeää välttää puristusta syitä vastaan kohtisuoraan, sillä tämä suunta on herkin sekä kuorman että kosteuden vaihteluiden aiheuttamille muodonmuutoksille. Vaikeuksia voi myös aiheutua erilaisten materiaalien käytöstä samassa rakennuksessa. Jos esimerkiksi palkin toinen pää on betonirakenteen päällä ja toinen pää liimapuurakenteen päällä, niin palkista tulee usein ajan myötä kalteva. Tässä tapauksessa voidaan asettaa puupalikka betonirakenteen ja palkin väliin, jolloin molempiin päihin syntyy yhtä suuri muodonmuutos.

Kosteusvaihteluiden epäedullista vaikutusta liimapuurakenteisiin voidaan välttää ja rakenteiden taipumia pienentää käyttämällä sellaista pintakäsittelyä, joka hidastaa kosteuden tunkeutumista liimapuuhun. Tätä ei aina käytännössä voida tehdä koska se on työlästä ja kallista. Kyllästäminen on myös mahdollista, mutta ei erityisen käytännöllistä.

Yleinen tapa pienentää muodonmuutosten haittavaikutuksia on käyttää esikoroitusta. Esikoroitus tarkoittaa sitä, että palkille tehtaassa valmistettaessa annetaan vastakkainen kaarevuus kuin mitä sille tulevat kuormat aiheuttavat. Esikoroituksen suuruus voidaan laskea kuormien aiheuttamasta taipumasta, kuten aikaisemmin tässä luvussa on selitetty.

Suunnittelijan pitää paneutua vaatimustason valintaan. Monessa tapauksessa käytetään raja-arvoina yksinkertaisia peukalosääntöjä, jotka toisinaan ovat sopivia mutta toisinaan liian karkeita.

Erilaisten liimapuurakentiedien taipumia

Kaikkien rakenteiden taipumalaskelmat tehdään samoilla kuormitusyhdistelmillä, katso kohta 6.2. > Kuormitusyhdistelmät. Tässä luvussa esitetään eräiden rakennusosien taipumien laskeminen. Usein tietokoneavusteiset mitoitusmenetelmät ovat paras tapa laskea muodonmuutokset. Laskennassa pitää käyttää soveltuvaa kuormitusyhdistelmää ja kimmo- ja liukukertoimien keskiarvoja.

Suorat tasakorkeat palkit

Useimmissa mitoituslaskelmissa on annettu tasakorkeiden suorien palkkien taipuman yhtälö. Jos palkin jännevälin suhde sen korkeuteen L/h on pienempi kuin 10, pitää taivutusmomentin aiheuttaman taipuman lisäksi ottaa huomioon leikkausvoiman aiheuttama taipuma. Muussa tapauksessa se voidaan jättää huomioonottamatta.

Vapaasti tuetun tasaisella kuormalla kuormitetun palkin taipuma jännevälin keskellä on

$$w_b = \frac{5qL^4}{384EI} \quad 6-17$$

missä indeksi b viittaa taivutusmomentin aiheuttamaan taipumaan. Leikkausvoiman aiheuttama taipuma on tässä tapauksessa

$$w_s = \left(1 + 0,96 \left(\frac{E}{G} \right) \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right) \cdot w_b \quad 6-18$$

missä indeksi s viittaa leikkausvoiman aiheuttamaan taipumaan. Sekä kimmokertoimen E että liukukertoimen G arvoina käytetään keskiarvoja.

Jatkuvien palkkien suurin taipuma esiintyy yleensä reunimmaisessa aukossa ja on huomattavasti pienempi kuin yksiaukkoisten palkkien.

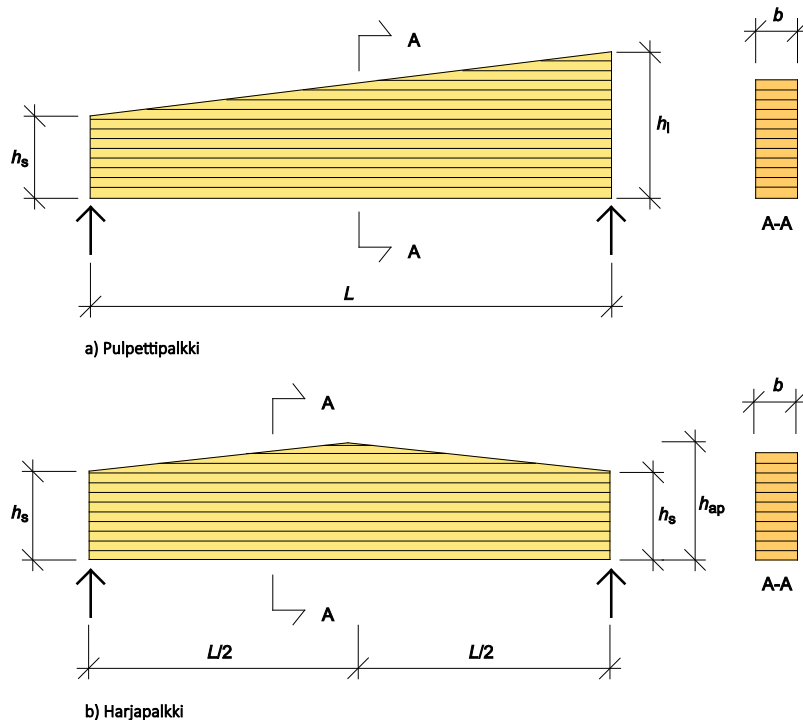
Harja- ja pulpettipalkit

Pulpettipalkkien ja harjapalkkien taipuma lasketaan helpoimmin tietokoneohjelmalla. Käsinslas-
ku virtuaalisen työn yhtälöit leikkausvoiman ä käyttämällä edellyttää huomattavaa laskentatyö-
tä. Vapaasti tuettujen tasaisella kuormalla kuormitettujen pulpettipalkkien tai symmetristen
harjapalkkien taipuma jännevälin keskellä voidaan arvioida yhtälöllä

$$w = \frac{5qL^4}{384EI_e} + 0,35 \frac{qL^2}{Gb(h_s + h_{\max})}$$

6-19

I_e	hitausmomentti, suorakaidepoikkileikkaukselle $bh_e^3/12$
h_e	$h_s + 0,33L \cdot \tan \alpha$ harjapalkeille
h_e	$h_s + 0,45L \cdot \tan \alpha$ pulpettipalkeille
h_s	palkin korkeus tuella
$h_{\max}$	h_{ap} harjapalkeille ja h_l pulpettipalkeille



KUVA 6-4

Pulpettipalkki ja harjapalkki.

Pitkillä palkeilla joilla $2L/(h_s + h_{\max}) > 25$ voidaan yhtälön jälkimmäinen leikkausmuodonmuutosta edustava termi jättää huomioonottamatta. Tarkempaa laskentaa varten voidaan käyttää yhtä-
löitä 6-20 - 6-27 ja niihin liittyviä lukuarvoja (Porteous & Kermani, 2007).

Pulpettipalkki, pistekuorma P jännevälin keskellä

$$w_b = \frac{5ML^2}{96EI_{h_s}} k_{\text{lob}} \quad \text{missä} \quad M = \frac{PL}{4}$$

6-20

$$w_s = \frac{1,2M}{GA_{h_s}} k_{1\delta\delta} \quad 6-21$$

Pulpettipalkki, tasainen kuorma

$$w_b = \frac{5ML^2}{48EI_{h_s}} k_{2\delta\delta} \quad \text{missä} \quad M = \frac{qL^2}{8} \quad 6-22$$

$$w_s = \frac{1,2M}{GA_{h_s}} k_{2\delta\delta} \quad 6-23$$

Harjapalkki, pistekuorma P jännevälän keskellä

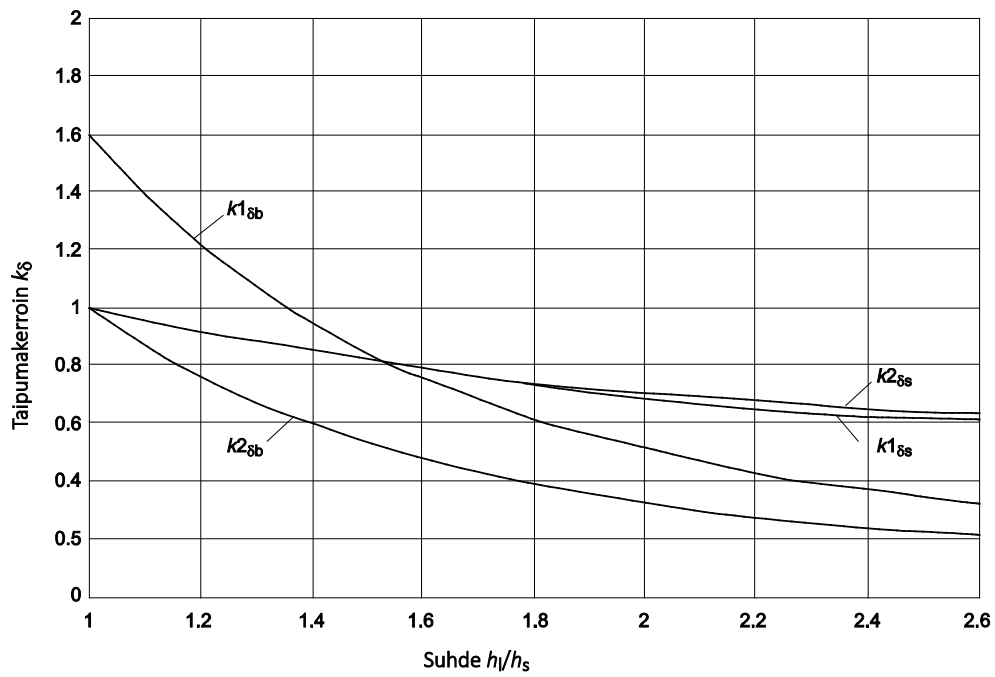
$$w_b = \frac{5ML^2}{96EI_{h_s}} k_{3\delta\delta} \quad \text{missä} \quad M = \frac{PL}{4} \quad 6-24$$

$$w_s = \frac{1,2M}{GA_{h_s}} k_{3\delta\delta} \quad 6-25$$

Harjapalkki, tasainen kuorma

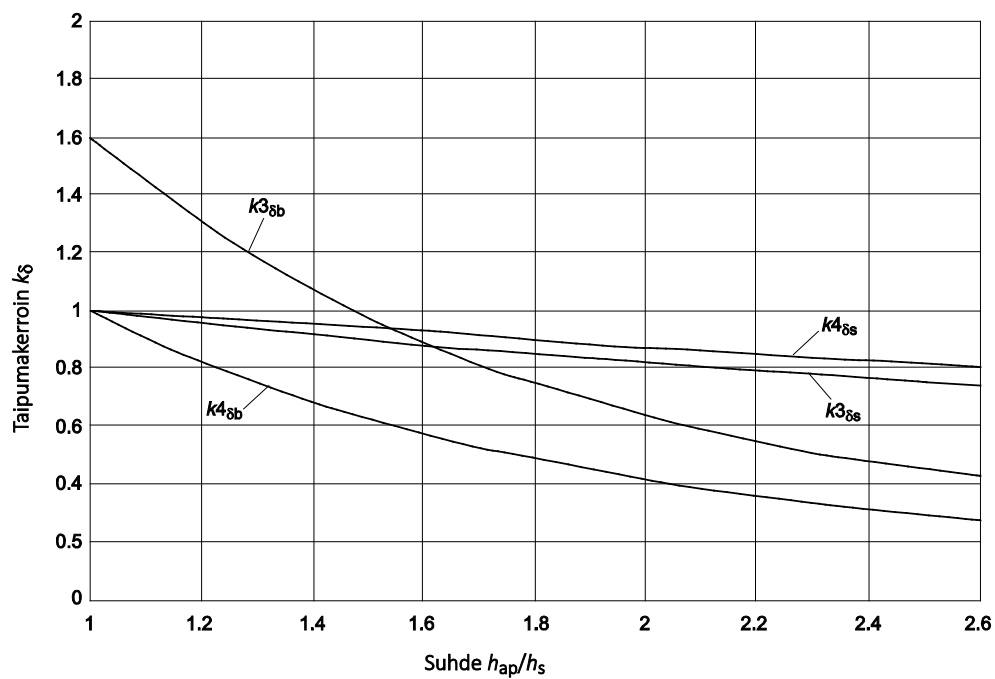
$$w_b = \frac{5ML^2}{48EI_{h_s}} k_{4\delta\delta} \quad \text{missä} \quad M = \frac{qL^2}{8} \quad 6-26$$

$$w_s = \frac{1,2M}{GA_{h_s}} k_{4\delta\delta} \quad 6-27$$



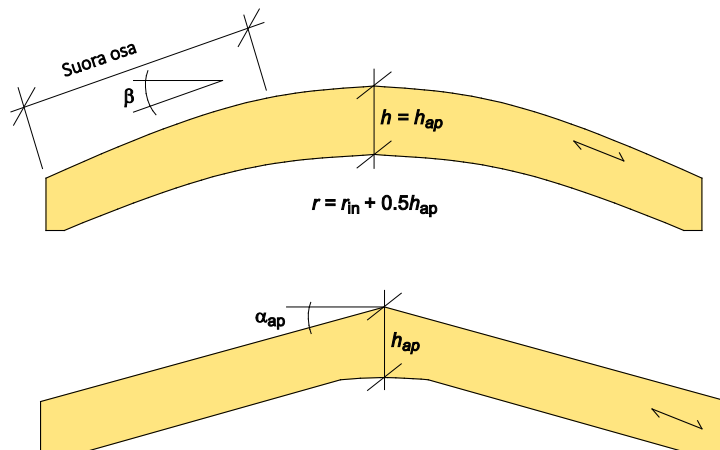
KUVA 6-5

Kertoimien $k_{\delta b}$ ja $k_{\delta s}$ arvot pulpettipalkeille.



KUVA 6-6

Kertoimien $k_{\delta b}$ ja $k_{\delta s}$ arvot harjapalkeille.

Kaarevat palkit

KUVA 6-7 Kaareva palkki (ylempi kuva) ja kaareva harjapalkki (alempi kuva).

Kaarevien palkkien taipuman arviointiin voidaan käyttää seuraavaa yhtälöä

$$w = \frac{w_q}{\cos \frac{\alpha + \beta}{2}}$$

6-28

missä w_q on sellaisen symmetrisen harjapalkin laskettu taipuma, jolla on sama jänneväli ja sama poikkileikkaus tuella ja keskellä kuin kaarevalla palkilla, katso luku 7.

Kaarevan palkin vapaalla tuella tapahtuva vaakasuora siirtymä voidaan arvioida yhtälöstä

$$w_h = 4 \frac{f + 0,8h}{L} w$$

6-29

f	neutraaliakselin sijainnin pystysuora etäisyys tuella ja harjalla
h	palkin korkeus tuella
L	jänneväli
w	pystysuora taipuma jännevälin keskellä

Ristikot

Liimapuuristikoiden muodonmuutoslaskelmat ovat monimutkaisempia kuin yksittäisten palkkien, sillä sekä liimapuuosat että liitokset muuttavat muotoaan. Kun ristikon paarteet ovat paraabeleja, taipuma voidaan arvioida (liitosten muodonmuutosta huomioonottamatta) laske-
malla sellaisen massiivisen palkin taipuma jonka hitausmomentti on

$$I = \sum A_i \cdot a_i^2$$

6-30

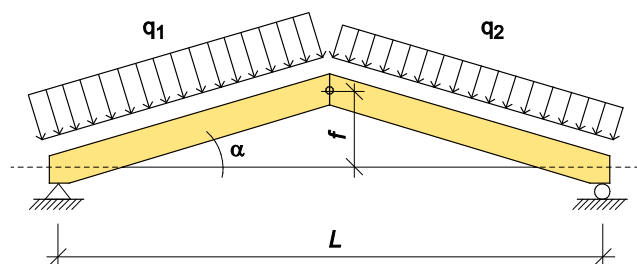
A_i	paarresauvojen poikkileikkauspinta-ala
a_i	paarresauvojen ja ristikon painopistelinjojen välinen etäisyys.

Liitoksissa tapahtuvien muodonmuutosten vuoksi ristikon muodonmuutos on suurempi kuin massiivisen palkin. Taipuman kasvu on riippuvainen liitosten lukumäärästä ja tyypistä. Käytännön mittaukset ovat osoittaneet, että taipuma voi muutaman vuoden kuluessa kasvaa jopa 50 % verrattuna siihen että liitosten taipumaa ei oteta huomioon. Pienin taipuma saadaan kun liitokset tehdään hammasvaarnoin ja suurin kun ne tehdään naulatuin vanerilevyin

Ristikot suositellaan valmistettaviksi esikoroitetuina (sekä ala- että yläpaarre ovat kaarevia), suositeltu esikoroituksen suuruus on noin $L/150$ kun $L/h = 12$ ja $L/200$ kun $L/h = 10$. Pulpetristikoiden ja harjaristikoiden taipuma on yksinkertaisinta laskea tietokoneella.

Kolminivelkattotuolit

Kolminivelkattotuolien kantavan rakenteen muodostavat liimapuupalkit ja teräksinen tai liimapuinen vetotanko.



KUVA 6-8

Kolminivelkattotuoli.

Kuvan 6-8 mukaisen alaspäin suuntautuvien kuormien kuormitetun kolminivelkattotuolin taipuma on

$$w = \frac{(q_1 + q_2)L^2}{8(\tan \alpha)^2 (EA)_{beam}} \left(\frac{1}{(\cos \alpha)^3} + \frac{(EA)_{beam}}{(EA)_{tie}} \right)$$

6-31

Jos tuet eivät voi siirtyä vaakasuorassa suunnassa, niin suluissa olevista termeistä jälkimmäinen jätetään pois.

6.3 Värähtelyt

Käyttöraja-tiloihin kuuluu myös käyttömukavuuden arviointi dynaamisten vaikutusten esiintyessä. Näitä ovat esimerkiksi lattialla kävellessä syntyvät värähtelyt. Värähtelyjen käsitteleminen on monimutkaista, koska se liittyy lattiarakenteen massa- ja rakenteen kantavien osien sijain- tiin toisiinsa nähden. Rakenne siirtää värähtelyä aiheuttavia kuormia sivusuunnassa ja vaimen- taa syntyviä värähtelyjä.

Käyttäjät aistivat rakennusten ja muiden rakenteiden matalataajuiset liikkeet kolmella ta- valla:

- Värähtelyyn liittyvä kiihtyvyys aiheuttaa kehossa tasapainoelimen havaitsemia voimia.
- Värähtely aiheuttaa silminnähtävää liikettä, esimerkiksi rakenteen päällä olevien tai sii- hen ripustettujen esineiden korkeusasema muuttuu katsojan suhteen.
- Värähtely aiheuttaa ääniä, esimerkiksi rakenteen liikkumisesta aiheutuvaa narinaa tai lasien helinää.

Ihmisten aiheuttamat värähtelyt vaikuttavat melkein aina käyttömukavuuteen, koska ne aiheuttavat asukkaiden ärtymystä. Toisinaan värähtelyn havaitsija ja aiheuttaja ovat sama henkilö, kun taas toisinaan ärtymystä aiheuttaa muiden ihmisten aiheuttama värähtely. Henkilön oma toiminta vaikuttaa värähtelyn kokemiseen. Lattialla kävelevä ihminen sietää paljon suurempia värähtelyitä kuin rauhallisesti istuva, lukeva tai kirjoittava ihminen. Henkilön elämystä luokiteltaessa on otettava huomioon sekä henkilön oma toiminta että henkilön suhde värähtelyn lähteeseen. Tarkoitusta varten on määritelty seuraavat käsitteet:

- *Lattian notkuminen* kuvaa itse aiheutetun lattian taipuman ja sen värähtelyn kokemista joka aiheutuu jalan osumisesta lattiaan yksittäisen askeleen aikana.
- *Häiritsevä värähtely* kuvaa toisten ihmisten kävelemisen aiheuttamaa värähtelyä.

Lattian notkuminen on yleensä vain kevytrakenteisten tai suurien pistekuormien rasittamien lattioiden ongelma. Notkuminen käsittää sekä lattian staattisen taipuman että sen välittömän liikenopeuden muutoksen, kun taas häiritsevä värähtely käsittää lattian välittömän liikenopeuden muutoksen ja jatkuvan värähtelyn.

Dynaamiset vaikutukset

Värähtelylähteiden ja värähtelyistä aiheutuvan haitan estämismahdollisuuksien mukaan rakennukset ja rakenteet voidaan ryhmitellä seuraavasti:

- asunnot
- julkiset rakennukset
- teollisuusrakennukset
- jalankulkuväylät (kävelysillat, ostoskeskusten jalankulkutiet)
- voimistelu- ja urheiluhallit
- tanssilavat ja konserttitalit

Rytminen liike on monimuotoista, minkä vuoksi se aiheuttaa monenlaisia dynaamisia vaikutuksia. Tahdistettua rytmistä liikettä tuottava toiminta kuten useiden ihmisten tanssiminen tai voimisteleminen on erityisen ongelmallista. 20 sekunnin ajan tai kauemmin tehty useamman ihmisen tahdistettu liike voi aiheuttaa seisovan aaltoliikkeen.

Ihmisen liikkumisesta aiheutuvat dynaamiset vaikutukset ovat riippuvaisia liikkuvien henkilöiden ominaisuuksista, liikunnan laadusta (käveleminen, juokseminen, hyppiminen), ihmisten lukumäärästä, liikkeen mahdollisesta samanaikaisuudesta ja lattian pintamateriaalien ominaisuuksista. Liimapuurakenteisten lattioiden ärsyttäväksi koettu värähtely liittyy usein kävelemiseen tai juoksemiseen.

Dynaamisten vaikutusten huomioonottaminen

Liimapuurakenteista lattiaa voidaan tarkastella kaksiulotteisena ohuena laattana joka on vahvistettu palkein. Tätä kaksiulotteista rakennetta tarkastellaan useimmiten yksiulotteiseksi yksinkertaistettuna, kun se mitoitetaan omalle painolle ja hyötykuormille, kuten aikaisemmissa luvuissa on esitetty. Liimapuurakenteisten lattioiden staattinen jäykkyys onkin usein riittävä jotta myös värähtely tulee asianmukaisesti huomioonotetuksi. Joskus on kuitenkin havaittu ongelmia sellaisissa lattiarakenteissa, joiden taipumatarkastelu on tehty perinteisesti tutkimalla pelkästään tasaisen kuorman vaikutusta.

Uusilla rakentamistavoilla on ollut perustavaa laatua oleva merkitys liimapuurakenteiden lattioiden värähtelykäyttäytymiseen. Esimerkkinä voidaan mainita pitkälle jalostettujen puutuotteiden käyttö, betoniset tasoituskerrokset ja uivat lattiat. Pitkälle jalostetut puutuotteet ja liimapuuristikot ovat kasvattaneet jänneväliä ja tehneet mahdolliseksi jatkuvat palkit ja ristikot, kun taas betonisen tasoitekerroksen käyttäminen kasvattaa ratkaisevalla tavalla lattiarakenteen massaa.

Värähtelymitoitus voidaan tehdä monella tavalla ja menetelmien parantamiseksi on tehty paljon tutkimusta.

Lattian värähtely

Ihmisten kokeman lattioiden värähtelyn kuvailemisessa tärkeimmät suureet ovat taajuusalue, vaikutuksen suuruus ja värähtelyn vaimentuminen.

Lattiarakenteet jaetaan tavallisesti kahteen ryhmään niiden ominaistajuuden mukaan. Matalataajuisien lattioiden ominaistajuus on pienempi kuin 7-8 Hz; jos ominaistajuus on suurempi niin lattia on korkeataajuinen. Matalataajuiset lattiat ovat yleensä painavia rakenteita kuten betonilattioita. Luokittelu matalataajuisiin ja korkeataajuisiin lattioihin perustuu siihen kuinka ne toimivat, kun niiden päällä kävellään. Matalataajuisilla lattioilla ihmisen kävelyn matalat taajuusalueet (jatkuvat osat) ovat tärkeimmät, koska ne aiheuttavat lattian resonanssin. Paikoillaan seisova henkilö voi tuntea tämän resonanssivärähtelyn. Korkeataajuinen lattia puolestaan on herkempi kävelyn impulsiivisille vaikutuksille. Tässä tapauksessa paikoillaan seisova henkilö voi tuntea toisen ihmisen kävelyn vaikutuksen ja kävelevä henkilö tuntee lattian notkuvan.

Kaksisuuntaisen liimapuurakenteen ominaistajuus f_1 on pääasiassa riippuvainen palkkien suuntaisesta jäykkyydestä EI_x , lattian painosta neliömetriä kohti m ja jännevälistä L . Vierekkäisten ominaistajuuksien etäisyys toisistaan on riippuvainen pääsuuntien jäykkyyksien, EI_y ja EI_x , suhteesta.

Vaimennus vaikuttaa pakotetun värähtelyn amplitudiin ja vapaan värähtelyn amplitudin muutokseen. Kun vaimennus kasvaa niin vapaa värähtely heikkenee nopeammin. Käytettyjen materiaalien vaikutus vaimennukseen on yleensä pieni. Suurin osa vaimennuksesta syntyy kitkasta, ja siihen vaikuttaa rakenteiden yksityiskohtien suunnittelu, niiden liitokset ja tukiehdot.

Taivutettujen rakenteiden päiden tuenta voi vaikuttaa huomattavasti vaimennukseen. On osoitettu, että vapaasti tuettujen palkkien ja ulokepalkkien ominaistajuuteen liittyvä vaimennus on noin prosentin luokkaa. Samojen palkkien kiinnittäminen jäykästi tuilla lisäsi vaimennusta noin 8 prosenttiin. Puurakenteisen lattian tehollinen vaimennus on 1...3 prosenttia, ja se vaihtelee lattian yksityiskohtien ja tarkasteltavan värähtelyn mukaan. Jos lattian pinnalle sijoitetaan massiivisia esineitä, niin vaimennusta voidaan huomattavasti kasvattaa, erityisesti jos rakenteen massa alun perin oli pieni.

Liimapuurakenteiden oma paino on luonnostaan pieni. Siksi niillä ei ole merkittävää vaimennuskykyä. Poikkeuksena voivat olla suuret rakennejärjestelmät, erityisesti jos on käytetty paksua betonista tasoitekerrosta tai jos kuormat ovat suuria.

Liimapuurakenteiden lattioiden värähtelyn rajoittaminen

Ihmisten lattian värähtelyn aistimista koskevan perustutkimuksen tuloksena on kehitetty mitoitusmenetelmiä, joilla pyritään estämään haitalliset värähtelyt. Tässä esitellään kaksi esimerkkiä.

Pistekuorman aiheuttaman taipuman rajoittaminen

On osoittautunut mahdolliseksi ennustaa lattian värähtelyn aiheuttamaa tuntemusta siten, että määritetään pistekuorman aiheuttama staattinen taipuma. Yleinen tapa on laskea taipuma palkin keskellä olevasta 1 kN pistekuormasta joko yksi- tai kaksisuuntaisen mallin avulla. Eri määräyksissä ja käsikirjoissa käytettävä taipumaraja vaihtelee, mutta myös jänneväliä ja mitoituksen tavoitteella on merkitystä.

Menetelmää voidaan pitää askeleen vaikutuksen mallintamisena, missä jalkaterän voimaa simuloiva kuorma 1 kN vaikuttaa lattian keskellä. Taipuma tässä pisteessä, a , ei saa ylittää tiettyä raja-arvoa. Pistekuorman aiheuttama taipuma on

$$a = \frac{PL^3}{48EI} \quad 6-32$$

ja tässä tapauksessa kuorman P arvo on 1 kN. Käytettäessä yksisuuntaista mallia lasketaan taipuma yhtälöstä 6-32 siten että käytetään yhden ainoan palkin jäykkyyttä EI . Useimmissa tapauksissa tämä johtaa taipuman yliarviointiin, sillä rakenne on kaksisuuntainen. Tämän huomioonottamiseksi voidaan taipumaa laskettaessa ottaa huomioon lattian molempien suuntien jäykkyys yhtälöllä

$$a = \kappa \frac{PL^3}{48EI} \quad 6-33$$

κ on seuraavien yhtälöiden avulla laskettava kuorman jakautumiskerroin.

$$\kappa = \begin{cases} -4,7\beta^2 + 2,9\beta + 1 & \text{kun } 0 \leq \beta < 0,3 \\ 0,8 + 0,2\beta & \text{kun } 0,3 \leq \beta \leq 1,0 \end{cases} \quad 6-34$$

$$\beta = \frac{(EI)_L}{(EI)_b} \left(\frac{s}{L} \right)^4 \quad 6-35$$

$(EI)_L$ lattian jäykemmän (palkkien) suunnan jäykkyys Nm^2/m

$(EI)_b$ lattian jäykkyys kohtisuoraan tätä suuntaa (palkkeja) vastaan Nm^2/m

s palkkien keskinäinen etäisyys

L palkkien jänneväli

Pistekuorman aiheuttaman taipuman ja yksikkövärähtelyn aiheuttaman värähtelynopeuden rajoittaminen

Kun lattian värähtelytaipumusta kuvataan staattisilla suureilla, kuten taipumalla, niin saadaan tosin tietty käsitys asiasta, mutta ei aina päästä tyydyttävään tulokseen. Tutkijat ovat tietoisia tästä, ja siksi uusin tutkimus keskittyy dynaamisiin värähtelyparametreihin. Dynaamisten parametrien käyttöä esitti ensimmäisten joukossa S. Ohlsson (1991). Värähtelyn kokemisen arvioinnissa pitää tarkistaa kaksi parametria, kun kevytrakenteisen lattian ominaistaajuus on yli 8 Hz:

- Keskellä lattiaa vaikuttavan 1 kN kuorman aiheuttama staattinen taipuma pitää rajoittaa. Suomessa raja-arvo on 0,5 mm kun se Ruotsissa on 1,5 mm.
- "1 Ns yksikköimpulssin" aiheuttaman suurimman nopeuden pitää olla enintään $100^{[f_1 \zeta - 1]}$ (m/s)/Ns, missä f_1 on alin ominaistaajuus ja ζ siihen liittyvä vaimennus.

Ensimmäinen ehto on sama kuin edellä esitetty ja Ohlsson (1991) totesi että tällä tavalla voidaan selvittää luonteeltaan puolistaattisten matalien taajuuksien (alle 8 Hz) vaikutus. Toinen ehto tarvitaan lyhtyaikaisen, kantapään iskusta lattiaan aiheutuvan värähtelyn rajoittamiseksi. Suorakulmaisella, kaikilta neljältä sivultaan vapaasti tuetulla lattialla, jonka ominaistaajuus f on pienempi kuin 40 Hz, yksikköimpulssin aiheuttama suurin nopeus on

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mbL + 200} \quad 6-36$$

n_{40} on niiden ominaistaajuuksien lukumäärä jotka ovat enintään 40 Hz. n_{40} voidaan laskea yhtälöstä

$$n_{40} = \left[\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{L} \right)^4 \left(\frac{(EI)_L}{(EI)_b} \right) \right]^{0,25} \quad 6-37$$

b	lattian leveys m
L	jänneväli m
m	massa pinta-alayksikköä kohti kg/m^2
$(EI)_L$	lattian jäykemmän (palkkien) suunnan jäykkyys Nm^2/m
$(EI)_b$	lattian jäykkyys kohtisuoraan tätä suuntaa (palkkeja) vastaan Nm^2/m

Ohlsson esittää myös yhtälön lattian alimman ominaistaajuuden laskemista varten

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad 6-38$$

Menetelmää on käytetty verrattain paljon esittämisen jälkeen ja sen avulla mitoitettut lattiat ovat käytännössä toimineet tyydyttävästi.

Vaimennusta koskevassa ehdossa pitää määritellä vaimennuksen ζ arvo mikä on vaikeaa. Ohlsson toteaa että ζ voi olla 1 %, mutta viittaa myös siihen että arvo voi olla suurempikin.

Aikaisemmin kuvatut menetelmät toimivat hyvin tietyissä tapauksissa, ja huonommin toisissa. Mitoitusmenetelmissä annetaan yleensä vain yksi raja-arvo lattioille ja suunnittelijalle on usein epäselvää mitä tämä raja-arvo tarkoittaa. Paljonko parempi lattia saadaan jos raja-arvoa pienennetään 50 prosenttia? Kirjallisuudesta löytyy monia malleja dynaamisten vaikutusten arviointiin, mutta niissä kaikissa on epävarmuustekijöitä ja on usein vaikeaa löytää kaikkiin tilanteisiin sopivaa menetelmää. Kaikki menetelmät ovat luonteeltaan puolikokeellisia ja antavat hyviä tuloksia juuri sellaisille lattioille joiden perusteella ne on kehitetty. Mikään ei tunnu toimivan tyydyttävästi toisen tyyppisillä lattioilla. Paras käsitys lattian toiminnasta saadaan usein testaamalla.

Värähtelyn aiheuttamien ongelmien välttäminen

Värähtelyongelmat ovat luonteeltaan monimutkaisia. Siksi on myös vaikeaa antaa suosituksia niiden ratkaisemiseksi. Käytännöllinen toimintatapa on että rakennusjärjestelmien ominaisvärähtelyluku mitoitetaan verrattain suureksi, menettelyä kutsutaan virittämiseksi. Tavoitteena on että rakenteen pienin, energialtaan suurin, ominaistaajuus on suurempi kuin värähtelyn aiheuttava taajuus. Erityisesti pyritään välttämään että kuormituksen aiheuttama taajuus on sama kuin rakenteen ominaistaajuus.

Käytetyt menettelyt värähtelyongelmien vähentämiseksi ovat jäykkyyden kasvattaminen materiaalia lisäämällä tai jännevälin lyhentäminen. Toisaalta suunnittelussa on muista syistä tavoitteena vähentää materiaalia ja kasvattaa jänneväliä. Siksi rakenteiden värähtelyongelmia esiintyy lisääntyvässä määrin.

On muitakin tapoja välttää haitallisesti värähteleviä ongelmalattioita. On ilmeistä että vaimennusta voidaan kasvattaa (esimerkiksi lisäämällä erityisiä vaimentimia), mutta tämä on usein monimutkaista ja kallista. Rakenteen yksityiskohtien suunnittelu, kuten jäykistäminen tai ristikoolaus, ja rakenteen eri osien välisten liitosten suunnittelu vaikuttavat merkittävästi lopputulokseen.

Erityisiä lattiatyyppejä ovat uivat lattiat ja korokelattiat. Tällaisia käytetään yhä useammin askeläänän vaimennukseen liittyvien vaatimuksien ja asennusten helppouden vuoksi. Näille lattioille on kuitenkin tyypillistä esineiden värähtely tai liike, kuten lasitavaroiden helinä tai huonekasvien lehtien liikkuminen. Näiden ilmiöiden on osoitettu olevan yhteydessä lattiarakenteen pintakerroksen taivutusjäykkyyteen. Pehmeiden uivien lattioiden paikallisia taipumia on rajoitettava tällaisten häiriötekijöiden välttämiseksi. Toisaalta riittävän jäykkä uivan lattian pintakerros jakaa pistekuormia useille lattiapalkeille ja parantaa siten lattian värähtelytaipumusta.

Paikallisia taipumia on usein vaikea ennustaa rakennelaskelmilla ja suositellaankin niiden määrittämistä kokeellisesti. Uivan lattian pintakerroksen jäykkyydellä on suuri vaikutus paikallisten taipumien suuruuteen.

On myös tärkeää huomata että lattiapalkit voivat siirtää värähtelyä huoneesta toiseen. Jatkuvat palkit voivat siirtää värähtelyä jopa huoneistojenkin välillä, ja naapurit voivat kokea värähtelyn häiritseväksi, vaikka värähtelyjen alkulähteenä olevassa tilassa ei havaita mitään ongelmia. On osoitettu että viereisestä huoneistosta kantautuvat värähtelyt koetaan ärsyttävämpinä kuin itse aiheutetut.

6.4 Kosteusvaihteluiden aiheuttamat muodonmuutokset

Liimapuisten rakennusosien kosteussuhde toimitettaessa on tavallisesti 12 %. Ulkoilman kosteuden vaihdellessa kosteussuhde hakeutuu tasapainoon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kanssa.

Vuodenaikaisvaihtelun seurauksena rakenteen kosteussuhde vaihtelee loputtomasti. Sisätilassa olevan rakennusosan kosteussuhde vaihtelee 4...5 prosenttiyksikköä ja ulkotilassa olevan 8...10 prosenttiyksikköä. Sisätiloissa puu on kuivimmillaan talvella, kun taas ulkona se on kuivimmillaan kesällä.

Kuten muukin puu, liimapuu turpoaa kostuessaan ja kutistuu kuivuessaan. Kosteusmuodonmuutos on moninkertainen syitä vastaan kohtisuoraan kuin syiden suunnassa, 0,2 % ja 0,01 % kun kosteussuhteen muutos on 1 prosentti. Tämä tarkoittaa sitä että tavanomainen kosteuden vaihtelu aiheuttaa sisätiloissa likimääräisen syiden suuntaisen (pituuden) muutoksen 0,1 mm/m ja ulkona 0,2 mm/m. Syitä vastaan kohtisuorassa olevat mitat muuttuvat sisällä 10 mm/m ja ulkona 20 mm/m.

Jos syitä vastaan kohtisuora kosteusmuodonmuutos estyy syystä tai toisesta, voi lujuus syitä vastaan kohtisuoraan ylittyä, jolloin puu tyssäytyy tai halkeaa. Sen vuoksi liitokset pitää suunnitella niin, että tavalliset kosteusmuodonmuutokset estyvät mahdollisimman vähän. Ruuviliitosten jäykkyys ja kestävyys huononee jos ne eivät ole tiukat. Tästä syystä ainakin tärkeimmät ruuviliitokset pitää jälkikiristää puun kuivuttua.

Pituuden muutokset ovat yleensä niin pieniä että ne voi jättää huomioonottamatta, paitsi hyvin suurissa rakenteissa. Jos kosteussuhde on epätasainen poikkileikkauksen eri osissa, kuten ulkovaipan eristekerroksessa olevassa palkissa tai pilarissa, niille voi tulla huomattavia muodonmuutoksia kylmän ja lämpimän puolen erilaisien kosteusliikkeen vuoksi. Talvella toinen puoli on lämpöisessä ja kuivassa, kun taas toinen puoli on kosketuksissa ulkoilmaan, jonka suhteellinen kosteus on suuri. Ulkopuoli turpoaa ja pitenee sisäpuoleen verrattuna. Tämän vuoksi katto ja ulkoseinät taipuvat ulospäin talvella. Jos tuenta sallii kulmanmuutokset eikä kosteusmuodonmuutosta ole estetty voidaan taipuma laskea yhtälöstä

$$w = \frac{L \cdot \Delta L}{8h}$$

6-39

L = jänneväli

ΔL = turpoamisen tai kutistumisen aiheuttama ulko- ja sisäpinnan välinen pituusero

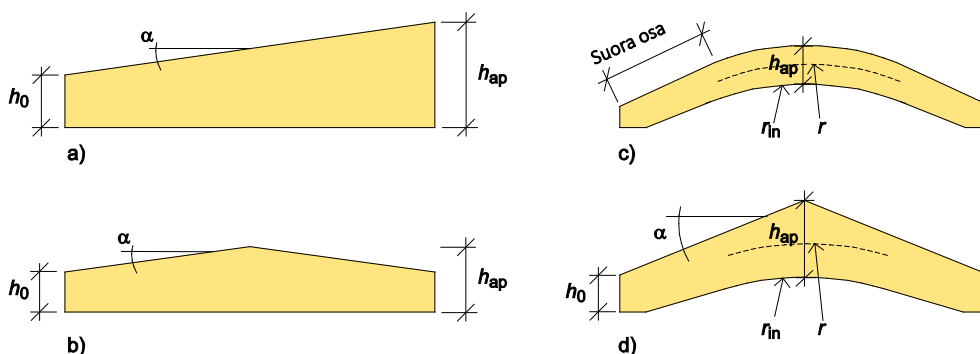
h = rakennusosan paksuus

Myös liitosten ja vetotankojen kosteusliikkeet voivat muuttaa voimien siirtymistä rakenteessa. Toisinaan on tarpeen tarkistaa liitokset ja vetotangot ja kiristää niitä rakenteen käyttöaikana.

7	HARJAPALKIT, KAAREVAT PALKIT JA KAAREVAT HARJAPALKIT	2
7.1	Pulpettipalkit ja harjapalkit	2
7.2	Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit	4
7.3	Mitoitus	6
	Palkit joiden korkeus muuttuu lineaarisesti	6
	Tasaisesti kuormitetun vapaasti tuetun harjapalkin alustava mitoitus	9
	Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit	10
	Tasaisesti kuormitetun vapaasti tuetun kaarevan tai kaarevan harjapalkin alustava mitoitus	14
7.4	Harjapalkkien, kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan	15
	Tavallisia vahvistustapoja kun syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on kriittinen	15
	Vahvistuksen mitoittaminen	16

7 HARJAPALKIT, KAAREVAT PALKIT JA KAAREVAT HARJAPALKIT

Arkkitehti voi halutessaan valita liimapuupalkin, jonka poikkileikkaus on vaihtuva ja akseli kaareva, jotta saadaan aikaan sopiva kattokaltevuus, mahdollisimman suuri vapaa korkeus tai jotta seinän korkeus tuella olisi pienempi. Tavallisia palkin muotoja ovat pulpettipalkki, harjapalkki, kaareva palkki ja kaareva harjapalkki, katso kuva 7-1.



KUVA 7-1

Erimuotoisia liimapuupalkkeja (a) pulpettipalkki (b) harjapalkki (c) kaareva palkki (d) kaareva harjapalkki.

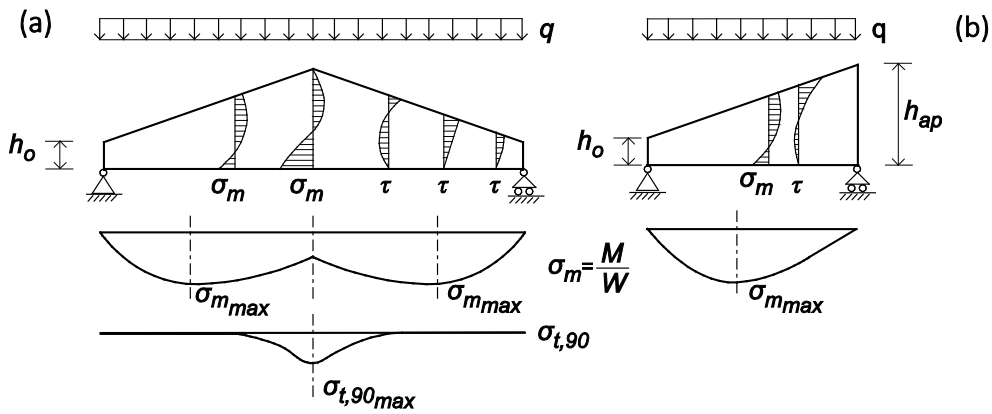
Näiden palkkien yhteinen ominaisuus on että poikkileikkauksen taivutusjännitysjakautuma ei ole lineaarinen, vaan se pitää laskea anisotrooppisten levyjen teorian avulla. Tavanomaisessa mitoituksessa voidaan taivutus- ja leikkausjännityksen maksimiarvo laskea riittävän tarkasti yksinkertaisen isotrooppisten aineiden palkkiteorian mukaan.

7.1 Pulpettipalkit ja harjapalkit

Usein liimapuusta tehtyjen rakennusosien poikkileikkaus muotoillaan muuttuvaksi. Pulpettipalkkien ja harjapalkkien lisäksi käytetään myös jatkuvia palkkeja, joiden välituilla on viisteet. Yleensä poikkileikkauksen korkeuden vaihtelu saadaan aikaan siten, että lamellit sahataan vinosti palkin toisella reunalla. Pulpettipalkit ja harjapalkit mitoitetaan samalla tavalla, minkä vuoksi seuraavassa tarkastellaan vain harjapalkkeja. Harjapalkissa materiaali on tehokkaasti käytetty hyväksi koska sen muoto myötäilee momenttipintaa.

Taivutusjännitysten jakautuminen harja- ja pulpettipalkkeissa ei ole lineaarinen. Suurin leikkausjännityskään ei yleensä ole neutraaliakselilla, vaan lähempänä palkin vinoa reunaa, katso kuva 7-2. Vain vapaasti tuetun palkin tuilla tai ulokepalkin vapaassa päässä suurin leikkausjännitys esiintyy neutraaliakselilla. Kuvassa 7-2 esitetyt leikkaus- ja taivutusjännitykset vaikuttavat lamellien suunnassa eikä vinon reunan suuntaisesti.

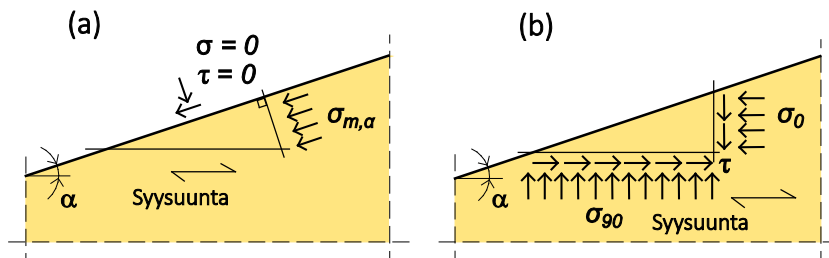
Koska sekä taivutusmomentti että palkin poikkileikkaus vaihtelevat palkin akselin suunnassa, ei suurin taivutusjännitys yleensä synny siellä missä taivutusmomentti on suurin, vaan lähempänä tukea olevassa poikkileikkauksessa.



KUVA 7-2

Taivutusjännitykset σ_m , leikkausjännitykset τ ja syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset $\sigma_{t,90}$ (a) harjapalkissa (b) pulpettipalkissa.

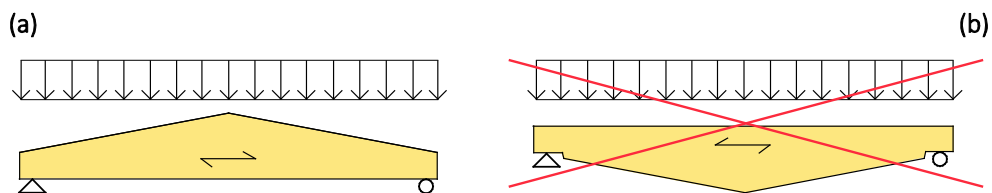
Vinon reunan kaltevuus α on yleensä enintään noin 10° . Kun kaltevuus on pieni niin vaikutus taivutusjännitysten jakautumiseen on pieni. Mitoitettaessa voidaan sen vuoksi laskea suurin taivutusjännitys palkin kummallakin reunalla kuten suoralle palkille (siis $\sigma_m = M/W$). Viistetyin reunan taivutusluutta on kuitenkin pienennettävä, jotta otetaan huomioon samanaikaisesti vaikuttavan leikkausjännityksen ja syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen vaikutus (katso kuva 7-3). Eurokoodi 5 suosittelee, että vinon reunan puolella taivutuslujuutta pienennetään luvussa 7.3. > määritellyllä kertoimella $k_{m\alpha}$.



KUVA 7-3

Jännitykset palkin vinon reunan puolella (a) vinon reunan suuntainen taivutusjännitys $\sigma_{m,\alpha}$, pääjännitys (b) syiden suuntainen taivutusjännitys σ_0 .

Syitä vastaan kohtisuorat jännitykset σ_{90} kasvavat kun vinon reunan kaltevuus kasvaa. Jos kalteva reuna on palkin puristuspuolella, syntyy palkkia taivutettaessa syitä vastaan kohtisuoria puristusjännityksiä $\sigma_{c,90}$. Jos palkki sen sijaan on käännetty ylösalaisin ja vino reuna on vetopuolella, syntyy syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä $\sigma_{t,90}$, katso kuva 7-4.

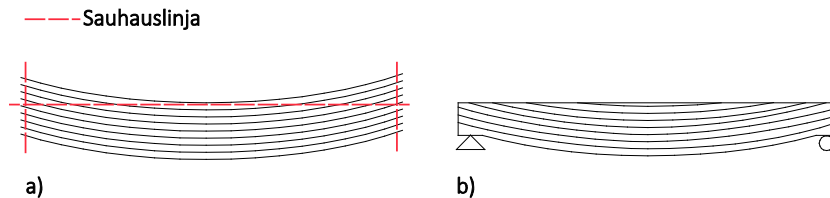


KUVA 7-4

Palkin vinolla reunalla syntyy syitä vastaan kohtisuoria jännityksiä (a) puristusjännitys (b) vetojännitys.

Tästä syystä vinon reunan kaltevuutta pitää rajoittaa. Kaltevuuskulma α saa olla enintään 10° puristetulla puolella ja $2...3^\circ$ vedetyllä puolella. Vetovoima syitä vastaan kohtisuoraan voi aiheuttaa hauraan murtuman jo hyvin pienillä jännityksen arvolla, ja siksi tällaisen vetovoiman suuruus pitää minimoida.

Pulpettikattoa haluttaessa voidaan käyttää ylösalaisin käännetyn harjapalkin asemesta alareunastaan kaarevaa mahapalkkia, missä kaarevan reunan lamellit ovat jatkuvia, mutta yläreunan lamellit on sahattu vinoon, katso kuva 7-5. Tällä tavoin ei synny syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä.



KUVA 7-5

Mahapalkki (a) lamellien liimaus (b) palkki sahauksen jälkeen.

7.2 Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit

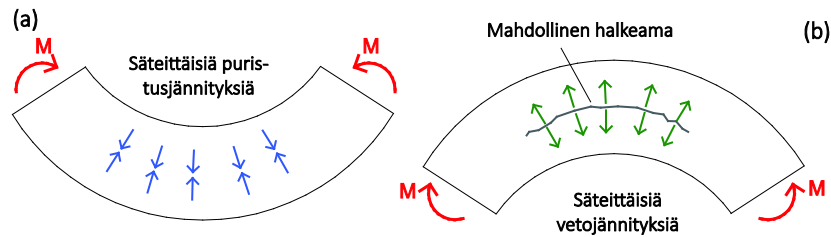
Liimapuun etuihin kuuluu kaarevien rakennusosien helppo valmistaminen. Lamellit taivutetaan haluttuun muotoon ennen kuin liima kovettuu. Rakenteen toiminnan mukaan erotetaan kaksi erityyppistä kaarevaa rakennetta, *kaareva palkki* ja *kaari*. Näiden perustavaa laatua oleva ero on, että *kaaren molemmat tuet ovat kiinteät* (sinä mielessä että tuella vaikuttaa vaakavoima, joka synnyttää kaareen normaalivoiman), kun taas *kaarevien palkkien toinen tuki voi vapaasti liikkua* palkin suunnassa. Kaaria käsitellään luvussa 11.

Kaarevuutta pitää rajoittaa etteivät lamellit vaurioidu ja ettei valmiiseen rakenteeseen synny suuria jäännösjännityksiä. Paksumpia lamelleja ei voi taivuttaa yhtä paljon kuin ohuempia. Jäännösjännityksiä ei yleensä tarvitse ottaa huomioon mitoituksessa. Jos kaarevuussäteen (r) ja lamellin paksuuden (t) välinen suhde on pieni, niin jäännösjännitykset vaikuttavat palkin taivutuskestävyyteen, mikä otetaan huomioon taivutuslujuutta pienentämällä. Eurokoodi 5:n mukaan lujuutta pienennetään jos $r/t < 240$. Käytännössä kaarevuussäteen ja lamellin paksuuden suhteen pitää aina olla suurempi kuin 170.

Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit ovat pääasiassa taivutettuja rakenteita, kun taas kaaret ovat pääasiassa puristettuja rakenteita. Kaarevien palkkien toisen tuen on päästävä siirtymään vapaasti vaakasuorassa suunnassa, ettei palkkiin aiheudu ylimääräisiä jännityksiä.

Kun taivutusmomentti rasittaa rakennusosaa jolla on alkukaarevuus taivutusmomentin taivutuksessa, syntyy taivutusjännitysten lisäksi säteittäisiä jännityksiä. Nämä voivat olla joko veto- tai puristusjännityksiä, katso kuva 7-6. Kun taivutusmomentin suunta on sellainen että se pyrkii lisäämään liimapuuosan kaarevuutta, niin lamellit puristuvat tiiviimmin toisiaan vastaan, kuva 7-6 vasen puoli. Tällöin lamellien väliin syntyy puristusjännityksiä. Kun taas taivutusmomentin suunta on sellainen että se pyrkii oikaisemaan liimapuuosaa, niin lamellit pyrkivät eroon toisistaan, kuva 7-6 oikea puoli. Tällöin lamellien väliin syntyy vetojännityksiä. Säteittäiset vetojännitykset voivat aiheuttaa rakennusosan halkeamisen ja niitä pitää välttää.

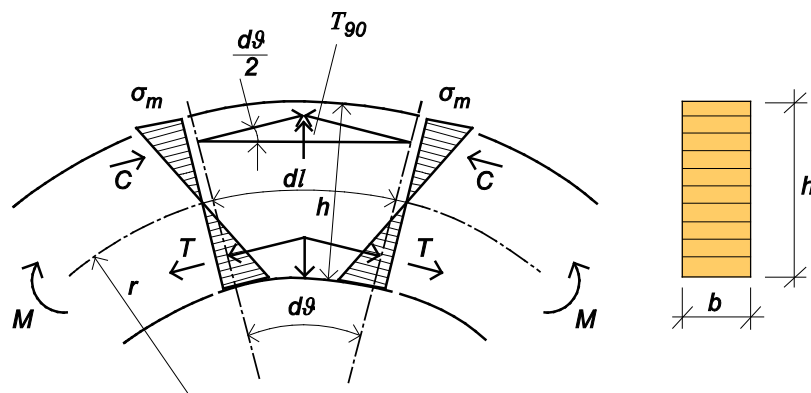
Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit vahvistetaan usein syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten aiheuttaman halkeamisriskin pienentämiseksi. Tavallisia vahvistustapoja ovat liimaruuvit tai itseporautuvat puuruuvit tai palkin pinnoille liimattavat vaneriset vahvistuslevyt. Vahvistusten mitoittamista käsitellään luvussa 7.4.2.



KUVA 7-6

(a) Taivutusmomentti pyrkii kasvattamaan liimapuisen rakennusosan kaarevuutta. (b) Taivutusmomentti pyrkii suoristamaan liimapuista rakennusosaa.

Kuva 7-7 esittää vakiomomentin rasittaman kaarevan palkin harjan aluetta. Jos oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi taivutusjännitysten jakautuvan poikkileikkauksessa lineaarisesti, niin puristus- ja vetojännitysten resultantit T ja C aiheuttavat säteittäiset voimat T_{90} .



KUVA 7-7

Yksinkertaistettu malli säteittäisten, syitä vastaan kohtisuorien jännitysten laskemiseksi kaarevan palkin harjalla. Palkkia rasittaa vain positiivinen taivutusmomentti.

Voidaan osoittaa että kuvassa 7-7 voimien T_{90} aiheuttama syitä vastaan kohtisuora jännitys on

$$\sigma_{t,90} = \frac{T_{90}}{b \cdot dl} = \frac{h}{4 \cdot r} \cdot \sigma_m = k_p \cdot \sigma_m$$

7-1

Yhtälön 7-1 mukaan kaarevan palkin harjalla syntyvä syitä vastaan kohtisuora vetojännitys $\sigma_{t,90}$ voidaan likimääräisesti laskea siten, että taivutusjännitys syiden suunnassa ($\sigma_m = M/W$) kerrotaan muotokertoimella $k_p = h/(4 \cdot r)$. Kaarevuussäteen pitää olla verrattain suuri, jotta syitä vastaan kohtisuora jännitys olisi pieni. Yleensä suositellaan että kaarevuussäde on aina vähintään 5 m.

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että vetolujuus syitä vastaan kohtisuoraan on erittäin riippuvainen kuormitetun rakennusosan koosta. Sen vuoksi eurokoodi 5:n mukaan vetolujuutta syitä vastaan kohtisuoraan $f_{t,90}$ muunnetaan tilavuudesta riippuvaisella muuntokertoimella k_{vol} (<1).

Palkit pitää vahvistaa jos mitoittava vetojännitys $\sigma_{t,90}$ ylittää eurokoodi 5:n mukaisen vetolujuuden syitä vastaan kohtisuoraan, katso luku 7.4.

7.3 Mitoitus

Sekä pulpettipalkeissa että kaarevissa harjapalkeissa jatkuvat lamellit sijoitetaan valmistettaessa yleensä palkin vetopuolelle. Vapaasti tuetun palkin vetopuoli on alapuoli, jos palkkia rasittaa pääasiassa painovoiman aiheuttamat kuormat. Vinoon sahatut lamellit tulevat vastaavasti puristuspuolelle.

Palkit joiden korkeus muuttuu lineaarisesti

Tavallisesti korkeudeltaan muuttuvien palkkien pituus ei ylitä 30 m valmistus- ja kuljetusteknisien syiden vuoksi. Kaltevuuden ei pidä olla suurempi kuin 10° . Katon kaltevuus on käytännössä $1/20$ - $1/10$, $\alpha \approx 2,9^\circ$ - $5,7^\circ$. Palkin harjan korkeuden pitää olla ainakin $L/20$, missä L on palkin jänneväli. Leveyden pitää olla vähintään seitsemäsosa harjan korkeudesta ($b \geq h_{ap}/7$) erityisesti asennusvaiheessa tapahtuvan kiepahduksen välttämiseksi.

Usein korkeudeltaan muuttuvat palkit valmistetaan esikorotettuina. Esikorotuksen pitää olla suunnilleen yhtä suuri kuin pysyvän kuorman ja määräävän hyötykuorman (esimerkiksi lumi-kuorman) puolikkaan aiheuttama suurin taipuma.

Vapaasti tuettujen tasaisesti kuormitettujen symmetristen palkkien taivutusjännitys ei tule koskaan mitoittavaksi harjalla (jännevälin keskellä). Rasitetuimman poikkileikkauksen etäisyys tuelta merkitään symbolilla x_0 . Sijainti voidaan määrittää analyyttisesti asettamalla taivutusjännityksen derivaatta x :n suhteen nolaksi, mistä saadaan tulokseksi

$$x_0 = \frac{h_0}{2 \cdot h_{ap}} \cdot l \quad 7-2$$

h_0 palkin korkeus tuella
 h_{ap} palkin korkeus harjalla
 l jänneväli

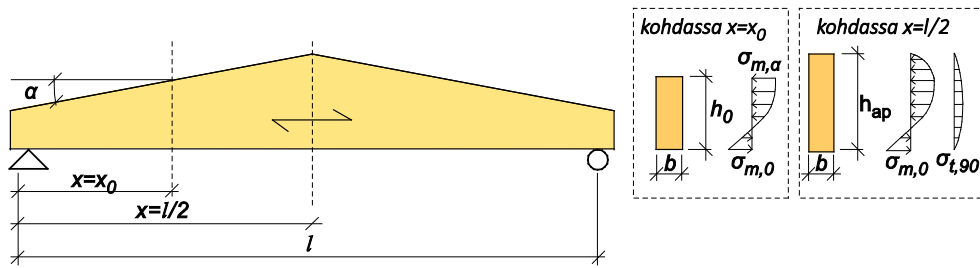
Tavanomaisin mittasuhtein suurimmat taivutusjännitykset esiintyvät jännevälin neljännespisteissä ($x_0 \approx l/4$).

Jos kaltevuus $\alpha \leq 10^\circ$ voidaan mitoittavien taivutusjännitysten $\sigma_{m,\alpha,d}$ ja $\sigma_{m,0,d}$ olettaa olevan yhtä suuria kuin jos ne laskettaisiin klassisella palkkiteorialla (huomaa että kuvassa 7-8 esitetään todellinen jännitysjakautuma ja että $\sigma_{m,\alpha,d} \neq \sigma_{m,0,d}$). Yksinkertaistuksesta saadaan

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{M_d}{W_{x_0}} \quad 7-3$$

M_d mitoittava taivutusmomentti poikkileikkauksessa $x=x_0$
 W_{x_0} poikkileikkauksen $x=x_0$ taivutusvastus

Poikkileikkaukseltaan muuttuvissa palkeissa käytetään yleisesti yhdistettyä liimapuuta, esimerkiksi luokan GL30c liimapuuta, joka tavallisesti koostuu luokan T22 ulkolamelleista ja luokan T15 sisälamelleista. Tällaisilla palkeilla kohta x_0 tuelta sijaitsee yleensä paikassa missä pinnan lamellien lujuus on pienempi, siis T15. Teoreettisesti pitäisi siis käyttää pienempää taivutuslujuuden arvoa kuin vastaavalle homogeeniselle, pelkästään luokan T22 lamelleista kootulle palkille. Pienempää puristuslujuuden arvoa ei kuitenkaan yleensä käytetä siitä syystä, että murto tapahtuu lähes aina vedetyltä reunalta, missä lamellit ovat lujempia luokan T22 lamelleja.



KUVA 7-8

Harjapalkki ja sen epälineaarinen taivutusjännitysjakautuma kohdassa $x=x_0$ ja palkin keskellä, missä on myös esitetty syitä vastaan kohtisuora vetojännitys.

Vinoon sahatus reunan uloimmaisten syiden jännitysten pitää täyttää ehto

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{md}$$

7-4

$\sigma_{m,\alpha,d}$	vinon reunan suuntaisen taivutusjännityksen mitoitusarvo
$f_{m,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo
$k_{m,\alpha}$	kerroin joka ottaa huomioon vinolla reunalla vaikuttavan taivutusjännityksen, leikkausjännityksen ja puristus- tai vetojännityksen yhteisvaikutuksen

Eurokoodi 5 antaa pienennyskertoimelle $k_{m,\alpha}$ seuraavat yhtälöt

- reunan suuntaisten vetojännitysten vaikuttaessa

$$k_{m,\alpha} = \left[1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0,75 \cdot f_{v,d}} \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} \tan^2 \alpha \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

7-5

- reunan suuntaisten puristusjännitysten vaikuttaessa

$$k_{m,\alpha} = \left[1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \tan^2 \alpha \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

7-6

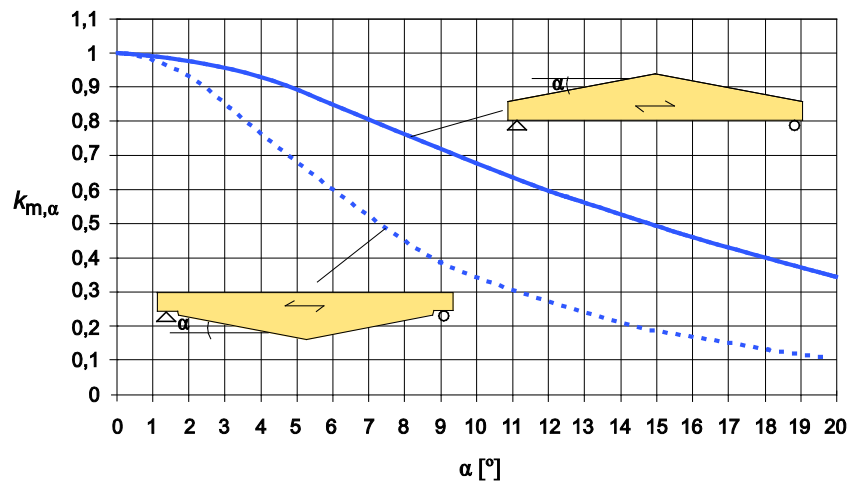
$f_{v,d}$	leikkauslujuuden mitoitusarvo eurokoodi 5:n mukaan
$f_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden mitoitusarvo eurokoodi 5:n mukaan
$f_{c,90,d}$	puristuslujuuden mitoitusarvo eurokoodi 5:n mukaan

$k_{m,\alpha}$ arvot vinon reunan kaltevuuden funktiona esitetään kuvassa 7-9. Arvot on laskettu luokan GL30c liimapuulle. Ehjän viivan arvoja voidaan käyttää riittävällä tarkkuudella myös sellaisille palkeille joiden alareuna on kaareva (mahapalkeille). Näissä tapauksissa kulma α on suurimman taivutusjännityksen kohdalla noin

$$\alpha \approx \frac{l}{4 \cdot R} \cdot \frac{180}{\pi}$$

7-7

l palkin jänneväli
 R lamellien kaarevuussäde (tavallisesti $R > 100$ m)



KUVA 7-9

$k_{m,\alpha}$ arvot eurokoodi 5:n mukaan kun palkin reunan kaltevuus vaihtelee; Liimapuuluokka GL30c; Käyttöluokka 1; Keskipitkä kuorman aikaluokka.

Taivutusmomentin aiheuttaman, syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen mitoitusarvo on

$$\sigma_{t,90,d} = (0,2 \cdot \tan \alpha) \cdot \frac{M_{ap,d}}{W_{ap}}$$

7-8

$M_{ap,d}$ taivutusmomentin mitoitusarvo harjalla

W_{ap} palkin taivutusvastus harjalla

$0,2 \cdot \tan \alpha$ elementtimenetelmällä määritetty kerroin joka ilmoittaa syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen suhteen taivutusjännitykseen palkin harjan alueella. Eurokoodi 5 merkitsee tätä kerrointa symbolilla k_p ja se esitetään kaltevuuden α funktiona myös kuvassa 7-12. Harjapalkkien kaarevuus on ∞ ja siksi k_p -arvo luetaan kohdasta $h_{ap}/r=0$ kuvassa 7-12.

Vetolujuutta syitä vastaan kohtisuoraan pitää myös pienentää tilavuusvaikutuksen mukaisesti. Eurokoodi 5 mukaan seuraavan ehdon pitää täyttyä

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d} = k_{dis} \cdot \left(\frac{0,01}{V} \right)^{0,2} \cdot f_{t,90,d}$$

7-9

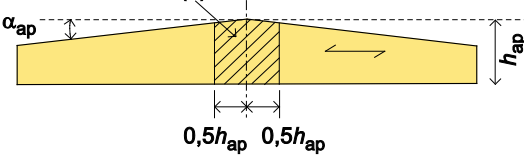
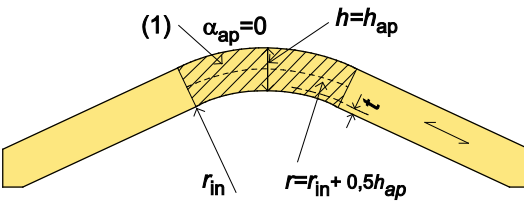
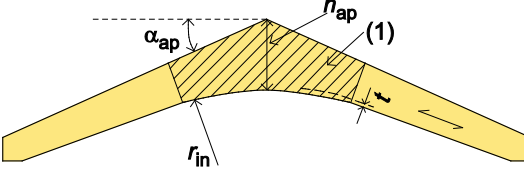
$f_{t,90,d}$ vetojännityksen mitoitusarvo syitä vastaan kohtisuoraan

k_{dis} kerroin joka ottaa huomioon harjan alueen jännitysjakautuman

Tasaisesti kuormitetun palkin k_{dis} ja V arvot on esitetty taulukossa 7-1.

TAULUKKO 7-1

k_{dis} ja V arvot eurokoodi 5:n mukaan tavanomaisille palkeille. Palkin leveys on b .

Palkin tyyppi	k_{dis}	V
Harjapalkki 	1,4	$\sim b \cdot (h_{ap})^2$
Kaareva palkki 	1,4	Kaarevan osan tilavuus (1)*
Kaareva harjapalkki 	1,7	Kaarevan osan tilavuus (1)*

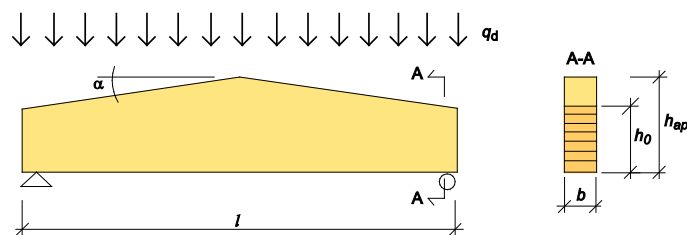
* Suurempaa tilavuutta V kuin $2/3$ palkin koko tilavuudesta V_b ei tarvitse käyttää.

Tavallisesti harjapalkkien mitoittamiseen kuuluvat seuraavat tarkistukset:

- kestävyys taivutusjännityksen suhteen etäisyydellä x_0 tuelta
- kestävyys leikkausjännityksen ja syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen suhteen tuella
- kestävyys syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen suhteen palkin harjan alueella
- palkin kiepahdus (tavallisesti tarkistetaan osa osalta, vierekkäisten orsien väliseltä osuudelta).

Tasaisesti kuormitetun vapaasti tuetun harjapalkin alustava mitoitus

Seuraavaksi esitetään yleisiä vapaasti tuetun tasaisella kuormalla kuormitetun harjapalkin mitoitusohjeita. Kuvassa 7-10 esitetään tyypillinen rakenne ja käytetyt merkinnät.



KUVA 7-10

Harjapalkki ja käytetyt merkinnät.

Mitoitettaessa tunnetaan tavallisesti:

- kuorman mitoitusarvo q_d
- katon kaltevuus α (tavallisesti 2° - 6°)
- jänneväli l (tavallisesti $\leq 30\text{m}$).

Sen lisäksi tunnetaan materiaaliominaisuudet, koska ne ovat riippuvaisia valitusta liimapuun luokasta, esimerkiksi GL30c.

Alustavan mitoituksen tuloksena tunnetaan arvioidut poikkileikkausmitat sekä tuella että harjalla.

Palkin leveys

Etenkin asennusaikaisen kiepahduksen estämiseksi palkin leveyden pitäisi olla vähintään $1/7$ korkeudesta, joka puolestaan on $1/20 \dots 1/15$ jännevälistä. Tästä saadaan

$$b \approx \frac{l}{140} \dots \frac{l}{110}$$

7-10

Palkin korkeus

Yleensä palkin mitoituksen määrää sen kestävyys taivutusta vastaan siinä poikkileikkauksessa, joka on etäisyydellä x_0 tuelta (katso kohta 7.1). Etäisyyden x_0 määrittäminen edellyttää kuitenkin että palkin korkeus tuella ja harjalla tunnettaisiin. Alustavassa mitoituksessa oletetaan, että kohta x_0 on jännevälin neljännespisteessä. Sen lisäksi palkin taivutuslujuutta $f_{m,d}$ kohdassa x_0 pienennetään hiukan koska yläreuna on vino. Kun α kaltevuus on alle 6° niin $k_{m,\alpha} \approx 0,9$ (katso kuva 7-9). Näillä oletuksin voidaan seuraavista yhtälöistä arvioida tarvittava korkeus.

Palkin korkeus tuella on

$$h_0 = \frac{l}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{q_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} - \tan \alpha \right)$$

7-11

Palkin korkeus harjalla on

$$h_{ap} = \frac{l}{4} \cdot \left(3 \cdot \sqrt{\frac{q_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}} + \tan \alpha \right)$$

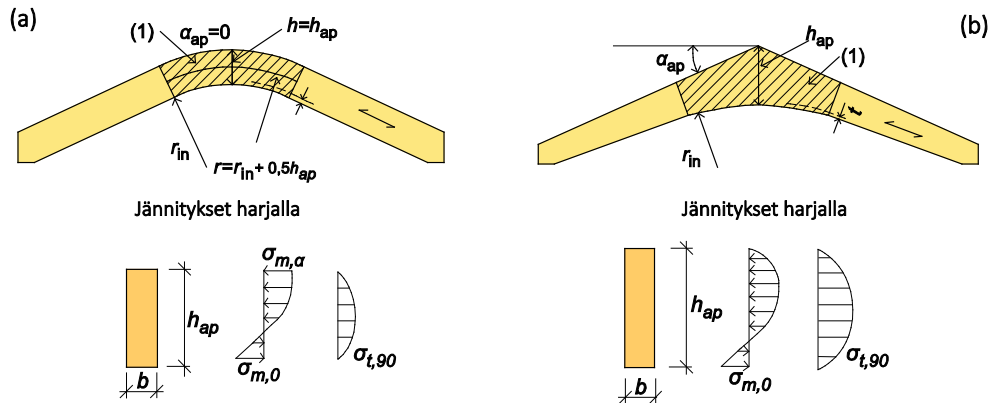
7-12

Kaarevat palkit ja kaarevat harjapalkit

Kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien jännevälin ei pidä olla suurempi kuin 20 m. Jänneväliä rajoittavat pääasiassa harjan alueelle syntyvät syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset. Halkeamisriskin pienentämiseksi näiden palkkien kaltevuuden ei pitäisi ylittää 15° (kaarevien palkkien osalta tarkoitetaan suoran osan kaltevuutta). Korkeuden tuella pitää olla vähintään $l/30$ kummallekin palkkityypille. Kaarevien palkkien korkeus harjalla on tavallisesti $l/20 \dots l/15$ ja kaarevien harjapalkkien $l/15 \dots l/10$. Leveyden pitää olla vähintään seitsemäsosa harjan korkeudesta ($b \geq h_{ap}/7$). Kaarevuussäteen r (katso kuva 7-11) pitää tavallisesti olla vähintään 10 m.

Näiden palkkien taipumalla ei yleensä ole merkitystä. Palkin pään vaakasuora siirtymä tuella voi kuitenkin olla varsin suuri. Suunnittelussa on varmistettava, että tämä siirtyminen voi tapahtua vapaasti aiheuttamatta ennalta arvaamattomia vaakavoimia tukirakenteille (pilareille tai seinille).

Poikkileikkaus missä taivutusjännitykset ovat suurimmat on etäisyydellä x_0 tuelta. Sen sijainti voidaan määrittää yhtälöstä 7-2. Kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien kestävyys määräytyy tavallisesti niiden kestävydestä harjan alueella syntyviä syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan. Nämä aiheutuvat pääasiassa painovoiman aiheuttamista kuormista mutta myös puun kosteusvaihteluista ja ne ovat suurimmillaan palkin harjan alueella (merkitty numerolla (1) kuvassa 7-11).



KUVA 7-11

Taivutusjännitys $\sigma_{m,0}$ ja vetojännitys kohtisuoraan syitä vastaan $\sigma_{t,90}$ (a) kaareva palkki (b) kaareva harjapalkki.

Eurokoodi 5:n mukaan voidaan harjalla vaikuttavan taivutusmomentin mitoitusarvon ($M_{ap,d}$) aiheuttama syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen mitoitusarvo laskea yhtälöistä 7-13 - 7-17 (merkinnät kuten kuvassa 7-11).

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{M_{ap,d}}{W_{ap}} \quad 7-13$$

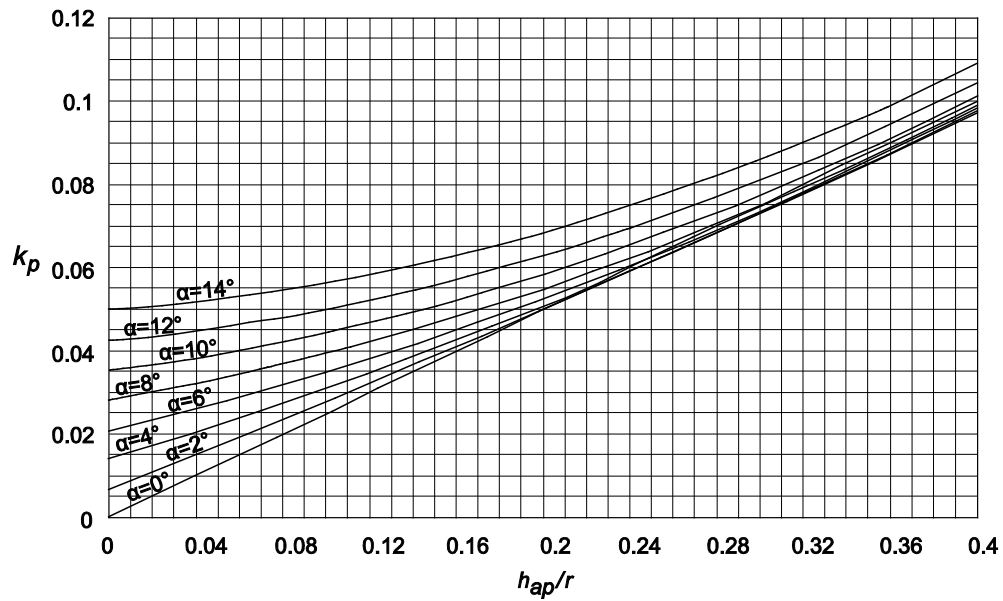
$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 \quad 7-14$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap} \quad 7-15$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad 7-16$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \tan \alpha_{ap} - 4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad 7-17$$

k_p on elementtimenetelmällä määritetty kerroin, joka on syitä vastaan kohtisuoran jännityksen ja harjan taivutusjännityksen mitoitusarvojen suhde. Kuva 7-12 esittää k_p :n arvoja suhteen h_{ap}/r funktiona. Harjan eri kaltevuuskulmille α_{ap} on piirretty omat käyränsä. Materiaali on liimapuuta GL30c.



KUVA 7-12

Eurokoodi 5:n kerroin k_p suhteen h_{ap}/r eri arvoille; liimapuuluokka GL30c.

Sytä vastaan kohtisuorat jännitykset tarkistetaan samalla yhtälöllä kuin harjapalkitkin, katso yhtälö 7-9.

Harjan taivutusjännitys voi olla mitoittava kaarevilla palkeilla joilla on suuri kaarevuussäde, mutta hyvin harvoin kaarevilla harjapalkeilla. Eurokoodi 5:n mukaan taivutusmomentin mitoitusarvon $M_{ap,d}$ aiheuttama taivutusjännitys harjalla voidaan laskea yhtälöistä 7-18 - 7-23.

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{M_{ap,d}}{W_{ap}} \quad 7-18$$

$$k_l = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3 \quad 7-19$$

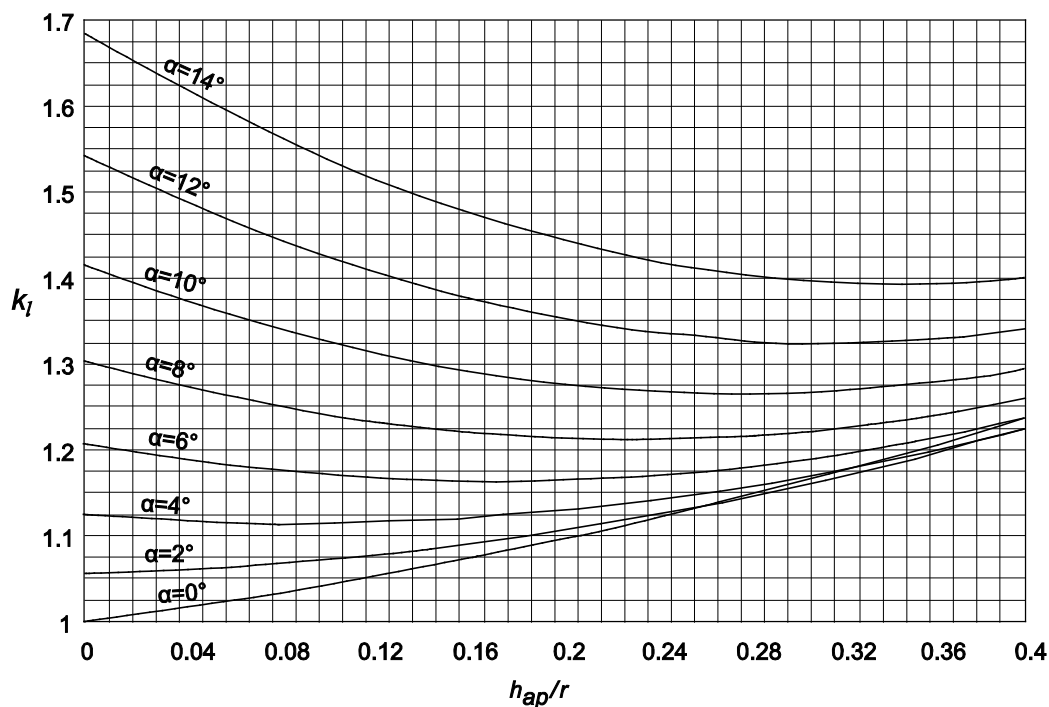
$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad 7-20$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \tan \alpha_{ap} \quad 7-21$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \tan \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad 7-22$$

$$k_4 = 6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap} \quad 7-23$$

k_l on elementtimenetelmällä määritetty kerroin, joka ottaa huomioon palkin geometrian. Kuva 7-13 esittää k_l :n arvoja suhteen h_{ap}/r funktiona. Harjan eri kaltevuuskulmille α_{ap} on piirretty omat käyränsä.



KUVA 7-13

Eurokoodi 5:n kerroin k_l suhteen h_{ap}/r eri arvoille; liimapuuluokka GL30c.

Kaarevien lamellien taivutuslujuutta pienennetään lamellien taivuttamisen aiheuttamien jännöjännitysten vuoksi. Yleensä taivutuslujuus $f_{m,d}$ kerrotaan kertoimella k_r jonka arvo pienenee kun suhde r_{in}/t pienenee (katso taulukko 7-2).

$$\sigma_{m,d} = k_r \cdot f_{m,d}$$

7-24

TAULUKKO 7-2

Eurokoodi 5:n mukainen taivutuslujuuden pienennyskerroin k_r suhteen r_{in}/t eri arvoille, r_{in} on kaarevuussäde ja t lamellin paksuus.

$\frac{r_{in}}{t}$	k_r
≥ 240	1
< 240	$0,76 + 0,001 \cdot \frac{r_{in}}{t}$

Tavallisesti kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien mitoitukseen kuuluvat seuraavat tarkistukset:

- kestävyys taivutusjännityksen suhteen etäisyydellä x_0 tuelta palkeilla joiden korkeus vaihtelee; joskus myös palkin keskellä
- kestävyys leikkausjännityksen ja syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen suhteen tuella
- kestävyys syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen suhteen palkin harjan alueella

- palkin kiepahdus (tavallisesti tarkistetaan osa osalta, vierekkäisten orsien väliseltä osuudelta; kaarevat palkit voidaan olettaa suoriksi kahden katto-orren väliseltä osuudelta).

Tasaisesti kuormitetun vapaasti tuetun kaarevan tai kaarevan harjapalkin alustava mitoitus

Seuraavaksi esitetään yleisiä vapaasti tuetun tasaisella kuormalla kuormitetun kaarevan palkin ja kaarevan harjapalkin mitoitusohjeita. Taulukossa 7-3 esitetään muutamia mitoittamista helpottavia geometrisia suureita.

TAULUKKO 7-3

Kaarevan palkin ja kaarevan harjapalkin alustavassa mitoittamisessa tarvittavia geometrisia suureita.

Palkkityyppi	Leveys b	Korkeus tuella h_0	Korkeus harjalla h_{ap}	Kaarevuussäde r
Kaareva palkki	$l/140 \dots l/120$	$\geq l/30$	$\approx l/17$	$\geq 10m$
Kaareva harjapalkki	$l/100 \dots l/80$	$\geq l/30$	$\approx l/13$	$\geq 10m$

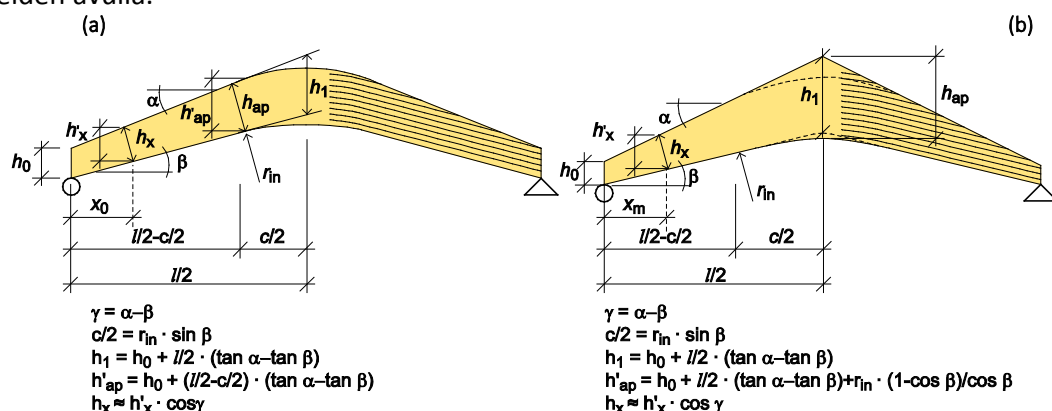
Yleensä tunnetaan alkuarvoina kuorman mitoitusarvo q_d , katon kaltevuus α ja jänneväli l kuten harjapalkeillakin.

Ensimmäiseksi määritetään palkin korkeus siinä poikkileikkauksessa missä on suurin taivutusjännitys, siis kohdassa $x = x_0$ tuelta. x_0 oletetaan sijaitsevan neljäsosapisteessä kuten harjapalkeillakin. Sen lisäksi palkin taivutuslujuutta $f_{m,d}$ pienennetään kertoimella $k_{m,\alpha} \approx 0,9$. Näillä oletuksilla voidaan tarvittava korkeus kohdassa $x = x_0$ laskea seuraavasta yhtälöstä

$$h'_{x0} = \frac{3 \cdot l}{4} \cdot \sqrt{\frac{q_d}{b \cdot (0,9 \cdot f_{m,d})}}$$

7-25

Palkin korkeus tuella ja harjalla voidaan sen jälkeen laskea kuvan 7-14 esittämien geometrinen suureiden avulla.

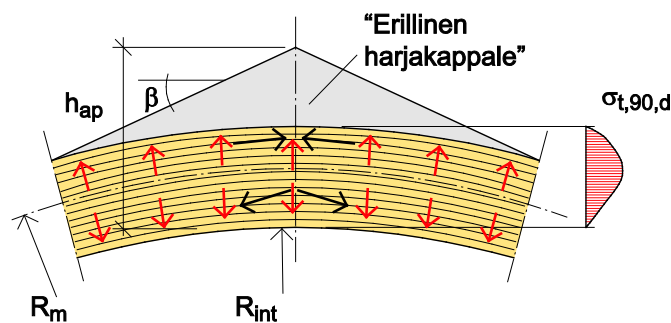


KUVA 7-14

Geometrisia suureita (a) kaareva palkki (b) kaareva harjapalkki.

7.4 Harjapalkkien, kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan

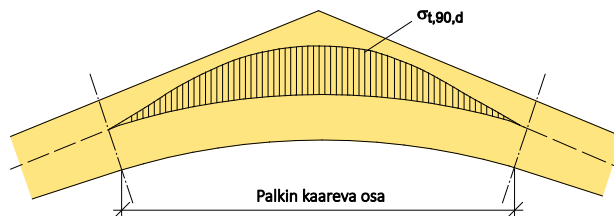
Edellisissä jaksoissa esitettiin harjan alueella syntyvien syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten eurokoodi 5:n mukaiset yhtälöt kaareville palkeille, kaareville harjapalkeille ja harjapalkeille. Kaareva harjapalkki on näistä kolmesta herkin halkeamaan harjalla syntyvien vetojännitysten vuoksi. Harjakappale voidaan valmistaa erillisenä halkeamisriskin pienentämiseksi. Palkin harja kiinnitetään siinä tapauksessa alla olevaan palkkiin muutamien yksittäisin ruuvein (katso kuva 7-15). Tällä tavoin kaarevan harjapalkin toiminta muuttuu lähes samanlaiseksi kuin kaarevan palkin, ja syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset pienenevät.



KUVA 7-15

Erillisen harjakappaleen avulla tehty kaareva harjapalkki.

Kun etäisyys harjalta kasvaa, niin syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset pienenevät. Niiden suuruuteen vaikuttaa palkin muoto ja kuormitusolosuhteet. Kuva 7-16 esittää tyypillistä tasaisen kuorman aiheuttamaa jännitysjakautumaa kaarevassa harjapalkissa.



KUVA 7-16

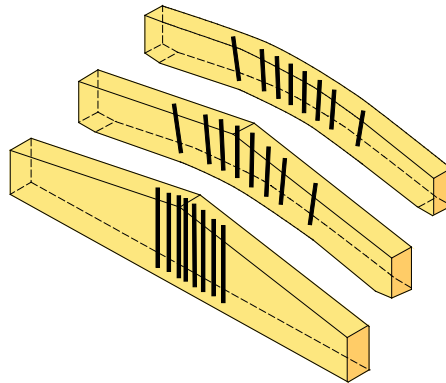
Tasaisen kuorman aiheuttama jännitysjakautuma kaarevassa harjapalkissa.

Tavallisia vahvistustapoja kun syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on kriittinen

Kaarevat palkit, kaarevat harjapalkit ja harjapalkit vahvistetaan syitä vastaan kohtisuoraa vetoa vastaan joko sisäisellä tai ulkoisella vahvistuksella.

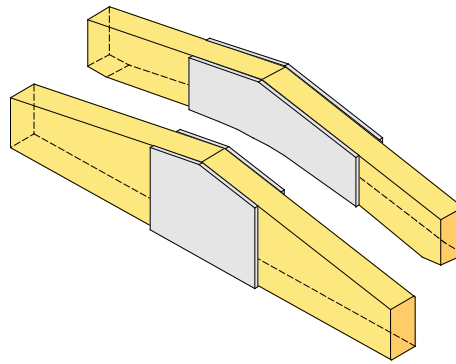
Sisäinen vahvistus voidaan tehdä käyttämällä liimaruuveja (ruuveja tai kierretankoja) tai täyskierteisiä puuruuveja. Kuva 7-17 esittää tyypillisiä sisäisiä vahvistuksia. Sisäistä vahvistusta käytettäessä on otettava huomioon jännityksiä laskettaessa että tangot tai ruuvit pienentävät poikkileikkauksen pinta-alaa.

Ulkoinen vahvistus voidaan tehdä liimaamalla palkin pintaan vaneria, kertopuuta tai lautoja joiden syiden suunta on kohtisuoraan palkin syitä vastaan tai puristamalla pintaan naulalevy. Seuraavassa esitetään sisäisen vahvistuksen mitoittaminen. Ulkoinen vahvistus mitoitetaan vastaavalla tavalla.



KUVA 7-17

Liimapuupalkin sisäinen vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan.



KUVA 7-18

Liimapuupalkin ulkoinen vahvistaminen syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä vastaan.

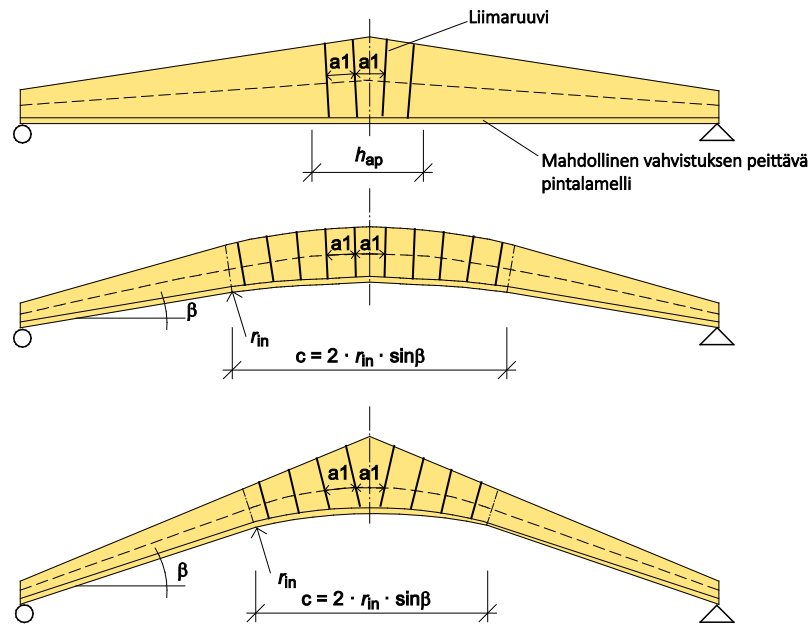
Vahvistuksen mitoittaminen

Palkki vahvistetaan alueella missä esiintyy huomattavia vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Vahvistus tehdään ainakin sille alueelle missä nämä jännitykset ylittävät vastaavan lujuuden ja sijoitellaan kuten kuvassa 7-19 on esitetty.

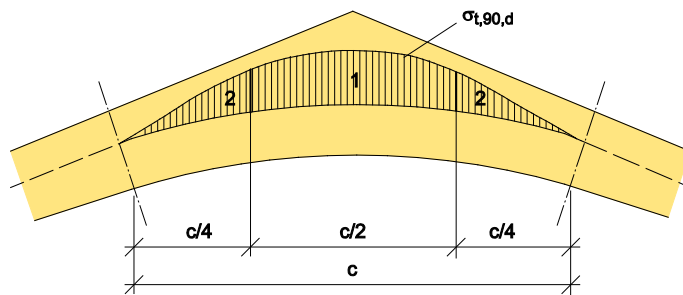
Kaarevat harjapalkit ja kaarevat palkit valmistetaan tavallisesti siten, että ne ovat suoria tukien läheisyydessä ja kaarevia vain keskeltä. Sellaisissa palkeissa vetojännitykset ulottuvat myös suoralle osuudelle, katso kuva 7-16. Suorilla osilla muodostuvat vetojännitykset ovat kuitenkin pieniä ja sen vuoksi vahvistetaan yleensä vain palkin kaareva osuus.

Joskus kaarevat palkit valmistetaan ilman suoria osuuksia. Jos näissä palkeissa tarvitaan vahvistuksia, ne sijoitetaan yleensä palkin keskelle alueelle missä syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on suurempi kuin 80 % vastaavasta lujuudesta.

Harjapalkkien vahvistus tehdään tarvittaessa symmetrisesti palkin harjan suhteen, tavallisesti palkin harjakorkeuden pituiselta alueelta. Kaarevissa harjapalkeissa syntyvä vetovoimajakautuma otetaan huomioon vahvistuksen sijoituksessa yksinkertaistetulla tavalla siten, että keskialueelle sijoitetaan vahvistus joka vastaa suurinta jännitystä ja ulompien neljäsosien alueelle vahvistus joka vastaa kahta kolmasosaa suurimmasta jännityksestä.


KUVA 7-19

Harjapalkkien, kaarevien palkkien ja kaarevien harjapalkkien vahvistuksen sijoittaminen.


KUVA 7-20

Kaarevan harjapalkin vahvistettavan alueen määrittely: keskialue (1) ja vahvistettavan alueen ulommat neljäsosat (2).

Harjan keskialueen jokainen yksittäinen ruuvi mitoitetaan voimalle, jonka mitoitusarvo on

$$F_{t,90,d} = \frac{\sigma_{t,90,d} \cdot b \cdot a_1}{n}$$

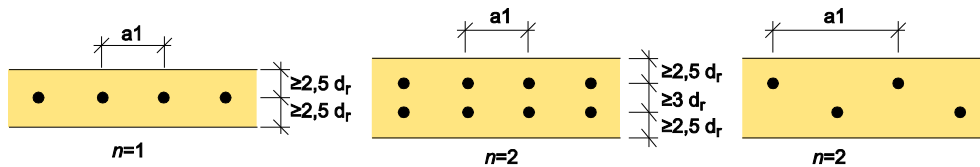
7-26

missä

$\sigma_{t,90,d}$ yhtälön 7-13 mukainen syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen mitoitusarvo palkin leveys

b vahvistuksien väli palkin pituusakselin suunnassa (suositeltu väli $250 \text{ mm} \leq a_1 \leq 0,75 \cdot h_{ap}$ missä h_{ap} on palkin korkeus harjalla)

a_1 vahvistavien ruuvien lukumäärä kohtisuoraan palkin pituusakselia vastaan ($n = 1$ tai 2 , katso Kuva 7-21).



KUVA 7-21

n ja a_1 yhtälöissä 7-26 ja 7-27 (n on vahvistavien ruuvien lukumäärä kohtisuoraan palkin pituusakselia vastaan). d_r on vahvistusruuvien kierteisen osan ulkohalkaisija.

Harjan ulompien neljänneksen alueella jokainen yksittäinen ruuvi mitoitetaan vastaavasti voimalle, jonka mitoitusarvo on

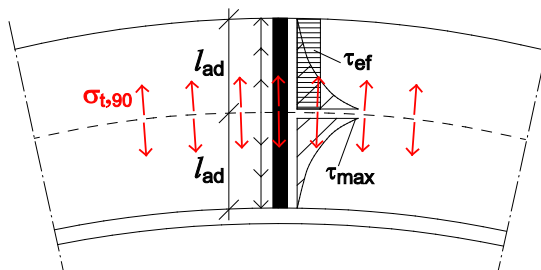
$$F_{t,90,d} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_{t,90,d} \cdot b \cdot a_1}{n} \quad 7-27$$

Seuraavan mitoitus ehdon pitää täyttyä

$$F_{t,90,d} \leq R_{ax,d} \quad 7-28$$

$R_{ax,d}$ vahvistamiseen käytetyn ruuvien tai liimatangon aksiaalinen lujuus; vetolujuus tai ulosvetolujuus, kumpi vain on pienempi

Yhtälöä 7-28 käytettäessä on muistettava, että vetovoima $F_{t,90,d}$ siirtyy ruuvien ja puuaineen välisten leikkausjännitysten avulla, mitkä eivät ole tasan jakautuneita koko ruuvien pituudelta. Kuitenkin niitä tavallisesti tarkastellaan tasan jakautuneina, katso kuva 7-22. Sen lisäksi ruuvien yläpäästä rasittaa ylöspäin suuntautunut vetovoima ja sen alapäästä alaspäin suuntautunut vetovoima. Tämän vuoksi ruuvien ulosvedon kestävyys yhtälössä 7-28 määritellään kuvan 7-22 mukaiselle pituudelle l_{ad} . Täyskierteisille ruuveille tai liimaruuveille joiden pituus on koko palkin korkeus voidaan käyttää niiden puolta pituutta arvona l_{ad} .



KUVA 7-22

Leikkausjännitysten jakautuminen kaarevan palkin vahvistusruuvissa.

8	RISTIKOT	2
8.1	Ristikoiden geometria	2
	Tasakorkea suora ristikko	3
	Harjaristikko	4
	Kaarevapaarteiset ristikot	4
	Sauvavoimat	5
8.2	Alustava mitoitus	6
	Sauvojen alustava mitoitus	7
	Ristikon sauvojen yleisiä mitoitusääntöjä	8
8.3	Sauva- ja liitosvoimien laskenta	9
	Puristussauvojen nurjahtaminen	11
8.4	Käyttörajoitilatarkastelu	13
8.5	Yksityiskohtien suunnittelu	13
	Uumasauvojen ja parteiden välisiä liitoksia	13
	Harjaliitokset ja tukialueen liitokset	16

8 RISTIKOT

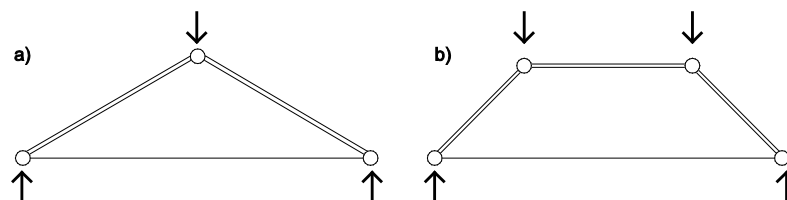
Ristikko on kantava rakennusosa, joka muodostuu suorien (tai lähes suorien) päistään yhteen liitettyjen sauvojen muodostamista kolmioista. Ristikot muodostuvat kolmioista, koska ne ovat geometriselta muodoltaan määriteltyjä: kulmat pysyvät määrätyn suuruisina eivätkä voi muuttua suuremmiksi tai pienemmiksi liitosten menemättä rikki. Esimerkiksi suorakulmion nurkat sen sijaan voivat siirtyä, jolloin siitä tulee suunnikas. Tasoristikon kaikki sauvat ja nurkat ovat samassa tasossa, mutta avaruusristikon sauvat ja nurkat muodostavat kolmiulotteisen rakenteen. Puiset ristikot ovat yleensä kaksitukisia vapaasti tuettuja tasoristikkoita, ja tämä luku käsittelee sellaisia.

Liimapuiset ristikot ovat taloudellisia kun jänneväli ylittää noin 25 m. Ristikkorakenteisen katon etuna on että rakennuksen tarvitsemat putkivedot voidaan asentaa ristikon uumasauvojen väliin.

Kun jänneväli on suuri ja varsinaisen vesikaton rakenne kevyt, voidaan ristikot sijoittaa 5...12 m päähän toisistaan. Tavallisesti katto-orret ovat 1,2...2,4 m jaolla ja niiden päällä on poimulevy. Vaihtoehtoisesti katto-orret voidaan jättää pois ja käyttää korkeampaa ja paksumpaa poimulevyä suoraan ristikoiden päällä. Jännevälin kasvaessa on yleensä taloudellisempaa käyttää harvempaa ristikkojakoa.

8.1 Ristikoiden geometria

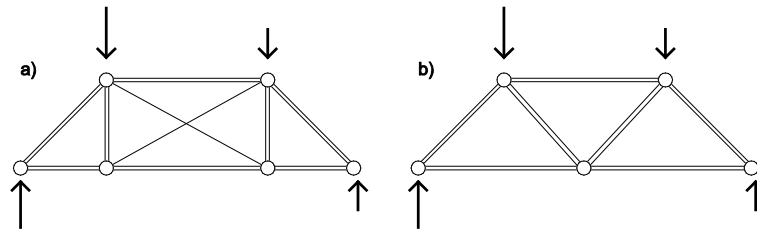
Ristikon rakenteellinen tarkoitus on siirtää sille yleensä orsien kohdalta tulevat pistekuormat tuille niin tehokkaasti ja taloudellisesti kuin mahdollista. Tehokkuus on riippuvainen valitusta ristikotyypistä ja arkkitehtonisista vaatimuksista. Kahden eri kuormitustilanteen ihanteellista muotoa vastaavat ristikot esitetään kuvassa 8-1.



KUVA 8-1

Kahden eri kuormitustilanteen ihanteellista muotoa vastaavat ristikot (a) stabiili kolmioista koottu ristikko (b) epästabiili neljän nivelen muodostama mekanismi.

Täysin symmetrinen kuorma voidaan viedä tuelle ilman uumasauvoja, sillä momenttipinta sopii yhteen rakenteen geometrian kanssa. Uumasauvatonta muotoa ei yleensä kuitenkaan voi käyttää, sillä lumesta, tuulesta ja pysyvistä kuormista aiheutuu aina myös epäsymmetrisiä kuormitusyhdistelmiä. Epäsymmetrisiä kuormituksia aiheutuu myös valmistus- ja asennustoleransseista. Suunnittelijan pitää kuitenkin pyrkiä mahdollisimman lähellä ideaalista olevaan ristikon yleismuotoon ja lisätä siihen epäsymmetrisen kuorman vaatimat uumasauvat. Tällä tavoin sisäsauvojen ja niiden liitosten voimat jäävät mahdollisimman pieniksi ja liitosten muoto tulee yksinkertaiseksi ja taloudelliseksi. Kuvan 8-1 esimerkkiin (b) sopivat uumasauvaratkaisut on esitetty kuvissa 8-2 (a) ja (b).



KUVA 8-2

Esimerkkejä epäsymmetristen kuormien vaatimista uumasauvaratkaisuista.

Jos arkkitehdin haluama muoto poikkeaa huomattavasti ideaalisesta muodosta, voi uumasauvoihin ja niiden liitoksiin syntyä suuria jännityksiä. Tällaisessa tilanteessa päästään taloudelliseen ratkaisuun siten, että uumasauvaratkaisussa haetaan materiaalikustannuksien ja valmistuskustannuksien tasapainoa. Ratkaisua haettaessa on otettava huomioon seuraavat näkökohdat:

- Liitosten lukumäärän pitää olla mahdollisimman pieni, koska jokaisen liitoksen valmistaminen on kallista ja jokaisen liitoksen muodonmuutos lisää ristikon kokonaismuodonmuutosta.
- Puristetut parresauvat ja uumasauvat eivät saa olla liian hoikkia.
- Parresauvojen paikallinen taipuma ei saa olla liian suuri.
- Parresauvojen ja uumasauvojen väliset kulmat eivät saa olla liian pieniä.

Kuljetusmahdollisuudet rajoittavat usein ristikon korkeutta tai jänneväliä. Kuljetus on suunniteltava huolellisesti jos ristikko on korkeampi kuin 3 m tai pidempi kuin 20 m. Kuljetukseen liittyvät ongelmat voidaan usein ratkaista siten, että ristikko toimitetaan kokonaan tai osittain asentamattomana.

Suurien ristikoiden parresauvoihin voidaan tehdä jatkoksia yhteen tai useampaan kohtaan, ja joskus voidaan koko ristikko koota rakennuspaikalla. On kuitenkin aina syytä esikoota ristikko liimapuutehtaalla, jotta varmistutaan osien yhteensopivuudesta. Esikokoamisen jälkeen ristikon liitoksia puretaan riittävä määrä kuljetusta varten.

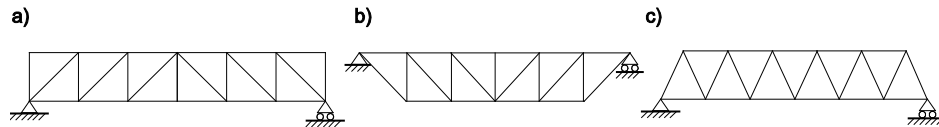
Kuvassa 8-4 (c) esitetyn ristikon tyyppiset rakenteet voidaan tarvittaessa rakentaa kahtena puolikkaana, jotka yhdistetään rakennuspaikalla keskellä olevalla vetotangolla.

Yleisistä ristikkomuodoista on lukuisia vaihtoehtoisia muotoja. Yksi tavallisimmista ristikoista on kolminivelkattotuoli, jota käsitellään luvussa 9. Seuraavassa kuvataan muutamia muita tavallisia muotoja.

Tasakorkea suora ristikko

Pitkillä jänneväleillä (25...30 m tasakorkea suora ristikko kilpailee taloudellisesti liimapuupalkkien tai vaneriuumaisten palkkien kanssa). Uumasauvoille tulee usein suuria kuormia, ja sen vuoksi liitosten suunnittelu voi olla vaikeaa. Uumasauvat voidaan sijoittaa niin, että ne ovat puristettuja (Howen ristikko, kuva 8-3 (a)), tai vedettyjä (Prattin ristikko, kuva 8-3 (b)) tai vuorotellen puristettuja ja vedettyjä (Warrenin ristikko, kuva 8-3 (c)).

Puristettujen diagonaalien etuna on että diagonaalien ja parresauvojen liitokset on helppompi mitoittaa, kun osa kuormasta voi siirtyä kosketuspaineella. Haittana on diagonaalien suurempi nurjahduspituus. Vedettyjä diagonaaleja käytettäessä ristikko voidaan tukea myös yläpaarteesta, kuten kuvassa 8-3 (b) on esitetty. Ristikon painopiste on tällöin tukipisteiden alapuolella, mikä helpottaa asennettaessa ristikon saamista pystysuoraan asentoon.



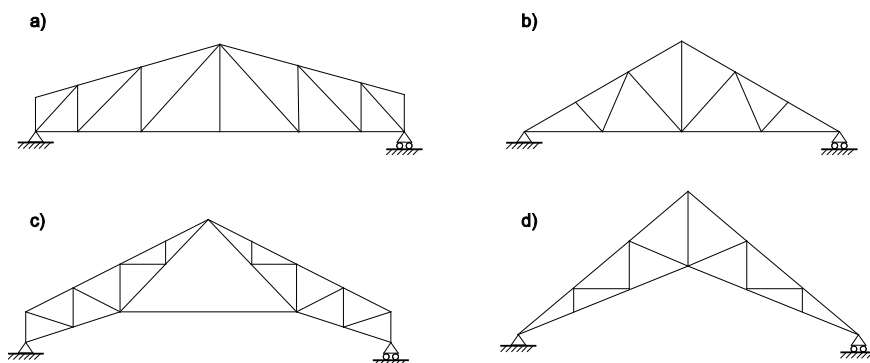
KUVA 8-3

Tasakorkeita suoria ristikoita (a) puristetut diagonaalit (Howen ristikko) (b) vedetyt diagonaalit (Prattin ristikko) (c) vuorotellen puristetut ja vedetyt diagonaalit (Warrenin ristikko).

Tasakorkeat suorat ristikot tehdään usein esikorotettuna. Esikorotuksen suuruus vastaa oman painon ja määräävän kuorman puolikkaan aiheuttamaa taipumaa. Määräävä kuorma voi olla esimerkiksi lumikuorma.

Harjaristikko

Harjaristikon muoto sopii verrattain hyvin yhteen tasaisen kuorman synnyttämän momenttipinnan kanssa ja sellainen ristikko sopii kattorakenteisiin, joissa käytetään perinteisiä orsia ja poimulevyä. Osa kuormasta siirtyy suoraan yläpaarteeseen kautta tuille. Uumasauvat siirtävät pieniä tai keskisuuria voimia, joille niiden liitokset voidaan helposti mitoittaa. Jos ristikon alareuna on vaakasuora, niin uumasauvat voidaan sijoitella kuten kuvassa 8-3 on esitetty. Kuvassa 8-4 esitetään erilaisia harjaristikoita.



KUVA 8-4

Harjaristikoita (a) katkaistu Howe-tyyppinen harjaristikko (b) harjaristikko (c) harjaristikko jonka alapaarre on korotettu (d) saksiristikko.

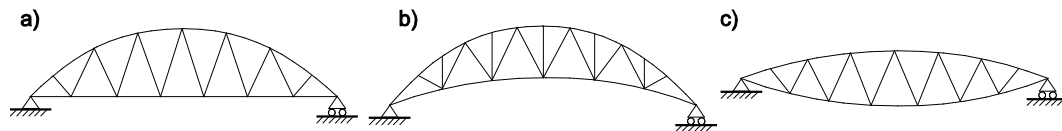
Jos ristikon keskellä tarvitaan enemmän korkeutta voidaan alapaarretta korottaa, katso kuva 8-4 (c) ja (d). Tällainen ristikko sopii esimerkiksi halleihin, joiden käyntiovi on päädyssä.

Kaarevapaarteiset ristikot

Suurien jännevälien ristikoiden yläpaarre tai molemmat paarteet voidaan tehdä paraabelin muotoisina rakenteen kilpailukyvyyn parantamiseksi, kuva 8-5.

Tasaisen kuorman rasittaman ristikon paarteet kantavat lähes koko kuorman, jos rakenteelle ei tule paikallisia suuria pistekuormia. Uumasauvoille tulee siten hyvin pieniä kuormia ja niiden ja paarresauvojen väliset liitokset tulevat yksinkertaisiksi ja edullisiksi. Tällaisen liimapuurakenteen jänneväli voi helposti ylittää jopa 60 m.

Tasaisen kuorman vallitessa paraabelin kaarella on paras kestävyys. Käytännössä valmistus on helpompaa jos paarteiden muotona käytetään ympyrän kaarta. Kaarevat paarteet muodostuvat tavallisesti kahdesta tai useammasta kaarevasta liimapuisesta osasta, jotka on liitetty toisiinsa momenttijäykkin liitoksiin. Suoran alapaarteiden materiaalina käytetään usein terästä.



KUVA 8-5

Kaarevapaarteisia ristikoita (a) paraabeliristikko jonka alapaarre on suora (b) paraabeliristikko jonka alapaarre on korotettu (c) ristikko jonka molemmat paarteet ovat kaarevat.

Sauvavoimat

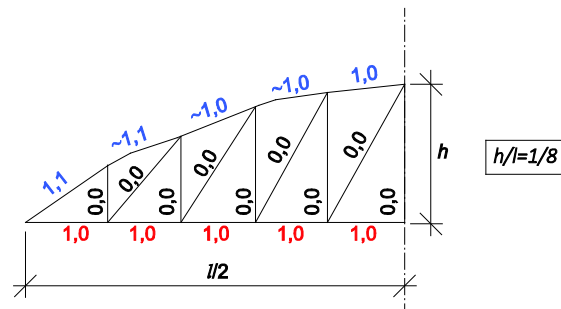
Ristikon sauvoihin syntyvät normaalivoimat ovat riippuvaisia valitusta ristikon muodosta. Kuvassa 8-6 esitetään kolmen erilaisen perusristikon sauvavoimat. Kuvassa esitetään suhteet $N/(q \cdot l)$, missä N on sauvavoima, q tasainen yksikkökuorma ja l on ristikon jänneväli. Vasemmalla puolella esitetään sauvavoimat kun ristikon kummallakin puoliskolla vaikuttaa tasainen yksikkökuorma ($q=1$). Oikealla puolella esitetään samanlaisen ristikon sauvavoimat, kun kuormitus on keskiviivan eri puolilla erilainen ($q_l=1$ jännevälin vasemmalla puolella ja $q_r=0,5$ jännevälin oikealla puolella). Punaiset numerot tarkoittavat vetovoimaa ja siniset puristavaa voimaa.

Kuvan 8-6 mukaan paraabeliristikon ylä- ja alapaarten kuormat ovat koko matkaltaan lähes samansuuruiset. Sen vuoksi uumasauvat (diagonaalit ja vertikaalit) eivät saa juuri lainkaan kuormia. Tällaisen ristikon liitoksista tulee varsin edullisia, lukuun ottamatta tuella olevaa alaja yläpaarten yhdistävää liitosta ja mahdollisia asennusliitoksia.

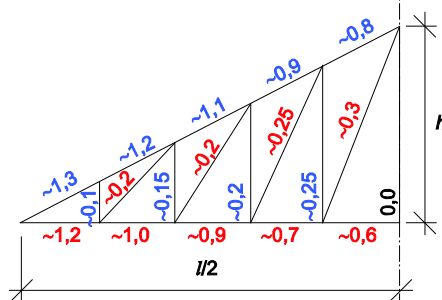
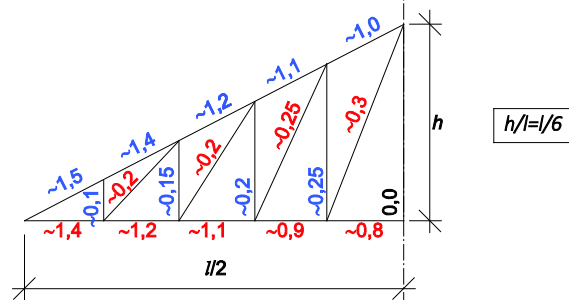
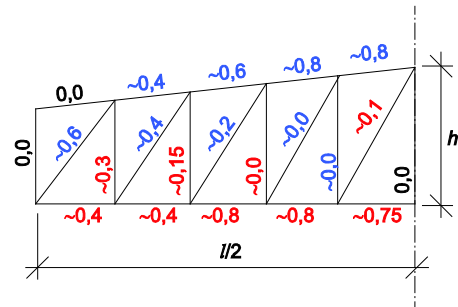
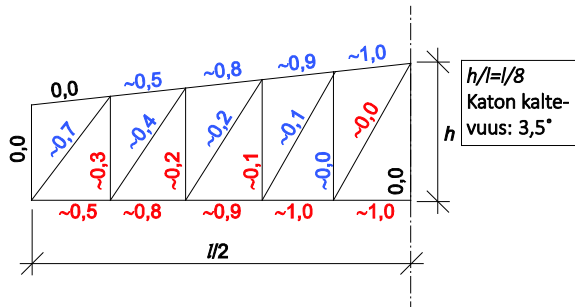
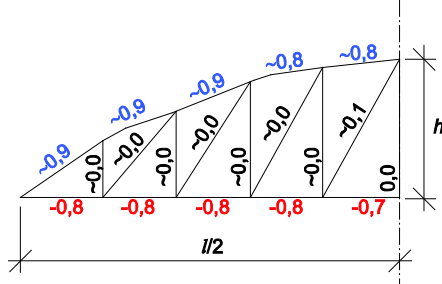
Katkaistun harjaristikon diagonaaleihin syntyy suuria normaalivoimia, erityisesti tuen läheisyydessä. Siksi liitoksista voi tulla näissä kohdissa hankalia. Lisäksi on otettava huomioon diagonaalien nurjahtaminen.

Harjaristikon uumasauvojen sauvavoimat ovat verrattain pieniä. Lähellä tukea syntyy kuitenkin ylä- ja alapaarteeseen hyvin suuria sauvavoimia.

Jos kuormitus poikkeaa kuvien mukaisesta, esimerkiksi jos jännevälin kummankin puoliskon kuorma on kasautuneen lumen vaikutuksesta kolmiomainen, poikkeavat sauvavoimat huomattavasti kuvan 8-6 esittämistä.

Tasainen yksikkökuorma ($q=1$)

Epätasainen kuorma

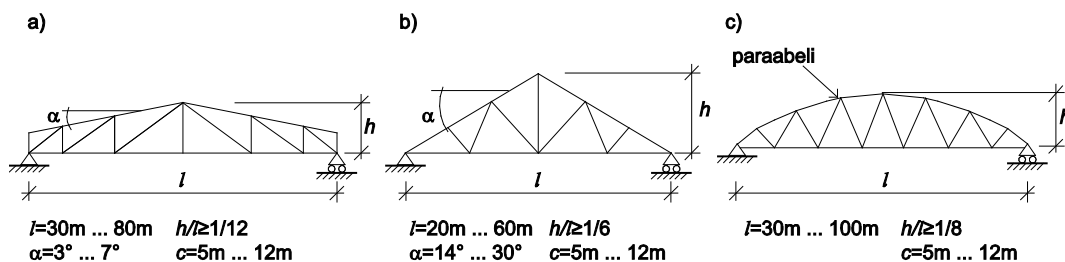
(vasen puoli $q_l=1$, oikea puoli $q_r=0,5$)

KUVA 8-6

Kolmen eri ristikkotyypin sauvavoimat. Ylimpänä paraabeliristikko, keskellä katkaistu harjaristikko ja alimpana harjaristikko. Vasemmalla tasaisen kuorman aiheuttamat sauvavoimat, oikealla puolella jännevälän vasemman puoliskon kuorma $q=1$ ja oikean puoliskon $q=0,5$.

8.2 Alustava mitoitus

Katon muoto ja kaltevuus määräytyvät yleensä ulkonäkösyistä. Tarvittavat asennukset, kuten ilmastointikanavat, vaikuttavat myös valittavaan rakenteeseen. Taloudellisista syistä pitäisi kuitenkin noudattaa kuvassa 8-7 esitettyjä jännevälän ja korkeuden suositeltuja arvoja.



KUVA 8-7

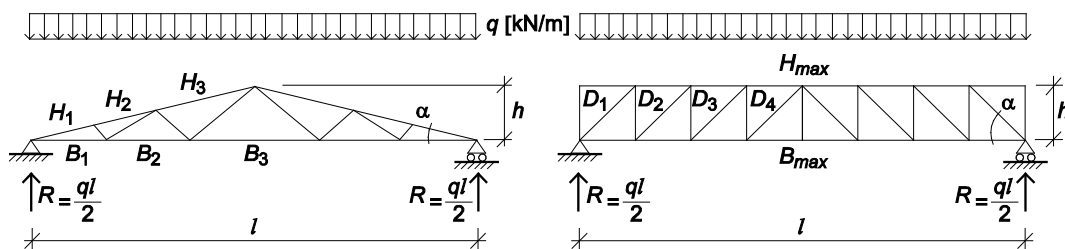
Kolmen ristikkotyypin suositeltavia mittasuhteita. c on vierekkäisten ristikkojen keskinäinen etäisyys.

Alustavassa mitoituksessa on otettava huomioon seuraavaa:

- Orsien ja muiden sekundäärirakenteiden sijoittelu sopeutetaan ristikon kolmiorakenteeseen siten, että kuormat tulevat mahdollisimman lähelle ristikon nurkkapistettä.
- Kun kuormat eivät ole kovin suuria valitaan taloudellisista syistä mieluummin ristikko, jonka diagonaalit ovat puristettuja. Vedettyjen diagonaalien nurkkaliitosten voimien siirtämiseen tarvitaan teräsosia ja sellaiset liitokset vaativat paljon aikaa suunnitella ja tehdä sekä ovat kalliita. Puisten puristettujen diagonaalien voimasta voidaan osa siirtää kosketuspaineella ja sauvoista tulee yleensä riittävän paksuja, jolloin ne eivät ole nurjahdusherkkiä. Suuria voimia ei voida siirtää kosketuspaineella ja liitokseen tarvitaan joko tapauksessa teräsosia. Tällöin ei ole suurta merkitystä sillä ovatko diagonaalit vedettyjä vai puristettuja.
- Ristikko on tehokkaimmillaan kun diagonaalien ja paarteiden välinen kulma on 30...60 °.

Sauvojen alustava mitoitus

Sauvojen poikkileikkauspinta-ala voidaan määrittää alustavasti yksinkertaistetulla laskennalla, missä oletetaan että sauvat ovat nivelellisesti kiinnitettyjä eikä niillä ole epäkeskeisyyttä. Tällä tavoin voidaan nopeasti laskea alustavassa mitoituksessa käytettävät sauvavoimat. Kahden tyyppillisen ristikon staattiset mallit on esitetty kuvassa 8-8. Kuvan mukaan arvioidut sauvavoimat ovat yleensä varmallalla puolella, koska sauvat on oletettu nivelellisesti kiinnitettyiksi.



KUVA 8-8

Alustavassa mitoituksessa käytettävä staattinen malli (a) harjaristikko (b) ristikko jonka diagonaalit ovat puristettut (Howen ristikko).

Harjaristikoiden parresauvojen suurimmat sauvavoimat syntyvät tuen läheisyyteen. Tukea lähimpänä olevan nivelen tasapainotarkastelu antaa suurimmaksi vetovoimaksi

$$B_{\max} = B_1 = \frac{q \cdot l}{2 \cdot \tan \alpha} \quad 8-1$$

Suurin puristusvoima on

$$H_{\max} = H_1 = \frac{q \cdot l}{2 \cdot \sin \alpha} \quad 8-2$$

Tavallisimpien harjaristikoiden uumasauvan suurin voima on noin $1/5 \dots 1/3 \cdot H_{\max}$.

Kun diagonaalit ovat puristetut niin tasakorkean ristikon paarresauvojen suurimmat sauvavoimat syntyvät jännevälin keskelle. Suurin vetovoima ja puristusvoima voidaan arvioida yhtälöstä

$$B_{\max} = H_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot h} \quad 8-3$$

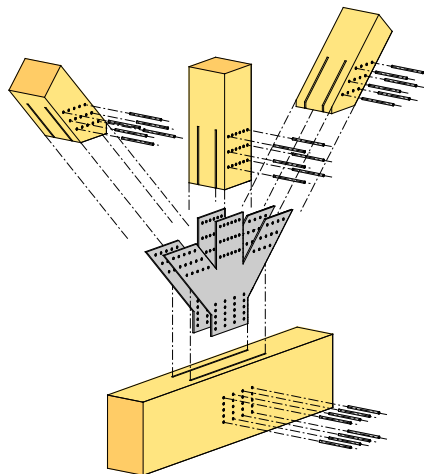
Uumasauvojen suurimmat voimat syntyvät lähimpänä tukea oleviin sauvoihin. Tasapainotarkastelulla saadaan

$$D_{\max} = D_1 = \frac{q \cdot l}{2 \cdot \sin \alpha} \quad 8-4$$

Kun suurimmat sauvavoimat on arvioitu niin sauvat voidaan mitoittaa. Seuraavassa esitetään muutamia yleisiä ristikoiden mitoitusääntöjä.

Ristikon sauvojen yleisiä mitoitusääntöjä

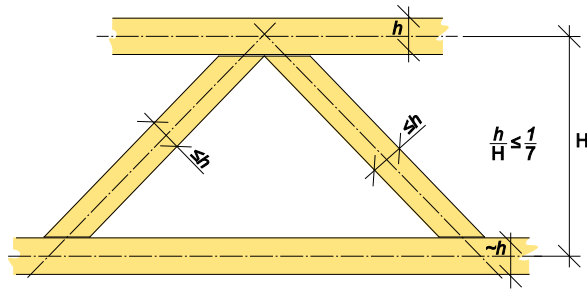
Ristikon sauvojen poikkileikkausmittojen valinnassa pitää ottaa huomioon niiden kiinnitys paarresauvoihin. Esimerkiksi suurien jännevälien ristikoissa käytetyn tappivaarnaliitoksen (katso kuva 8-9) puuosien on oltava riittävän paksuja, jotta teräslevyt mahtuvat. Näiden ristikoiden sauvavoimat ovat suuria ja tarvitaan useita teräslevyjä.



KUVA 8-9

Tyypillinen tappivaarnaliitoksena toteutettu ristikon diagonaalisauvojen kiinnitys.

Yksittäisen sauvan taivutusjäykkyys ristikon tasossa pitää olla pieni verrattuna asennetun ristikon taivutusjäykkyYTEEN. Silloin nurkkien taivutusmomentti jää yleensä pieneksi, sitä ei tarvitse ottaa huomioon ja nurkat voidaan olettaa niveliksi aiheuttamatta laskelmin suurta virhettä. Sauvan taivutusjäykkyyttä voidaan pitää pienenä ristikon taivutusjäykkyYTEEN verrattuna, jos sen ristikon tason suuntainen poikkileikkausmitta ei ole suurempi kuin 1/7 ristikon momentti-varresta (katso kuva 8-10).

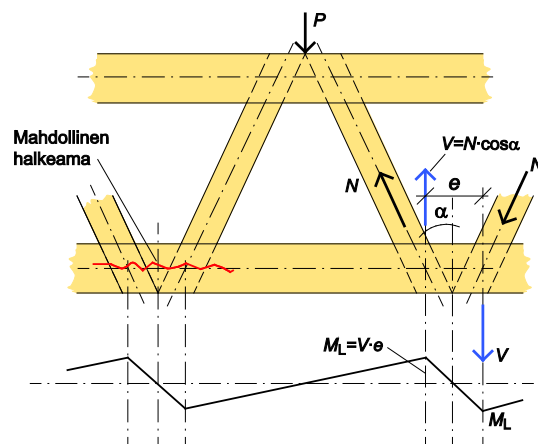


KUVA 8-10

Sauvojen ristikon tason suuntaisen poikkileikkausmitan ja ristikon momenttivarren välinen suhde, jolla sauvojen kiinnitysmomenttia ei tarvitse ottaa huomioon.

Tästä syystä käytetään puristetuissa sauvoissa lähes neliömäistä poikkileikkausta ja vedetyissä sauvoissa neliömäistä tai suorakulmaista poikkileikkausta, jonka lyhyempi sivu on ristikon tasossa. Tällaisten sauvojen parareliitoksen suunnittelussa voidaan välttää epäkeskeisyyttä.

Nurkkien epäkeskeisyyttä pitää aina välttää, jotta syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten aiheuttama haurasmurtuman riski on pienempi. Tällaisia jännityksiä syntyy sekundäärisistä taivutusmomenteista, katso kuva 8-11. Kaikkien nurkassa kohtaavien sauvojen akseleiden pitää leikata toisensa samassa pisteessä joka on nivelen akseli. Jos alustava mitoitus tehdään huolellisesti niin nurkat voidaan suunnitella keskeisiksi.



KUVA 8-11

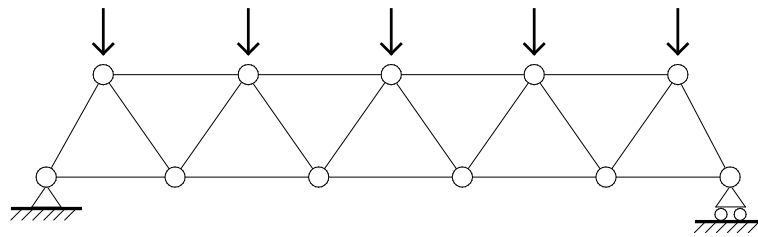
Huono esimerkki ristikosta jonka nurkka on epäkeskeinen. Kuvassa esitetään myös epäkeskeisyysmomentin momenttipinta ja halkeama, jonka syitä vastaan kohtisuora vetovoima voi aiheuttaa.

Mitoituksessa on tärkeää ottaa huomioon että levyille jyrskityt urat ja ruuvien reiät pienentävät erityisesti vedettyjen rakenneosien kestävyyttä. Näiden huomioonottamiseksi oletetaan yleensä alustavassa mitoituksessa että vedettyjen sauvojen nettopinta-ala A_{net} on 60...80 prosenttia bruttopinta-alasta A_{gross} .

Sauvojen poikkileikkaustyyppi ja nurkkien liittostyyppi ovat riippuvaisia myös tarvittavasta palonkestävyydestä. Tavallisesti rakenteiden luokan pitää olla RE60 tai RE90.

8.3 Sauva- ja liitosvoimien laskenta

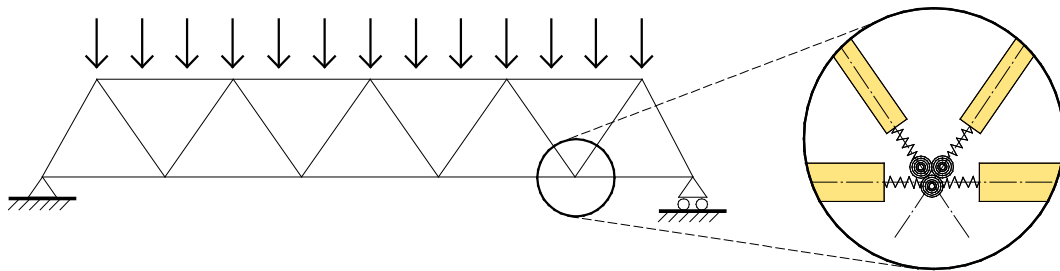
Ristikon idealisoitu staattinen malli voidaan kuvata päistään täydellisin nivelin kiinnitettyjen sauvojen muodostamina kolmioina. Sauvoilla ei ole lainkaan epäkeskeisyyttä ja kuormat ovat nivelten kohdalla vaikuttavia pistekuormia, katso kuva 8-12.



KUVA 8-12

Kaavamainen idealisoidun ristikon staattinen malli, missä kuormia on vain nivelten kohdalla.

Tällaisia olosuhteita on vain harvoin puurakenteissa. Esimerkiksi liitoksilla on yleensä jonkunlainen vääntöjäykkyys ja niissä tapahtuu muodonmuutoksia. Sitä paitsi sekä ylä- että alapaarre ovat useimmiten jatkuvia, eivätkä nivelellisesti kiinnitettyjä uumasauvojen liitosten kohdalla. Kehittyneempi malli ottaa huomioon, että nurkat toimivat kiertymän ja siirtymän suhteen jousina, katso kuva 8-13.

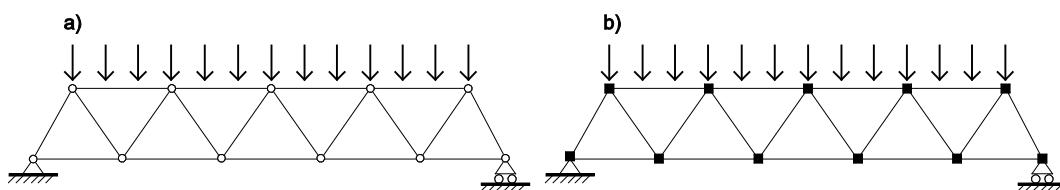


KUVA 8-13

Ristikon kehittyneempi malli, missä nurkat toimivat kiertymän ja siirtymän suhteen jousina.

Liitoksen kiertymistä ja siirtymistä on käytännössä mahdoton analysoida tarkasti. Siksi suositellaan että tutkitaan kaksi rajatapausta:

- paarteet ovat jatkuvat, uumasauvat kiinnittyvät niihin nivelellisesti, kuva 8-14 (a)
- uumasauvat kiinnittyvät jatkuviin paarteisiin jäykästi, kuva 8-14 (b).



KUVA 8-14

Sauvavoiminen ja -momenttien arvioimisessa käytettävät ristikon staattiset mallit. Kummassakin ristikossa oletetaan paarteet jatkuviksi. (a) Uumasauvat kiinnittyvät nivelellisesti. (b) Uumasauvojen kiinnitys on jäykkä.

Sauvojen mitoitus voidaan tehdä siten, että kuvan 8-14 tapauksista (a) ja (b) valitaan kussakin tapauksessa kriittisempi.

Sauvat voivat olla yksinkertaisia tai koostua useammasta osasta. Usein paarisauvat ovat kaksinkertaiset ja uumasauvat yksinkertaiset. Toisinaan käytetään puisia puristussauvoja ja teräksisiä vetosauvoja (kuva 8-19).

Vetosauvojen mitoituksessa pitää ottaa huomioon ruuvien reikien ja muiden liitososien aiheuttama poikkileikkauksen pieneneminen. Sauvojen suuruus määräytyy usein liitososien tilantarpeesta.

Yleensä liitokset mitoitetaan vain sauvojen akseleiden suuntaisille voimille. Liitoksen kestävyys pitää kuitenkin olla 10...15 % suurempi kuin sille tulevat sauvavoimat, jotta kestävyys kattaa liitoksen mahdollisen (suunnittelemattoman) epäkeskeisyyden ja vääntöjäykkyyden vaikutuksen.

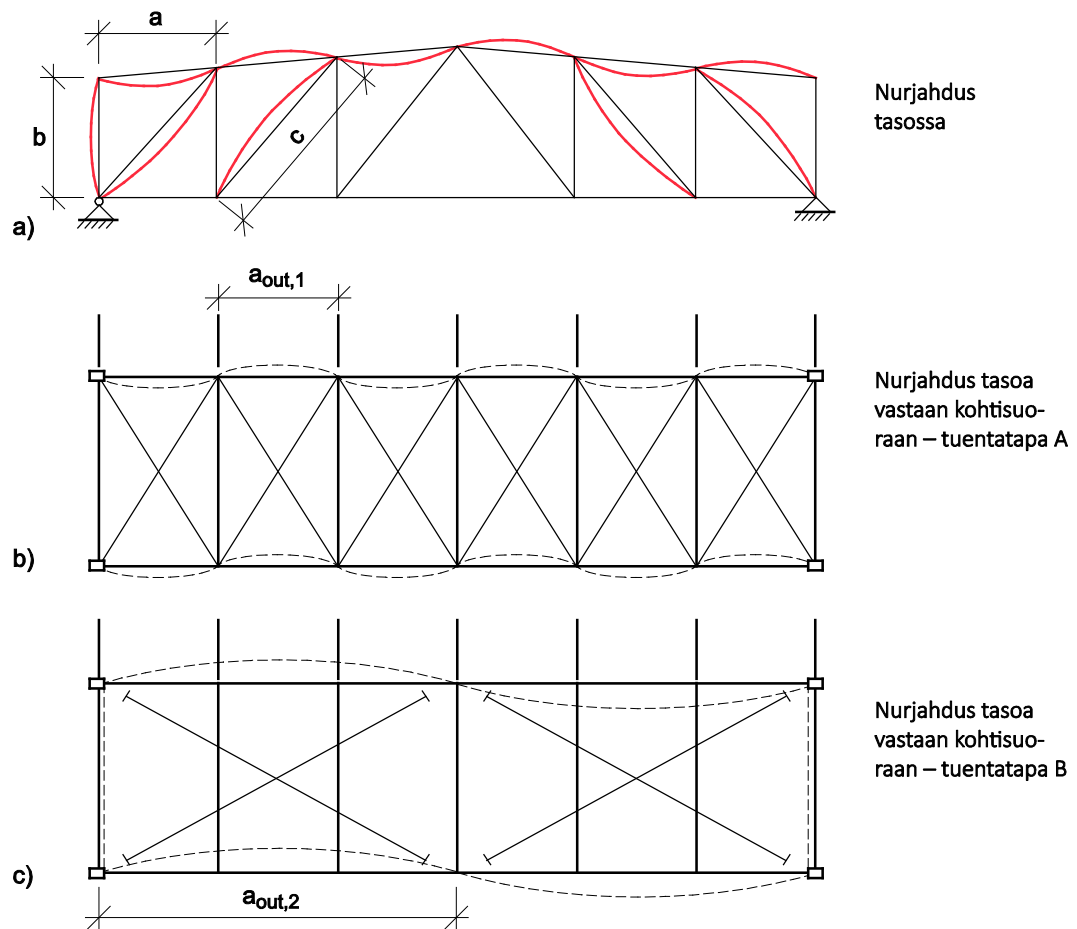
Puristussauvojen nurjahtaminen

Ristikon yläparre ja muut puristussauvat joille tulee myös taivutusmomenttia pitää mitoittaa luvun 4 mukaisesti. Nurjahdusriski sekä ristikon tasossa että sitä vastaan kohtisuoraan pitää ottaa huomioon.

Tarkasteltaessa parresauvojen nurjahtamista kummassakin suunnassa ja uumasauvojen nurjahtamista kohtisuoraan ristikon tasoa vastaan oletetaan nurjahduspituudeksi l_{cr} sauvan teoreettinen pituus l . Tarkasteltaessa nurjahtamista ristikon tasossa teoreettinen pituus on liitosten välinen pituus. Tarkasteltaessa nurjahtamista ristikon tasoa vastaan kohtisuoraan teoreettinen pituus on sivutukien välinen pituus.

Tarkasteltaessa ristikon tasossa tapahtuvaa nurjahtamista voidaan uumasauvoille käyttää teoreettista pituutta lyhyempää nurjahduspituutta, jos parresauvat ja liitokset ovat sellaisia että uumasauvoille voidaan olettaa tietty kiinnitysaste. Jos liitos muodostuu esimerkiksi ruuvimaisten kiinnikkeiden ryhmästä (katso kuva 8-16 (b) ja 8-17) voidaan uumasauvojen nurjahduspituudeksi l_{cr} olettaa $0,9 \cdot l$.

Jos taas liitoksen muodostaa yksi ruuvimainen kiinnike tai sen kiertymä on muuten mahdollinen käytetään yleensä arvoa l , katso kuva 8-15 ja taulukko 8-1.



KUVA 8-15

Esimerkki ristikon teoreettisen nurjahduspituuden määrittämisestä.

Nurjahduspituuden pienentämiseksi voidaan sauvoja tukea sivusuunnassa, kuten kuvassa 8-15 (b) ja (c) on esitetty. Tuentatavassa A tukipisteet muodostuvat liikkumattomiin nurkkiin kiinnitetyistä orsista. Tuentatavassa B yläpaarre voi nurjahtaa ristikon tasoa vastaan kohtisuoraan useamman kentän matkalta. Jos tuulen noste on suurempi kuin pysyvät kuormat, niin alapaarrekin voi nurjahtaa.

TAULUKKO 8-1

Ristikon sauvojen nurjahduspituuksia. Symbolit kuten kuvassa 8-15.

Sauva	Nurjahduspituus l_{cr}	
	Ristikon tasossa	Ristikon tasoa vastaan kohtisuoraan
Yläpaarre	a	$a_{out,1}$ tai $a_{out,2}$
Vertikaali	b	b^1
Diagonaali	c	c^2

¹ Jos nurkan kiinnityksen muodostaa ruuviryhmä niin $l_{cr} = 0,9 \cdot b$.

² Jos nurkan kiinnityksen muodostaa ruuviryhmä niin $l_{cr} = 0,9 \cdot c$.

8.4 Käyttörajatilatarkastelu

Mitoituksen viimeinen vaihe on ristikon käyttötilatarkastelu (katso luku 6). Käyttörajatilatarkastelussa tarkistetaan, että ristikon suurin taipuma käyttörajatilan kuormista ei ylitä määräyksissä esitettyä vaatimusta (tavallisesti $l/200$ välittömälle taipumalle ja $l/300$ lopulliselle taipumalle). Taipumia laskettaessa pitää ottaa huomioon liitoksien muodonmuutos, jolla on suuri merkitys ristikon kokonaistaipumaan. Tämä voidaan tehdä joko siten, että ristikon nurkkien jousto otetaan laskentamallissa huomioon, tai kasvattamalla taipumaa liitosten muodonmuutokset huomioonottavalla kertoimella. Kerroin on ruuviliitoksille 1,3...1,5 (katso kuva 8-16 a) ja tappiliitoksille 1,1...1,2 (katso kuva 8-16 b ja 8-17). Laskelmissa pitää myös ottaa huomioon sauvojen pituuden muutos.

Yleensä käyttörajatilalla ei ole suurta merkitystä puuristikoiden mitoittamisessa, sillä niiden taiputusjäykkyys on verrattain suuri. Ristikot valmistetaan usein esikoroitetuina (sekä ala- että yläpaarre ovat kaarevat). Esikoroituksen suuruus on tavallisesti $l/150$ - $l/200$.

8.5 Yksityiskohtien suunnittelu

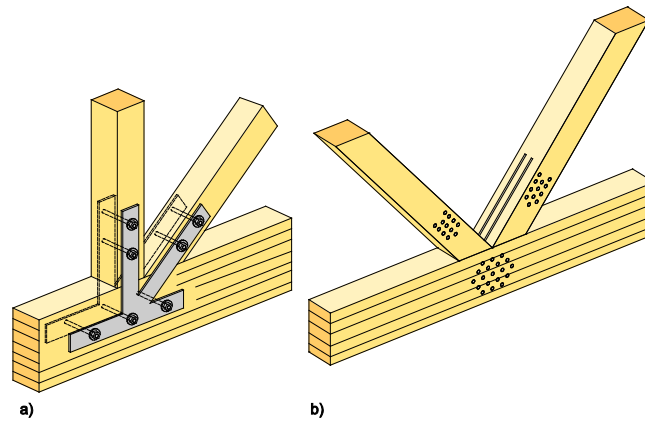
Nurkkaliitoksilla on ratkaiseva vaikutus ristikon laatuun, kestävyys ja varsinkin sen valmistuskustannuksiin. Ristikoiden nurkkaliitosten suunnittelussa pitää ottaa huomioon että

- kaikkien nurkkaan kiinnittyvien sauvojen akselit leikkaavat toisensa samassa pisteessä
- nurkan alue on pieni
- nurkka on helppo ja nopea asentaa
- nurkan palonkestävyys vastaa vaadittua
- nurkassa on mahdollisimman harvoja teräsosia
- samassa ristikossa käytetään samanlaisia liitoksia niin monessa kohdin kuin mahdollista.

Liitosten mitoittamista käsitellään luvussa 14. Seuraavassa kuvataan tyypillisiä nurkkia.

Uumasauvojen ja parteiden välisiä liitoksia

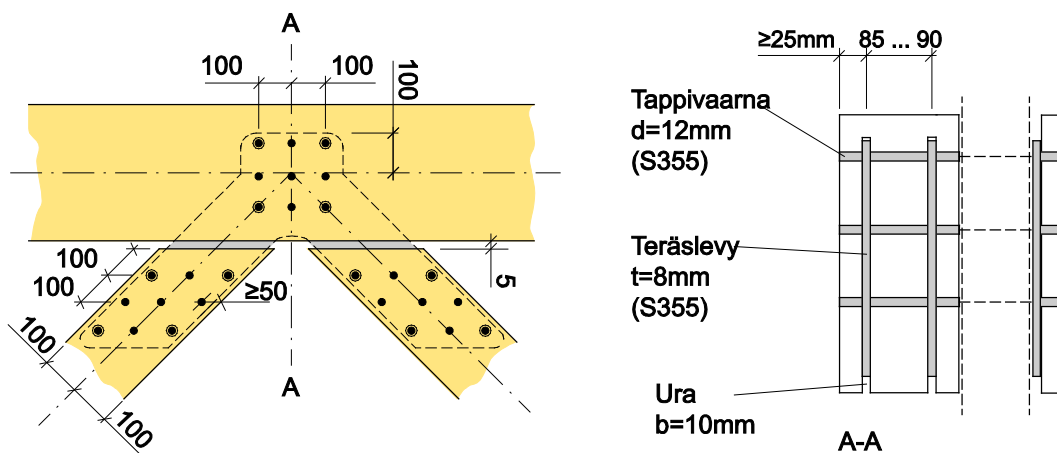
Jos ristikko muodostuu yksinkertaisista paarre- ja uumasauvoista, niin nurkkaliitokset ovat tavallisesti ruuviliitoksia tai tappivaarnaliitoksia (katso myös jakso 14.9). Kuvassa 8-16 esitetään tyypillisiä nurkkia. Nurkassa (a) on sauvojen ulkopinnassa ruuvein kiinnitetyt teräslevyt. Nurkassa (b) on tappivaarnaliitos. Tappivaarnaliitoksessa voi olla myös useita urissa olevia teräslevyjä, jolloin liitostyyppi sopii ristikoille joilla on jopa 80 m jänneväli ja suuret kuormat.



KUVA 8-16

Ristikon nurkka (a) ruuvein kiinnitetyt teräslevyt (b) tappivaarnaliitos.

Norjassa ja Ruotsissa on rakennettu useita suuria tappivaarnaliitoksia toteutettuja ristikoita teollisuushalleihin, liikekiinteistöihin ja urheiluareenoille sekä siltoihin. Näissä on käytetty uriin asennettujen teräslevyjen paksuutena on $t=8\text{mm}$ ja vaarujen halkaisijana $d=12\text{mm}$. Sauvat tehdään liimapuusta GL30c tai GL30h ja teräsosat tehdään tavallisesta hiiliteräksestä kuten S355. Liitosten kestävyys optimoimiseksi ja rakenteen sitkeyden varmistamiseksi voidaan valita kuvan 8-17 mukaiset teräslevyjen ja vaarujen keskinäiset etäisyydet, pääty- ja reunaetäisyydet. Erityisesti on otettava huomioon lohkeamismurtumisen vaara, erityisesti jos liitoksessa on useita levyjä ja paljon vaaruja, katso luku 14.

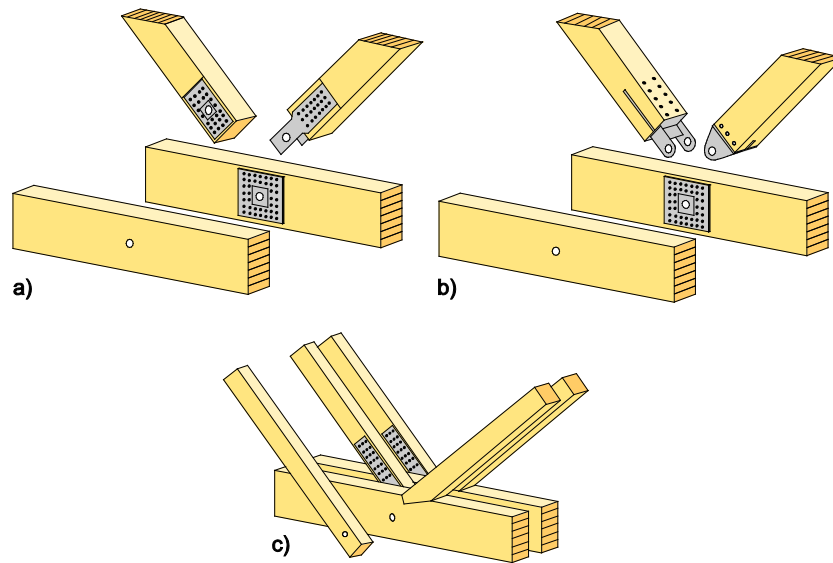


KUVA 8-17

Tyypillinen Norjassa ja Ruotsissa käytetty liitostyyppi missä tavanomaisesti käytettävät mitat on annettu. Hyvin suurissa liimapuuristikoissa on käytetty jopa 9 teräslevyä vierekkäin.

On myös tavallista että ristikon sauvat muodostuvat kahdesta tai kolmesta samansuuntaisesta erillisestä osasta. Mitä suurempi jänneväli on, sitä useampia rinnakkaisia sauvoja tarvitaan. Kuva 8-18 esittää tällaisten ristikoiden nurkkien rakenteita. Nurkissa (a) ja (b) diagonaalien voima siirtyy paarteille yhden ainoan koko nurkan lävistävän ruuvien välityksellä. Voima siirtyy ruuvien ja yksittäisten sauvojen välillä pikemminkin ruuvien ja teräslevyn välisen kosketuspaineen kuin ruuvien ja puun välisen kosketuspaineen avulla. Puuosien reiät valmistetaan liitoksessa (a) tavallisesti hiukan suuremmiksi kuin naulauslevyjen reiät. Naulauslevyt on yleensä vahvistettu reiän kohdalta ja ne kiinnitetään puosaan käyttämällä sauvavoimaa vastaavaa naulamäärää.

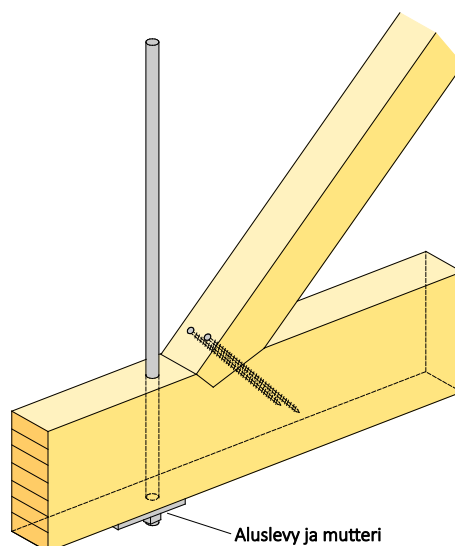
Nurkassa (c) vedettyjen diagonaalien voima siirtyy paarteille kuten liitoksissa (a) ja (b). Sen sijaan puristettujen diagonaalien voima siirtyy suoraan kosketuspaineella alapaarteelle.



KUVA 8-18

Ristikön nurkkia (a) naulauslevyt ja yksi ruuvi (b) uumasauvoihin tappivaarnaliitoksella kiinnitetty levy joka on kiinnitetty yhdellä ruuvilla parresauvaan (c) vedetyt diagonaalit kiinnitetty kuten liitoksessa (a) ja puristetut kirvesmiesliitoksella.

Kun ristikon diagonaalit ovat puristettuja (Howen ristikko) niin pystysauvoina voidaan käyttää terästankoja, jos niille ei missään olosuhteissa tule puristavaa voimaa. Terästangon kiinnitys tehdään siten, että paarteen läpi porataan reikä ja tanko ankkuroidaan mutterilla, jonka alla on riittävän suuri aluslevy. Yleensä terästangolle annetaan tietty esijännitys. Kuva 8-19 esittää tällaista nurkkaa.

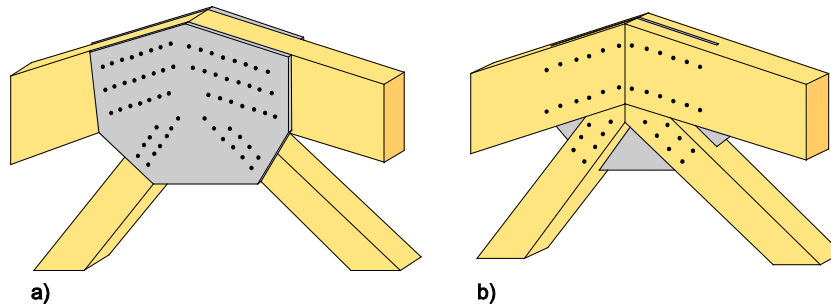


KUVA 8-19

Ristikön nurkka missä on puristettu diagonaali ja vedetty terästanko.

Harjaliitokset ja tukialueen liitokset

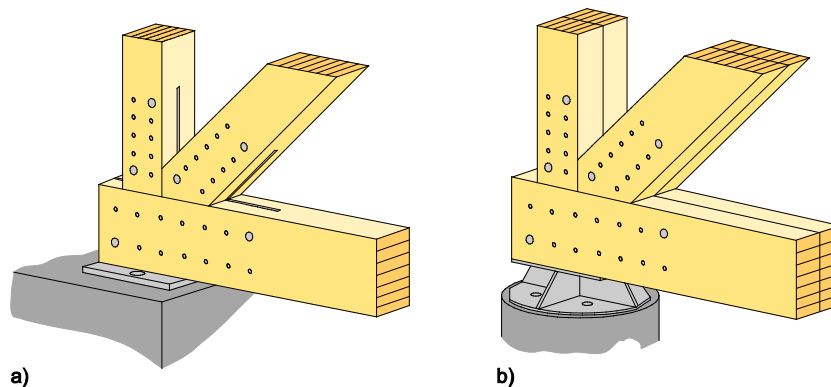
Kuvassa 8-20 esitetään kaksi erilaista harjaristikon harjaliitosta. Liitoksessa (a) päälle asetetut levyt voivat olla vaneria, ristiviilullista kertopuuta tai terästä. Tämä tyyppi on tavallinen pienellä kuormilla. Nurkka (b) on tappivaarnaliitos. Suurilla jänneväleillä tai kuormilla voidaan käyttää useita teräslevyjä, jotta nurkan kantokyvystä tulee riittävä.



KUVA 8-20

Harjaristikon harjaliitoksia (a) ulkopuoliset levyt vaneria, ristiviilullista kertopuuta tai terästä (b) tappivaarnaliitos.

Kuva 8-21 esittää kahta tukialueen liitosta. Molemmat ovat tappivaarnaliitoksia. Vaihtoehdossa 8(a) ristikon sauvat muodostuvat yhdestä osasta ja vaihtoehdossa (b) kahdesta osasta.



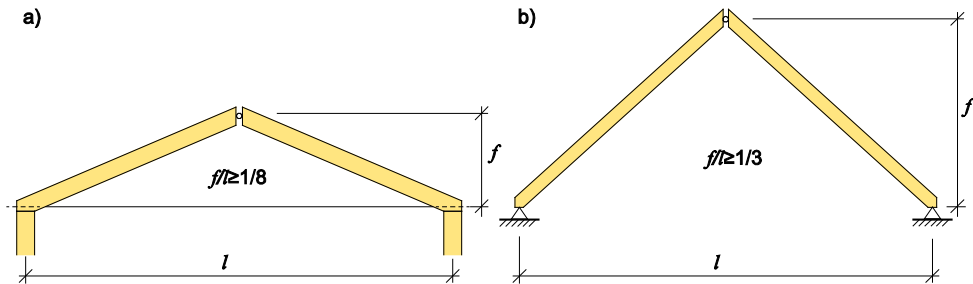
KUVA 8-21

Tukialueen tappivaarnaliitoksia (a) yhdestä osasta muodostuvat sauvat (b) kahdesta osasta muodostuvat sauvat.

9	KOLMINIVELKATTOTUOLIT	2
9.1	Vahvistamattomista palkeista koottu kolminivelkattotuoli	3
	Muodonmuutos	4
	Kestävyys nostavia kuormia vastaan	5
9.2	Tasaisella kuormalla kuormitetun kolminivelkattotuolin alustava mitoitus	6
9.3	Muodonmuutostarkastelu	7
9.4	Liitokset	7
	Vetotangon ankkurointi palkkiin	7
	Nivelellinen harjaliitos	8
	Teräksisen vetotangon ja palkin välinen liitos	9

9 KOLMINIVELKATTOTUOLIT

Kolminivelkattotuoli muodostuu tavallisesti kahdesta kattokaltevuuden mukaisesti vinosta palkista. Jos kolminivelkattotuoli on pilareiden varassa, niin tukipisteiden vaakavoimat siirretään vetotangolla, 9-1 (a). Jos kolminivelkattotuolin perustus on liikkumaton, siirtyy tukireaktion vaakakomponentti suoraan perustukselle, kuva 9-1 (b).

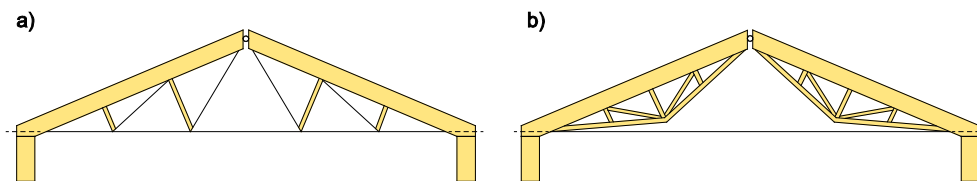


KUVA 9-1

Kolminivelkattotuoli (a) pilareiden varassa (b) liikkumattoman perustuksen varassa.

Kolminivelkattotuoleja käytetään kun katon kaltevuus on suuri ja kun jänneväli on niin pitkä että tavallisten liimapuupalkkien kestävyys on riittämätön. Katon sekundäärirakenne muodostuu orsista. Orsiväli voi olla 6...8 m, jos niiden päällä käytetään kantavaa poimulevyä. Pilareiden varassa olevan kolminivelkattotuolin kaltevuuden pitää olla mieluiten yli 14° ($f/l \geq 1/8$) harjan painuman ja pilareiden yläpään siirtymien rajoittamiseksi. Suoraan perustuksen varassa olevan kolminivelkattotuolin kaltevuuden pitää olla mieluiten yli 30° ($f/l \geq 1/3$), jotta katon alle saadaan riittävästi tilaa. Jänneväli voi olla 15...50 m.

Jos jänneväli ylittää 50 m, voidaan kolminivelkattotuolin palkit vahvistaa puisten ja teräksisten tukisauvojen muodostamalla ristikolla (kuva 9-2 (a)) tai palkkien alapuolisilla sekundäärisillä ristikoilla (kuva 9-2 (b)). Tässä luvussa käsitellään jatkossa vain vetotangollisia kolminivelkattotuoleja.



KUVA 9-2

Kolminivelkattotuolien vahvistaminen (a) puisten ja teräksisten tukisauvojen muodostama ristikko (b) palkkien alapuoliset sekundääriset ristikot.

9.1 Vahvistamattomista palkeista koottu kolminivelkattotuoli

Liimapuupalkit mitoitetaan kuten taivutetut ja puristetut palkit, katso luku 4. Mitoituksessa otetaan huomioon nurjahdusriski. Yleensä katto-orret ja muut sekundäärirakenteet rajoittavat riittävästi nurjahdusta kohtisuoraan kattotuolin tasoa vastaan. Sekundäärirakenteet pitää mitoittaa syntyville jäykistysvoimille luvun 13 mukaan.

Katon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa nurjahduspituus l_c on

$$l_c = \frac{l}{2 \cdot \cos \alpha} \quad 9-1$$

l kattotuolin jänneväli
 α katon kaltevuus.

Harjalla ja tuilla pitää tarkistaa leikkausjännitykset ja paikalliset puristusjännitykset, joiden laskennassa pitää ottaa huomioon voiman vaikutussuunta vinosti puun syiden suuntaa vastaan.

Vetotanko voidaan tehdä liimapuusta, kun jänneväli on 25...30 m. Vetotangon ja palkin välisestä liitoksesta voi kuitenkin tulla hankala; erityisesti jos vaakavoima on suuri tarvitaan vetotangon ja palkkien välisen voiman siirtämiseen useita mekaanisia liittimiä, ruuveja tai vaarnatappeja. (Liitoksen mitoittamiseen palataan luvussa 14.8.) Lisäksi liittimet heikentävät liimapuupoikkileikkausta ja pienentävät siten kestävyyttä. Yleensä käytetään mieluiten teräksistä vetotankoa, sillä sen ja puupalkin välinen liitos on yksinkertainen. Lämpimissä tai puolilämpimissä tiloissa ($\geq +5^\circ\text{C}$) voidaan käyttää erikoislujuutta terästä, kuten Dywidag-jänneterästä. Usein teräksen lujuusluokan korottamisesta ei kuitenkaan ole merkittävää hyötyä, sillä kattotuolin mitoituksessa ratkaisevaa on tukien vaakasuora siirtymä. Vetotangon ja liimapuupalkkien liitoksen mitoituksessa on otettava huomioon että voima vaikuttaa vinosti syiden suuntaa vastaan.

Harjaliitos mitoitetaan yleensä nivelenä, sen ei siis katsota siirtävän taivutusmomenttia. Liitoksessa vaikuttava vaakasuora voima on yhtä suuri kuin vetotangossa vaikuttava, mutta se vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan. Harjaliitoksen pitää siirtää myös leikkausvoimaa, kun kuormitus on epäsymmetrinen (katon puolikkaiden kuormat ovat eri suuret).

Tasaisesti jakautuneen, alaspäin suuntautuvan kuorman vaikuttaessa tukireaktiot ja sisäiset voimat lasketaan seuraavista yhtälöistä (merkinnät kuten kuvassa 9-3).

Pystysuorat tukireaktiot ovat

$$R_1 = \frac{(3 \cdot q_1 + q_2) \cdot l}{8} \quad 9-2$$

$$R_2 = \frac{(q_1 + 3 \cdot q_2) \cdot l}{8} \quad 9-3$$

Vetotangon vaakavoima on

$$H = \frac{(q_1 + q_2) \cdot l^2}{16 \cdot f} \quad 9-4$$

Palkin suurin momentti M ja vastaava puristusvoima N ovat

$$M = \frac{q_1 \cdot l^2}{32} \quad 9-5$$

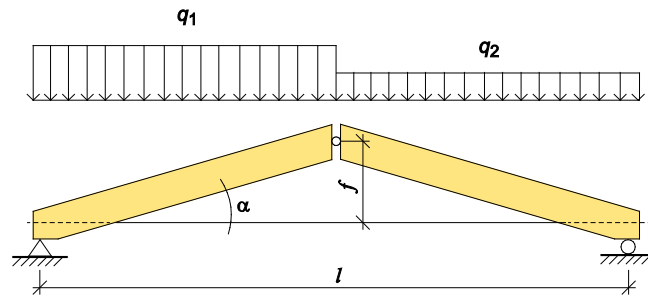
$$N = \frac{(q_1 + q_2) \cdot l}{8 \cdot \sin \alpha} \quad 9-6$$

Palkin suurin leikkausvoima on

$$V_1 = \frac{q_1 \cdot l}{4} \cdot \cos \alpha \quad 9-7$$

Harjan pystysuora leikkausvoima on

$$V_2 = \frac{(q_1 - q_2) \cdot l}{8} \quad 9-8$$



KUVA 9-3

Kahdesta palkista ja vetotangosta muodostuva kolminivelkattotuoli jota kuormittaa alaspäin suuntautuvat tas-
san jakautuneet kuormat q_1 ja q_2 .

Muodonmuutos

Kuvan 9-3 mukaisin kuormin on harjan pystysuora korkeudenmuutos alaspäin

$$w = \frac{(q_1 + q_2) \cdot l^2}{8 \cdot \tan^2 \alpha \cdot (E \cdot A)_{rafter}} \cdot \left(\frac{1}{\cos^3 \alpha} + \frac{(E \cdot A)_{rafter}}{(E \cdot A)_{tension\ tie}} \right) \quad 9-9$$

Jos tuet eivät siirry vaakasuorassa suunnassa (vetotanko on äärettömän jäykkä) niin toinen termi suluissa on nolla.

Kestävyys nostavia kuormia vastaan

Tuulikuorma voi aiheuttaa kolminivelkattotuolille nostavan kuormitusyhdistelmän. Koska aina-
kaan teräksinen vetotanko ei voi siirtää puristavia voimia, niin rakenne toimii aiotulla tavalla
vain sellaisilla kuormayhdistelmillä jotka aiheuttavat vetotankoon vetovoiman, eli

$$\sum_i H_i \geq 0$$

9-10

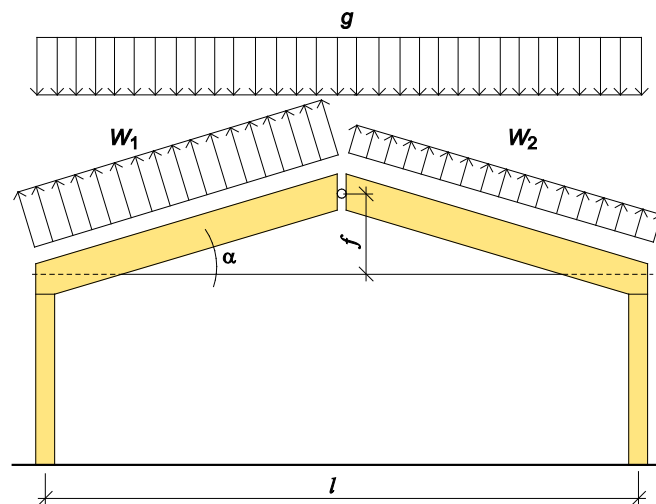
missä H_i on kuormitusyhdistelmän eri kuormien aiheuttamat voimat vetotangolle. Etumerkki on plus jos voima on vetävä (kuten painovoiman aiheuttamista kuormista) ja miinus, jos kuorma on puristava (kuten tuulen nostovoimasta).

Kun yhtälöä 9-10 muokataan, niin voidaan johtaa yleinen yhtälö vetotangollisen kolminivelkattotuolin tarpeelliselle omalle painolle g tapauksessa, missä tuulikuormien jakautuminen on kuvan Kuva 9-4 mukainen. Kun tuulen nostovoima on tasan jakautunut ja sen arvot katon puoliskoille ovat w_1 ja w_2 ja oma paino g on myös tasan jakautunut saadaan

$$-\left[\frac{w_1 + w_2}{2} \cdot \frac{l^2}{8 \cdot f} \cdot (1 - \tan^2 \alpha) \right] + \left[\frac{g \cdot l^2}{8 \cdot f} \right] \geq 0$$

9-11

Vasemmanpuoleisissa hakasuluissa on tuulikuorman vetotangolle aiheuttama voima ja oikeanpuoleisissa hakasuluissa on oman painon vetotangolle aiheuttama voima.



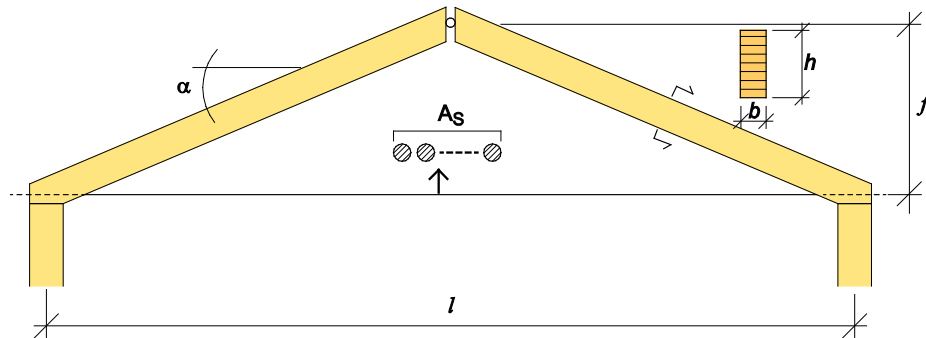
KUVA 9-4

Kolminivelkattotuoli jota rasittavat oma paino g ja tuulen aiheuttama nostovoima w_1 ja w_2 .

Jos yhtälön 9-11 mukainen ehto ei täyty, niin sisäänpäin vaikuttava vaakavoima on otettava huomioon suunnittelussa, esimerkiksi käyttämällä vetotankoa joka kestää puristusta. Alapäästään jäykästi kiinnitetyt pilarit eivät yleensä ole riittävän jäykkiä siirtämään tällaista vaakavoimaa.

9.2 Tasaisella kuormalla kuormitetun kolminivelkattotuolin alustava mitoitus

Tässä luvussa annetaan yleisiä ohjeita sellaisen kolminivelkattotuolin mitoittamiseen, jonka vetotanko on terästä. Geometriset suureet ja merkinnät on esitetty kuvassa 9-5.



KUVA 9-5

Tyypillinen kolminivelkattotuoli jonka vetotanko on terästä.

Alustavassa mitoituksessa tunnetaan yleensä

- tasan jakautunut mitoituskuorma q_d (symmetrinen)
- katon kaltevuus α (yleensä $\geq 14^\circ$)
- jänneväli l (yleensä ≤ 50 m).

Lisäksi kaikki materiaalien mitoittavat lujuusarvot ovat tunnettuja, koska ne perustuvat suoraan valittuun lujuusluokkaan, kuten liimapuun luokkaan GL30c.

Alustavaan mitoitukseen kuuluu palkkien ja vetotangon poikkileikkausmittojen arviointi. Erityisesti asennusaikaisen kiepahtamisriskin minimoimiseksi palkin leveyden pitäisi olla

$$b \approx \frac{l}{200} \dots \frac{l}{170}$$

9-12

Orsien keskinäinen etäisyys valitaan siten, että kattotuoli ei nurjahda omasta tasostaan. Orsijako i on tavallisesti pienempi kuin 1,8 m. Tässä tapauksessa voidaan palkin korkeus käyttöluokissa 1 ja 2 keskipitkälle kuormayhdistelmälle (kun k_{mod} on 0,8) arvioida yhtälöistä

$$h \approx \frac{k_1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{k_1^2 + 4 \cdot k_2} \quad 9-13 \text{ (a)}$$

$$k_1 = \frac{q_d \cdot l}{54,4 \cdot b \cdot \sin \alpha} \quad 9-13 \text{ (b)}$$

$$k_2 = \frac{q_d \cdot l^2}{102,4 \cdot b} \quad 9-13 \text{ (c)}$$

Yhtälöissä mitat ja voimat on annettu yksiköissä mm ja N.

Yleensä vaakasuoria siirtymiä halutaan rajoittaa, ja siksi ei pidä käyttää teräslajeja joilla on hyvin suuri lujuus. Lujuuden ei pidä kuitenkaan olla niin pieni ettei tangon päitä voida kierteistää riittävän tarkasti. Myötölujuuden pitää siksi olla 355...600 N/mm². Tarvittava tangon poikkileikkausala on

$$A_s \approx \frac{q_d \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \frac{1,4}{f_{ub}}$$

9-14

f_{ub} vetotangon myötöraja

9.3 Muodonmuutostarkastelu

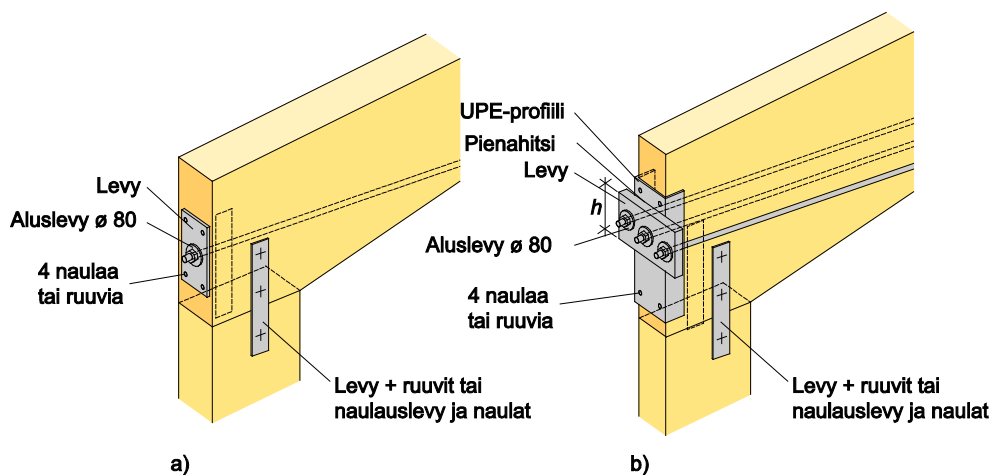
Harjan pystysuora painuma ratkaisee yleensä pidemmällä jänneväleillä ($l \geq 25$ m) käyttörajatilan mitoituksen. Käyttörajatilan hetkellisten kuormien aiheuttaman pystysuoran painuman ei pitäisi ylittää arvoa $l/500...l/700$.

9.4 Liitokset

Vetotangon ankkurointi palkkiin

Vetotanko siirtää kattotuolin palkeille vain oman vetovoimansa. Tavallisesti vetotanko on terästä tai liimapuuta, katso luku 14.8. Vetovoima siirretään tavallisesti palkille mahdollisimman lähellä palkin ja vetotangon akselien leikkauspistettä.

Teräksinen vetotanko soveltuu sekä pienille että suurille vetovoimille. Pienehköille voimille käytetään yhtä vetotankoa, jota varten liimapuupalkin keskelle porataan reikä. Vetotanko ankkuroidaan liimapuupalkin päätä vasten ankkurilevyllä, katso kuva 9-6 (a). Suurille voimille käytetään palkin molemmin puolin sijaitsevia vetotankoja – tarvittaessa voidaan käyttää vielä kolmatta, keskeistä vetotankoa. Silloin suositellaan ankkurilevyn ja palkin pään välillä käytettäväksi esimerkiksi UPE-profiilia jakamaan puristusvoimaa suuremmalle pinta-alalle, katso kuva 9-6 (b). Palkin päätä vasten tulevassa teräslevyssä pitää olla kiinnitysreiät asennuksen helpottamiseksi.

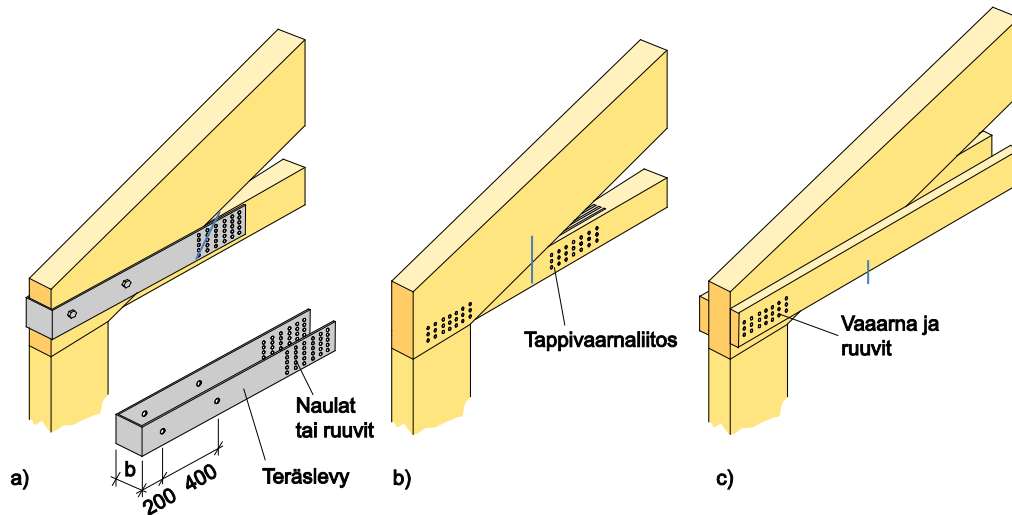


KUVA 9-6

Teräksisen vetotangon ankkurointi (a) pienehköille vetovoimille sopiva liitos (b) suurille vetovoimille sopiva liitos (katso luku 14.8).

Pienehköillä vetovoimilla voidaan myös käyttää liimapuista vetotankoa. Yksiosaisen vetotangon ankkurointi voidaan tehdä palkin pään kiertävän teräsnauhan avulla kuten kuvassa 9-7 (a) tai nauha voi päättyä palkin kyljelläkin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tappivaarnaliitosta vetotangon kiinnittämiseen, katso kuva 9-7 (b). Kaksiosaisen vetotangon ankkurointi tehdään tappivaarnoin, ruuvein tai puurakenneruuvein, katso kuva 9-7 (c). Katso myös luku 14.8.

Suojaamaton teräksinen vetotanko ei yleensä täytä tavanomaisia paloturvallisuusvaatimuksia, esimerkiksi luokan R30 vaatimuksia, katso luku 15. Vetotanko suojataan helpoimmin putken muotoisilla mineraalivillakappaleilla. Jos ulkonäkövaatimukset ovat suuret, voidaan mineraalivillaiset suojakappaleet peittää muoviholkilla. Vetotanko venyy huomattavasti myös eristystä käytettäessä, ja tuet on mitoitettava tälle venymälle.



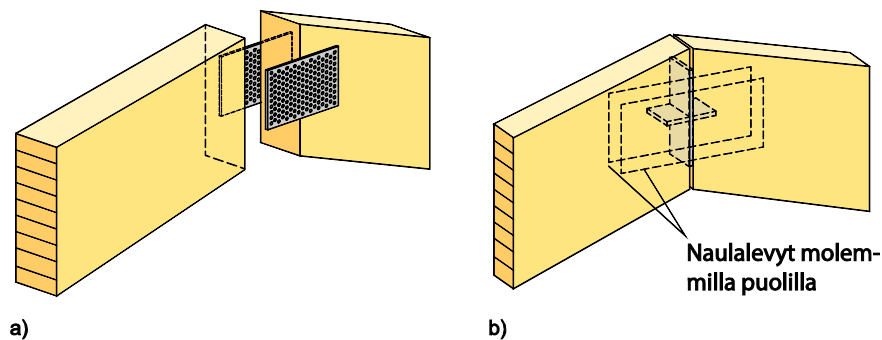
KUVA 9-7

Liimapuisen vetotangon ankkurointi (a) yksinkertainen tanko joka on ankkuroitu palkin pään kiertävällä teräsnauhalla (b) tappivaarnaliitos (c) kaksinkertaisen vetotangon ankkurointi.

Nivelellinen harjaliitos

Nivelellinen harjaliitos siirtää vaakasuoria ja pystysuoria voimia, katso luku 14.7. Taivutusmomenttia siirtyy niin vähän ettei sitä oteta huomioon mitoituksessa. Liitososat eivät saa rajoittaa palkkien välisen kulman muutosta. Jos kiertymä on estetty syntyy lisäjännityksiä, jotka voivat aiheuttaa rakenteelle ennalta arvaamattomia vaurioita.

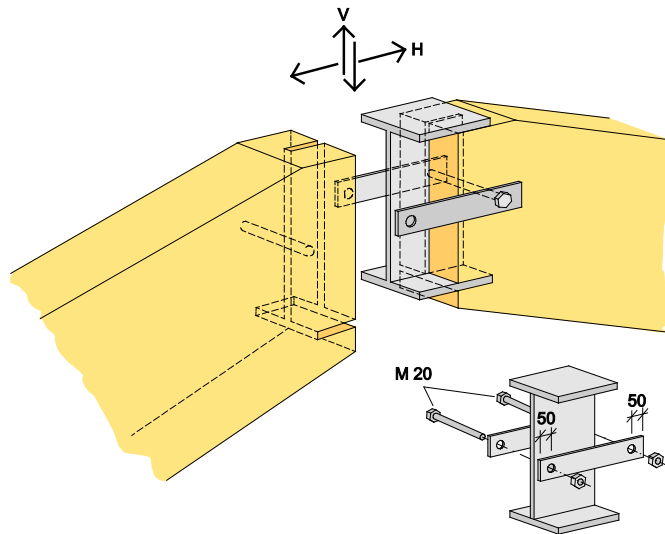
Harjaliitos tehdään usein kuvan 9-8 (a) mukaisesti naulauslevyin. Nämä voidaan suurien voimien vaikuttaessa yhdistää ristin muotoisella liittimellä, katso kuva 9-8 (b).



KUVA 9-8

Nivelellinen harjaliitos (a) pienehköt leikkausvoimat (b) suuret leikkausvoimat.

Kun harjan leikkausvoima on suuri, voidaan nivelellinen harjaliitos tehdä käyttämällä esimerkiksi kuvan 9-9 mukaisesti IPE-teräksiä. Yleensä muototeräksen leveys a on yhtä suuri tai hiukan pienempi kuin palkin leveys. Muototeräksen korkeus b on riippuvainen siirrettävän leikkausvoiman suuruudesta ja se on tavallisesti 200...350 mm, katso kuva 9-9.

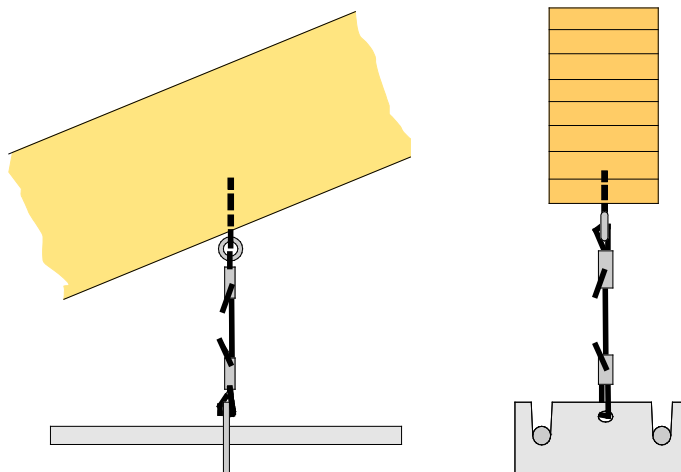


KUVA 9-9

Nivelellinen harjaliitos suurille leikkausvoimille.

Teräksisen vetotangon ja palkin välinen liitos

Vetotangoista voi tulla melko pitkiä. Niiden taipuman rajoittamiseksi ja vetotangon oman painon aiheuttaman taivutusmomentin pienentämiseksi käytetään usein ripustimia. Ripustimet tehdään tavallisista terästangoista joiden halkaisija d on tavallisesti 5 mm, ja ne sijoitellaan noin 10 m välein. Tyypillinen rakenne missä on palkki, ripustin ja vetotanko, esitetään kuvassa 9-10.



Kuva 9-10

Tyypillinen vetotangon ripustin.

10	KEHÄT	2
10.1	Kolminivelkehän mitoittaminen	2
10.2	Sisäiset voimasuureet ja tukireaktiot	3
10.3	Mitoituksen kulku	4
10.4	Nurjahtaminen	4
	Kehän nurjahtaminen tasostaan	5
	Kehän nurjahtaminen tasossaan	7
10.5	Käyttörajoitilatarkastelu	9
10.6	Kehän nurkan mitoittaminen	10
	Kaareva nurkka	10
	Sormijatkettu nurkka	10
	Yhdistetty nurkka	12
10.7	Yksityiskohtien muotoilu	13
	Nivelellinen kehän kantaliitos kun nurkka on kaareva tai sormijatkettu	13
	Harjanivel	14
	Yhdistetyn kehän detaljeja	14

10 KEHÄT

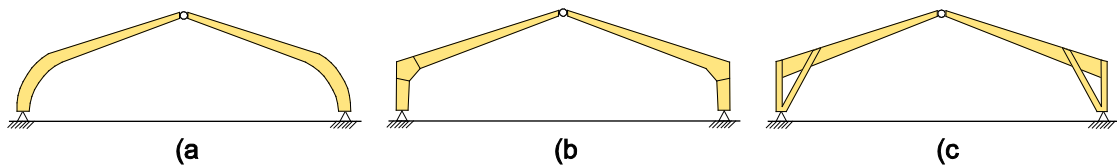
Puurakenteiset kehät tehdään lähes poikkeuksetta liimapuusta. Kehän nurkka voi olla kaareva, jolloin lamellit on taivutettu nurkan mukaisesti, sormijatkettu tai yhdistetty, katso kuva 10-1. Kehän muodon pitää mahdollisimman tarkkaan noudattaa määräävän kuorman puristusviivaa toiminnallisten ja esteettisten vaatimusten rajoissa. Kaarevat ja yhdistetyt kehän nurkat täyttävät nämä vaatimukset helpoimmin ja soveltuvat siksi parhaiten suurille jänneväleille. Erityisesti harjan painumisen rajoittamiseksi katon kaltevuuden ei pidä olla pienempi kuin 14° .

Kolminivelkehä soveltuu jopa 40 m jänneväleille. Kuljetusrajoitusten vuoksi kehän jalan ja harjan välisen mitan ei pidä ylittää 24 m ja sitä vastaan kohtisuoran mitan kehän ulkoreunalle ei pidä ylittää 3,7 m.

Kaksinivelkehän rakenne on jäykempi, mutta sellainen kehä pitää valmistaa yleensä ainakin kolmessa osassa, jotka liitetään toisiinsa momenttijäykästi työmaalla. Jatkokset sijoitetaan mieluiten sellaisiin kohtiin missä on pieni taivutusmomentti. Momenttijäykän jatkoksen tekeminen on haastavampaa kuin nivelen tekeminen, ja sellainen liitos on sekä kalliimpi että ulkonäöltään vähemmän huomaamaton. Kehän puuosista tulee sen sijaan pienempiä kuin vastaavan kolminivelkehän osista ja niitä on sen vuoksi helpompi kuljettaa.

Nivelettömiä kehiä ei yleensä käytetä puurakenteissa.

Yleisin tyyppi on kolminivelkehä ja sen vuoksi jatkossa käsitellään vain sitä.



KUVA 10-1

Esimerkkejä kolminivelkehistä (a) kaareva kehän nurkka (b) sormijatkettu kehän nurkka (c) yhdistetty kehän nurkka.

10.1 Kolminivelkehän mitoittaminen

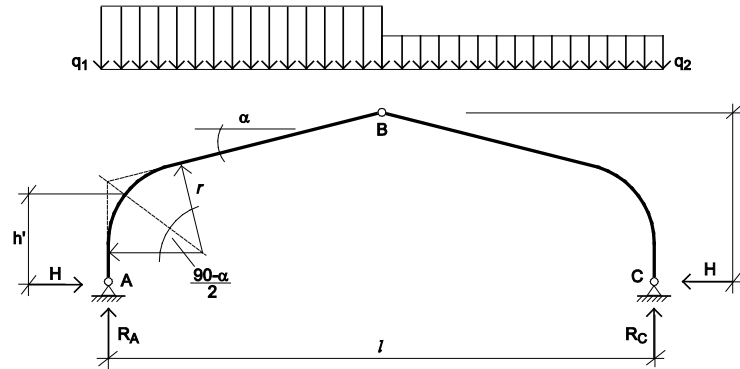
Kolminivelkehä on tasossaan stabiili vaikuttaviin vaakavoimiin nähden ja staattisesti määrätty. Sen vuoksi tukien epätasainen painuminen tai liitoksien ennalta arvaamattomat muodonmuutokset eivät vaikuta taivutusmomentin jakautumaan. Koska kolminivelkehä kiinnittyy perustuksiin nivelellisesti, niin perustusrakenteesta tulee yksinkertainen. Huonoissa perustusolosuhteissa tukien vaakavoimat voidaan siirtää perustusten välillä käyttämällä lattiarakenteeseen tai sen alle sijoitettua vetotankoa.

Tavallisesti katon kaltevuus on noin 15° . Mitoittava kuormitusyhdistelmä on silloin oman painon ja lumikuorman yhdistelmä, lisäksi pitää ottaa huomioon mahdolliset nosturipalkit ja vastaavat. Kirkkojen ja varastorakennuksien katon kaltevuus voi olla suuri, jolloin mitoittavan kuormayhdistelmän määräävä kuorma voi olla tuulikuorma.

Muodonmuutosten laskeminen tehdään helpoimmin tietokoneavusteisesti käyttämällä elementtimenetelmään perustuvaa laskentaohjelmaa.

10.2 Sisäiset voimasuureet ja tukireaktiot

Kolminivelkehä on staattisesti määrätty ja sisäiset voimat voidaan siten laskea tasapainoyhtälöistä. Geometrinen muoto aiheuttaa kuitenkin usein huomattavaa laskentatyötä jonka tekemistä tietokone voi merkittävästi helpottaa.



KUVA 10-2

Kaarevanurkkainen kolminivelkehä, merkinnät.

Kun kehää rasittaa kuvan 10-2 mukaiset tasaiset kuormat voidaan tukireaktiot ja sisäiset voimat laskea seuraavista yhtälöistä.

Pystysuorat tukireaktiot ovat

$$R_A = \frac{(3 \cdot q_1 + q_2) \cdot l}{8} \quad 10-1$$

$$R_C = \frac{(q_1 + 3 \cdot q_2) \cdot l}{8} \quad 10-2$$

Vaakasuora tukireaktio on

$$H = \frac{(q_1 + q_2) \cdot l^2}{16 \cdot f} \quad 10-3$$

Kehän nurkassa vaikuttava suurin normaalivoima N on

$$N \approx \sqrt{R_c^2 + H^2} \quad 10-4$$

Kehän nurkassa vaikuttava suurin taivutusmomentti M on

$$M = H \cdot h + (N - R_c) \cdot r + \frac{q_2 \cdot r^2}{2} \left(1 - \frac{R_c}{N}\right)^2 \quad 10-5$$

Harjan vertikaalien leikkausvoima V_B on

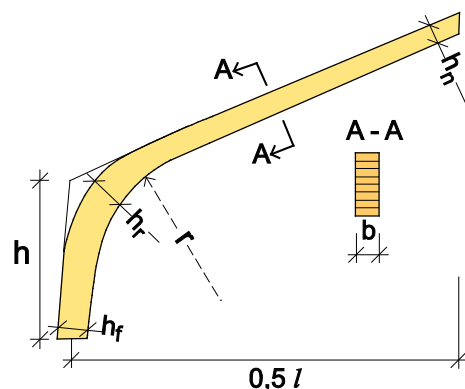
$$V_B = \frac{(q_1 - q_2) \cdot l}{8} \quad 10-6$$

Jos kolminivelkehän toinen jalka on pystysuora, esimerkiksi jos nurkka on sormijatkettu, niin nurkan kaarevuussäde r voidaan asettaa nolllaksi. Sellaisen kehän nurkan taivutusmomentti M yksinkertaistuu muotoon $H \cdot h$ (katso yhtälö 10-5).

10.3 Mitoituksen kulku

Kehien mitoituksen vaiheet ovat seuraavat:

1. Määrittele kehän päämitat, kuormien mitoitusarvot ja käyttöluokka.
2. Luonnostele kehän muoto kokemuseräisen kuvan 10-3 avulla.
3. Laske tukireaktiot ja harjalla vaikuttavat sisäiset voimat eri kuormitusyhdistelmille.
4. Valitse tarvittava poikkileikkauskoko tuilla suurimman normaalivoiman tai suurimman leikkausvoiman perusteella.
5. Valitse tarvittava poikkileikkauskoko harjalla kuten tuilla. Harjan liitososan muotoilu voi myös vaikuttaa valittaviin mittoihin.
6. Korjaa kohdan 2 luonnosta ja määrittele taivutusmomentti ja sisäiset voimat kehän nurkassa eri kuormitusyhdistelmille.
7. Määrittele kehän nurkan tarvittavat poikkileikkausmitat ottamalla huomioon nurjahdus ja käytetyn nurkan muotoilu kohtien 10.4 ja 10.6 mukaan.
8. Mitoita kehän palkki samanaikaiselle taivutukselle ja puristukselle kohdan 10.4 mukaan. Kehän poikkileikkaus ei yleensä ole vakio harjan ja nurkan välillä, ja sen vuoksi kriittinen poikkileikkaus ei ole suurimman kenttämomentin kohdalla. Yleensä on riittävää tarkistaa pari satunnaisesti valittua poikkileikkausta.
9. Tarkista kehän toiminta käyttörajatilassa kohdan 10.5 mukaan.



$$h_r \approx h / 15 + l / 30$$

$$h_f \sim 0,7 \cdot h_r$$

$$h_n \sim 0,3 \cdot h_r (\geq 250\text{mm})$$

$$b \sim 0,15 \cdot h_r - 0,20 \cdot h_r$$

$$r \geq 8 \text{ m}$$

KUVA 10-3

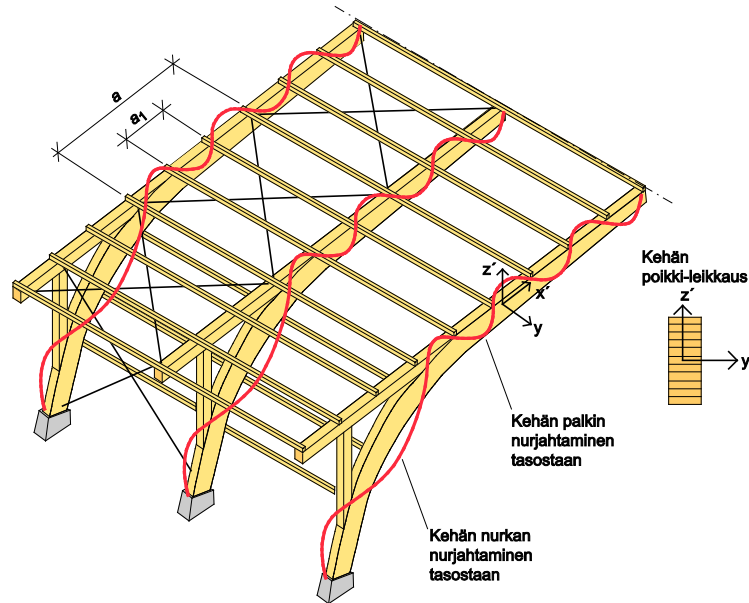
Liimapuukehän alustava mitoitus

10.4 Nurjahtaminen

Kehän kestävyys nurjahdusta vastaan osoitetaan poikkileikkauksen molempien akseleiden suhteen samalla tavalla kuin palkkien ja pilareiden kestävyys. Nurjahduspituus voidaan arvioida vain likimääräisesti, koska liitoksissa tapahtuu muodonmuutoksia ja tuentaolosuhteet eivät vastaa idealisoituja.

Kehän nurjahtaminen tasostaan

Kehän nurjahtaminen tasostaan tarkistetaan kuten minkä tahansa puristetun ja taivutetun rakennusosan nurjahtaminen tukipisteiden välillä. Nurjahduspituus riippuu kattorakenteesta ja valitusta jäykistysrakenteesta. Esimerkiksi riittävän jäykkä kattolevy, kuten kehän palkkiin kiinni ruuvattu teräksinen poimulevy, voi estää kehän nurjahtamisen tasostaan. Jos jäykkä kattolevy on ruuvattu orsien yläreunaan, nurjahtaminen tapahtuu niiden pisteiden välillä missä orret kiinnittyvät kehän palkkiin (nurjahduspituus a_1 , katso kuva 10-4). Esimerkiksi kuitusementtilevystä tehty katto ei ole riittävän jäykkä estämään nurjahdusta ja tällaisen katon yhteydessä nurjahduspituudeksi pitää valita tuuliristikon nurkkien väli (nurjahduspituus a , katso kuva 10-4).



KUVA 10-4

Kehän palkin ja nurkan nurjahtaminen tasostaan. Kattorakenteeseen kuuluu jäykkä levy, kuten teräksinen poimulevy (ei näytetty kuvassa).

Kehän palkin nurjahtaminen tasostaan

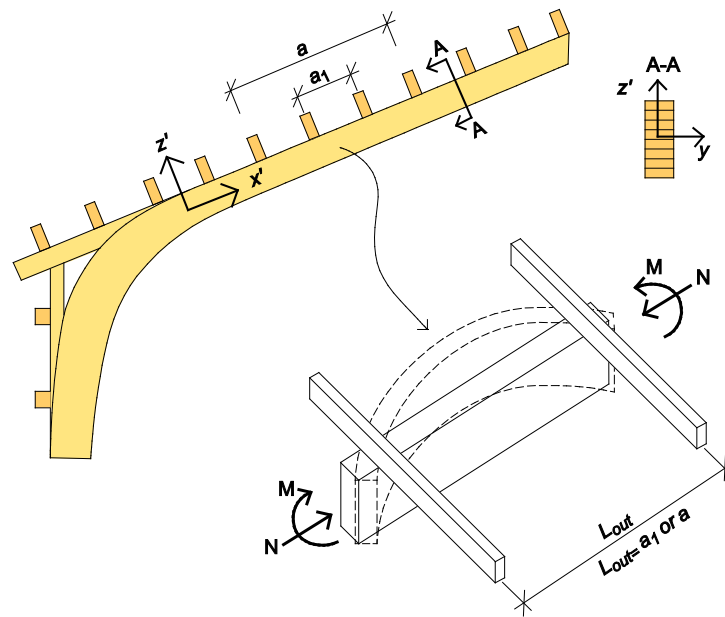
Nurjahtaminen kehän tasosta tarkistetaan kuten puristettujen palkkien nurjahtaminen kuvassa 10-5 esitetyn mallin mukaisesti. Mitoitusehto on

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} &\leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} &\leq 1 \end{aligned} \right.$$

10-7

$\sigma_{c,0,d}$	mitoitettava puristusjännitys
$\sigma_{m,y,d}$	mitoitettava taivutusjännitys y-akselin suhteen
$f_{c,d}$	puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{m,y,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo y-akselin suhteen
$k_{c,z'}$	kerroin joka ottaa huomioon nurjahtamisen kehän tasosta (siis z' - akselin suhteen, katso kuva 10-4)
k_{crit}	kerroin joka ottaa huomioon kiepahtamisen, katso jakso 4.1.3

Luvussa 4 on esitetty käytetyt merkinnät yksityiskohtaisemmin.

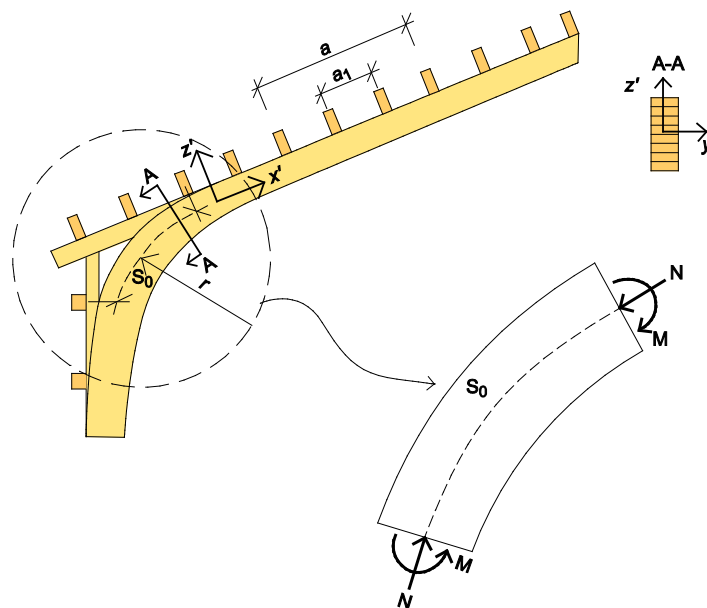


KUVA 10-5

Kehän palkin nurjahtamisen mallintaminen, nurjahdus kehän tasosta. Riittävän jäykkää kattomateriaalia käytettäessä nurjahduspituudeksi voidaan olettaa a_1 . Muussa tapauksessa nurjahduspituudeksi oletetaan a , katso myös kuva 10-4.

Kehän kaarevien osien nurjahtaminen

Yleensä kehää ei jäykistetä nurkan alueella. Taivutusmomentti painovoiman aiheuttamista kuormista on nurkassa negatiivinen eli poikkileikkauksen alapinta on nurkassa puristettu. Sen lisäksi nurkassa on puristusvoiman aiheuttamia jännityksiä. Kehän nurkassa pitää tarkistaa puristusvoimien ja taivutuksen yhteisvaikutus.



KUVA 10-6

Kehän nurkan nurjahtamisen mallintaminen.

Mitoitusehto on muuten sama kuin kehän palkille (yhtälö 10-7), mutta lisäksi tulee luvussa 7 määritelty kerroin k_r , joka ottaa huomioon lamellien taivutuksen aiheuttaman lujuuden pienemisen.

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot k_r \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} \leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_r \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \end{cases} \quad 10-8$$

Jaksossa 4.1.3 esitetyn hoikkuusluvun ja kiepahduskertoimen k_{crit} laskennassa tarvittava kriittinen taivutusmomentti M_{cr} on

$$M_{cr} = \frac{\pi}{s_0} \cdot \sqrt{(E \cdot I_z) \cdot (G \cdot k_v)} + \frac{(E \cdot I_z) + (G \cdot k_v)}{2 \cdot r} \quad 10-9$$

$$I_z = \frac{b^3 \cdot h}{12} \quad 10-10$$

$$k_v = \frac{b^3 \cdot h}{3} \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{b}{h} \right) \quad 10-11$$

k_v vääntöjäyhyysmomentti

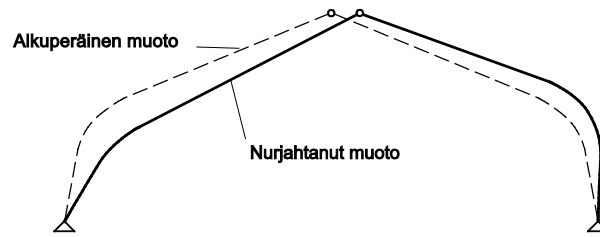
Kehän nurjahtaminen tasossaan

Kehän nurjahtaminen tasossaan edellyttää tavanomaista puristettujen ja taivutettujen sauvojen nurjahdustarkastelua vaativampaa tarkastelua. Laskelmissa on yleensä kaksi vaihetta:

1. *lineaarinen nurjahdusanalyysi*
2. *toisen kertaluokan analyysi.*

Lineaarinen nurjahdusanalyysi

Lineaarista nurjahdusanalyysiä sovelletaan samoin kuin samanaikaisesti puristettuja ja taivutettuja rakenneosia analysoitaessa. Ulkoisten kuormien aiheuttamat jännitykset lasketaan lineaarisella kimmoteorialla tarkastelemalla alkuperäisessä muodossaan olevaa staattista mallia. Geometrisen epätäydellisyyden aiheuttamat muodonmuutokset kehän tasossa ja sitä vastaan kohtisuoraan otetaan huomioon siten, että puristus- ja taivutuslujuus kerrotaan nurjahduksen huomioonottavilla pienennyskerroimilla k_c ja k_{crit} . k_c on nurjahduksen huomioonottava pienennyskerroin akselin suuntaisten puristusvoimien vaikuttaessa. Tavanomaisilla korkeuden ja jännevälän suhteilla ensimmäinen nurjahdustapa on yleensä asymmetrinen ja sillä on kuvan 10-7 mukainen muoto.



KUVA 10-7

Kolminivelkehän nurjahtaminen tasossaan.

Kun nurjahtamista tarkastellaan yksinkertaistetun analyysin avulla, tarvitaan nurjahduspituus L_e . Se voidaan määrittää numeerisesti, esimerkiksi käyttämällä lineaarista nurjahdusanalyysiiä, tai kokeellisin yhtälöin.

Alustavasti voidaan nurjahduspituudeksi olettaa

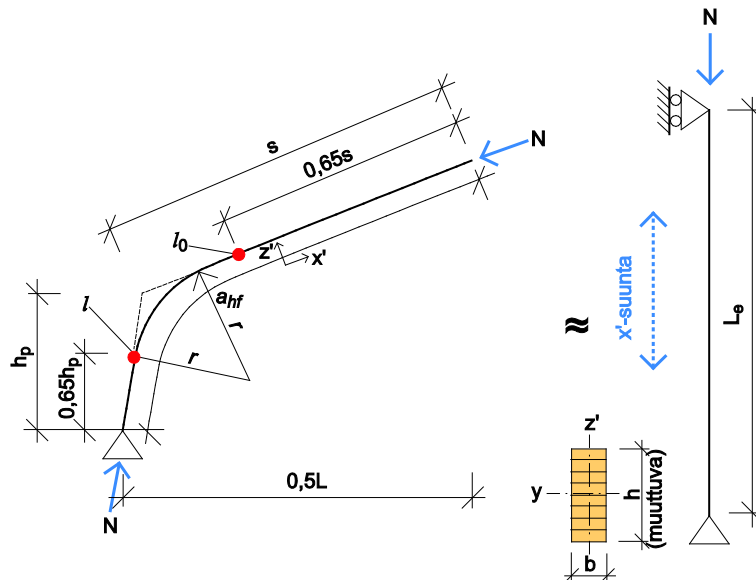
$$L_e \approx 1,25 \cdot a_{hf} \quad 10-12$$

missä a_{hf} on kehän puolikkaan pituus (katso kuva 10-8).

Tarkempi arvio on esitetty saksalaisessa puurakenteiden normissa DIN 1052.

$$L_e \approx h_p \cdot \sqrt{4 + 1,6 \cdot \frac{I_0}{I} \cdot \frac{2 \cdot s}{h_p}} \quad 10-13$$

Hitausmomentit I ja I_0 lasketaan etäisyyksillä $0,65 \cdot h$ ja $0,65 \cdot s$ tuelta ja harjasta (katso kuva 10-8). Mitoitusehto on



KUVA 10-8

Kolminivelkehän nurjahduspituuden laskemisessa käytetty malli.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_r \cdot f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,d}} \leq 1 \quad 10-14$$

$k_{c,y}$ kehän tasossa tapahtuvan nurjahduksen huomioonottava kerroin (nurjahdus siis y-akselin suhteen, katso kuva 10-8)

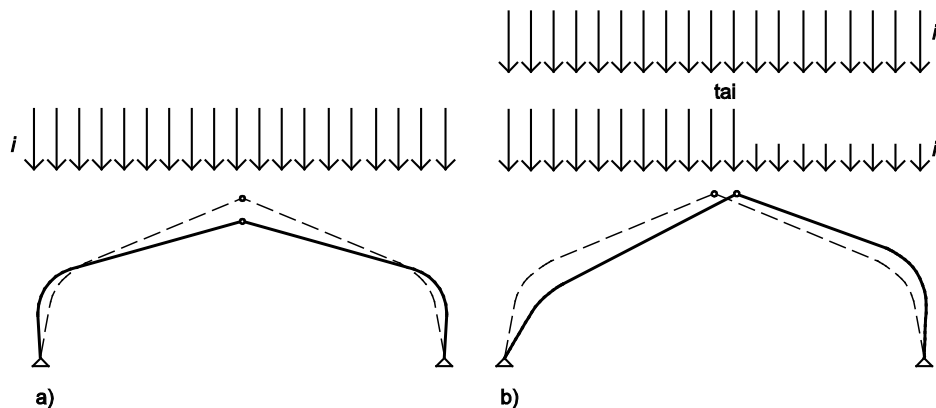
Muut merkinnät ovat samat kuin yhtälössä 10-7 ja luvuissa 4 ja 7.

Toisen kertaluokan analyysi

Toisen kertaluokan analyysissä lasketaan jännitykset geometrisesti epälineaarisen teorian mukaisesti ja tasapainoa tarkastellaan muotonsa muuttaneen staattisen mallin mukaan.

Rakenteen kuormia lisätään portaittain. Ennen uutta kuorman lisäystä lasketaan edellisen kuormitustilanteen mukainen muoto. Kuormaa lisätään kohtiin, jotka päätetään sen jälkeen kun edellisen kuorman lisäyksen vaikutus muodonmuutokseen on laskettu. Tällä tavoin otetaan huomioon kaikkien muodonmuutosten vaikutus sisäisiin voimiin, myös vaakasuorassa suunnassa tapahtuvan muodonmuutoksen. Tällainen analyysi tehdään yleensä erityisten elementtimenetelmään perustuvien tietokoneohjelmien avulla.

Jos mallintamisessa otetaan huomioon myös rakenteen geometrian poikkeaminen aiotusta muodosta, voidaan toisen kertaluokan analyysin tuloksena saatuja sisäisiä voimia käyttää sellaisenaan mitoituksessa eikä lujuutta tarvitse pienentää nurjahduksen vuoksi (siis $k_{c,y}=1,0$). Alkuperäisen muodon poikkeaman oletetaan vaikuttavan yhdessä kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen kanssa, jonka muodoksi oletetaan kuvan 10-9 mukainen muoto. Eurokoodi 5:n luvussa 5.4.4 annetaan suosituksia käytettävälle kehien alkuperäisen muodon poikkeamalle.



KUVA 10-9

Toisen kertaluokan analyysissä oletettu kehien alkuperäisen muodon poikkeama aiotusta (a) symmetrinen nurjahdus (b) epäsymmetrinen nurjahdus.

10.5 Käyttörajatarkastelu

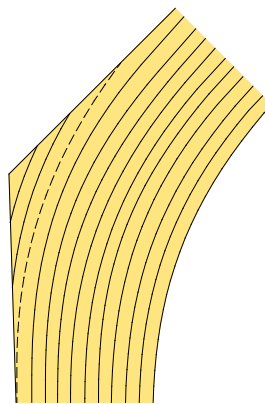
Kolminivelkehien osat valmistetaan tavallisesti ilman esikoroitusta. Toisinaan esikoroitus voi olla välttämätön, esimerkiksi jos on odotettavissa suuria kosteusmuodonmuutoksia. Tavallisesti tarkistetaan harjan taipuma. Laskenta tehdään yksinkertaisimmin jonkun kaupallisesti saatavilla olevan elementtimenetelmään perustuvan ohjelmiston avulla.

Rakentamismääräyksissä ei yleensä ole kehien taipumia koskevia määräyksiä, sillä taipumarajojen pitäisi olla riippuvaisia rakennuksen aiotusta käytöstä. Oman painon ja asianmukaisten muuttuvien kuormien aiheuttaman pitkäaikaisen taipuman ei kuitenkaan missään olosuhteissa pitäisi ylittää 1/200 jännevälistä.

10.6 Kehän nurkan mitoittaminen

Kaareva nurkka

Kaarevan nurkan poikkileikkaus on yleensä tasakorkea ja nurkassa käytetään joskus erillistä kuvan 10-10 mukaista kiilakappaletta. Valmistuksen yksinkertaistamiseksi ja lujuuden pienemisen välttämiseksi valitaan tavallisesti suurehko kaarevuussäteen ja lamellin paksuuden välinen suhde, $r/t \approx 240$. Usein kaarevien nurkkien lamellien paksuus on $t = 33$ mm ja kaarevuussäde $r = 8$ m. Kuvassa katkoviivan ulkopuolella näkyvä kiilakappale voi olla liimattu, jolloin se toimii yhdessä muun rakenteen kanssa, tai se voi olla paikoilleen naulattu tai ruuvattu. Säteen suuntaiset vetojännitykset syitä vastaan kohtisuoraan tarkistetaan kuormitustapaukselle, jossa kehän nurkan taivutusmomentti on positiivinen (vetojännitys sisäreunassa). Tavallisesti tällainen tilanne esiintyy kun määräävä kuorma on tuulikuorma. Kehän nurkka mitoitetaan periaatteessa samalla tavalla kuin kaarevat harjapalkit.

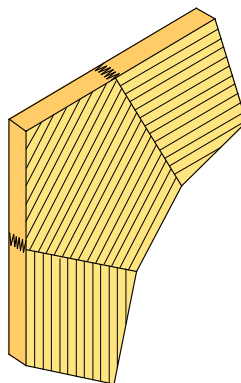


KUVA 10-10

Kaareva kehän nurkka ja sen kanssa toimiva päälle liimattu kiilakappale.

Sormijatkettu nurkka

Sormijatkettu nurkka valmistetaan yleensä erillisen välikappaleen avulla (katso kuva 10-11). Välikappale pienentää voiman ja puun syiden välistä kulmaa jatkosten kohdalla ja parantaa siten nurkan kestävyyttä. Tavallisesti määräävä kuorma aiheuttaa nurkkaan negatiivisen taivutusmomentin ja silloin sekä kehän palkin että jalan lamellien pitää olla kehän ulkoreunan suuntaisia (katso kuva 10-11). Välikappaleen lamellit ovat yleensä kehän sisäreunan suuntaisia.



KUVA 10-11

Sormijatkettu kehän nurkka jossa on käytetty välikappaletta.

Nurkan molemmat liitokset tarkistetaan seuraavan kokemusperäisen menettelyn mukaisesti:

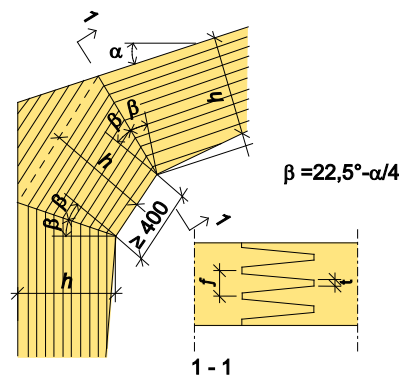
- Taivutusmomentti M_{joint} ja normaalivoima N_{joint} kohtisuoraan leikkaustasoa vastaan lasketaan kummankin liitoksen keskellä.
- Liitoksen tehollinen poikkileikkauspinta-ala ja tehollinen taivutusvastus lasketaan. Kuvan 10-12 merkinnöin saadaan

$$A_{joint} = \frac{b \cdot h}{\cos \beta} \cdot \left(1 - \frac{t}{f}\right) \quad 10-15$$

$$W_{joint} = \frac{b \cdot h^2}{6 \cdot \cos^2 \beta} \cdot \left(1 - \frac{t}{f}\right) \quad 10-16$$

t liitosprofiilin kärjen leveys
 f liitosprofiilin sormien välinen etäisyys.

- Suhde t/f on tavallisesti 0,1...0,2. Jos sormien profiilia ei tunneta etukäteen, voidaan yhtälöiden 10-15 ja 10-16 suluisissa oleva lauseke korvata arvolla 0,8.



KUVA 10-12

Sormijatkettu nurkka, merkinnät ja geometria.

- Puristuslujuuden mitoitusarvo $f_{c,\alpha}$ määritetään kulman β avulla, missä β on puristavan voiman ja syiden suunnan välinen kulma (katso luku 4).
- Mitoitusehto on kuormitusyhdistelmän aiheuttaessa puristusjännityksiä kehän nurkan sisäreunassa

$$\frac{N_{joint}}{A_{joint}} + \frac{M_{joint}}{W_{joint}} = f_{c,\alpha} \quad 10-17$$

- Kuormitusyhdistelmän aiheuttaessa vetojännityksiä kehän nurkan sisäreunassa (määrävä kuorma tuulikuorma) mitoitusehto on

$$\frac{N_{joint}}{A_{joint}} + \frac{M_{joint}}{W_{joint}} = k_{\alpha} f_{c,\alpha} \quad 10-18$$

- Kerroin k_{α} on riippuvainen kulmasta β jatkoksessa vaikuttavan puristavan voiman ja syiden suunnan välillä taulukon 10-1 mukaisesti.

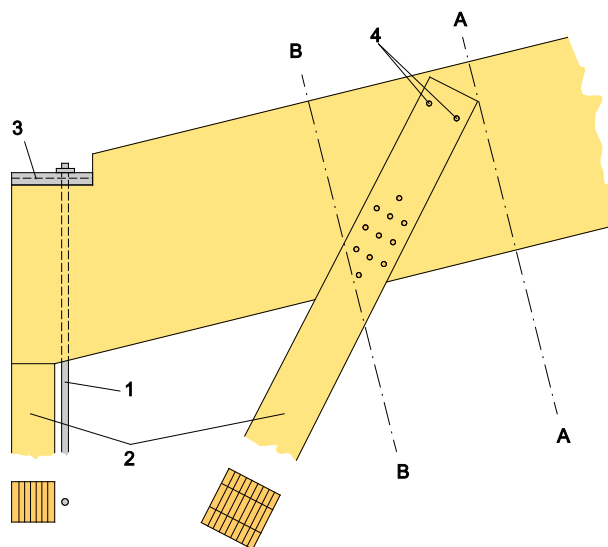
TAULUKKO 10-1

Kerroin k_α kulman β funktiona.

Kulma β	Kerroin k_α
$\beta \leq 11,25^\circ$	$k_\alpha = 0,33$
$11,25^\circ < \beta \leq 18,75^\circ$	$k_\alpha = 0,533 - 0,0178 \cdot \beta$
$18,75^\circ < \beta \leq 22,5^\circ$	$k_\alpha = 0,20$

Yhdistetty nurkka

Yhdistetty nurkka voidaan muotoilla monella tavalla. Kehissä joissa on kuvan 10-13 mukaisesti sisempi kehän jalka tarkistetaan leikkaus A samanaikaiselle puristusvoimalle ja taivutusmomentille kohdan 10.6.2 mukaan, jolloin puristus- ja taivutuslujuuksien arvoja pienennetään kehän kummassakin suunnassa tapahtuvan nurjahduksen vuoksi. Lisäksi tarkistetaan leikkausjännitykset leikkauksessa B.

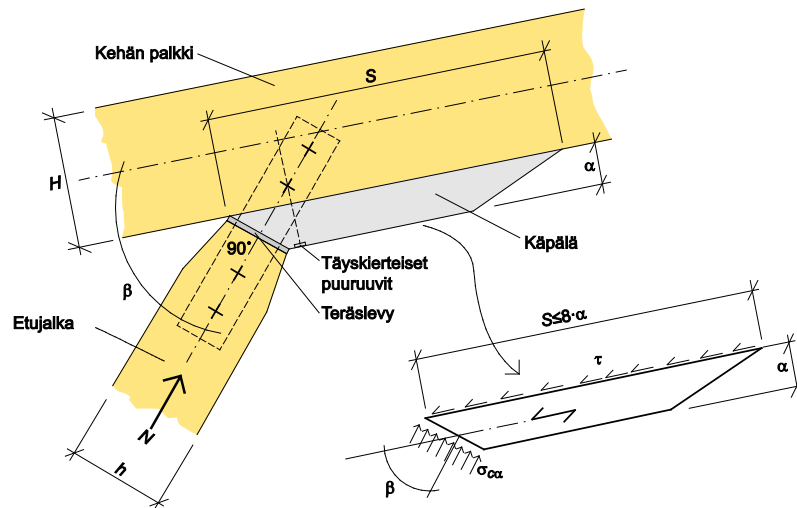


KUVA 10-13

Yhdistetty nurkka jossa sisäjalan kiinnitys on tehty ruuvein. (1) teräksinen vetotanko (2) puinen puristussauva (3) teräksinen U-profiili (4) soikeat ruuvit.

Ulompi kehän jalka mitoitetaan tavallisesti normaalivoimalle ja mahdolliselle samanaikaiselle tuulikuorman aiheuttamalle taivutusmomentille. Jos kuormitus aiheutuu suurimmaksi osaksi painovoimasta, syntyy kehän ulompaan jalkaan suuria vetovoimia. Nämä voidaan siirtää perustukselle kuvan 10-13 mukaisen teräksisen vetotangon avulla. Puristusvoimat siirretään yksinkertaisen puusauvan avulla. Vetotanko pitää kiinnittää kehän palkin yläreunaan halkeamisriskin pienentämiseksi.

Kehän sisäjalka mitoitetaan kuten puristettu ja mahdollisesti taivutettu pilari, jos palkin ja jalan liitos aiheuttaa epäkeskeisiä kuormia. Kehän palkin ja jalan välinen liitos tehdään usein niin, että puristusvoimat siirtyvät kehän palkin alaosassa, mieluiten kosketuspaineen avulla. Voimien siirtämiseen voidaan käyttää kuvan 10-14 mukaista palkin alla olevaa käpälää. Lisäksi on tarkistettava puristuspintojen tyssäytymisriski – puun syyt voivat puristuspinnossa painua toistensa sisälle saman tapaan kuin jos kahta harjaa painetaan vastakkain. Tämän estämiseksi voidaan joskus käyttää teräslevyä tai vastaavaa liitoksessa. Käpälän ja kehän palkin välinen liimaliitos pitää vahvistaa yhdellä tai useammalla puurakenneruuvilla mahdollisten vetovoimien siirtämiseksi, joita voi syntyä esimerkiksi jos kosketuspinnat eivät täydellisesti sovi yhteen.



KUVA 10-14

Yhdistetty nurkka, sisäiset voimasuureet ja merkinnät. Kulma β palkin ja etujalan välillä on yleensä 45...60°.

Liitoksen kestävyyttä laskettaessa tarkistetaan

- kosketuspaine $\sigma_{c,\alpha,d}$ kehän jalan ja liimapuisen käpälän välillä

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N}{b \cdot a} \cdot \cos \beta \leq f_{c,\alpha,d} \quad 10-19$$

$f_{c,\alpha,d}$ puristuslujuus kulmassa α syiden suuntaa vasten, laskettu kuten luvun 4 kappaleessa 4.1.5, missä voiman suunnan ja syiden suunnan välisenä kulmana α käytetään kulmaa β
 b kehän jalan poikkileikkausmitta kohtisuoraan kehän tasoa vastaan

- leikkauslujuus käpälän ja kehän palkin välillä

$$\tau_d = \frac{N}{b \cdot s} \cdot \cos \beta \leq 0,5 \cdot f_{v,d} \quad 10-20$$

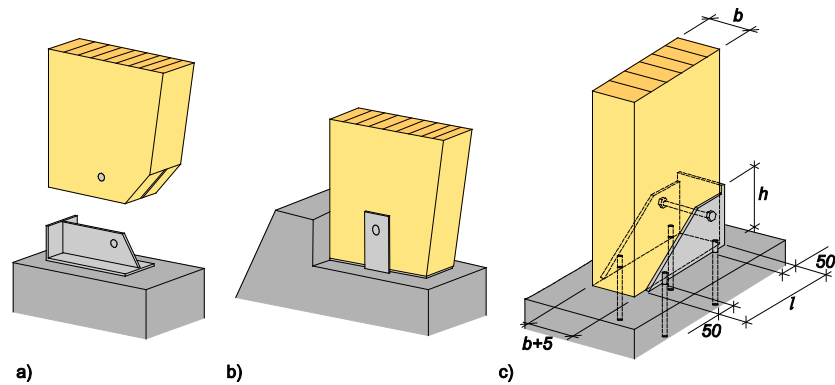
$f_{v,d}$ liimapuun leikkauslujuus

Yhtälössä 10-20 arvoa $f_{v,d}$ pienennetään kokemuspäisesti kertoimella 0,5. Edelleen pitää tarkistaa että käpälän pituus s on ainakin 200 mm ja että käpälän pituuden ja korkeuden välinen suhde on ainakin 6 (siis $s/a \geq 6$). Jos $s \geq 8 \cdot a$, niin s :n arvona yhtälössä 10-20 käytetään arvoa $8 \cdot a$. Suurempaa s :n arvoa kuin $8 \cdot a$ ei siten voi hyödyntää laskelmissa.

10.7 Yksityiskohtien muotoilu

Nivelellinen kehän kantaliitos kun nurkka on kaareva tai sormijatkettu

Kehän ja perustuksen välinen liitos tehdään nivelenä. Liitostyyppi siirtää yleensä niin vähän taivutusmomenttia, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon kehän mitoituksessa, vaikkakin sillä on merkitystä itse liitoksen ja sen ankkuroinnin mitoittamisessa. Liitoksen pitää sallia kiertyminen jäykemmän akselin ympäri ja siirtää sekä vaakasuoria että pystysuoria kuormia, katso kuva 10-15.



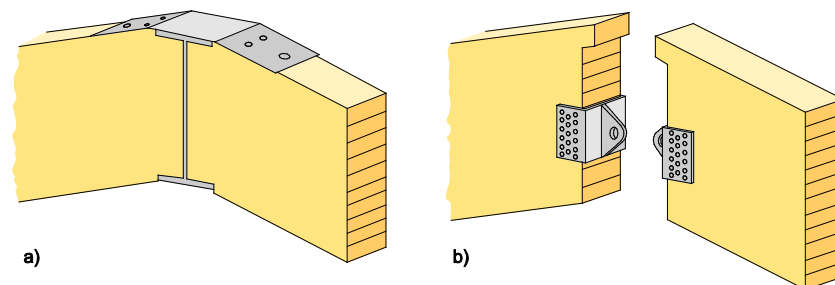
KUVA 10-15

Kaarevien ja sormijatkettujen kehien liitoksiin perustuksiin (a) tappivaarnaliitos jossa on myös taempi tukilevy (b) teräskiinnikkeet ja betoninen tuki (c) takalevyllinen pilarikenkä.

Toleranssit pitää ottaa huomioon kun teräsosat asennetaan valmiiksi betoniin, kuten kuvassa 10-15 (c). On aina suositeltavaa eristää puuosa betonista vesieristeellä, myös käyttöluokissa 1 ja 2, ettei kosteutta pääse tunkeutumaan päätypuuhun.

Harjanivel

Harjanivelet siirtävät vaaka- ja pystysuoria voimia. Taivutusmomenttia siirtyy niin vähän että sitä ei oteta huomioon mitoituksessa. Liitos ei saa estää kehän palkkien kulmanmuutoksia, muuten voi syntyä lisäjännityksiä jotka voivat aiheuttaa rakenteelle ennalta arvaamattomia vaurioita. Liitos tehdään samaan tapaan kuin luvussa 9 esitelty kolminivelkannattajan harjaliitos. Kuvassa 10-16 esitetään lisää harjaliitoksen tekotapoja.

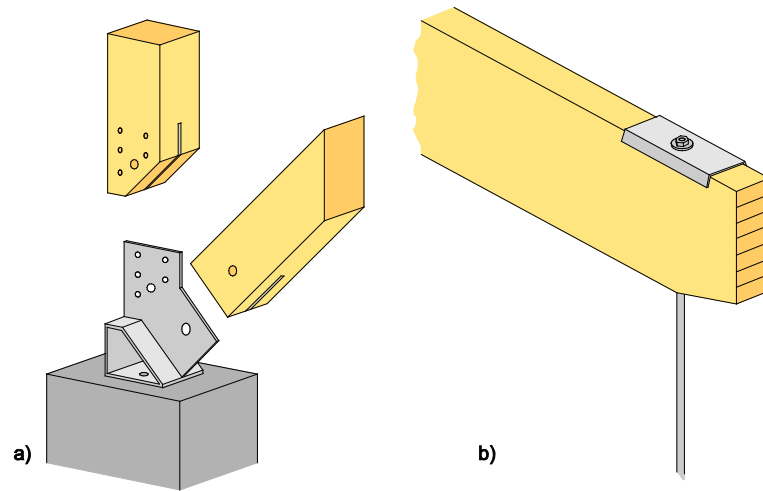


KUVA 10-16

Nivelellinen harjaliitos (a) palkkeihin on tehty urat joihin sovitetaan I-muotoinen teräsosa ja liitos sidotaan harjalta teräslevyllä (b) nivelellinen tappiliitos, liitoksen yläreuna pitää viistää jotta kiertyminen pääsee vapaasti tapahtumaan.

Yhdistetyn kehän detaljeja

Kuva 10-17 esittää yhdistetyn kehän kannan liitoksen ja vetotangon ja kehän palkin välisen liitoksen.



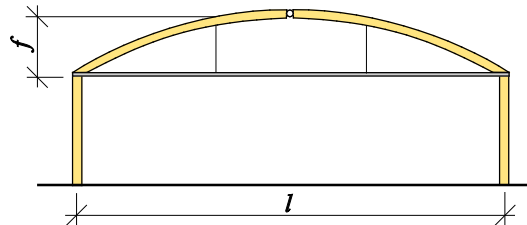
KUVA 10-17

Yhdistetyn kehän liitoksia (a) kannan liittyminen tukeen (b) vetotangon ja kehän palkin välinen liitos.

11	KAARET	2
11.1	Kaarien geometrisia suureita	4
11.2	Alustava mitoitus	4
11.3	Kolminivelkaarien alustava mitoitus	5
11.4	Sisäiset voimasuureet ja tukireaktiot	5
	Pysyvät kuormat + tasainen lumikuorma	6
	Pysyvät kuormat + kolmiomaiset lumikuormat	7
11.5	Nurjahtaminen	8
	Kaaren nurjahtaminen tasostaan	9
	Kaaren nurjahtaminen tasossaan	10
11.6	Leikkausjännitykset ja syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset	15
11.7	Yksityiskohtien muotoilu	15
	Nivelellinen kaaren kanta	15
	Harjan niveljatkos	16

11 KAARET

Liimapuu soveltuu hyvin kaarien materiaaliksi, sillä siitä voidaan ilman merkittäviä lisäkustannuksia muotoilla kaarevia ja poikkileikkaukseltaan muuttuvia rakenteita. Tavallisesti käytetään massiivista tasakorkeaa poikkileikkausta mutta etenkin suurilla jänneväleillä käytetään myös yhdistettyjä poikkileikkauksia ja kotelorakenteita.

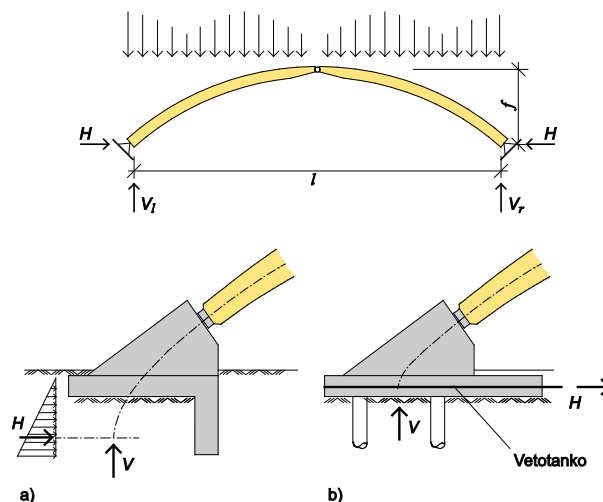


KUVA 11-1

Pilareiden varassa oleva vetotangollinen kaari.

Kaaren muoto valitaan niin, että taivutusmomentista tulee mahdollisimman pieni. Kaaren muoto seuraa siten mitoittavan kuormitusyhdistelmän puristusviivaa. Taivutusmomenttia ei kuitenkaan täysin voida välttää, sillä tarkasteltavana on aina useita kuormitusyhdistelmiä, joilla kullakin on oma puristusviivansa. Paraabeli tai ympyränkaari ovat usein sopivia kompromisseja. Nuolikorkeuden suhde jänneväliin f/l on yleensä noin 0,14...0,15. Toiminnallisista syistä voidaan valita muukin muoto kuten ellipsi, jos esimerkiksi halutaan suurempaa vapaata korkeutta tuen lähellä. Tällöin kaari lähenee muodoltaan kehää. Suurempi vapaa korkeus saadaan myös nostamalla kaari kuvan 11-1 mukaisesti pilareiden varaan. Kaarivaikutuksen aiheuttamat vaakasuorat tukireaktiot edellyttävät tässä tapauksessa tukien välistä vetotankoa.

Kun kaari on suoraan lattialaatan tai betonisen perustuksen varassa ja perustusolosuhteet ovat suotuisat, kuten kuvassa 11-2 (a), siirretään vaakavoimat suoraan perustukselle. Jos perustusolosuhteet ovat huonot kuten kuvassa 11-2 (b), voidaan käyttää lattian alla olevaa tai lattian sisään valettua vetotankoa. Vaakasuurien tukireaktioiden rajoittamiseksi nuolikorkeuden pitää olla vähintään 0,14...0,15 kaaren jännevälistä. Paraabelilla ja ympyränkaarella tämä vastaa noin 30 °kaltevuutta tuella. Tavallisesti kaaren nuolikorkeuden suhde jänneväliin f/l on 0,14...0,30.

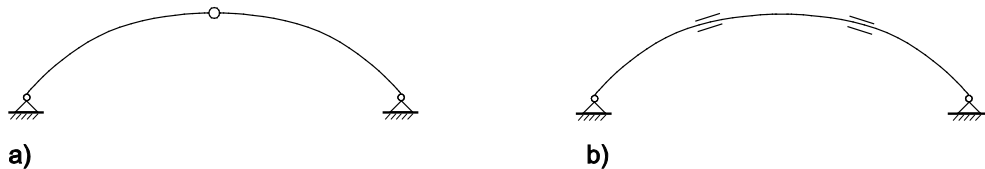


KUVA 11-2

Suoraan perustuksen varassa oleva kaari (a) vaakavoimat siirtyvät suoraan tuen kautta perustuksille (b) vaakavoimat siirretään betonilaatassa olevan vetotangon avulla.

Kaksinivelkaari ja kolminivelkaari valitaan samoin perustein kuin vastaavat kehärakenteet (katso luku 10). Kolminivelkaria käytetään siten aina 60...70 m jänneväleille asti, kun taas suurempi jänneväli yleensä edellyttää kaaren koostuvan kolmesta tai useammasta osasta, jotka liitetään toisiinsa momenttijäykästi rakennuspaikalla. Nivelet ja jatkokset pitää sijoittaa kuten kuvassa 11-3 on esitetty. Kaksinivelkaaren haittana on, että se on staattisesti määräämätön ja siksi herkkä esimerkiksi tukien painumiselle tai kosteusmuodonmuutoksille.

Nivelettömiä kaaria ei yleensä käytetä kantavina puurakenteina.

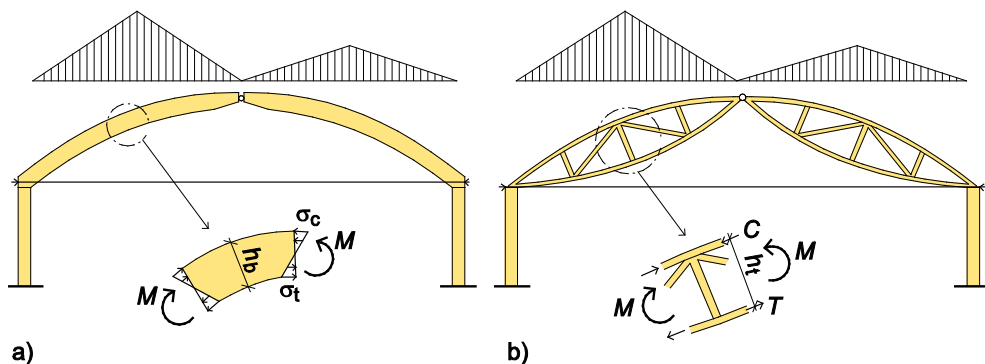


KUVA 11-3

Kaarien jatkosten sijoittaminen (a) kolminivelkaari (b) kaksinivelkaari.

Kaaria ei suositella käytettäväksi kun rakenteeseen kohdistuu suuria pistekuormia. Yksittäiset pistekuormat lisäävät puristusviivan ja rakenteen painopisteviivan välistä etäisyyttä ja kasvattavat rakenteen sisäistä taivutusmomenttia. Suuret pistekuormat muuttavat siten ratkaisevasti kaaren käyttäytymistä puristetusta taivutetuksi rakenteeksi. Pistekuormien vaikutus on pienempi katoilla, joilla on suuri tasaisesti jakautunut oma paino.

Eurokoodi 1-3 ja jotkut kansalliset määräykset edellyttävät, että kinostuvan lumen vaikutus otetaan huomioon kuvan 11-4 mukaisesti kaaren kummallakin puolella vaikuttavan kolmiomaisen kuorman avulla. Toisissa maissa, kuten Norjassa ja Suomessa, käytetään kolmiomaista lumikuormaa vain katon toisella puoliskolla. Tällaiset kuormat aiheuttavat kaarelle melko suuria taivutusmomenteja, erityisesti jos jänneväli on suuri. Tätä vaikutusta voidaan pienentää kasvattamalla kaaren sisäistä momenttivartta, esimerkiksi valitsemalla rakenne missä kumpikin katon puolisko muodostuu kaarevapaarteisesta ristikosta, katso kuva 11-4 (b).



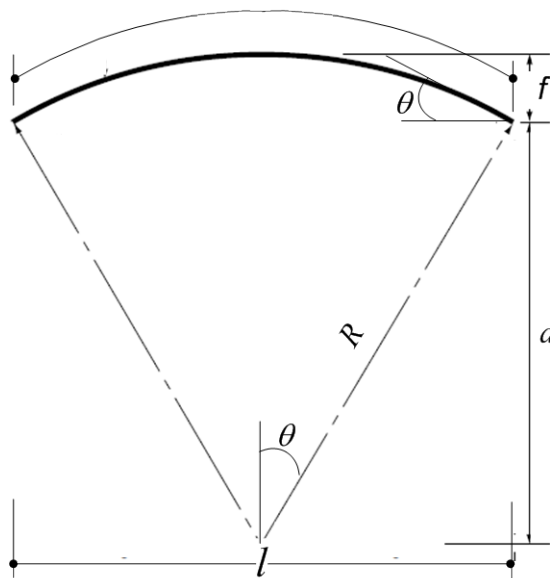
KUVA 11-4

Kolmiomaisen kuorman rasittamia kaarirakenteita (a) tavallinen kaari (b) rakenne joka muodostuu harjalla yhdistetyistä kaarevapaarteisista ristikoista. Rakenne (b) voidaan myös tulkita kolminivelkattotuoliksi.

Tavallisimmin liimapuukaaret ovat kolminivelkaaria. Siksi seuraavassa käsitellään vain niiden mitoittamista. Myös luvussa 10 on kaariin soveltuvia ohjeita.

11.1 Kaarien geometrisia suureita

Ympyränkaaren geometriset suureet mielivaltaiselle nuolikorkeuden ja jännevälän suhteelle on annettu kuvassa 11-5. Samoja arvoja voidaan käyttää myös paraabelille, joille nuolikorkeuden ja jännevälän suhde on noin 0,14...0,15. Paraabelin kaarevuus ei ole vakio, mutta pienillä suhteen f/l arvoilla paraabeli ja ympyränkaari ovat lähes samanmuotoiset, ja kuvan 11-5 yhtälöitä voidaan käyttää riittävällä tarkkuudella myös paraabelille.



Kaarevuussäde
$$R = \frac{l^2 + 4 \cdot f^2}{8 \cdot f}$$

Kulma tuella
$$\theta = \arcsin \left(\frac{l}{2 \cdot R} \right)$$

Kaaren pituus
$$s = 2 \cdot \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot R$$

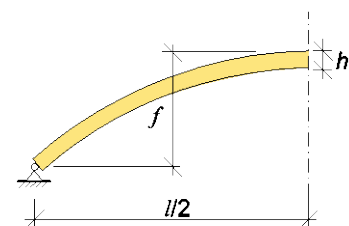
KUVA 11-5

Laakeiden kaarien geometria.

11.2 Alustava mitoitus

Yleensä kaaren muoto ja usein myös sen nuolikorkeus määräytyy ulkonäkösyistä. Taloudellisista syistä ja myös vaakasuoran tukireaktion rajoittamiseksi on syytä seurata kuvassa 11-6 esitettyjä mittoja koskevia peukalosääntöjä.

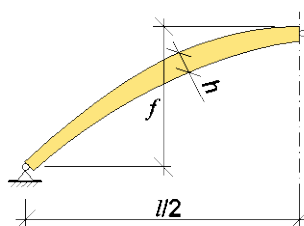
Kaksinivelkaari



$l=30-100 \text{ m}$; $h=l/50-l/30$; $f \geq l/10$

a)

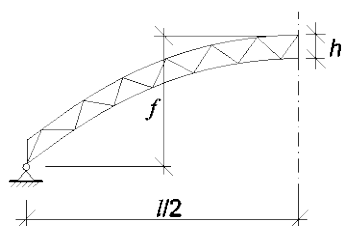
Kolminivelkaari



$l=30-100 \text{ m}$; $h=l/50-l/30$; $f \geq l/7$

b)

Ristikkorakenteinen
kaksi- tai kolminivelkaari



$l=50-120 \text{ m}$; $h=l/40-l/20$; $f \geq l/8$

c)

KUVA 11-6

Kolmen eri kaarityypin alustava mitoitus.

11.3 Kolminivelkaarien alustava mitoitus

Kolminivelkaari on stabiili omassa tasossaan vaikuttaviin vaakavoimiin nähden ja staattisesti määrätty, minkä vuoksi perustusten epätasainen painuma tai liitosten ja kantanelvelten odottamattomat siirtymät eivät vaikuta kaaren taivutusmomenttiin (katso myös luku 10). Kolminivelkaari kiinnittyy nivelellisesti perustuksiin, mikä helpottaa niiden suunnittelua. Jos perustamisolosuhteet ovat huonot, voidaan vaakavoima siirtää lattian sisässä tai alla olevalla vetotangolla perustukselta toiselle.

Muodonmuutosten laskenta tehdään tavallisesti tietokoneavusteisesti käyttämällä jotain elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmaa.

11.4 Sisäiset voimasuureet ja tukireaktiot

Kaaren jokaisen yksittäisen poikkileikkauksen normaalivoima ja leikkausvoima ovat riippuvaiset kaaren tangentin kulmasta α (katso kuva 11-7).

Mielivaltaisessa poikkileikkauksessa normaalivoima N on

$$N = H \cdot \cos \alpha + V_b \cdot \sin \alpha \quad 11-1$$

Mielivaltaisessa poikkileikkauksessa leikkausvoima V on

$$V = -H \cdot \sin \alpha + V_b \cdot \cos \alpha \quad 11-2$$

missä V_b on sellaisen vapaasti tuetun palkin leikkausvoima, jolla on sama jänneväli ja sama kuormitus kuin kaarella ja H on tukireaktion vaakasuora komponentti, katso kuva 11-7.

Kriittinen poikkileikkaus on yleensä lähellä jännevälin neljännesspistettä. Tässä poikkileikkauksessa kulma α on ympyränkaarelle

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l}{4 \cdot R}\right) \quad 11-3 (a)$$

ja paraabelille

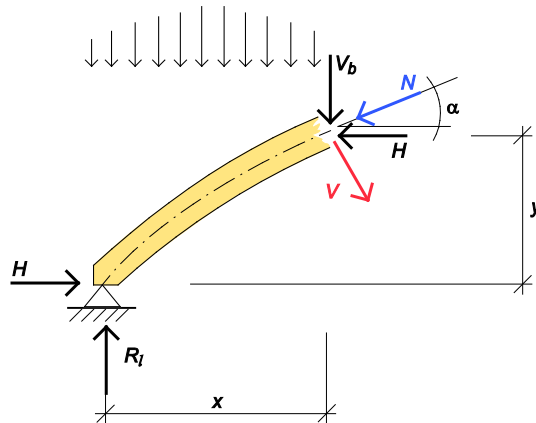
$$\alpha = \frac{180}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot f}{l}\right) \quad 11-3 (b)$$

Jännevälin neljännesspisteessä voidaan kaaren painopisteen korkeus y_0 laskea ympyränkaarelle yhtälöstä

$$y_0 = \frac{f}{2} - \frac{l^2}{8 \cdot f} + \sqrt{\frac{l^4}{64 \cdot f^2} + \frac{f^2}{4} + \frac{l^2}{16}} \quad 11-4 (a)$$

ja paraabelille

$$y_0 = \frac{3}{4} \cdot f \quad 11-4 (b)$$



KUVA 11-7

Kaaren mielivaltaisen poikkileikkauksen sisäiset voimat.

Kolminivelkaarien mitoittavat kuormitusyhdistelmät ovat tavallisesti:

- Pysyvät kuormat + tasan jakautunut lumikuorma
- Pysyvät kuormat + kolmiomaiset eri suuret lumikuormat kummallakin kaaren puoliskolla

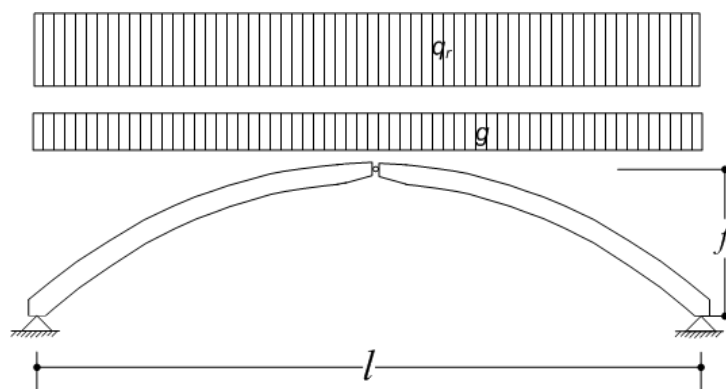
Seuraavaksi esitetään sellaisten kolminivelkaarien sisäisten voimien (normaalivoima, leikkausvoima ja taivutusmomentti) ja tukireaktioiden laskentaohjeet, jotka ovat ympyränkaaria, joiden nuolikorkeuden ja jännevälin suhde f/l on noin 0,14 ... 0,15, tai paraabeleita, jotka täyttävät yhtälön 11-5 mukaisen ehdon.

$$y = \frac{4 \cdot f}{l} \cdot \left(x - \frac{x^2}{l} \right)$$

11-5

X-akseli alkaa kaaren tuelta ja y on kaaren painopisteen korkeus.

Pysyvät kuormat + tasainen lumikuorma



KUVA 11-8

Kolminivelkaari jota kuormittaa pysyvä kuorma ja tasan jakautunut lumikuorma.

Kun kehää rasittaa kuvan 11-8 mukaiset tasaiset kuormat voidaan tukireaktiot ja sisäiset voimat laskea seuraavista yhtälöistä.

Pystysuorat tukireaktiot (vasemmalla tuella: R_l ja oikealla tuella: R_r) ovat

$$R_l = R_r = \frac{(q_r + g) \cdot l}{2} \quad 11-6$$

Vaakasuora tukireaktio on

$$H = \frac{(q_r + g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \quad 11-7$$

Suurin normaalivoima jännevälin neljännespisteessä on

$$N = \frac{(q_r + g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \cos \alpha + \frac{(q_r + g) \cdot l}{4} \cdot \sin \alpha \quad 11-8$$

Taivutusmomentti jännevälin neljännespisteessä on

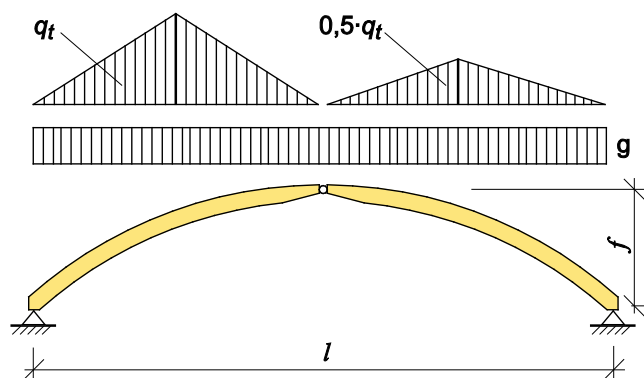
$$M \approx 0 \quad 11-9$$

Leikkausvoima tuella ($x=0$) on

$$V_{sp} = -\frac{(q_r + g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \sin \alpha_{spr} + \frac{(q_r + g) \cdot l}{2} \cdot \cos \alpha_{spr} \quad 11-10$$

Kaaren harjalla ei ole leikkausvoimaa.

Pysyvät kuormat + kolmiomaiset lumikuormat



KUVA 11-9

Kolminivelkaari jota kuormittaa pysyvät kuormat ja eurokoodi 1-3 mukaiset kolmiomaiset eri suuret lumikuormat kummallakin kaaren puoliskolla.

Kun kuormitus on kuvan 11-9 mukainen voidaan tukireaktiot ja sisäiset voimat laskea seuraavista yhtälöistä.

Pystysuora tukireaktio vasemmalla tuella on

$$R_l = \frac{7}{32} \cdot q_t \cdot l + \frac{1}{2} \cdot g \cdot l \quad 11-11$$

Pystysuora tukireaktio oikealla tuella on

$$R_r = \frac{5}{32} \cdot q_t \cdot l + \frac{1}{2} \cdot g \cdot l \quad 11-12$$

Vaakasuora tukireaktio on

$$H = \frac{3}{64} \frac{(q_t) \cdot l^2}{f} + \frac{(g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \quad 11-13$$

Suurin normaalivoima jännevälin neljännespisteessä on

$$N = \frac{l^2}{8 \cdot f} \cdot \left(g + \frac{3 \cdot q_t}{8} \right) \cdot \cos \alpha + \frac{l}{4} \cdot \left(g + \frac{3 \cdot q_t}{8} \right) \cdot \sin \alpha \quad 11-14$$

Taivutusmomentti jännevälin neljännespisteessä (y_0 yhtälössä 11-4) on

$$M = \frac{q_t \cdot l^2}{22,6} - \left(\frac{3}{64} \frac{(q_t) \cdot l^2}{f} + \frac{(g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \right) \cdot y_0 \quad 11-15$$

Leikkausvoima tuella ($x=0$) on

$$V_{spring} = -\frac{l^2}{8 \cdot f} \cdot \left(g + \frac{3 \cdot q_t}{8} \right) \cdot \sin \alpha_{spr} + \frac{l}{2} \cdot \left(g + \frac{5 \cdot q_t}{16} \right) \cdot \cos \alpha_{spr} \quad 11-16$$

Leikkausvoima kaaren harjalla on

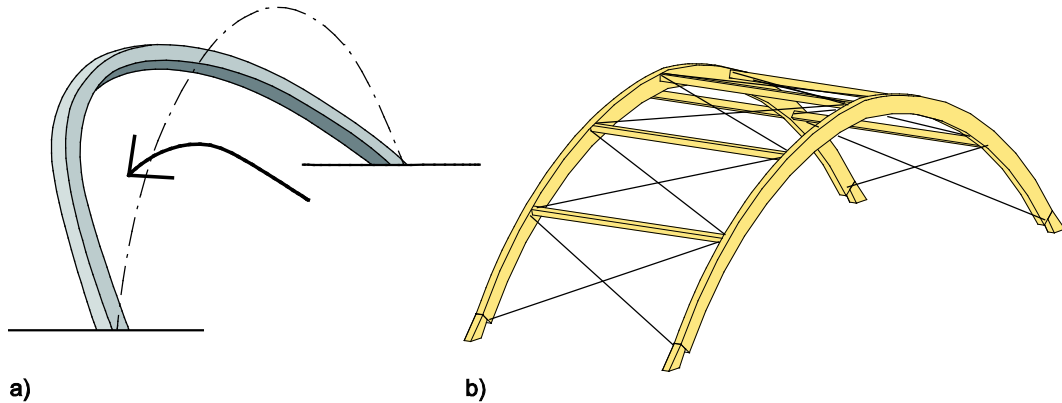
$$V_{ridge} = \frac{q_t \cdot l}{32} \quad 11-17$$

11.5 Nurjahtaminen

Kaaret ovat yleensä hoikkia rakenteita ja niiden mitoituksessa on vielä tärkeämpää kuin kehien mitoituksessa ottaa huomioon nurjahdusriski kaaren omassa tasossa ja kohtisuoraan sen tasoa vastaan.

Kaaren nurjahtaminen tasostaan

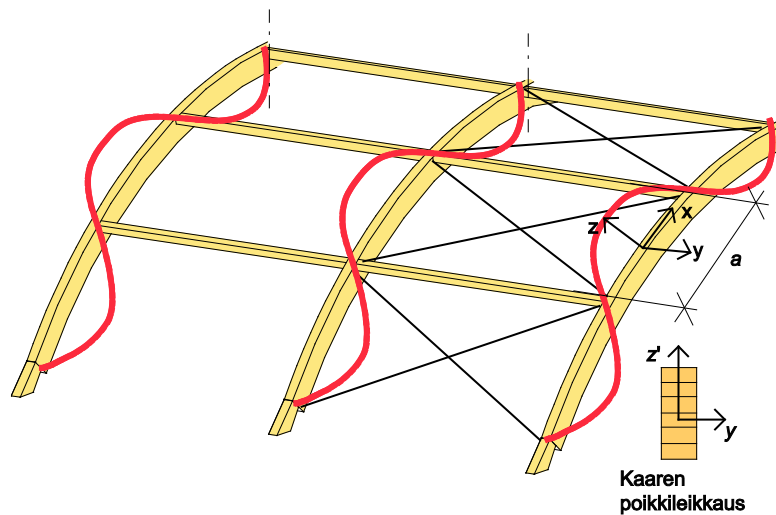
Pystysuora kaari pitää etenkin asennuksen aikana tukea siten, ettei se kaadu sivusuunnassa, katso kuva 11-10 (a). Tukeminen voidaan tehdä kahdella tavalla. Toinen tapa on kiinnittää kaari jäykästi kantoihinsa, mikä voi olla vaikeaa saada aikaan ja vaatii järeitä perustuksia erityisesti silloin kun kaaret ovat suuria. Toinen tavallisempi tapa on asentaa samanaikaisesti kaksi kaarta, jotka sidotaan toisiinsa väliaikaisesti tai pysyvästi, ja näin estetään rakenteen kaatuminen, katso kuva 11-10 (b).



KUVA 11-10

Kaaren asennusaikainen sivuttainen tukeminen. (a) Kaari voi kaatua sivusuunnassa. (b) Rakenteesta saadaan vakaa kun se jäykistetään muilla rakenteilla, kuten orsilla ja ristisiteillä.

Toinen kehien ja kaarien yhteinen ongelma on niiden nurjahtaminen tasostaan (kiepahtaminen). Koska puurakenteet voivat olla hyvinkin hoikkia niin sivuttainen nurjahtaminen voi tapahtua kuten kuvassa 11-11 on esitetty.



KUVA 11-11

Sivusuunnassa jäykistettyjen kaarten nurjahtaminen tasostaan; jäykistyskohtien välimatka on a .

Yksi tapa pienentää kaaren nurjahduserkkyyttä tasostaan on kasvattaa kaaren poikkileikkauksen leveyttä, jolloin kaaren jäykkyys sivusuuntaan kasvaa. Toinen tapa on pienentää orsiväliä tai käyttää niiden päällä jäykkää kattolevyä. Orret on kiinnitettävä kaariin huolellisesti sellaisin liitoksin, jotka pystyvät siirtämään tukivoimat. Tavallisissa kaarissa nurjahdus kaaren tasosta tarkistetaan tukipisteiden välillä kuten minkä tahansa puristetun ja taivutetun rakenteen nurjahtaminen. Tukipisteiden avulla voidaan helposti määritellä kaaren osien nurjahduspituudet.

Mitoitusehto on

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot k_r \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} \leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z'} \cdot f_{c,d}} + 0,7 \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_r \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \end{cases} \quad 11-18$$

$\sigma_{c,0,d}$	mitoitettava puristusjännitys
$\sigma_{m,y,d}$	mitoitettava taivutusjännitys y-akselin suhteen
$f_{c,d}$	puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{m,y,d}$	taivutuslujuuden mitoitusarvo y-akselin suhteen
$k_{c,z'}$	kerroin joka ottaa huomioon nurjahtamisen kaaren tasosta (siis z'- akselin suhteen, katso kuva 11-11)
k_{crit}	kerroin joka ottaa huomioon kiepahtamisen, katso jakso 4.1.3.
k_r	kerroin joka ottaa huomioon lujuuden pienenemisen lamellien taivuttamisen aiheuttamien jäännösjännitysten vuoksi, katso luku 7

Käytetyt merkinnät on selitetty yksityiskohtaisemmin luvussa 4. Jos kaari on jatkuvasti tuettu yläreunastaan esimerkiksi teräksisellä poimulevyllä, niin kaaren nurjahtamista pitää tarkastella vain sellaisissa kohdissa missä taivutusmomentti on negatiivinen (eli kaaren alareuna on puristettu). Tavanomaisille kaaren muodoille kerroin k_r ei yleensä ole pienempi kuin 1,0.

Kaaren nurjahtaminen tasossaan

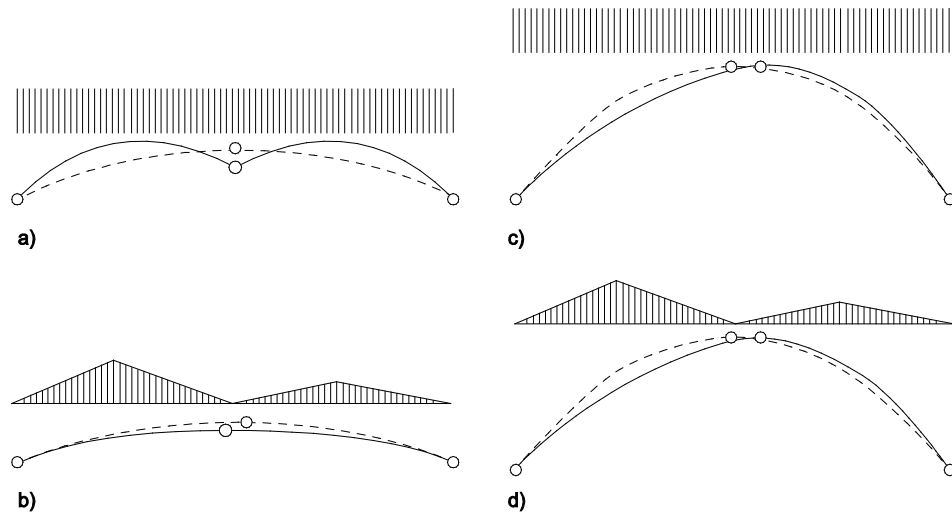
Kaaren nurjahtaminen tasossaan vaatii monimutkaisemman tarkastelun kuin tavalliset puristetut ja taivutetut rakenteet. Laskelmissa on yleensä kaksi vaihetta:

1. *lineaarinen nurjahdusanalyysi*
2. *toisen kertaluokan analyysi.*

Lineaarinen nurjahdusanalyysi

Lineaarista nurjahdusanalyysiä sovelletaan samoin kuin samanaikaisesti puristettuja ja taivutettuja rakenneosia analysoitaessa. Ulkoisten kuormien aiheuttamat jännitykset lasketaan lineaarisella kimmoteorialla tarkastelemalla alkuperäisessä muodossaan olevaa staattista mallia. Geometrisen epätäydellisyyden aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset kaaren tasossa otetaan huomioon siten, että puristus- ja taivutuslujuus kerrotaan nurjahduksen huomioonotavilla pienennyskerroinilla k_c ja k_{crit} .

Kaksinivelkaari nurjahtaa aina epäsymmetrisesti riippumatta siitä onko kuorma symmetrinen vai epäsymmetrinen, katso kuva 11-15 (b). Tämä tarkoittaa sitä että harja siirtyy sivusuunnassa kaaren tasossa ja taivutusmomentin merkki muuttuu kaaren harjalla. Laakea *kolminivelkaari* (siis nuolikorkeuden ja jännevälän suhde f/l on pienempi kuin 0,25...0,3) nurjahtaa symmetrisestä kuormasta symmetrisesti, katso kuva 11-12 (a).



KUVA 11-12

Kolminivelkaaren nurjautuminen tasossa.

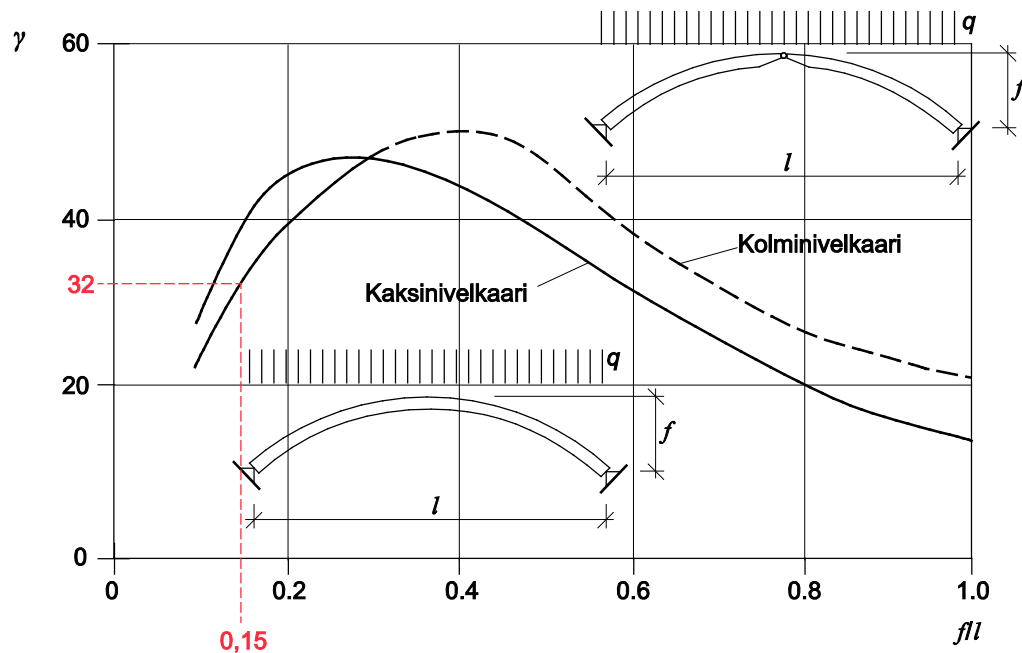
Nurjahduskuorman laskentaan yksinkertaistetulla analyysillä tarvitaan nurjahduspituus l_e . Se voidaan laskea joko numeerisella analyysillä käyttämällä elementtimenetelmään perustuvaa tietokoneohjelmaa tai kokemuspärisistä yhtälöistä.

Paraabelinmuotoisen, poikkileikkaukseltaan muuttumattoman kaksinivelkaaren tai kolminivelkaaren kriittinen kuorma on Timoshenko et al. (1963) mukaan

$$q_{cr} = \gamma \cdot \frac{E \cdot I}{l^3}$$

11-19

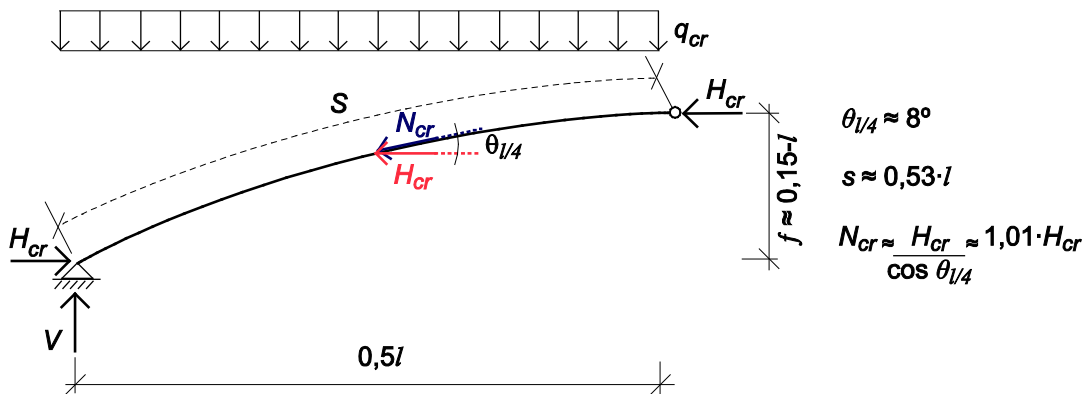
Numeerisesti määritetyn kertoimen γ arvo on suhteen f/l funktiona esitetty kuvassa 11-13.



KUVA 11-13

Kerroin γ suhteen f/l funktiona. (Katkoviivoin esitetty osuus käyrästä vastaa symmetristä nurjahdusta.)

Kuvassa 11-14 esitetään ympyränkaaren tai paraabelin muotoinen kolminivelkaari, jolla on muuttumaton poikkileikkaus ja jonka nuolikorkeuden suhde jänneväliin f/l on noin 0,14...0,15, kummankin kaaren puolikkaan pituus on s sekä kaltevuus neljännespisteessä $\theta_{l/4}$. Kaarta rasittaa tasainen kuorma. Eulerin nurjahdusteorian mukainen nurjahduskuorma N_{cr} neljännespisteessä on annettu kuvassa. Kuvan 11-14 geometriset suureet perustuvat kuvassa 11-5 annettuihin yhtälöihin.



KUVA 11-14

Kolminivelkaaren puolikkaassa vaikuttavat voimat. $\theta_{l/4}$ on kaaren painopisteviivan kaltevuus neljännespisteessä, s on kaaren puolikkaan pituus ja N_{cr} Eulerin nurjahdusteorian mukainen nurjahduskuorma neljännespisteessä.

Nurjahduskuorma kaaren neljännespisteessä on

$$N_{cr, l/4} \approx 1,04 \cdot \frac{q_{cr} \cdot l^2}{8 \cdot f} = 1,04 \cdot \gamma \cdot \frac{E \cdot I}{8 \cdot f \cdot l} \quad 11-20$$

Kun tätä verrataan Eulerin teorian mukaiseen suoran pilarin nurjahduskuormaan, pilarin pituus $s (=0,53 \cdot l)$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{(\beta \cdot s)^2} \quad 11-21$$

ja kun luetaan kuvasta 11-13 kertoimen $\gamma \approx 32$ arvo kun f/l on 0,15, saadaan nurjahduspituuden kertoimeksi β

$$\beta \approx 1,17. \quad 11-22$$

Käytännön mitoituksessa oletetaan usein nurjahduspituudelle l_e suurempi arvo tarkasteltaessa kaarien nurjahdusta tasossaan

$$l_e = \beta \cdot s = 1,25 \cdot s \quad 11-23$$

On ilmeistä että nurjahduspituus on kuvan 11-4 mukaisissa epäsymmetrisissä kuormitustapauksissa erilainen kuin symmetrisessä kuormitustapauksessa. Alustavassa mitoituksessa voidaan kuitenkin käyttää nurjahduspituutta $l_e = 1,25 \cdot s$ myös epäsymmetrisessä tapauksessa, mikä useimmiten on varmallla puolella.

Yhtälön 11-24 mukainen mitoitusehto ottaa huomioon samanaikaisesti vaikuttavan taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_r \cdot f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,d}} \leq 1 \quad 11-24$$

$k_{c,y}$ kehän tasossa tapahtuvan nurjahduksen huomioonottava kerroin (nurjahdus siis y-akselin suhteen, katso kuva 11-11)

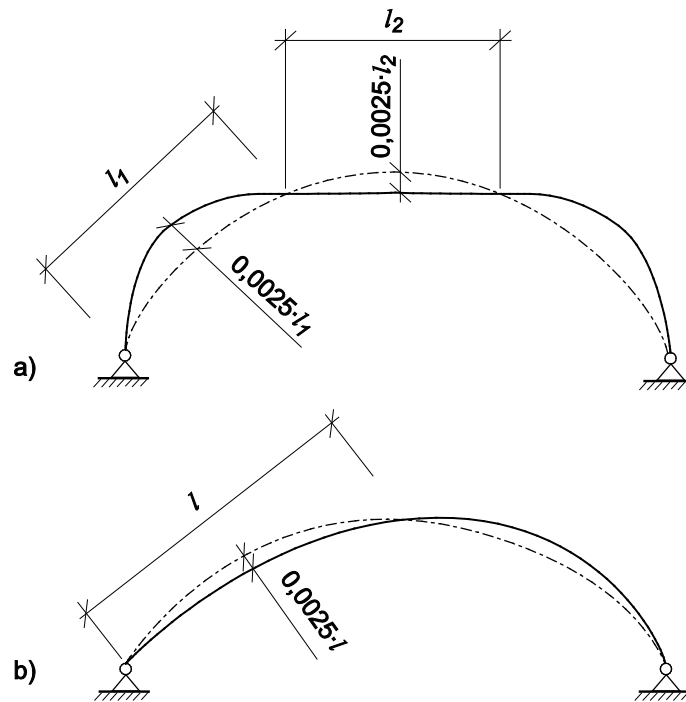
Muut merkinnät kuten yhtälössä 11-18 ja luvussa 4.

Toisen kertaluokan analyysi

Kun sovelletaan toisen kertaluokan analyysiä lasketaan jännitykset geometrisesti epälineaari-teorian mukaisesti ja tasapainoa tarkastellaan muotonsa muuttaneen staattisen mallin mukaan.

Toisen kertaluokan analyysissä rakenteen kuormia lisätään portaittain. Ennen uutta kuorman lisäystä lasketaan edellisen kuormitustilanteen mukainen muoto. Kuormaa lisätään kohtiin jotka päätetään sen jälkeen kun edellisen kuorman lisäyksen vaikutus muodonmuutokseen on laskettu. Tällä tavoin otetaan huomioon kaikkien muodonmuutosten vaikutus sisäisiin voimiin, myös vaakasuorassa suunnassa tapahtuvan muodonmuutoksen. Tällainen analyysi tehdään yleensä erityisten elementtimenetelmään perustuvien tietokoneohjelmien avulla.

Jos mallintamisessa otetaan huomioon myös rakenteen geometrian poikkeaminen aiotusta muodosta, voidaan toisen kertaluokan analyysin tuloksena saatuja sisäisiä voimia käyttää sellaisenaan mitoituksessa eikä lujuutta tarvitse pienentää nurjahduksen vuoksi (siis $k_{c,y}=1,0$). Muodon poikkeaman alkuarvon oletetaan vaikuttavan yhdessä kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen kanssa ja sen muodoksi oletetaan kuvan 11-15 (a) ja (b) mukainen muoto. Eurokoodi 5:n luvussa 5.4.4 annetaan suosituksia käytettävälle kaarien muodon poikkeamalle aiotusta muodosta. Nämä muodonmuutostavat vastaavat hyvin kaksinivelkaaren toista ja ensimmäistä nurjahdustapaa. Kuvan 11-15 (a) muotoa käytetään symmetriselle ja kuvan 11-15 (b) muotoa epäsymmetriselle kuormitukselle.



KUVA 11-15

Eurokoodi 5:n mukaiset poikkeamat aiotusta muodosta (a) kaksinivelkaaren toista nurjahdustapaa vastaava symmetrinen muodon poikkeama (b) ensimmäistä nurjahdustapaa vastaava epäsymmetrinen (sivusiirtynyt) muodon poikkeama.

Yksinkertaistettu toisen kertaluokan analyysi ja taivutusmomentin laskeminen

Kun kaaren muodon poikkeama aiotusta vastaa ensimmäisiä nurjahdustapoja voidaan likimääräistä yhtälöä 11-25 käyttää sen arvioimiseksi, kuinka muodon poikkeaman alkuarvo δ_0 kasvaa toisen kertaluokan vaikutusten vuoksi (katso luku 4 yhtälö 4-19).

$$\delta_{tot} = \delta_0 + \delta_p = \frac{\delta_0}{1 - H/H_{cr}} \quad 11-25$$

H määrävän kuormitusyhdistelmän aiheuttama kaaren vaakavoima
 H_{cr} tarkasteltavan nurjahdustavan nurjahduskuorma

Taivutusmomentti M_0 kasvaa lineaarisen teorian mukaan samassa suhteessa

$$M'' = \frac{M_0}{1 - H/H_{cr}} \quad 11-26$$

missä M'' on toisen kertaluokan mukainen taivutusmomentti. Yhtälö 11-26 antaa parhaan tuloksen kun taivutusmomenttipinnan alkuperäinen muoto vastaa kaaren nurjahtaneen muodon momenttipinnan muotoa.

11.6 Leikkausjännitykset ja syitä vastaan kohtisuorat vetojännitykset

Samanaikaisesti vaikuttavien leikkausjännitysten ja syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten mitoitusyhtälö on

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad 11-27$$

τ_d	mitoitettava leikkausjännitys
$\sigma_{t,90,d}$	mitoitettava syitä vastaan kohtisuora vetojännitys
$f_{t,90,d}$	syitä vastaan kohtisuora vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{v,d}$	leikkauslujuuden mitoitusarvo
k_{dis}, k_{vol}	luvussa 7 selitetyjä kertoimia

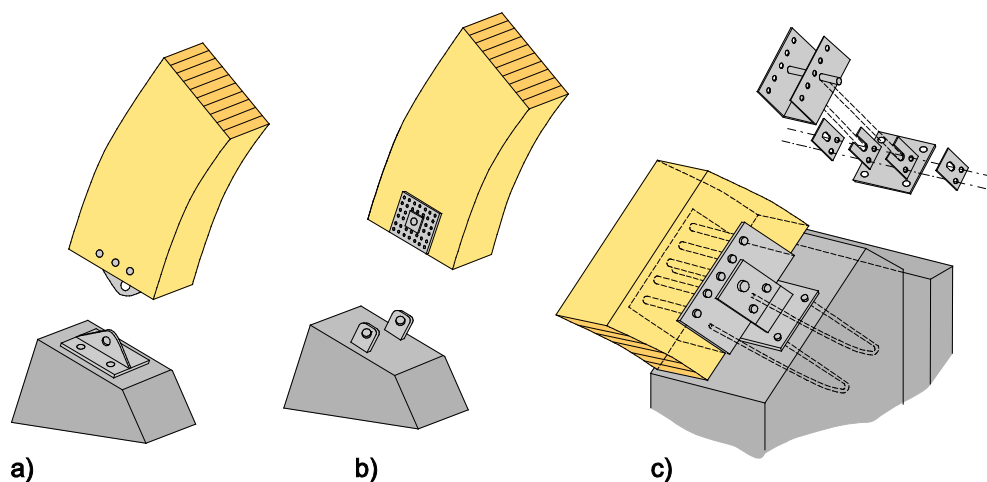
Tietyissä kuormitustilanteissa suureen osaan kaaresta kohdistuu positiivinen taivutusmomentti, joka aiheuttaa vetojännityksiä kohtisuoraan syitä vastaan. Nämä jännitykset ovat kuitenkin verrattain pieniä suurimmassa osassa kaarta. Siksi suositellaan australialaisen standardin AS 1720.1—1997 mukaisesti, että vain se osa liimapuukaaresta otetaan huomioon kertoimen k_{vol} laskennassa, missä syitä vastaan kohtisuoran vetojännityksen arvo ylittää 80 % jännityksen suurimmasta arvosta.

11.7 Yksityiskohtien muotoilu

Nivelellinen kaaren kanta

Kaaren ja perustuksen välinen liitos tehdään nivelenä. Liitostyyppi siirtää yleensä niin vähän taivutusmomenttia että sitä ei tarvitse ottaa huomioon kehän mitoituksessa, vaikkakin sillä on merkitystä itse liitoksen ja sen ankkuroinnin mitoittamisessa.

Liitoksen pitää sallia kiertyminen jäykemmän akselin ympäri ja siirtää sekä vaakasuoria että pystysuoria kuormia, katso kuva 11-16. On aina suositeltavaa eristää puuosa betonista vesieristeellä, myös käyttöluokissa 1 ja 2, ettei kosteutta pääse tunkeutumaan päätypuuhun.

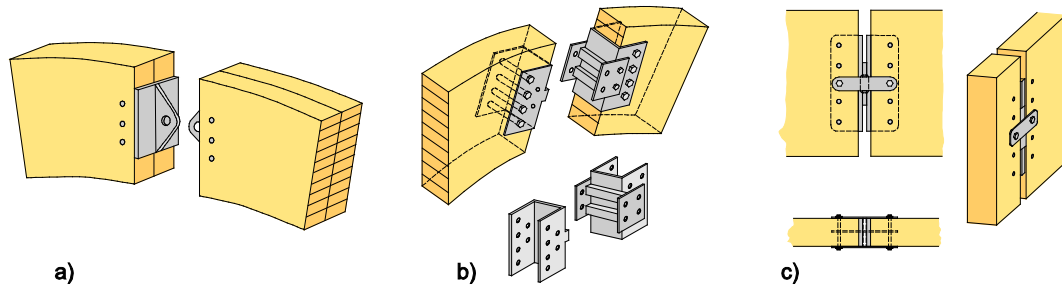


KUVA 11-16

Kaarien liitoksia perustuksiin (a) niveltappiliitos jossa on myös ankkurilevy (b) teräskiinnikkeet ja niveltappi (c) U-teräksen ja sivutukien läpi kulkeva niveltappi.

Harjan niveljatkos

Harjan niveljatkokset siirtävät vaaka- ja pystysuoria voimia. Taivutusmomenttia siirtyy niin vähän että sitä ei oteta huomioon mitoituksessa. Liitos ei saa estää kaaren osien kulmanmuutoksia, muuten voi syntyä lisäjännityksiä jotka voivat aiheuttaa rakenteelle ennalta arvaamattomia vaurioita. Liitos tehdään samaan tapaan kuin luvussa 9 esitelty kolminivelkannattajan harjaliitos. Kuvassa 11-17 esitetään lisää harjaliitoksen tekotapoja.



KUVA 11-17

Nivelellinen harjaliitos (a) vastalevyllinen tappivaarnaliitos ja niveltappi (b) vastalevy, keinunivel ja sivutuet (c) vastalevyllinen tappivaarnaliitos, keinunivel ja sivutuet.

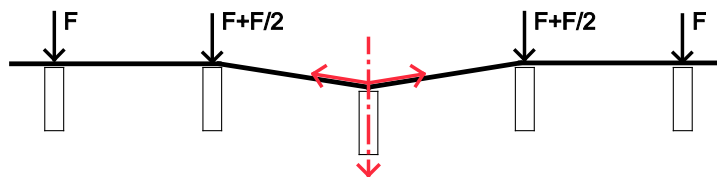
12	ORRET	2
12.1	Limitetyt orret	3
12.2	Gerber-nivelelliset orret	5
12.3	Vinot orret	6

12 ORRET

Liimapuiset orret ovat tavallisesti suoria palkkeja joilla on vakiopoikkileikkaus. Ne voivat olla pääpalkkien välissä sijaitsevia vapaasti tuettuja (kaksitukisia) palkkeja, tai levätä useamman pääkannattajan päällä. Pääkannattajien päällä olevat orret voivat puolestaan olla jatkamattomia palkkeja, jotka ulottuvat useamman jänteen yli, tai momenttijäykin jatkoksina jatkettuja, jolloin kaksi palkkia on tuella limittäin. Myös Gerber-nivelin jatkettuja palkkeja käytetään.

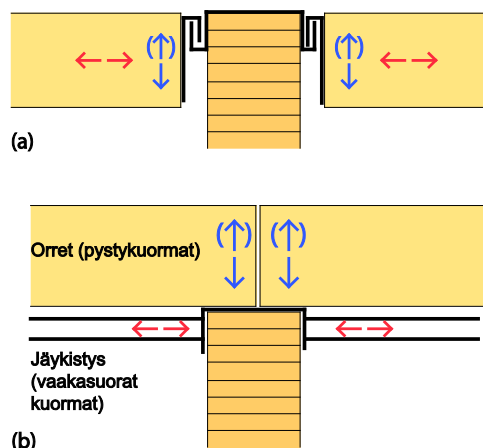
Jatkuvat orsirakenteet ja Gerber-niveelliset palkit ovat edullisia, koska ne tarvitsevat pienemmän poikkileikkauksen kuin vapaasti tuetut palkit. Vapaasti tuetuin palkein toteutettu rakenne on kuitenkin turvallisempi, sillä jatkuvan sortuman vaara on pienempi. Jos pääkannattaja murtuu, siirtävät jatkuvat orret kuorman murtuneelta palkilta viereisille palkeille (kuva 12-1). Murtumisen syy ei kuitenkaan yleensä ole paikallinen vika, kuten huonolaatuinen materiaali tai laho, vaan koko rakennetta koskeva suunnittelussa tai rakentamisessa tapahtunut virhe. Sen vuoksi viereiset pääkannattajat eivät tavallisesti pysty kantamaan yksittäisen pääkannattajan murtumisesta aiheutuvaa lisäkuormaa, vaan seurauksena on jatkuva sortuma. Yksinkertaiset palkit eivät jaa kuormaa uudelleen ja sen vuoksi niiden käyttäminen voi estää jatkuvan sortuman.

Orsilla on usein useampia tehtäviä – ne siirtävät pystykuormia pääkannattajille, tukevat niitä kiepahtamista vastaan ja siirtävät tuulikuormia. Turvallisuussyistä näin ei pitäisi olla, vaan orsien pitäisi siirtää joko pystykuormia tai vaakasuoria kuormia. Myös orsien liitokset pääpalkkeihin pitää suunnitella siten, että ne siirtävät joko pystykuormia tai vaakasuoria kuormia. Liitokset pitää myös suunnitella siten, että yksittäinen orsi voidaan vaihtaa jos se sattuisi vahingoittumaan (kuva 12-2).



KUVA 12-1

Rakenne missä orret jakavat kuorman viereisille palkeille kun yksi vaurioituu. Tällaista rakennetta on vältettävä. [Dietsch 2011]



KUVA 12-2

(a) Liitos joka siirtää sekä pystysuoria että vaakasuoria kuormia mahdollistaa vaurioituneen orren vaihdon. (b) Erilliset rakenteet pystysuorien ja vaakasuorien kuormien siirtämiseen mahdollistavat vaurioituneen orren vaihdon.

12.2 Limitetyt orret

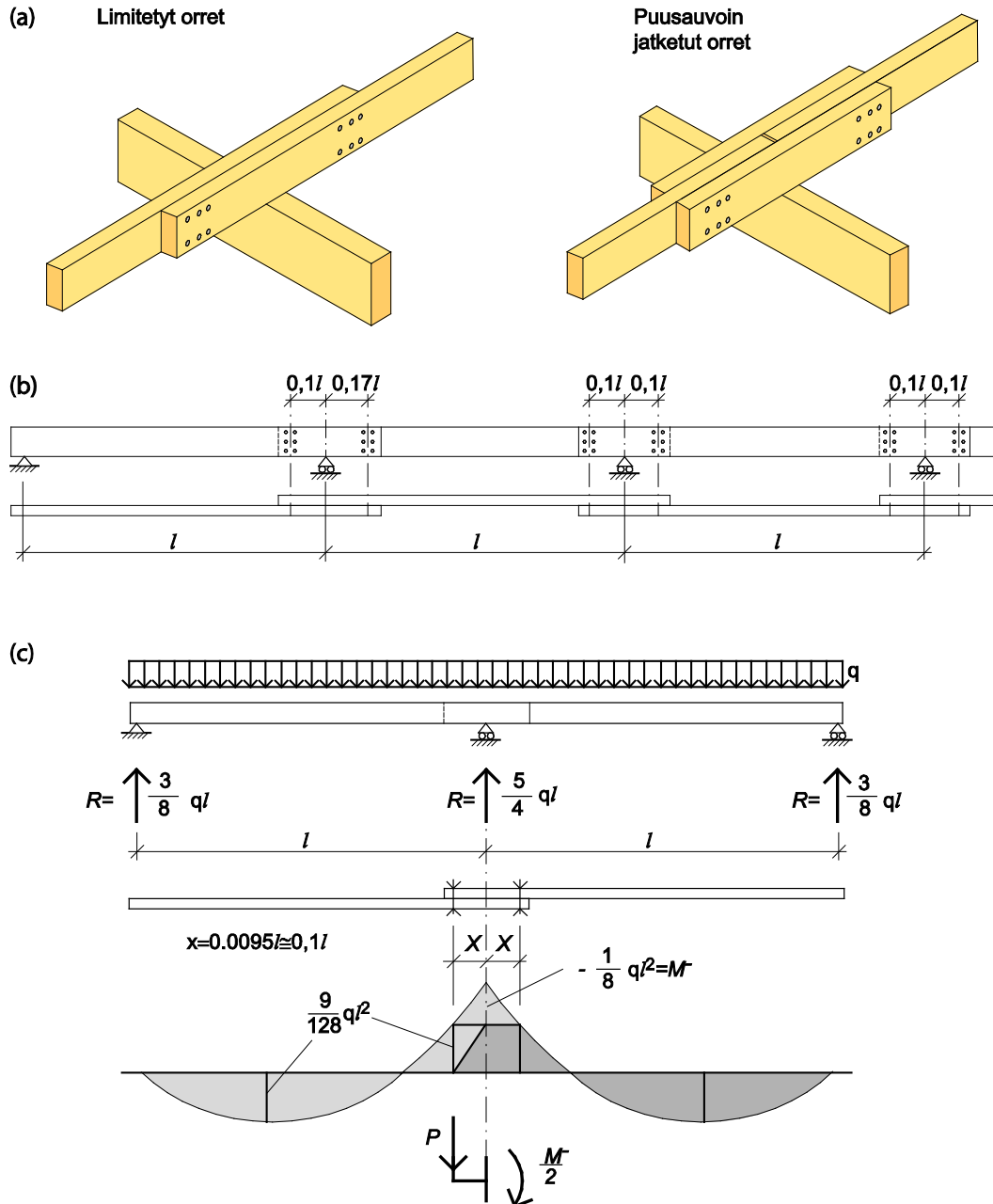
Limitettyjen orsien kestävyys kaksinkertaistuu tuella, missä taivutusmomentti on suurin (kuva 12-3 a). Tämä pienentää katon taipumia samaan tapaan kuin viisteet. Limityksen pitää olla kuvan 12-3 c) mukaisesti niin pitkä, että tukimomentti puolittuu, jolloin aukkomomentti on mitoittava. Taivutusmomentti, tukireaktiot ja suurin taipuma lasketaan kuten sellaiselle jatkuvalle palkille, jonka hitausmomentti on vakio. Myös taulukoituja arvoja voidaan käyttää. Vaikka jäykkyyden vaihtelu vaikuttaisi taivutusmomentin jakautumaan suotuisasti, niin liitoksissa tapahtuvat siirtymät vaikuttavat päinvastaiseen suuntaan. Jos rakenteessa on ainakin kaksi samanlaista aukkoa, ja orsien limitys on kuvan 12-3 b mukainen, voidaan käyttää taulukossa 12-1 annettuja arvoja mitoittavalle taivutusmomentille M_d , liitosvoimille F_d , tarvittavalle limitykselle x ja suurimmalle taipumalle w . Jotta voidaan käyttää vain yhtä orsikokoa, käytetään reunimmaisissa aukoissa yleensä kaksinkertaisia orsia suuremman aukkomomentin vuoksi.

TAULUKKO 12-1

Kuvan 12-3 mukaisten limitettyjen orsien taivutusmomentin ja liitosvoimien mitoittavat arvot, tarvittava limitys ja suurin taipuma. q_d on tasaisen kuorman mitoitusarvo ja l on aukon pituus. Vertaa kuvassa 12-3 c annettuihin kaksiaukkoisten orsien arvoihin.

	2 aukkoa	3 tai useampi aukko	
		Reunimmainen aukko	Keskellä olevat aukot
Mitoittava taivutusmomentti M_d	$0,07 \cdot q_d \cdot l^2 = \frac{9 \cdot q \cdot l^2}{128}$	$0,08 \cdot q_d \cdot l^2$	$0,046 \cdot q_d \cdot l^2$
Mitoittava liitosvoima F_d	$0,0625 \cdot q_d \cdot l = \frac{5}{8} q \cdot l$	$0,42 \cdot q_d \cdot l$	$0,42 \cdot q_d \cdot l$
Tarvittava limitys x	$0,1 l$	$0,1 l^*$	$0,1 l^*$
Suurin taipuma w	$\frac{0,54 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$	$\frac{0,69 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$	$\frac{0,32 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$

* Ensimmäisen välituen keskialueella (toisessa aukossa) käytetään limitystä $0,17 l$



KUVA 12-3

Orsien limittäminen (a) limityksen tekotapoja (b) jatkuvat limitetyt orret (c) kaksiaukkoisten orsien limityksen tarvittava pituus.

Mitoitettaessa vähintään kahden aukon yli ulottuvia jatkamattomia orsia on otettava huomioon, että pääkannattajat muodostavat painuvia tukia. Taulukossa 12-1 annettua tukimomenttia voidaan sen vuoksi pienentää 10 %. Myös välitukien tukireaktiota voidaan pienentää. Tällaisia orsia tukevat pääkannattajat voidaan siten mitoittaa kuormalle $1,1q_d l$ (eikä kuormalle $1,25 q_d l$).

12.3 Gerber-nivelelliset orret

Gerber-nivelellinen rakenne suunnitellaan siten, että aukkomomentit ja tukimomentit ovat suunnilleen yhtä suuria. Jatkuvan sortumariskin pienentämiseksi rakenne pitää suunnitella siten, että joka toisessa aukossa ei ole niveliä.

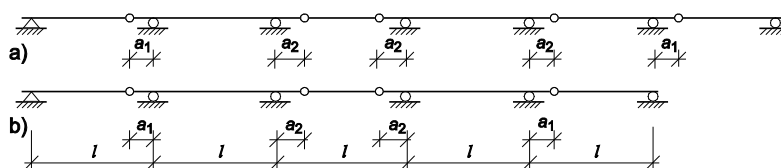
Kun orret ylittävät vähintään neljä kenttää ja nivelet sijoitetaan kuten kuvan 12-4 vaihtoehtoisissa 1 tai 2, ovat taivutusmomentit, leikkausvoimat, liitosvoimat, nivelten sijoittelu ja taipumat taulukon 12-2 mukaiset. Usein on käytännöllistä valita orsien korkeus samaksi sekä reunimmaisessa kentässä että keskikentässä ja käyttää tarvittaessa reunimmaisessa kentässä leveämpiä orsia, jos kestävyys ei muuten ole riittävä.

TAULUKKO 12-2

Gerber-nivelellisen rakenteen taivutusmomentit, leikkausvoimat, liitosvoimat, nivelten sijoittelu ja taipumat; katso myös kuva 12-4. q_d on tasaisen kuorman mitoitusarvo ja l on jänneväli.

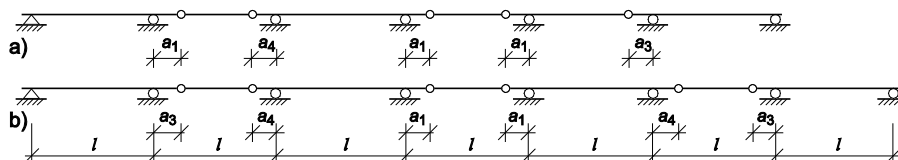
	Vähintään neljä kenttää Nivel reunimmaisessa kentässä Kuvan 12-4 vaihtoehto 1		Vähintään neljä kenttää Ei niveltä reunimmaisessa kentässä Kuvan 12-4 vaihtoehto 2	
	Reunimmainen kenttä	Keskikenttä	Reunimmainen kenttä	Keskikenttä
Mitoittava taivutusmomentti M_d	$0,096 \cdot q_d \cdot l^2$	$0,063 \cdot q_d \cdot l^2$	$0,086 \cdot q_d \cdot l^2$	$0,063 \cdot q_d \cdot l^2$
Mitoittava leikkausvoima V_d	$0,44 \cdot q_d \cdot l$	$0,56 \cdot q_d \cdot l$	$0,59 \cdot q_d \cdot l$	$0,56 \cdot q_d \cdot l$
Mitoittava liitosvoima F_d	$0,44 \cdot q_d \cdot l$	$0,35 \cdot q_d \cdot l$	-	$0,35 \cdot q_d \cdot l$
Nivelten sijainti, mitta a	$0,125 \cdot l$	$0,146 \cdot l$	Kuten kuvassa 12-4	Kuten kuvassa 12-4
Taipuma w	$\frac{0,72 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$	$\frac{0,52 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$	$\frac{0,77 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$	$\frac{0,52 \cdot q_d \cdot l^4}{100EI}$

(A)



$$a_1=0,125l \quad a_2=0,146l$$

(B)



$$a_1=0,146l \quad a_2=0,204l \quad a_3=0,157l$$

KUVA 12-4

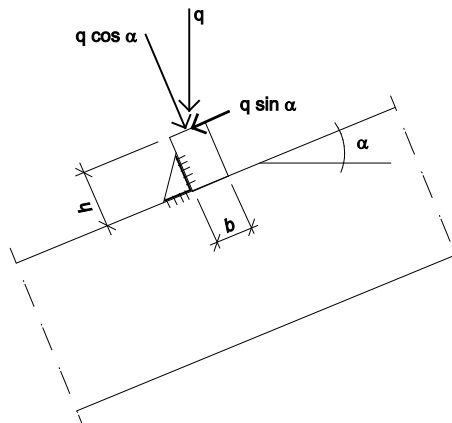
Erilaisia Gerber-nivelellisiä rakenteita. (A) nivel reunimmaisessa kentässä (a) kenttien lukumäärä parillinen (b) kenttien lukumäärä pariton (B) ei niveltä reunimmaisessa kentässä (a) kenttien lukumäärä parillinen (b) kenttien lukumäärä pariton.

12.4 Vinot orret

Orsien kaltevuus pitää ottaa huomioon katon ollessa kaltevampi kuin 1:10. Pystysuorat kuormat, kuten lumikuorma ja oma paino, jaetaan kuvan 12-5 mukaisesti kattoon vastaan kohtisuoraksi ($q \cdot \cos \alpha$) ja katon suuntaiseksi komponentiksi ($q \cdot \sin \alpha$).

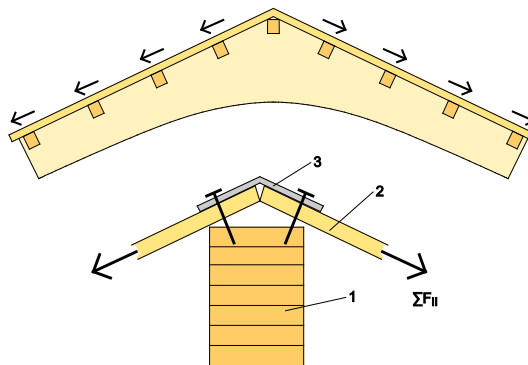
Jos kattolevyt ovat riittävästi kiinnitetyt toisiinsa ja kattolevyn jäykkyys on riittävä siirtämään katon suuntaisen komponentin ($q \cdot \sin \alpha$) levyvaikutuksen avulla, niin orret voidaan mitoittaa vain kattoon vastaan kohtisuoralle komponentille (katso kuva 12-6). Edellytyksenä on että molemmat katon puoliskot ovat harjalla riittävästi toisiinsa kiinnitetyt, jolloin kattolevyt voivat siirtää katon suuntaisen voimakomponentin levyvaikutuksella. Kurkihirsi pitää mitoittaa sille tulevalle pystysuoralle voimakomponentille. Jos katto on kaltevampi kuin 1:10 tai jos levyvaikutusta ei voida hyödyntää, pitää orret mitoittaa vinolle taivutukselle luvun 4 yhtälöä 4-4 käyttäen. Epäselvissä tapauksissa voi olla tarpeen lyhentää heikomman suunnan jänneväliä siten, että orret ripustetaan kuvan 12-7 mukaisesti harjalta. Kattotuolit pitää siinä tapauksessa mitoittaa ripustuksesta aiheutuvalle lisäkuormalle. Orsien ja kattopalkkien välinen liitos voidaan tehdä esimerkiksi kulmakiinnikkein tai erilaisin ruuvein. Nämä liitokset pitää mitoittaa katon suuntaiselle voimalle ($q \cdot \sin \alpha$) ettei orsi liu'u kattopalkin päällä. Jos orret sijoitetaan kattopalkkien väliin palkkikengällä, niin liitos pitää mitoittaa koko voimalle (sekä katon suuntaiselle että kattoon vastaan kohtisuoralle komponentille).

Jos orsia käytetään pääpalkkien jäykistämiseen tai tuulijäykistykseen veto- tai puristusvoimien siirtämiseen, ne pitää mitoittaa samanaikaisesti vaikuttaville puristukselle ja taivutukselle kuten luvussa 4.2 on esitetty. Liitokset ja liittimet pitää myös mitoittaa näille voimille, katso luku 14.



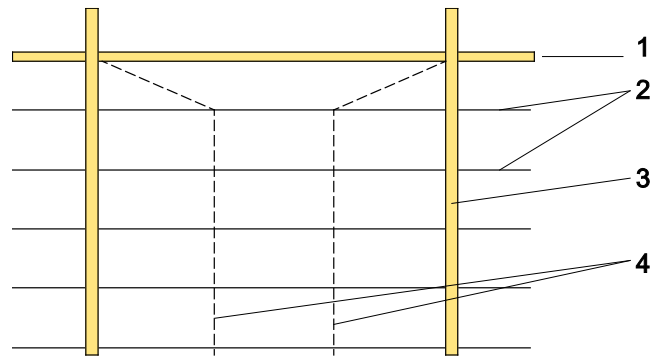
KUVA 12-5

Orren pystysuoran voiman jakaminen komponentteihin.



KUVA 12-6

Kalteva katto, orret ja kattolevy. 1) Kurkihirsi, 2) kattolevy, 3) naulauslevy.



KUVA 12-7.

Jyrkillä katoilla voidaan orret kiinnittää kurkihirteen. (1) kurkihirs; (2) orret; (3) kattopalkit; (4) ripustusteräs.

13	RAKENTEIDEN JÄYKISTÄMINEN	2
13.1	Yleistä	2
13.2	Koko rakenteen jäykistäminen	3
13.3	Suurien puurakenteiden jäykistäminen	4
	Vaakasuurien kuormien siirtäminen	6
	Sivuttaisen muodonmuutoksen rajoittaminen	9
	Nurjahtavan rakenteen kestävyuden parantaminen	10
	Seinien jäykistäminen	12
	Katon jäykistäminen	16
	Kehien ja kaarien jäykistäminen	24
13.4	Jäykistyksen kestävyys ja jäykkyys	25
	Pilareiden jäykistäminen	25
	Palkkien jäykistäminen	27
13.5	Eriyistapauksia	30
	Rakenteet joiden jäykistämätön reuna on puristettu	30
	Geometrian muutosten aiheuttamat voimat	33

13 RAKENTEIDEN JÄYKISTÄMINEN

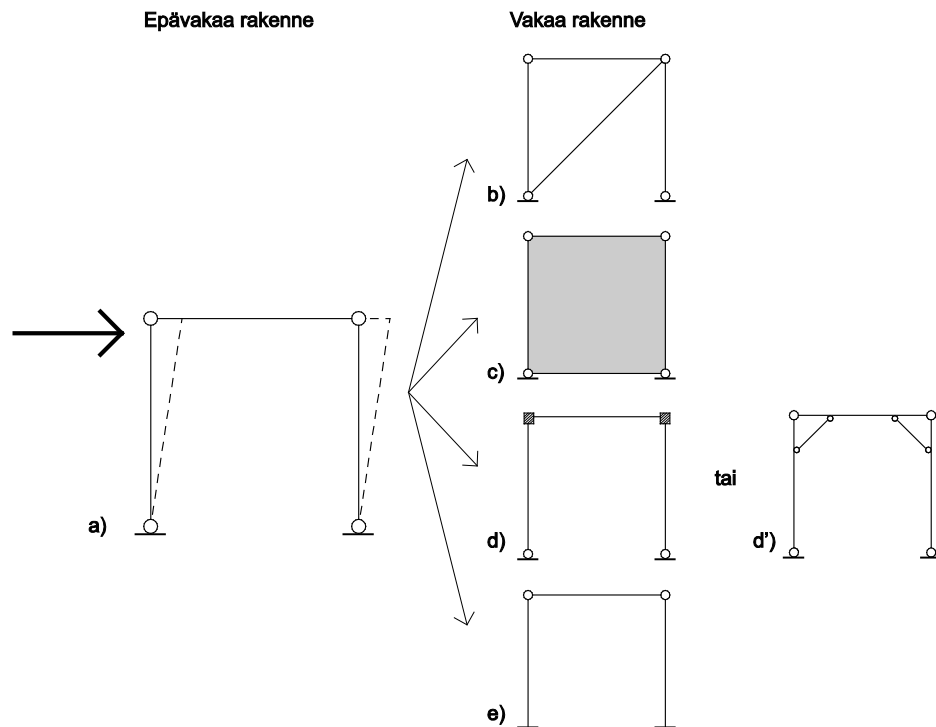
Rakenteiden jäykistäminen kaatavia voimia vastaan on rakennesuunnittelun tärkeimpiä osatehtäviä. Rakennuksen perustustason suuntaisia vaakavoimia esiintyy kaikissa suunnissa. Ne aiheutuvat tuulikuormista, maanjäristyksen vaikutuksista tai trukkien törmäyskuormista. Jos pilarit tukevat nosturipalkkeja tai muiden liikkuvien koneiden ratoja, niin vaakavoimia syntyy koneiden lähtiessä liikkeelle, jarruttaessa ja pysähtyessä. Lisäksi vaakavoimia aiheutuu painovoiman vaikutuksesta, kun pilareilla ja palkeilla on aina alkupäkeskeisyyttä.

Kaikkien rakenteiden muoto muuttuu, kun niihin kohdistuu vaakavoimia. Vakaan rakenteen muodonmuutokset ovat yleensä pieniä, sillä niissä syntyy vaakavoimien vaikutuksesta sisäisiä voimia, jotka pyrkivät palauttamaan rakenteen muodon alkuperäiseksi voiman vaikutuksen lakkautta, katso esimerkiksi kuva 13-1 (b)-(e). Tällaisia palauttavia voimia ei synny epävakaassa rakenteessa, vaan vaakavoimien aiheuttamat muodonmuutokset ovat suuria ja ne kasvavat koko vaakavoiman vaikutusajan, katso esimerkiksi kuva 13-1 (a).

Rakennesuunnittelijan velvollisuutena on varmistaa suunnitteleman rakenteen vakaus.

13.1 Yleistä

Yleisen, itsestään pystyssä pysyvän rakenteen eri jäykistämistavat on esitetty kuvassa 13-1.



KUVA 13-1

Pilari-palkkirakenteen jäykistäminen (a) epävaka rakenne (b) diagonaalijäykistys (c) levyjäykistys (d, d') pilarin ja palkin väliset momenttijäykät liitokset (e) pilarin ja perustuksen väliset momenttijäykät liitokset.

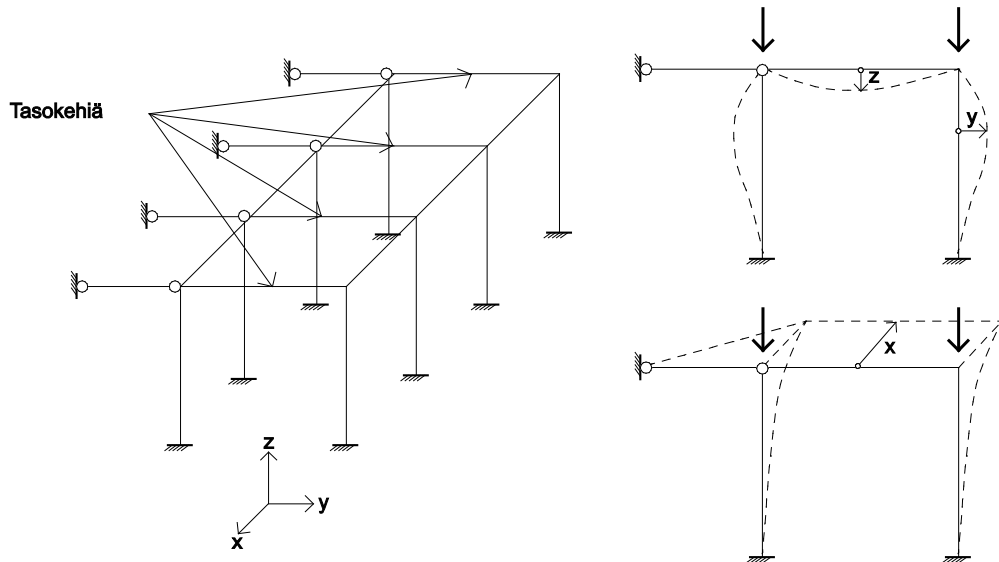
Rakenteeseen voidaan lisätä kuvan 13-1 (b) mukaiset diagonaalit. Tällä tavoin sen muoto ei voi muuttua suunnikkaaksi kuvan 13-1 (a) esittämällä tavalla, elleivät diagonaalit pitene enemmän kuin mitä ne oikein mitoitettuina tekevät. Toinen tapa jäykistää rakenne on käyttää kuvan 13-1 (c) mukaisesti levyjä, eli muodonmuutoksen estäviä jäykkiä taseorakenteita. Kolmas tapa on estää rakenneosien välinen kulmanmuutos jäykällä kiinnityksellä pilarin ja palkin liittymäkohdas-

sa, kuva 13-1 (d) ja (d'), pilarin ja perustuksen liittymässä, kuva 13-1 (e), tai molemmissa kohdissa.

Näistä perustapauksista on luonnollisesti erilaisia muunnelmia. Kuitenkin useimmat yksittäisistä osista kootut rakenteet on jäykistetty vain yhdellä näistä tavoista. Samanaikaisesti voidaan käyttää useampiakin, esimerkiksi momenttijäykkiä liitoksia ja diagonaaleja, mutta tämä tehdään yleensä vain jos rakenteen jäykkyyttä pitää parantaa.

13.2 Koko rakenteen jäykistäminen

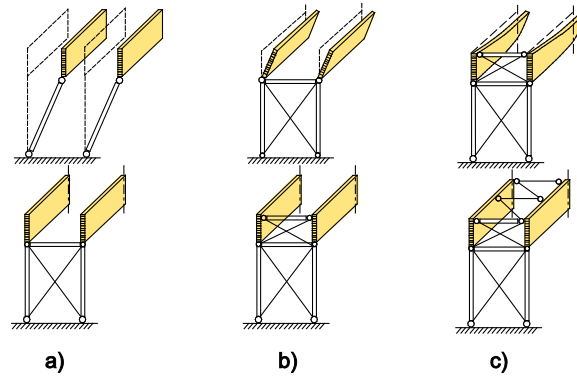
Suunnittelijan pitää hahmottaa rakenne kolmiulotteisesti voidakseen arvioida sen osien nurjahdamistavat ja suunnitella koko rakenteen jäykistykseen. Tämä koskee myös niitä tapauksia, missä rakenne muodostuu pienemmistä osakokonaisuuksista, joista jokainen on omassa tasossaan. Tarkastellaan esimerkiksi kuvan 13-2 (a) mukaista sarjaa samanlaisia kehä. Kuormien aiheuttamien jännitysten arvioimiseksi tarkastellaan kutakin kehää omassa tasossaan. Rakenteen stabiileetti pitää kuitenkin arvioida yhtenä kokonaisuutena myös toisessa suunnassa kuvan 13-2 (c) mukaisesti eikä vain yksittäisen tasossaan olevan kehän osalta yhdessä suunnassa kuvan 13-2 (b) mukaisesti).



KUVA 13-2

Rakenteen nurjahtaminen (a) kolmiulotteinen rakennemalli (b) nurjahdus tasossa (c) nurjahdus tasosta.

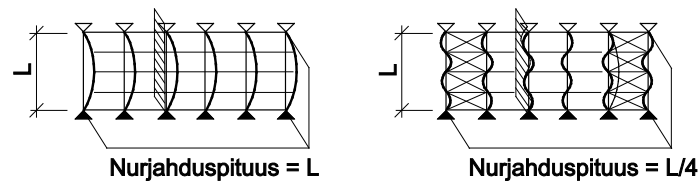
Rakenteiden pitää kyetä siirtämään kaikki kuormat katon tasosta alkaen perustuksiin asti. Kuva 13-3 havainnollistaa tätä. Jos rakenteen kenttä pitää jäykistää vaakavoimia vastaan, niin ensimmäiseksi on estettävä pilareiden sivuttainen liike. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi kuvan 13-3(a) mukaisesti diagonaalein. Pilarit on tällä tavalla tosin jäykistetty, mutta katolta tulevia kuormia ei vielä saada vietyksi perustuksille. Sitä varten palkkien tuille pitää lisätä erillinen jäykiste, joka mahdollistaa katon vaakavoimien viemisen alla oleville rakenteille, esimerkiksi kuvan 13-3(b) mukainen rakenne. Rakenne voi nyt vaikuttaa stabiililta, mutta palkit ovat edelleen alttiita kiepahdukselle, mikä voidaan estää esimerkiksi katon tasossa olevalla ristikolla, missä palkit toimivat kuvan 13-3(c) mukaisesti veto- ja puristuspaarteina.


KUVA 13-3

Rakenteen kentän jäykistäminen.

Jäykisteitä tarvitaan myös:

- pitämään poikittaiset palkit (orret tai erilliset jäykistyssauvat) paikoillaan jotta ne voivat tukea palkkien puristuspuolta sivusuunnassa ja
- estämään koko katon sivusuuntainen nurjahtamisen, katso kuva 13-4.


KUVA 13-4

Kattorakenteen palkkien nurjahduspituus (a) jäykistämätön kattorakenne (b) kattorakenne missä on käytetty terästankoja diagonaaleina.

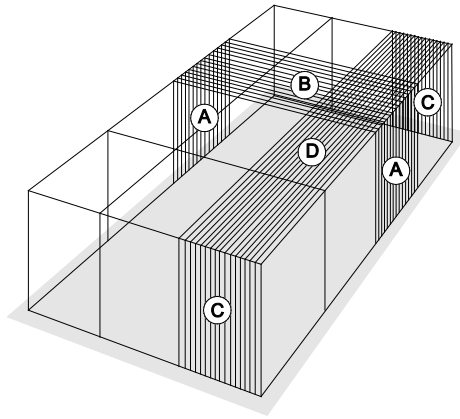
Usein rakenteiden kiepahdustuenta on epäselvä. Joskus vain palkin vetopuoli on jäykistetty mutta ei sen puristuspuolta, tai orsien tai kevyen lattiarakenteen ja palkkien välinen liitos ei ole riittävän kestävä. Tällaisissa epäselvissä tapauksissa on viisainta olettaa, että jäykistys ei ole riittävä. Vaihtoehtoisesti voidaan joskus olettaa jäykistykseen muodostuvan joustavasta tuennasta.

Jäykistystä ei saa jättää huomioonottamatta. Useita puurakenteiden vaurioita on aiheutunut riittämättömästä jäykistyksestä vaakavoimia vastaan. Rakennesuunnittelijan pitää myös ottaa huolellisesti huomioon asennusvaiheen jäykistystarpeet, esimerkiksi tilanne missä kaikki lopullisen rakenteen suunnitellut jäykisteet eivät vielä ole paikoillaan.

13.3 Suurien puurakenteiden jäykistäminen

Suurten rakennusten kokonaisvakavuuden ymmärtämiseksi tarkastellaan yksinkertaisen hallin jäykistämistä. Erilaisten jäykistävien osien tunnistamiseksi tarkastellaan niiden asemaa sekä rakennuksen vaipan suhteen (sivuseinät, päätyseinät, katto) että rakennuksen pääsuuntien suhteen (pituussuunta, poikkisuunta). Tarkasteltavassa rakennuksessa voidaan kuvan 13-5 mukaisesti erottaa neljä jäykistävää osaa:

- sivuseinien muodostama jäykistys (A)
- katon muodostama jäykistys poikkisuunnassa (B)
- päätyseinien muodostama jäykistys (C)
- katon muodostama jäykistys pituussuunnassa (D).

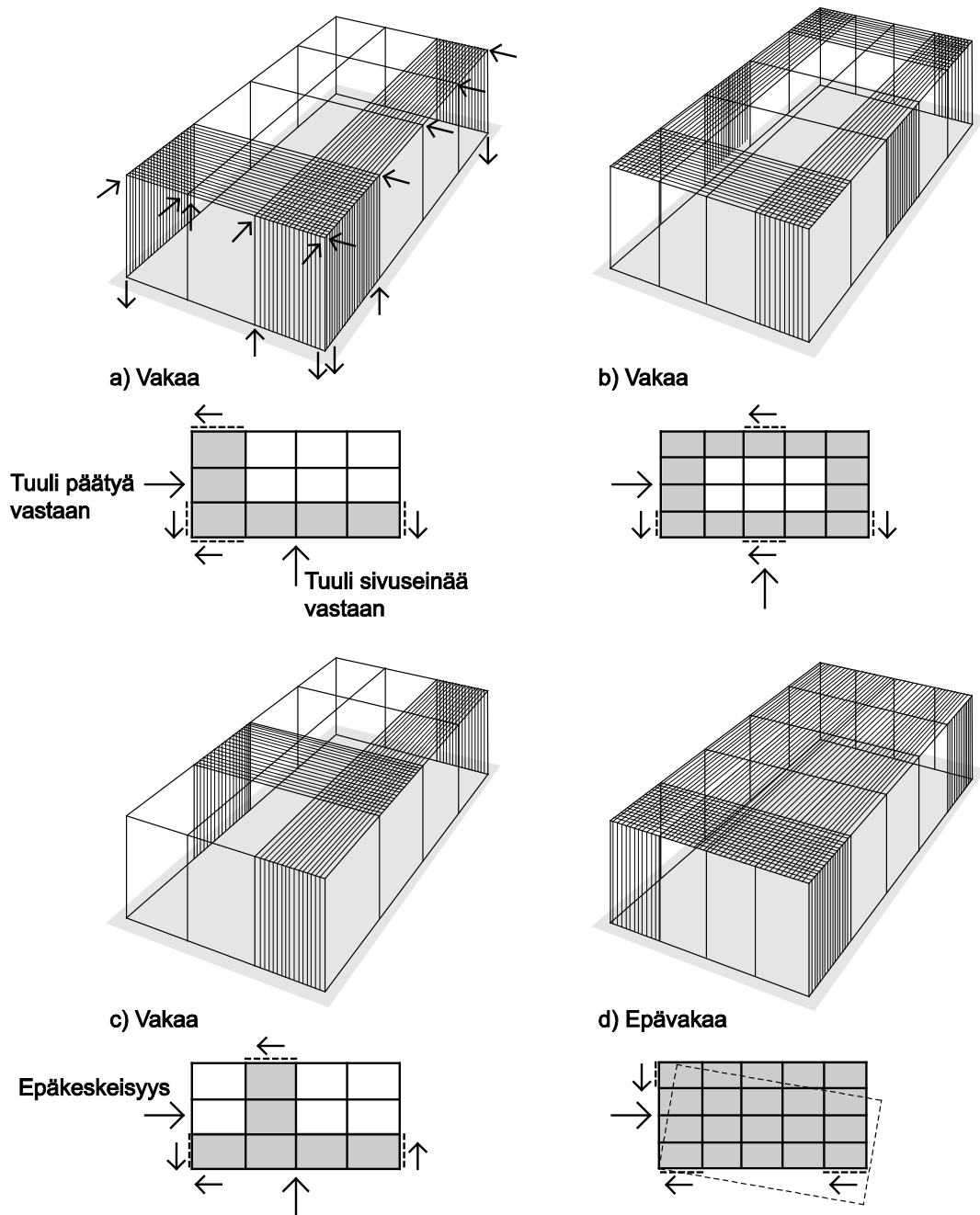


KUVA 13-5

Yksinkertaisen hallin jäykistävät rakenteet.

Kuva 13-6 esittää muutamia tavallisia rakennuksen jäykistävien rakenteiden sijoitustapoja. Jos katto on tasossaan jäykistetty, niin jäykistävien seinien sijoittelun pitää täyttää seuraavat ehdot, jotta rakennus olisi jäykkä vaakavoimille:

- Seinien jäykistykseen pitää voida siirtää mielivaltaisessa suunnassa oleva vaakavoima jolloin jäykistysrakenteita pitää olla ainakin kahdessa toisensa risteävässä suunnassa.
- Seinien jäykistykseen pitää voida siirtää rakenteen kuormien ja jäykistysseinien välisen epäkeskeisyyden aiheuttama pohjatason vastainen kiertävä momentti, jolloin jäykistysrakenteita pitää olla ainakin kahdessa yhdensuuntaisessa linjassa.



KUVA 13-6

Esimerkkejä vakaista ja epävakaista rakenteista.

Jäykisteen päätehtävänä on tehdä rakenteesta vakaa. Lisäksi se

- siirtää vaakasuorat kuormat (kohta 13.3. > Vaakasuorien kuormien siirtäminen)
- rajoittaa sivuttaisia muodonmuutoksia (kohta 13.3. > Sivuttaisen muodonmuutoksen rajoittaminen)
- parantaa nurjahtavien ja kiepahtavien rakenteiden kestävyyttä (kohta 13.3. > Nurjahtavan rakenteen kestävyuden parantaminen).

Vaakasuorien kuormien siirtäminen

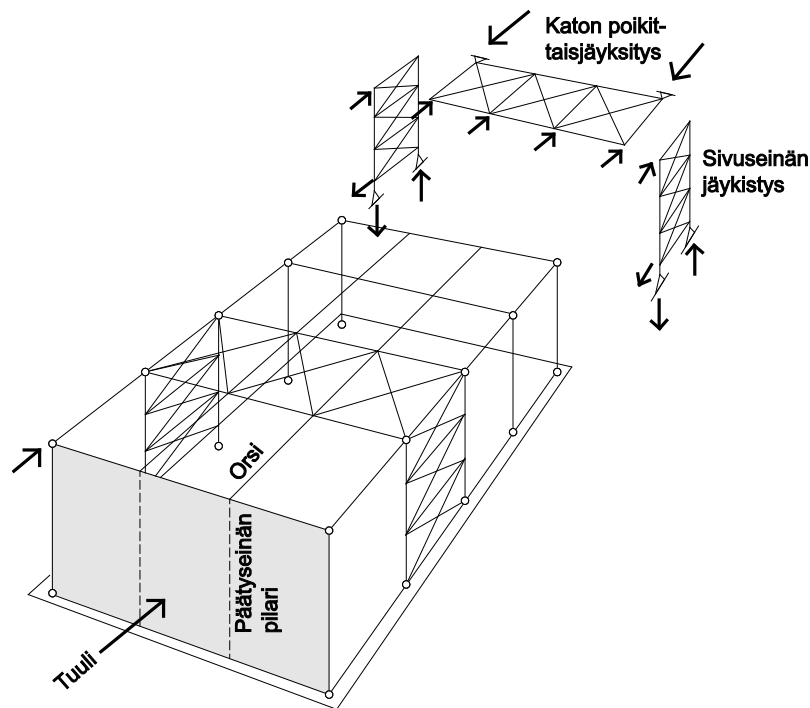
Kun painovoiman aiheuttamat kuormat vaikuttavat aina vain pystysuorassa, niin vaakavoimat voivat vaikuttaa missä tahansa tason suunnassa. Siksi jäykistykseen pitää voida siirtää missä ta-

hansa suunnassa vaikuttava vaakavoima perustuksille, käytettiinpä mitä jäykistystapaa tahansa. Sen lisäksi pitää tarkistaa, että liitoksilla on riittävä kestävyys vaakavoimien siirtämiseksi rakenteen eri osien välillä.

Päätyseiniin kohdistuvat vaakavoimat

Kuorman siirtymistä on helpompi ymmärtää, jos tarkastellaan kuvan 13-7 mukaista rakennusta, jonka päätyyn tuulikuorma vaikuttaa:

- Tuulikuorma kuormittaa päätyseinän pilareita, jotka toimivat pystysuorassa tasossa vapaasti tuettuina yksiaukkoisina palkkeina. Syntyy kaksi yhtä suurta vaakasuuntaista tukireaktiota, toinen pilarin alapään ja perustuksen liittymään ja toinen orren tukemaan yläpäähän.
- Orret siirtävät tukireaktion katon tasossa katon poikittaisjäykistykselle, joka toimii vaakasuorana ristikkona.
- Katon poikittaisjäykistystä kuormittavat orsien välittämät kuormat, ja sitä tukee kummankin sivuseinän jäykistys.
- Sivuseinien jäykistysristikot toimivat perustuksiin jäykästi kiinnitettyinä ulokkeina ja siirtävät vaakasuoralta ristikolta tulevat tukireaktiot perustuksille. Kummankin ristikon perustuksille siirtämät kuormat muodostuvat yhdestä vaakavoimasta ja kahdesta toisilleen vastakkaissuuntaisesta pystykuormasta.



KUVA 13-7

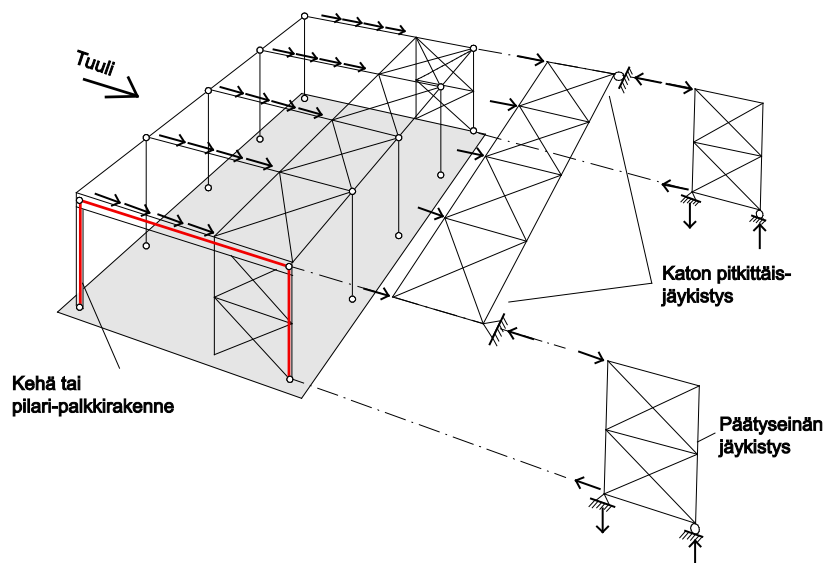
Kuormien siirtyminen vaakavoiman vaikuttaessa päätyseinään.

Orret voivat toimia vaakasuoran ristikon puristussauvoina. Usein on kuitenkin parempi suunnitella ristikkoon erilliset puristussauvat, jolloin ristikon kaikki sauvat voivat olla samassa tasossa ja vältetään nurkkien epäkeskeisyys.

Katon poikittaisjäykistys ja sivuseinien jäykistys sijoitetaan tavallisesti samaan kenttään. Jäykistettyjen kenttien lukumäärän pienentäminen vaikeuttaa rakenteen asentamista, sillä silloin tarvitaan väliaikaista asennusaikaista jäykistystä. Siksi suositellaan että jäykistettyjen kenttien välimatka ei ylitä 30...40 m. Jäykistystä ei sijoiteta tavallisesti lähinnä päätyä olevaan kenttään, sillä päätyseinän rakenne poikkeaa yleensä sivuseinien rakenteesta, ja tarvittaisiin erilaisia nurkkien rakenteita.

Sivuseiniin kohdistuvat vaakavoimat

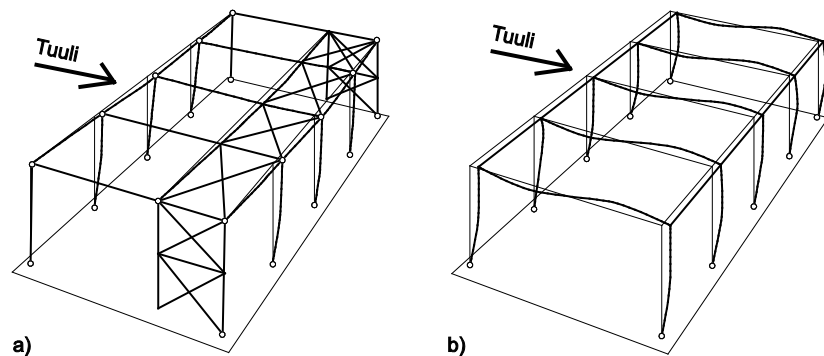
Sivuseiniin vaikuttava tuulikuorma siirretään samaan tapaan kuin päätyseiniin vaikuttava, katso kuva 13-8.



KUVA 13-8

Sivuseinään vaikuttavien vaakakuormien siirtyminen.

Kuvan 13-9 (b) mukaiset kehät ja kaaret ovat tasossaan vakaita. Pilari-palkkirakenne jonka pilarit ovat jäykästi kiinnitettyt perustuksiin on myös vakaa tasossaan. Pilari-palkkirakenne jonka pilarit ovat nivelellisesti kiinnitettyt perustuksiin voidaan jäykistää katon levyvaikutuksen avulla tai käyttämällä katossa kuvan 13-9 (a) mukaista pituussuuntaista jäykistystä yhdessä päätyseinän jäykisteiden kanssa. Kuvan 13-9 (a) mukaisen pituussuuntaisen jäykistyksen liitokset ovat yleensä monimutkaisia. Lisäksi pilarit pitää jäykistää väliaikaisesti kummassakin suunnassa, kunnes koko rakennus on asennettu valmiiksi.



KUVA 13-9

(a) Ristikoin jäykistetty pilari-palkkirakenne (b) kehärakenne.

Kattopalkkeja käytetään usein pituussuuntaisen jäykistysristikon puristussauvoina ja orsia puristettuina ja vedettyinä parresauvoina, jolloin ei voi käyttää Gerber-nivelellistä rakennetta.

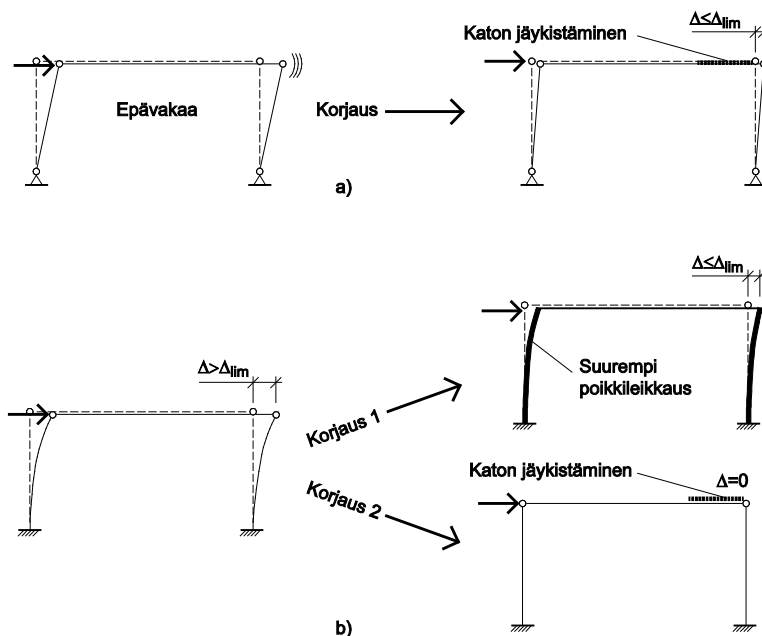
Sivuttaisen muodonmuutoksen rajoittaminen

Rakennuksen sivusuuntaista muodonmuutosta pitää rajoittaa käyttötarkoituksen mukaisesti. Ylisuuret sivuttaiset liikkeet voivat lisäksi heikentää nurjahduskestävyyttä aiheuttamalla toisen kertaluokan vaikutuksia, kuten kohdassa 13.3.3 selitetään.

Pilari-palkkirakenne jäykistetään katon ja päätyseinien jäykistysrakenteilla, kuten esimerkiksi kuvassa 13-9 (a) tai 13-10 (a). Tällaisen rakenteen sivusiirtymää rajoittaa vain jäykistysrakenne.

Jäykästi perustuksiin kiinnitetyt kehät ja pilari-palkkirakenteet ovat sen sijaan vakaita omassa tasossaan. Vaikka rakenne on vakaa, voivat vaakavoimat kuitenkin aiheuttaa liian suuren sivusiirtymän. Muodonmuutosta voidaan tavallisesti pienentää (kuva 13-10 (b))

- kasvattamalla pilarin poikkileikkausta
- jäykistämällä katto pituussuunnassa ja päätyseininä.



KUVA 13-10

Katon pituussuuntaisen jäykistämisen vaikutus pilari-palkkirakenteen sivusiirtymään (a) nivelellinen pilari (b) perustuksiin jäykästi kiinnitetty pilari.

Yleensä kuvan 13-10 (a) rakenne on edullisempi kuin (b), koska nivelelliset liitokset ovat edullisempia kuin momenttijäykät. Sen lisäksi on helppoa ja kustannustehokasta rajoittaa nivelellisen pilari-palkkirakenteen sivusiirtymää jäykistämällä kattoa enemmän.

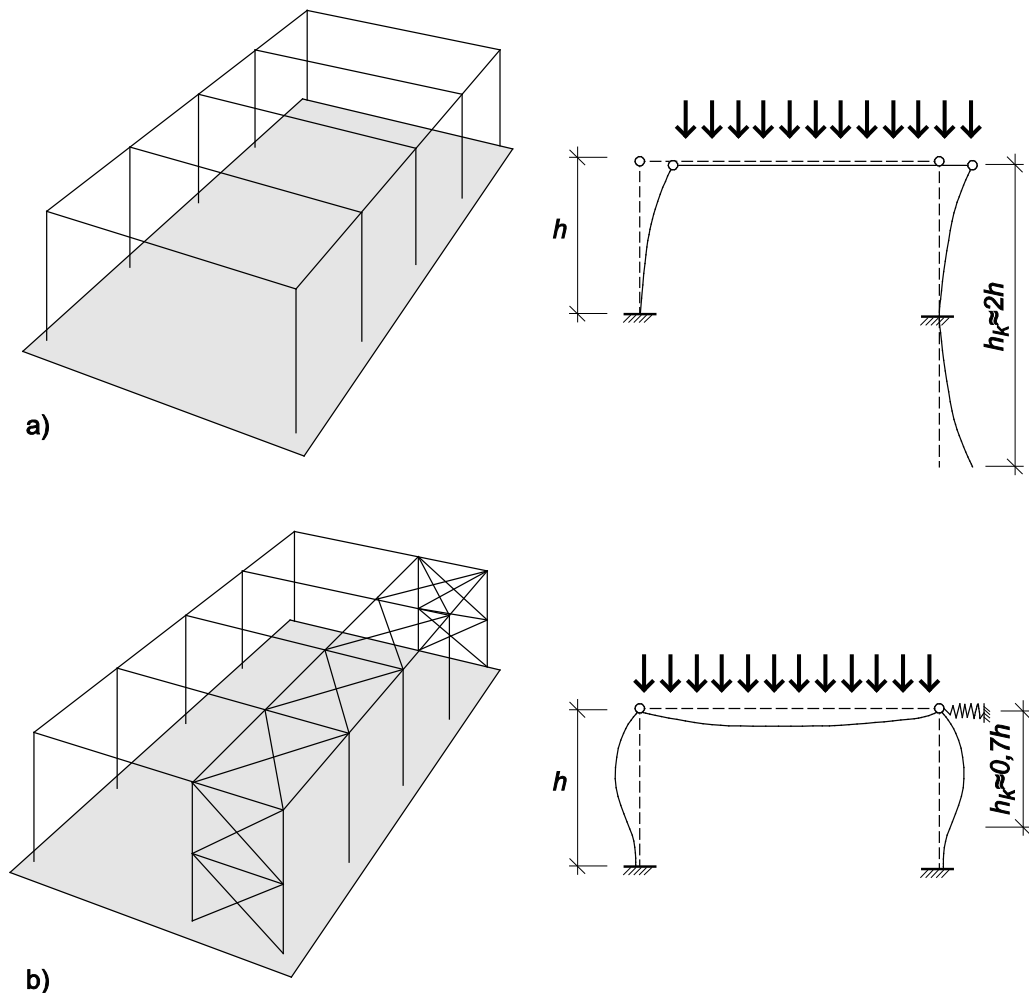
Jäykästi perustuksiin kiinnitettyjä pilareita on edullista käyttää, jos rakennus on liian pitkä tai jos maaperän kantokyky ei ole kovin hyvä. Tällaisessa rakenteessa vaakavoimat siirtyvät tasaisesti kaikille pilareille. Jos kuvan 13-10 (a) mukaista jäykistystä käytetään pitkässä rakenteessa, niin katon jäykistysristikon sauvoille tai levyelementille tulee hyvin suuria puristus- ja veto-voimia, minkä vuoksi voidaan joutua vahvistamaan orsia ja pääpalkkeja. Sellainen rakenne aiheuttaa myös suuria nostavia ja puristavia voimia seinän jäykistykseen tuentakohdissa (katso kuva 13-8) ja kasvattaa perustusrakenteiden kustannuksia.

Jos rakennusta jatketaan myöhemmin, niin pilareiden ja kehän jalkojen momenttijäykä kiinnittäminen perustuksiin on eduksi, koska jäykistysrakenteita ei tarvitse vahvistaa toisin kuin nivelellistä kiinnitystä käytettäessä.

Nurjahtavan rakenteen kestävyuden parantaminen

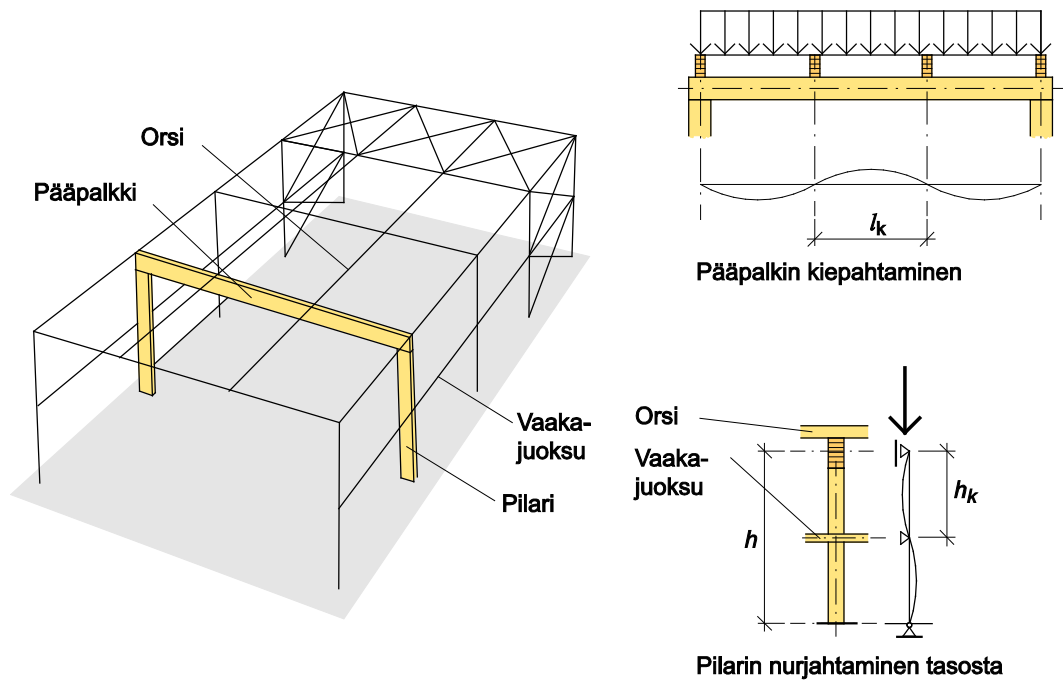
Jäykistys siirtää vaakavoimat perustuksille ja rajoittaa sivusuuntaista muodonmuutosta. Sekä vaakasuorat että pystysuorat jäykistysrakenteet voivat myös pienentää puristettujen rakenteiden nurjahduspituutta.

Katon pituussuuntainen jäykistys pienentää tehokkaasti sivusiirtymää erityisesti sellaisissa pilari-palkkirakenteissa, missä pilarit ovat jäykästi kiinnitettyjä perustuksiin, koska pilareiden nurjahduspituus pienenee kuvan 13-11 mukaisesti. Jos tarkastellaan nurjahtamista tasossa, niin katon jäykistysrakenteen jäykkyys on käytännössä niin suuri, että pilarin yläpää voidaan olettaa sivusuunnassa siirtymättömäksi. Todellisuudessa jäykistys toimii kuten sarja jousitukia pilareiden yläpäässä, katso kuva 13-11 (b). Myös katon ja sivuseinien poikittaiset jäykistysrakenteet pienentävät puristettujen rakennusosien nurjahduspituutta. Kuva 13-12 esittää poikittaisjäykistysvaikutusta pääpalkkien kiepahtamiseen ja pilareiden nurjahtamiseen tasosta.



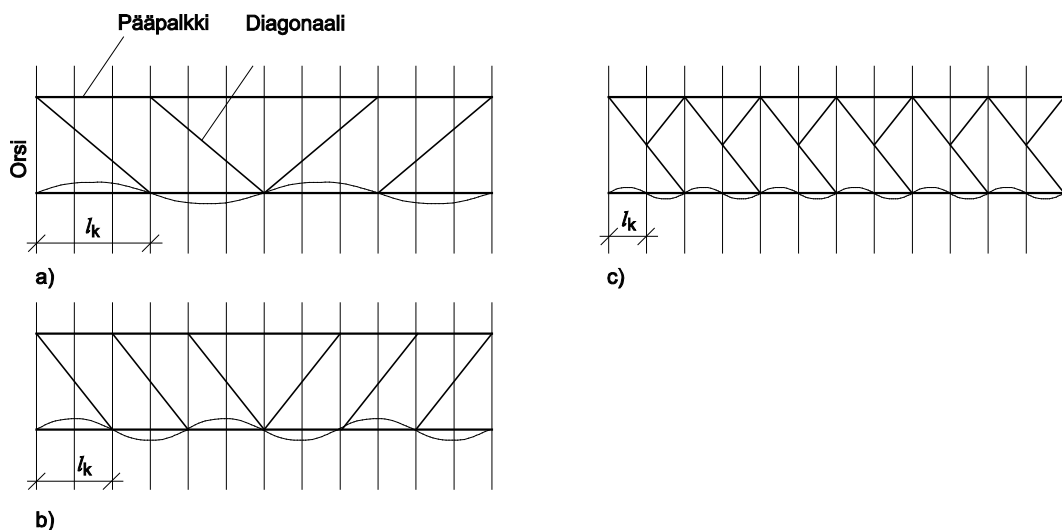
KUVA 13-11

Katon pituussuuntaisen jäykistysvaikutus pilari-palkkirakenteen pilarin nurjahduspituuteen. Pilarit ovat jäykästi kiinnitetty perustuksiin (a) ilman jäykistystä (b) jäykistettynä.


KUVA 13-12

Katon poikittaisen jäykistyksen vaikutus pääpalkin kiepahtamiseen ja pilarin nurjahtamiseen tasosta.

Rakenteen pääpalkkeja mitoitettaessa on huomattava, että palkki on jäykistetty kiepahtamista vastaan vain niissä kohdissa, missä se on sidottu katon jäykistysristikkoon. Siksi sellainen jäykistysristikko, missä on vain muutama diagonaali (ja siis vain muutama nurkka), voi olla riittämätön jäykistämään pääpalkkeja kiepahdusta vastaan. Kuva 13-13 esittää, kuinka kiepahduspituus l_k pienenee, kun katon poikittaisen jäykistyksen diagonaalien määrää kasvatetaan.


KUVA 13-13

Katon erilaisten poikittaisjäykisteiden vaikutus pääpalkin kiepahduspituuteen.

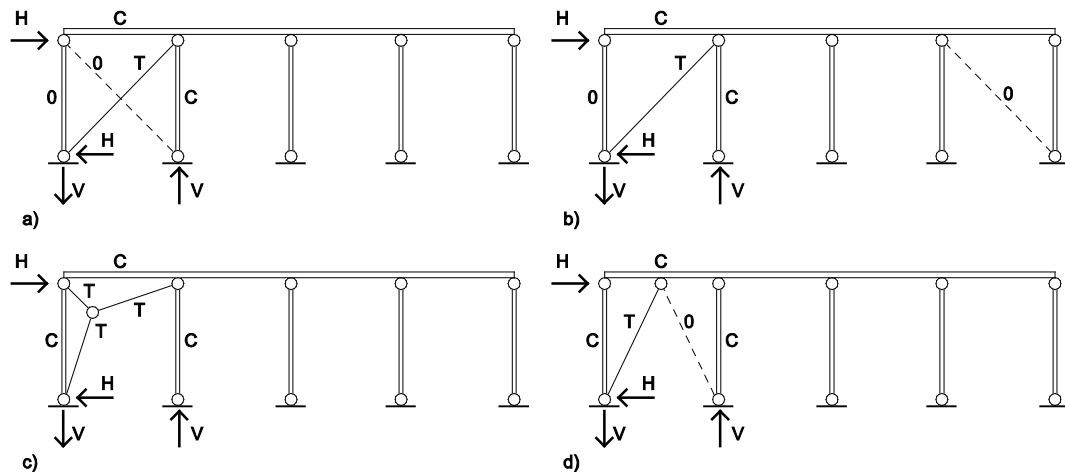
Seinien jäykistäminen

Jäykistetyt kentät sijoitetaan niin, että niiden vaikutus rakenteen yksityiskohtiin on mahdollisimman pieni. Sen lisäksi sijoittelussa otetaan huomioon rakennuksen asentaminen ja vaakavoimien jakautuminen rakenteessa. Seinien jäykistämässä voidaan käyttää

- teräksisiä kierretankoja
- puristettuja vinosauvoja (yleensä lähes neliöpoikkileikkauksellisia puusauvoja)
- kehiä
- levyjä.

Terästangot

Kuva 13-14 esittää kenttien jäykistämistä teräksillä kierretangoilla. Tankoja voidaan käyttää yksittäisinä tai ristikkäisinä diagonaaleina, K-jäykisteinä ja epäkeskeisinä jäykisteinä. Näiden etuna on että terästangot siirtävät vain vetovoimia. Jäykistys muodostuu yksinomaan keveistä osista, mutta sen vaikutus kokonaisjäykkyyteen on suuri. Vedetyt tangot voidaan helposti jälkijännittää vanntiruvein. Tällä tavoin pystysauvat saadaan tarkasti paikoilleen ja mittatoleransseja voidaan kompensoida.



KUVA 13-14

Jäykistäminen terästangoilla (a) ristikkäiset diagonaalit (b) yksittäiset diagonaalit (c) epäkeskeinen jäykistys (d) K-jäykistys. C = puristussauva, T = vetosauva ja 0 = kuormittumaton sauva.

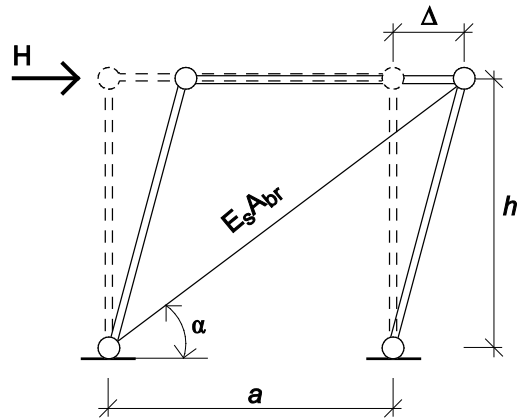
Kun jäykistys tehdään K-muotoon asennetuilla terästangoilla, rakenne toimii osittain vaakasuorien osien taivutuksen avulla. Tällainen rakenne on sen vuoksi pienempi joustavampi ja siirtymät suuremmat.

Jos liitosten siirtymiä ja puuosien pituussuuntaista muodonmuutosta ei oteta huomioon, voidaan jäykistetyn kentän jäykkyys k_{br} ($=H/\Delta$) laskea yhtälöstä

$$k_{br} = \frac{E_s \cdot A_{br} \cdot \cos^3 \alpha}{a}$$

13-1

missä merkinnät on esitetty kuvassa 13-15.

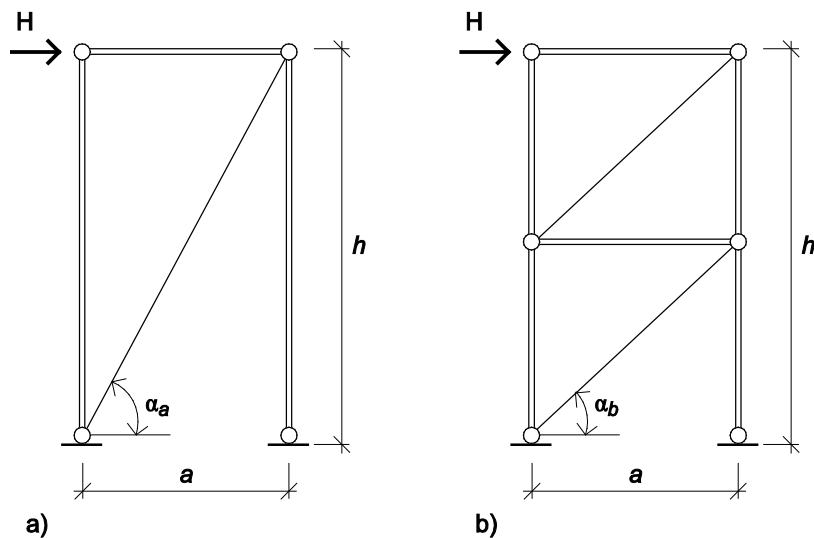

KUVA 13-15

Diagonaalilla jäykistetyin kentän jäykkyyden laskemisessa käytetty malli.

Kun jäykistävän diagonaalin kaltevuus pienenee, niin jäykkyys kasvaa ja siten myös jäykistykseen tehokkuus. Tavallisesti rakenteissa sekä a että h ovat määriteltäviä. Siksi ainoa tapa pienentää kaltevuutta α on kasvattaa jäykistettyjen kenttien lukumäärää korkeussuunnassa. Lukumäärän valinta on tehokkuuden ja taloudellisuuden välinen kompromissi. Kun rakenteen kentän leveys a ja korkeus h ovat määriteltäviä, jäykistämiseen voidaan käyttää

- yhtä ainoaa diagonaalia, kuva 13-16 (a)
- kahta tai useampaa diagonaalia, kuva 13-16 (b), jotka jakavat kentän korkeussuunnassa kahdeksi tai useammaksi osaksi.

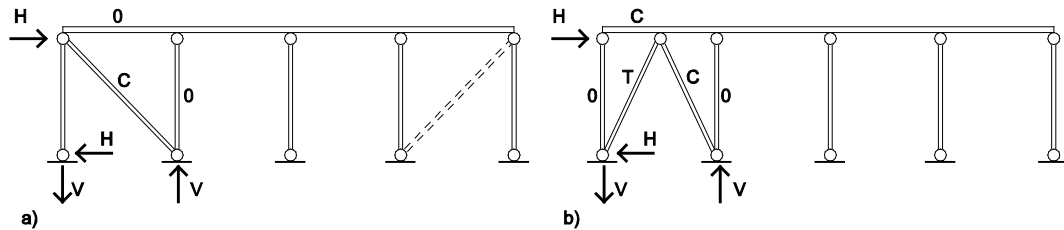
Jos kenttää ei jaeta korkeussuunnassa, niin kulma α on verrattain suuri ja jäykistykseen teho on pieni. Jos jäykkyydelle k_{br} on asetettu vaatimuksia, niin kuvan 13-16 (a) teräsdiagonaalin pitää olla suurempi kuin kuvan 13-16 (b) tapauksessa. Toisaalta kuvan 13-16 (b) mukainen rakenne vaatii useamman tangon ja liitoksen kuin kuvan (a) mukainen rakenne. Kokemus on osoittanut, että kentän jakaminen korkeussuunnassa kannattaa tehdä siten, että diagonaalien kaltevuus on $45^\circ < \alpha < 60^\circ$.


KUVA 13-16

Diagonaalein jäykistetyin kentän jäykkyyden arviointimalli.

Puusauvat

Kuvassa 13-17 esitetään puusauvoin jäykistettyjä kenttiä. Sauvoja on käytetty diagonaaleina tai ne muodostavat K-jäykistys. Yhtä ainoaa diagonaalia käytettäessä sen pitää voida siirtää sekä veto- että puristusvoimia tuulikuorman suunnan muuttuessa. Puisten diagonaalien haittana on, että niiden pituutta ei voi säätää, ja siksi asennuksessa tarvitaan suurempaa tarkkuutta kuin terästankoja käytettäessä.

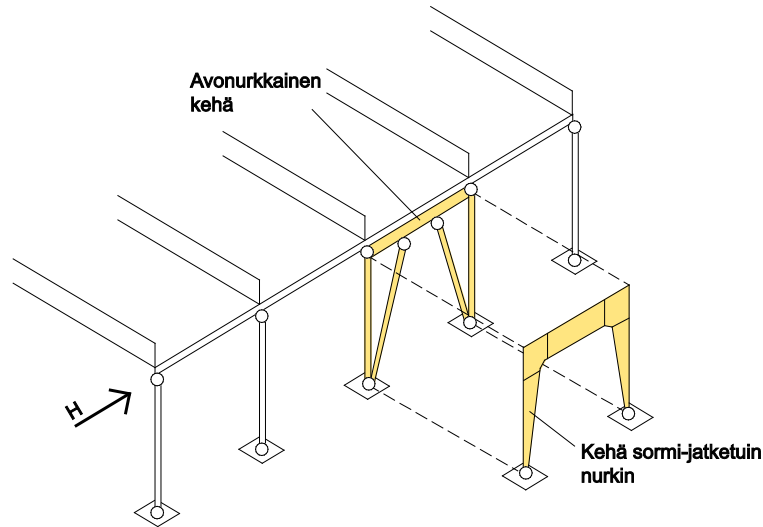


KUVA 13-17

Jäykistys tekeminen puusauvoin (a) diagonaalijäykistys (b) K-jäykistys. C = puristussauva, T = vetosauva ja 0 = kuormittumaton sauva.

Kehät

Jos rakennukseen halutaan suuria ovi- ja ikkuna-aukkoja, voidaan jäykistämisen käyttää kuvan 13-18 mukaisia kehiä, jolloin diagonaalit eivät rajoita aukkojen sijoittelua. Kehät voidaan valmistaa puusta tai teräksestä, jos vaakavoimat ovat hyvin suuria.

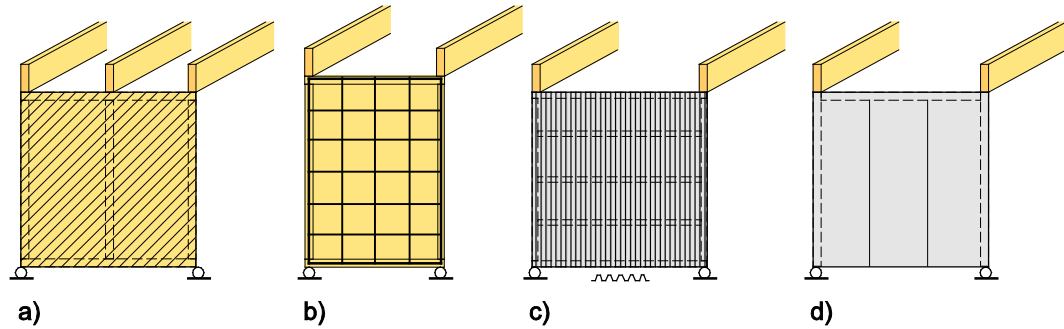


KUVA 13-18

Jäykistäminen kehien avulla.

Levyjäykistys

Levyseiniin voidaan käyttää puulevyjä kuten ristiinliimattuja massiivipuulevyjä (CLT), vaneria, suunnattua lastulevyä (OSB) tai ristiviilullista LVL-levyä. Levyseiniä voidaan tehdä myös kuvan 13-19 mukaisesti teräspoimulevystä, betonilaatoista tai muista levystä. Levyvaikutusta hyödynnettäessä seiniin voi tehdä aukkoja vain rajoitetusti.

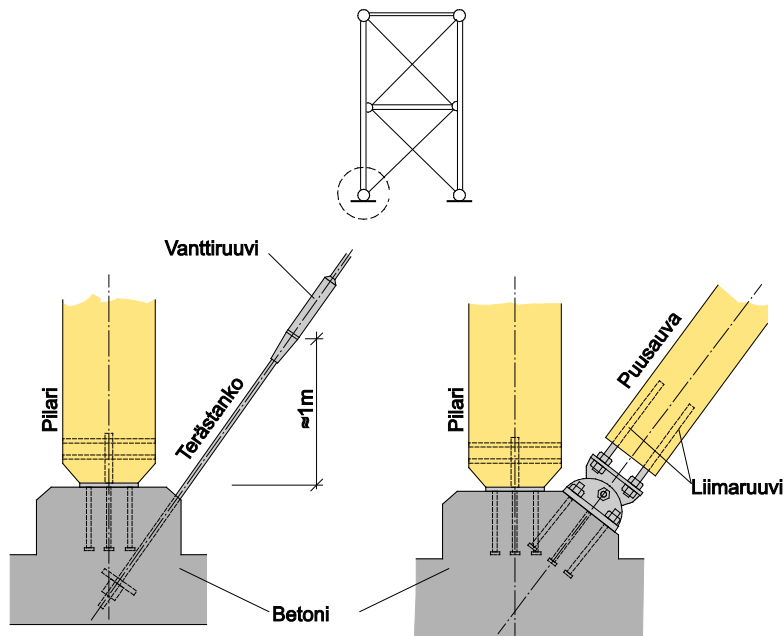


KUVA 13-19

Levyjäykistys (a) vinolauditus (b) puulevy (c) metallilevy (d) betonielementtejä.

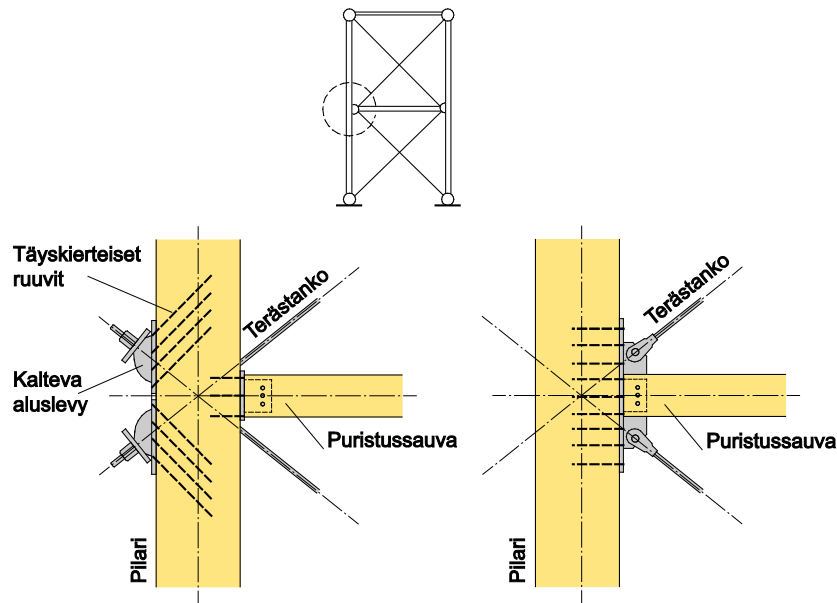
Seinän jäykistykseen yksityiskohtien suunnittelu

Kuvassa 13-20 esitetään teräs- ja puudiagonaalien kiinnitys betoniseen perustukseen. Kummankin rakenteen diagonaalit voidaan helposti jälkijännittää vanttiruvin avulla (jos käytetään kierretankoa) tai mutterin avulla (jos käytetään puusauvaa) ja siten saadaan pilari oikeaan asentoon. Kuvassa 13-21 esitetään kaksi mahdollista teräsdiagonaalien kiinnitystä puupilariin. Kuvassa 13-22 esitetään kaksi erilaista teräsdiagonaalien risteyskohdan kiinnikettä.

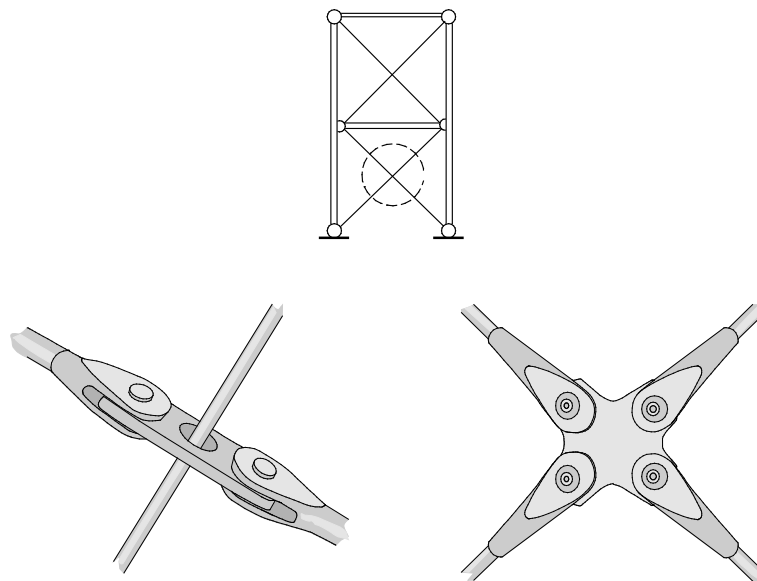


KUVA 13-20

Esimerkki erilaisten diagonaalien kiinnittämisestä betoniperustuksiin.


KUVA 13-21

Esimerkki teräsdiagonaalien kiinnittämisestä puupilariin.


KUVA 13-22

Diagonaalien risteyskohdan kiinnikkeitä.

Katon jäykistäminen

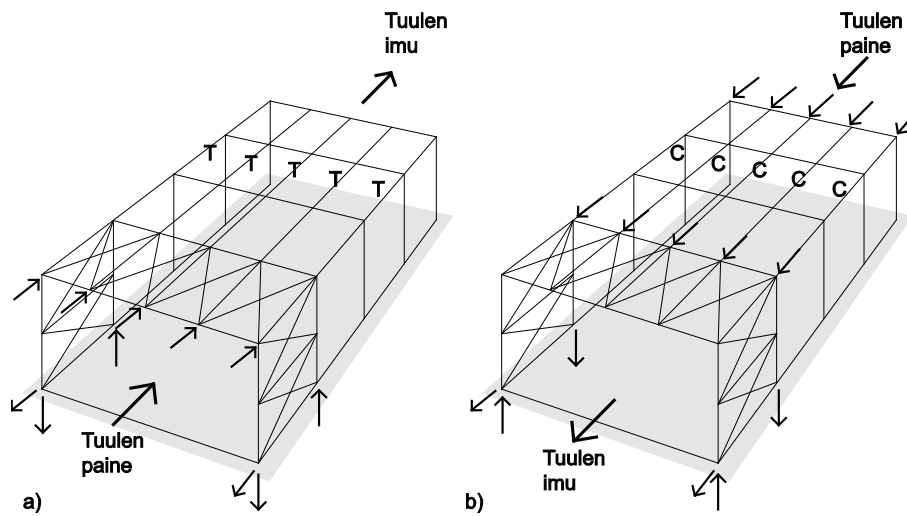
Suuret rakennukset jäykistetään vaakavoimille tavallisesti jommallakummalla seuraavista tavoista:

- vaakasuoralla ristikolla katon tasossa
- kattorakenteen levyvaikutuksella, jos katto on puulevyistä tai teräspoimulevystä.

Vaakasuora ristikko

Seuraavassa käsitellään ainoastaan kuvassa 13-5 esitettyä poikittaista jäykistämistä "B". Kuvan 13-5 mukaista pituussuuntaista jäykistämistä "D" ei nykyisin käytetä suurissa puurakenteissa, vaan kaikki pilarit kiinnitetään mieluummin jäykästi perustuksiin.

Pienehköissä rakennuksissa (pituus alle 40 m) voi yksikin kattoristikko riittää. Orsien ja niiden ja pääpalkkien välisten liitosten pitää voida siirtää rakennuksen toiseen päähän kohdistuvien kuormien aiheuttamia puristus- ja vetovoimia, katso kuva 13-23.



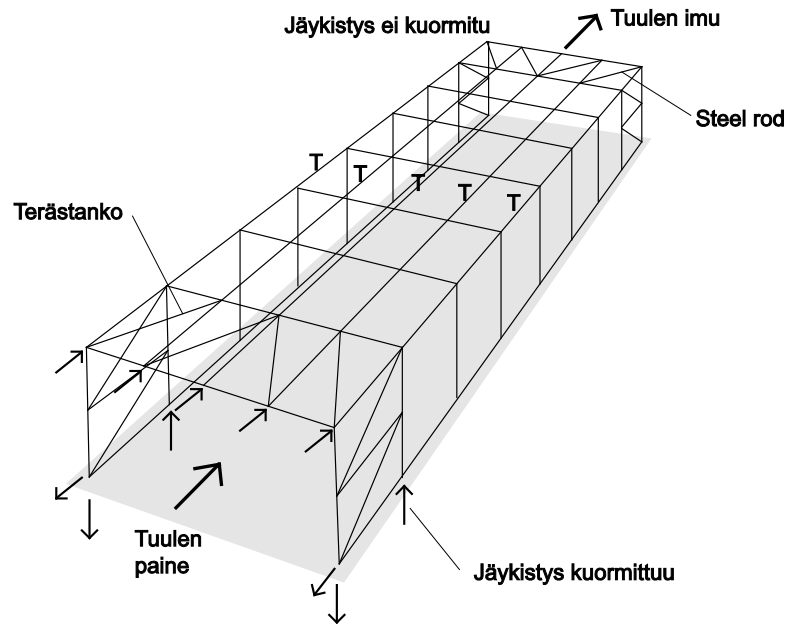
KUVA 13-23

Pienen rakennuksen jäykistäminen. T: vedetyt orret, C: puristetut orret.

Pidemmissä rakennuksissa voidaan tarvita kaksi tai useampiakin kattoristikoita jo pelkästään asennuksen helpottamiseksi. Päädyissä tuuliristikot sijoitetaan mieluiten toiseen kenttään. Silloin katon poikkeava rakenne päätyseinän kohdalla ei vaikuta nurkkien rakenteeseen.

Vaakasuuron ristikon diagonaalit tehdään tavallisesti joko terästangoista tai puusauvoista. Yleensä käytetään terästankoja, koska ne voidaan helposti jälkijännittää vanttiruuvein, jolloin pääpalkkien asento saadaan oikeaksi.

Diagonaalien sijoituksen mukaan jäykistysrakenne voi toimia vain toisessa tai molemmissa suunnissa. Jos esimerkiksi käytetään vain yhtä teräsdiagonaalia kussakin ristikon kentässä, niin ristikko toimii vain silloin kun terästankoon tulee vetovoima. Tällaisia ristikoita tarvitaan yksi kummassakin päädyssä, ja kumpikin pitää mitoittaa sekä sitä lähinnä olevaan päädyn kohdistuvalle tuulen paineelle että kauempana olevalle päädylle kohdistuvalle tuulen imulle (kuva 13-24). Tällaisen katon orret on mitoitettava myös tuulen imun aiheuttamille vetovoimille pystykuormien aiheuttaman taivutusmomentin lisäksi. Ristikko missä käytetään ristikkäisiä diagonaaleja siirtää sekä tuulen imua että puristusta.


KUVA 13-24

Esimerkki jäykistysrakenteesta, missä jokaisessa ristikon kentässä on vain yksi diagonaali. Rakenne toimii vain sen suuntaisille kuormille, jotka aiheuttavat vetoa diagonaaleihin.

Kuvassa 13-25 esitetään katon jäykistämistä erilaisin vaakasuorin ristikoin. Vaakasuoran kuorman vaikuttaessa kuvissa (a), (b) ja (c) esitetyt kaksi pääpalkkia toimivat ristikon vedettynä ja puristettuna paarteena. Kuvassa (d) sen sijaan pääpalkit, orret ja terästangot (tai vaijerit) muodostavat kaarevapaarteisen ristikon. Se siirtää vaakavoimat

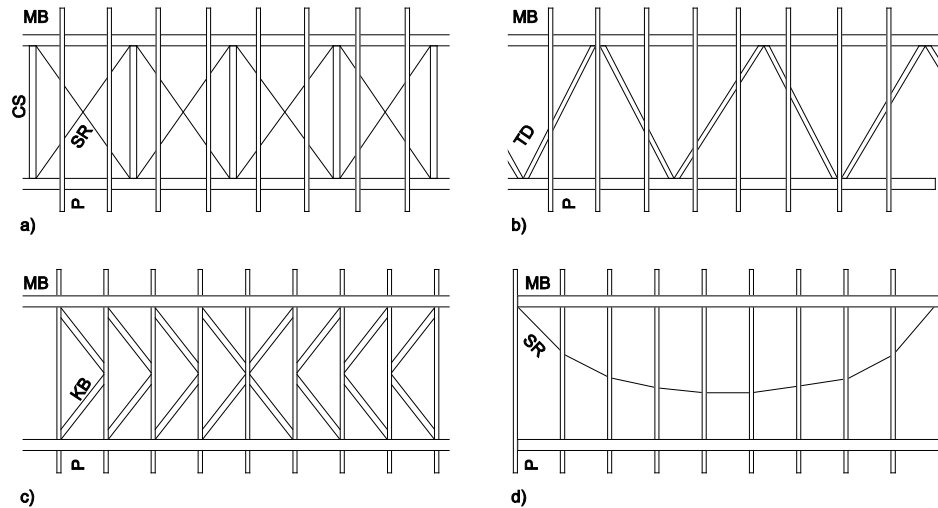
- pääpalkille tulevana taivutusmomenttina (palkin heikomman akselin suhteen) ja puristusvoimana
- terästangoille tai vaijereille tulevana vetovoimana
- osalle orsista tulevina puristusvoimina.

Kuvan 13-25 (a) esittämässä jäykistysrakenteessa on ristikkäiset sauvat. Hyvin hoikkina ne nurjahtavat helposti ja vain vedetyt sauvat siirtävät kuormia. Ristikon puristetut uumasauvat ovat tavallisesti puuta.

Kuvan 13-25 (b) esittämässä jäykistysrakenteessa on V-kuvion muodostavat sauvat. Pääpalkit ja diagonaalit muodostavat Warrenin ristikon. Jokaista diagonaaliparia kuormittaa puristus- ja vetovoima, joka muuttaa suuntaansa kun vaakasuoran kuormituksen suunta muuttuu.

Kuvan 13-25 (c) esittämässä jäykistysrakenteessa on K-kuvion muodostavat sauvat. Tämän rakenteen etuna on, että pääpalkkien toisiaan lähellä olevat tuentapisteet lisäävät pääpalkkien kiepahduskestävyyttä.

Kuvan 13-25 (d) esittämä jäykistysrakenne toimii vain sen suuntaisille vaakavoimille, jotka aiheuttavat vetovoimia terästangoille. Siksi pituussuuntaisen vakavuuden varmistamiseksi tarvitaan kaksi ristikköä, jotka ovat toisilleen pelikuvia.



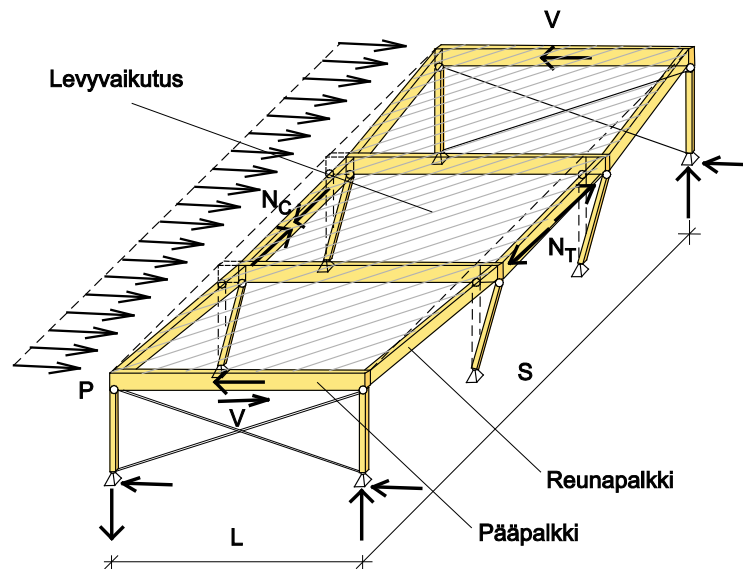
KUVA 13-25

Esimerkki erilaisista jäykistykseen käytettävistä ristikoista. M B: Pääpalkki, P: Orsi, S R: Terästanko, T D: Puinen diagonaali, C S: Puristettu puusauva, K B: Puinen K-K-jäykistyssauva.

Katon levyvaikutus

Puulevyt ja teräspoimulevyt voivat toimia jäykisteenä levyvaikutuksen ansiosta. Katon levyvaikutus tarkoittaa sitä, että kattolevy siirtää leikkausvoimia kuten ohutuumaisen palkin uumalevy.

Kattolevyä voidaan havainnollistaa katon muodostaman suuren I-palkin ohuena uumalevyä, jota pääasiassa kuormittaa leikkausjännitys. Kuvitteellisen palkin laipat muodostuvat katon reunapalkkeista tai koko sivuseinistä, jotka siirtävät taivutusmomenttia kuvan 13-26 mukaisesti niihin tulevan puristusvoiman N_C ja vetovoiman N_T avulla.



KUVA 13-26

Katon levyvaikutus.

Taivutusmomentin aiheuttama veto- ja puristusvoima rasitetuimmille reunapalkkeille on

$$N_C = N_T = \frac{q \cdot s^2}{8 \cdot L}$$

13-2

Koska koko taivutusmomentin oletetaan siirtyvän reunapalkkien avulla, niin niiden pitää olla jatkuvia tai siten jatkettuja, että palkin osien välillä voi siirtyä veto- ja puristusvoimia.

Kattolevy siirtää vaakavoimat leikkausvoimana pystysuorille jäykistyslementeille, jotka voivat olla levyseiniä, diagonaalijäykisteitä tai jäykästi kiinnitettyjä nurkkia. Kattolevy pitää mitoittaa kuormalle

$$V = \frac{q \cdot s}{2} \quad 13-3$$

Levyn pitää kestää koko leikkausvoima. Leikkausjännitys on suurin lähellä levyn reunoja. Leikkausjännitysvuo, v (N/mm), jolle levy ja sen liitokset pitää mitoittaa on

$$v = \frac{V}{L} \quad 13-4$$

Levyn ja reunapalkkien välisen yksittäisen kiinnikkeen kestävyys pitää siten olla vähintään

$$F_v = v \cdot s_f \quad 13-5$$

s_f kiinnikkeiden keskinäinen etäisyys

Samalla tavalla voidaan levy mitoittaa sen tasossa vaikuttavalle leikkausjännitykselle τ

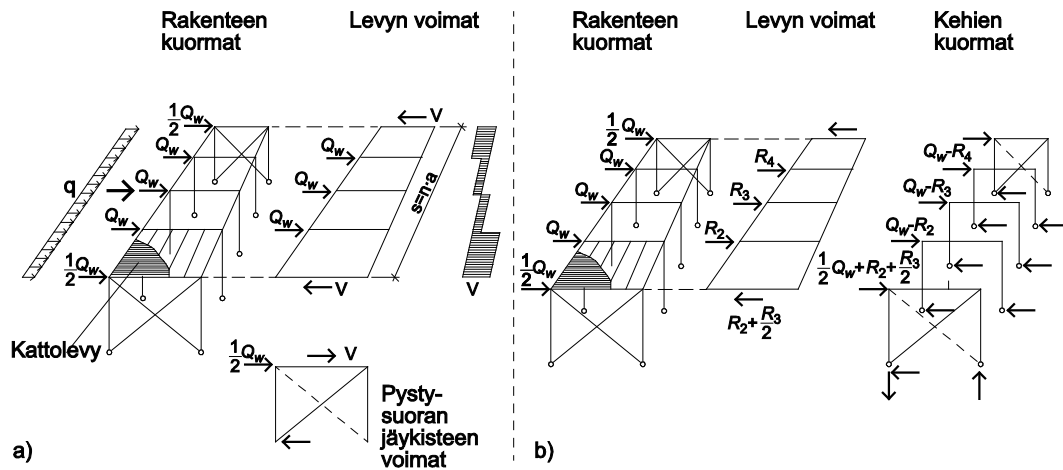
$$\tau = v/t \quad 13-6$$

t levyn paksuus

Levyvaikutuksen matemaattinen tulkinta on karkea yksinkertaistus, sillä levyn kiinnitysaste tai jäykkyys on täysin tuntematon. Levyvaikutusta voidaan käyttää hyväksi, jos seuraavat yleiset edellytykset täyttyvät:

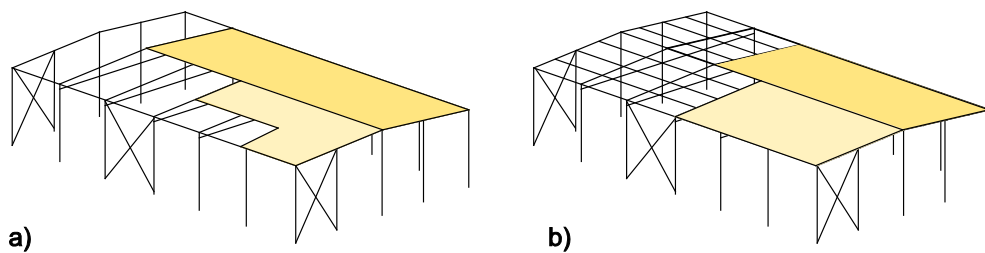
- Päätyseinät jäykistetään.
- Kattolevy kiinnitetään huolella kattopalkkeihin.
- Kattolevyn liitokset ja reunat kiinnitetään voimia siirtävin liitoksien.
- Katon mahdollisten aukkojen pinta-ala ei ole suurempi kuin 3 % kattopinta-alasta. Jos aukkojen vaikutuksesta tehdään yksityiskohtainen analyysi, niin voidaan sallia enintään 15 % aukkoja.

Runko ja kattolevy toimivat aina yhdessä, mikä vaikuttaa oleellisesti valmiin rakennuksen toimintaan. Jos kantava rakenne koostuu perustuksiin nivelellisesti kiinnitetyistä pilareista ja palkeista, niin kattolevyn pitää siirtää koko kuvan 13-27 (a) mukainen katon tasossa vaikuttava vaakavoima q . Jos kantavan rakenteen pilarit puolestaan ovat jäykästi kiinnitetty perustuksiin, niin kuorma q jakautuu kehien (tai pilareiden) ja kattolevyn välillä kuvan 13-27 (b) mukaisesti


KUVA 13-27

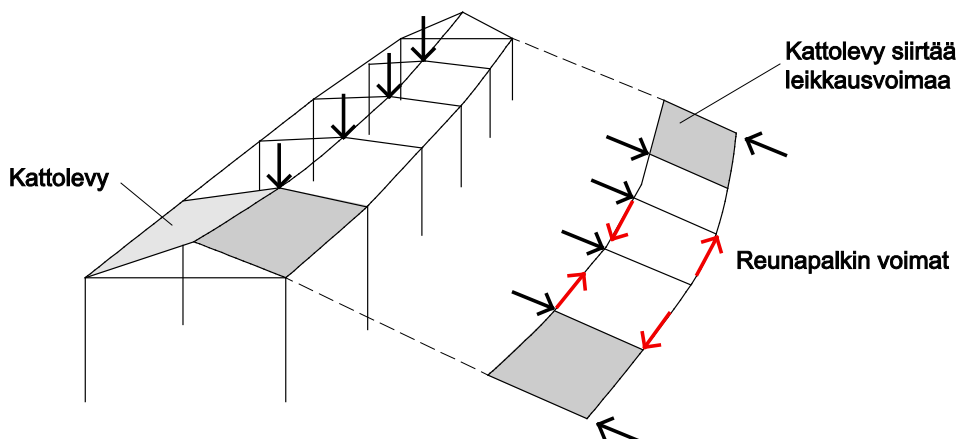
Kuormien siirtyminen (a) nivelelliset pilarit ja palkit (b) kehärakenne.

Tyypillisiä katon kiinnitystapoja on esitetty kuvassa 13-28. Jos mahdollista niin jokaisen levyn kaikki neljä reunaa on kiinnitettävä jotta saadaan parempi jäykkyys ja kestävyys. Levyt voidaan kiinnittää vain orsiin, jos päissä olevien levyjen päät kiinnitetään huolellisesti päätyseniin.


KUVA 13-28

Kattolevyn kiinnitys (a) levy kiinnitetty pääpalkkeihin (b) levy kiinnitetty orsiin.

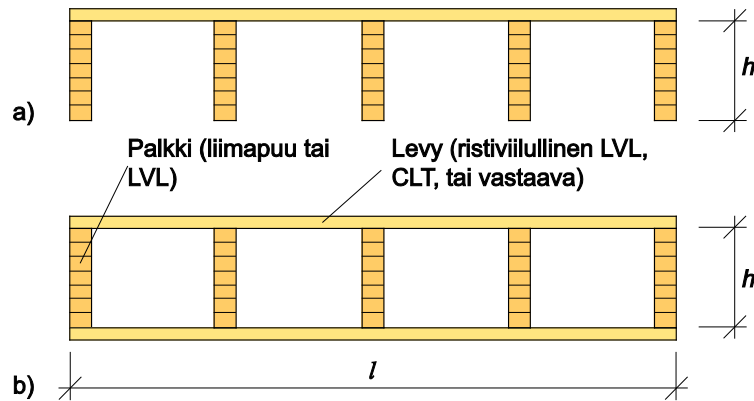
Kuvan 13-29 mukaisten pystysuorien voimien kuormittaessa kaltevaa kattoa leikkausvoimat eivät siirry rakennuksen rungolle, ellei kattolevy toimi korkeana levyuumaaisena palkkina. Tämä tarkoittaa että kattolevy ja katon reunapalkit itse asiassa siirtävät osan pystykuormia. Mitä jyrkempi katto on, sitä suurempi osuus pystykuormista siirtyy levyvaikutuksen avulla.


KUVA 13-29

Kaltevan kattolevyn toiminta levyuumaaisena palkkina.

Tavallisia levyvaikutusta hyödyntäviä rakenteita

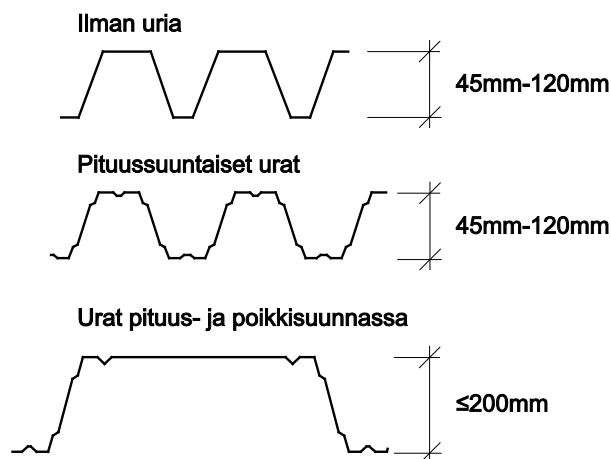
Puulevystä tai teräspoimulevystä tehty katto toimii levynä. Puulevyt voivat olla vaneria, suunnattua lastulevyä (OSB) tai ristiinliimattua massiivipuulevyä (CLT). Puulevyt vahvistetaan usein palkeilla, koska jänneväli (pääpalkkien keskinäinen etäisyys) on yleensä yli 5 m. Palkit liimataan tavallisesti kiinni levyyn ripalaataksi ja puristus saadaan aikaan ruuvein. Tarvittaessa voidaan palkkien kummallakin puolella käyttää levyä, jos jänneväli on suuri. Sellaisten rakenteiden tyyppillinen korkeus on $h = 300 \dots 800$ mm, leveys $l = 1800 \dots 2500$ mm, jänneväli $s = 5 \dots 18$ m, katso kuva 13-30.



KUVA 13-30

Tyyppillinen puinen kattorakenne (a) avonainen poikkileikkaus (b) kotelopoikkileikkaus.

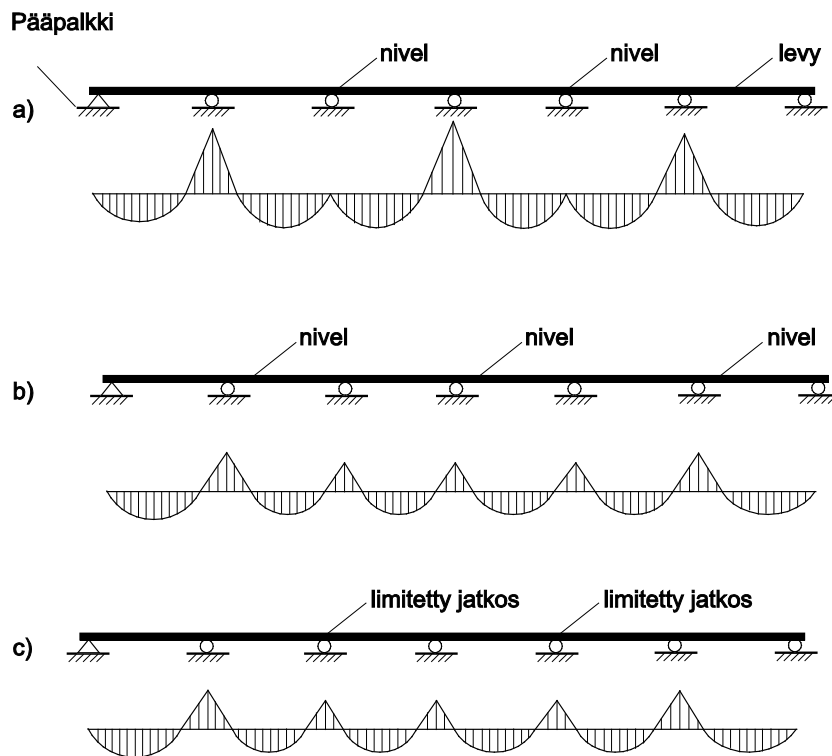
Ruotsissa ja Norjassa käytetään myös paljon teräspoimulevyä. Tämä katemateriaali tehdään kylmämuovatusista teräspellistä, jonka paksuus on tavallisesti 0,6...1,2 mm. Kantavien levyjen profiilin korkeudeksi riittää lyhyillä jänneväleillä 45 mm mutta se voi olla jopa 200 mm pitkällä jänneväleillä. Teräksen myötöraja on tavallisesti 350...500 MPa. Levy kestää paremmin pystykuormia, jos se uritetetaan.



KUVA 13-31

Tyyppisiä poimulevyjen poikkileikkauksia.

Yleensä poimulevykatot tehdään siten, että levy on jatkuva vähintään kolmen pääpalkin yli. Jatkuva rakenne voi muodostua tuilla nivelellisesti kiinnitetyistä levyistä, Gerber-nivelellisestä rakenteesta tai tuilla limitetyistä levyistä. Kuva 13-32 esittää näitä vaihtoehtoja.



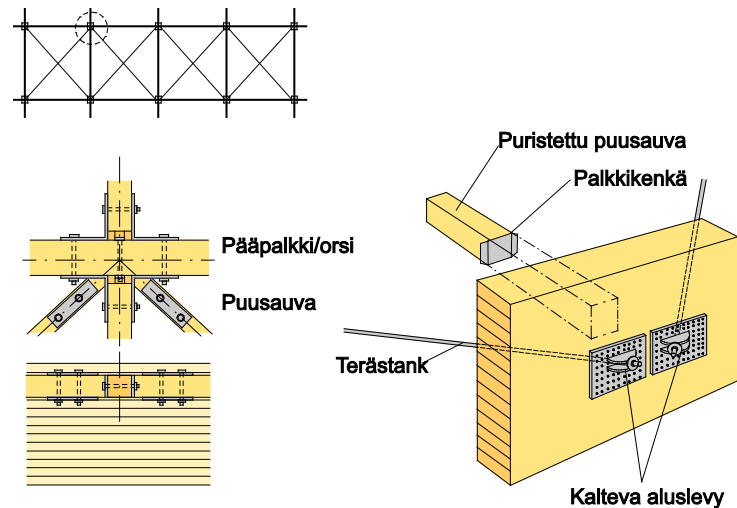
KUVA 13-32

Poimulevyn jatkosten sijoittamistapoja ja vastaavat taivutusmomenttipinnat kun kuorma on tasainen (a) tuilla niveljatkokset (b) Gerber-nivelellinen rakenne (c) limitetyt jatkokset.

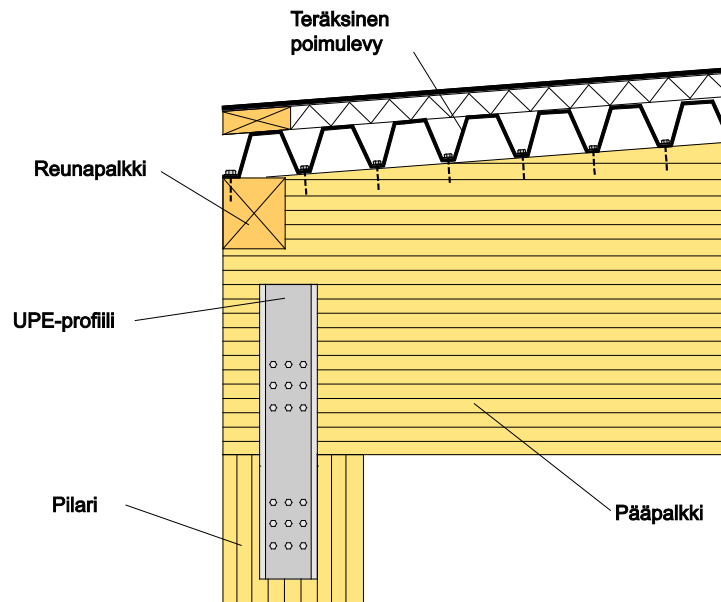
Limitettyjen jatkosten käyttämisellä on se etu, että rakenteen kestävyys kaksinkertaistuu tuella, missä taivutusmomentti on suurin. Limitys tehdään niin pitkäksi että kunkin levyn suurin tukimomentti pienenee suunnilleen puoleen maksimiarvostaan; tässä tapauksessa kenttämomentista tulee mitoittava. Gerber-nivelellinen rakenne suunnitellaan siten, että positiivisesta ja negatiivisesta taivutusmomentista tulee yhtä suuria. Jatkuvan sortuman vaaran välttämiseksi joka toinen kenttä pitää tehdä ilman niveliä.

Katon jäykistyksen yksityiskohtien suunnittelu

Kuvassa 13-33 esitetään muutamia jäykistysrakenteiden ja pääkannattajien ja orsien välisiä liitoksia. Kuvassa 13-34 esitetään teräspoimulevyn ja puupalkkien välinen liitos.


KUVA 13-33

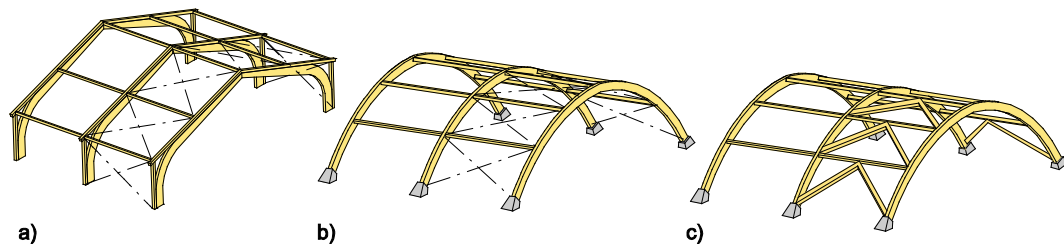
Esimerkkejä jäykistysrakenteiden ja pääkannattajien välisistä liitoksista.


KUVA 13-34

Esimerkki teräspoimulevyn ja puupalkkien välisestä liitoksesta.

Kehien ja kaarien jäykistäminen

Sekä staattisesti määrätty että määräämättömät kehät ja kaaret ovat tasossaan vakaita. Ne pitää jäykistää tasoaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kehien ja kaarien jäykistämisen periaate on esitetty kuvassa 13-35. Kehää tai kaarta käytetään usein ristikon parresauvoina ja osa orsista muodostaa ristikon uuman puristussauvat. Jäykistämiseen käytetään ainoastaan diagonaaleja, usein ristikkäisiä terästankoja (kuva 13-35 (a) ja (b)) ja joskus puusauvoja (kuva 13-35 (c)), jotka voivat olla puristettuja tai vedettyjä. Ristikon muodostavien komponenttien liitoksien mitoituksessa pitää ottaa huomioon syntyvät voimat ja niiden epäkeskeisyys, sillä ristikon puristetut ja vedetyt sauvat ovat eri tasoissa.



KUVA 13-35

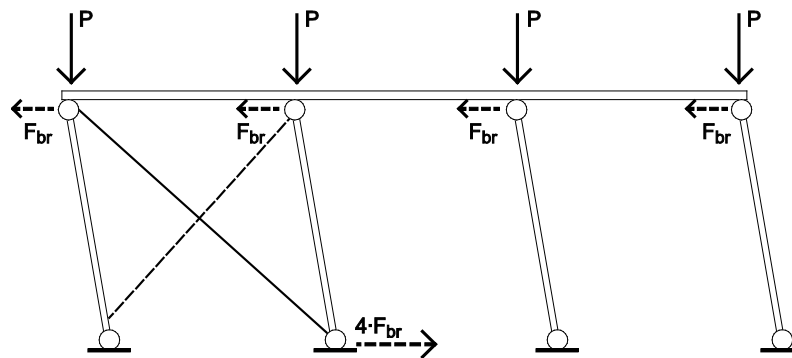
Kehien ja kaarien jäykistäminen (a) ja (b) ristikkäiset teräsdiagonaalit (c) puusauvat.

13.4 Jäykistykseen kestävyys ja jäykkyys

Jäykistykseen päätarkoitus on estää rakenteen osan sivuttainen siirtymä jäykistykseen kiinnityskohdissa. Sivusiirtymän estävä jäykistys lisää myös tavallisesti jäykistetyn palkin tai pilarin kiepahdus- ja nurjahduskestävyyttä.

Pilareiden jäykistäminen

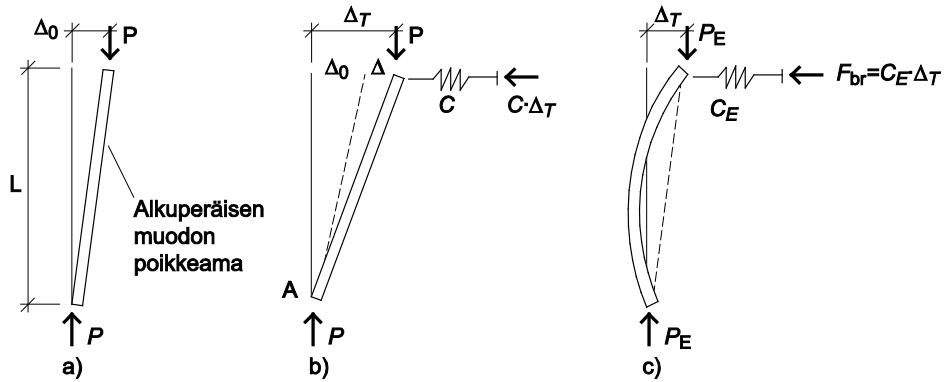
Jos täydellisessä rakenteessa olisi vain täysin suoria sauvoja ja ne olisivat ovat täysin jäykistetyt, ei jäykistävälle rakenteelle syntyisi mitään voimia edes pilarin nurjahtaessa, sillä jäykistyspisteessä ei esiintyisi lainkaan sivusiirtymää. Todellisissa rakenteissa syntyy kuormitettaessa aina voimia jäykistävälle rakenteelle. Tarkastellaan sarjaa nivelellisesti kiinnitettyjä pilareita, joista jokaista rasittaa puristusvoima P ja jotka on jäykistetty. Koska pilarit eivät ole ehdottoman pystysuoria, niin jokaisen pilarin huippuun muodostuu vaakavoima F_{br} . Jäykistysrakenteen kestävyden ja jäykkyyden pitää siten olla riittävä vastustamaan näiden voimien resultanttia. Kaikkien pilareiden oletetaan olevan kallellaan samaan suuntaan, jolloin saadaan varmalla puolella oleva ratkaisu.



KUVA 13-36

Pilareiden kaltevuudesta jäykistysrakenteelle aiheutuvat voimat.

Usein oletetaan että jäykistykselle tuleva voima F_{br} on noin 1-2 prosenttia puristusvoimasta P . Sellainen yksinkertaistettu oletus ilman jäykkyyksivaatimusta ei aina johda jäykistykseen asianmukaiseen mitoittamiseen. Jos jäykistysrakenne on liian hoikka voi sivusiirtymä – ja siten myös jäykistykselle tuleva voima – kasvaa liian suureksi. Tarkastellaan esimerkiksi kuvan 13-37 mukaista elastista sivuttaisjäykistystä, missä jäykistystä mallinnetaan pilarin päässä olevalla jousella jonka jousivakio on C .



KUVA 13-37

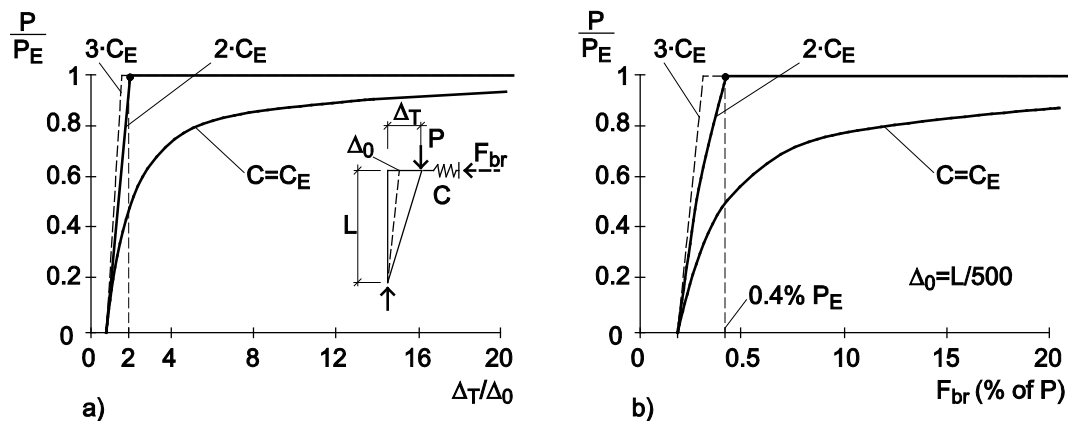
Elastinen sivuttaisjäykistys.

Täydellisen suoran pilarin yksinkertaisen tasapainotarkastelun avulla voidaan osoittaa, että Eulerin nurjahduskuorman saavuttamista vastaavan, niin kutsutun ideaalisen jousivakion C_E arvo on

$$C_E = \frac{P_E}{L}$$

13-7

Jos pilari ei ole luotisuora niin P , C ja Δ_T on esitetty kuvassa 13-38(a). Jos $C=C_E$, niin P_E saavutetaan vain jos siirtymä on hyvin suuri. Sellainen suuri siirtymä aiheuttaisi suuria voimia F_{br} jäykistysrakenteelle, sillä $F_{br}=C \cdot \Delta$. Käytännön mitoituksessa Δ valitaan pieneksi. Tähän päästään jos C on suurempi kuin C_E esimerkiksi $C=2 \cdot C_E$. Jos $C=2 \cdot C_E$, niin $\Delta = 2 \cdot \Delta_0$ kun $P=P_E$, kuten on esitetty kuvassa 13-38(a). Mitä suurempi jousivakio on, sitä pienemmäksi jäykistykselle tuleva voima jää, katso 13-38(b).

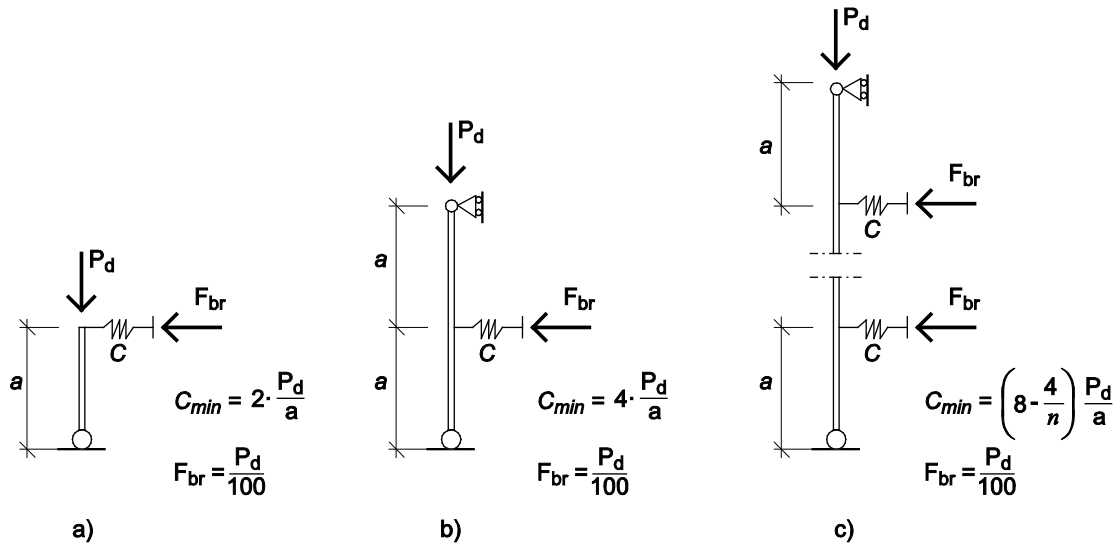


KUVA 13-38

Muodon poikkeaminen pystysuorasta. Vaikutus jäykistykselle tuleviin voimiin.

Yllä olevaa mallia voidaan – tosin hiukan monimutkaisemmassa muodossa – käyttää sellaisen pilarin kriittisen kuorman määrittämiseen, joka on tuettu useammasta kohtaa samanlaisin jousituin, joiden jousivakio on C . Jos oletetaan pilarille tyypillinen poikkeama pystysuorasta, esimerkiksi 1/500 liimapuupilarin korkeudesta, niin voidaan johtaa yksinkertainen mitoitusehto. Yllä selitetyistä syistä suositellaan, että jäykistyskuorman jousivakio C_{min} on kaksinkertainen verrattuna ideaaliseen jousivakioon C_E . Tässä mitoitus ehdossa korvataan Eulerin nurjahduskuorma P_E

pilarin puristusvoiman mitoitusarvolla P_d , joka käytännössä on huomattavasti pienempi kuin nurjahduskuorma. Lisäksi suositellaan jäykistykseksi tulevana voimana F_{br} käytettäväksi vähintään 1 % pystykuormasta, vaikka F_{br} kuvan 13-38 (b) mukaisesti ei koskaan ylitä arvoa 0,4 % pystykuormasta, jos $C=2 \cdot C_E$. Syynä tähän on, että poikkeamaksi suorasta oletetaan $\Delta_0 = L/500$. Tuulikuormien ja muiden vaakasuorien kuormien sekä ylisuurien ruuvien ja muiden vastaavien vuoksi voi oletettu arvo hyvinkin olla suurempi kuin $L/500$. Siten myös jäykistykseksi tuleva voima F_{br} voi olla suurempi kuin 0,4 % pystykuormasta.

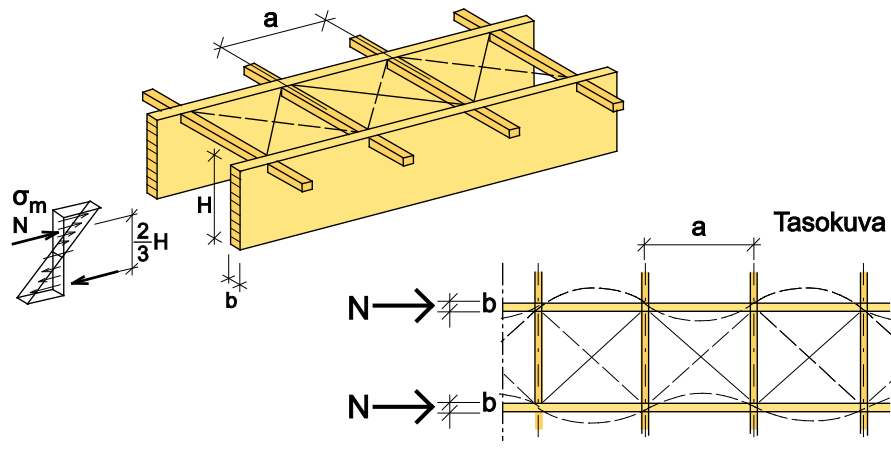


KUVA 13-39

Jäykistykseen pienin suositeltu jousivakio ja vastaava jäykistykseksi tuleva voima. Jäykistyskohtien lukumäärä on n .

Palkkien jäykistäminen

Palkit voidaan jäykistää sekä sivusiirtymää että vääntymistä vastaan. Tehokas jäykistysrakenne estää sekä palkin ylä- että alareunan sivusiirtymän ja siis poikkileikkauksen vääntymisen. Sivusiirtymisen estämiseen voidaan käyttää vapaasti tuetun palkin yläpuolella olevia orsia tai katon levyvaikutusta ja vääntymistä voidaan estää tehokkaasti vierekkäisten palkkien välissä olevalla levyllä tai ristikkäisillä sauvoilla. On tehokkaampaa käyttää samaa rakennetta jäykistämään palkkia sekä sivusiirtymää että vääntymistä vastaan kuin kahta erillistä rakennetta. Puurakenteiden jäykistämisessä on kuitenkin yleinen tapa että jännevälin alueella käytetään vain kuvan 13-40 mukaista jäykistystä sivusiirtymiä vastaan, jota täydennetään pelkästään palkin tuilla olevalla vääntöjäykistyksellä.



KUVA 13-40

Palkkien jäykistäminen vaakasuoran kiepahtamista estävän ristikon avulla.

Kiepahtamisen estämiseksi jäykistysrakenteella pitää olla riittävä jäykkyys ja kestävyys. Seuraavassa esitettävä mitoitusmenetelmä soveltuu vain palkin yläreunassa olevalle jäykisteelle. Jokaisen yksittäisen palkin aiheuttaman sivuttaisvoiman laskentaa on yksinkertaistettu. Jäykistykseen pitää kestää nämä voimat. Palkin muodon oletetaan poikkeavan ideaalisesta siten, että se muodostaa kuvan 13-41 mukaisen pystysuoran kaarevan pinnan. Yksinkertaistetun mallin mukaan palkkia pidetään sauvana, johon vaikuttaa puristusvoima

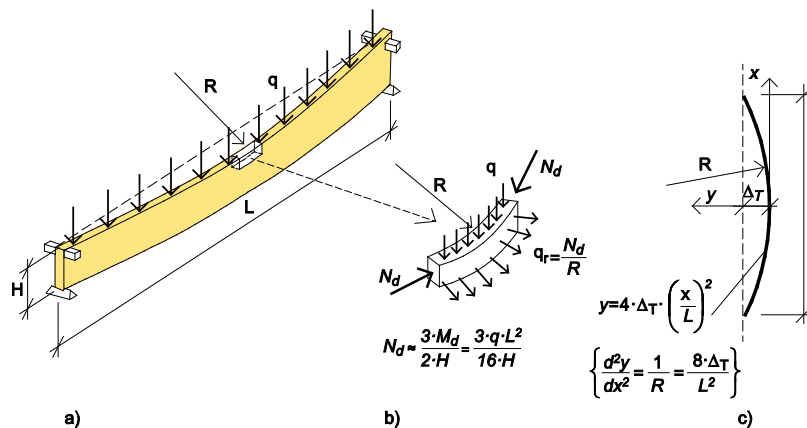
$$N_d = 1,5 \cdot M_d / H,$$

13-8

M_d palkin taivutusmomentin suurin arvo

H palkin korkeus kuvan 13-41 (b) mukaisesti

Palkin likimääräisenä muotona käytetään kuvan 13-41 (c) mukaista paraabelia. Kaarevan palkin puristusvoimasta N_d aiheutuu palkkia vastaan kohtisuora jakautunut voima q_R joka jäykistykseen pitää kestää.



KUVA 13-41

Jäykistykselle aiheutuvat voimat (a) kuormitetun palkin muodonmuutos (b) palkin sivuttaisvoimat (c) oletettu muodonmuutos kohtisuoraan palkin tasoa vastaan.

Sivusuuntainen voima q_R voidaan helposti johtaa kuvan 13-41 avulla

$$q_R = \frac{8 \cdot N_d \cdot \Delta_T}{L^2} = \frac{N_d}{L} \cdot 8 \cdot \frac{\Delta_T}{L}$$

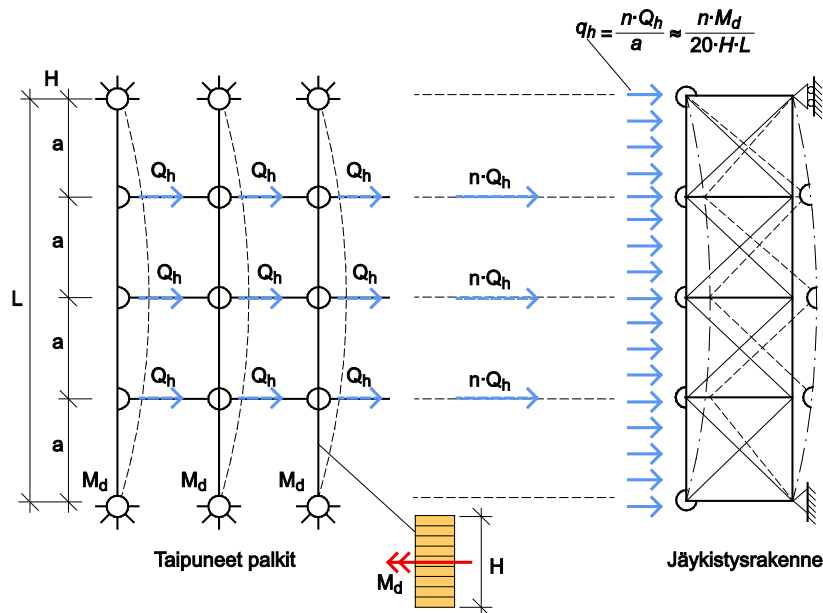
13-9

Liimapuurakenteiden muodon poikkeama suorasta Δ_0 on noin $L/500$. Lisäksi eurokoodi 5:n mukaan pitää ottaa huomioon kuorman q_R ja muiden ulkoisten kuormien (kuten tuulikuorman) aiheuttama lisäpoikkeama Δ . Nämä eivät saa olla suurempia kuin $L/500$. Suurin mahdollinen sivusiirtymä pitää siten rajoittaa arvoon $\Delta_T = (\Delta_0 + \Delta) = L/250$, mistä saadaan

$$q_R = \frac{N_d}{L} \cdot 8 \cdot \frac{1}{250} \approx \frac{1}{30} \cdot \frac{N_d}{L} = \frac{M_d}{20 \cdot L \cdot H}$$

13-10

Jäykistysrakenteeseen vaikuttava voima on sitä suurempi mitä useampia palkkeja se jäykistää. Rakenteelle kokonaisuutena tuleva voima q_h on kuvan 13-42 mukaisesti kaikkien rakenteeseen kuuluvien palkkien aiheuttamien voimien summa.



KUVA 13-42

Useampia palkkeja jäykistävälle rakenteelle tulevien voimien laskenta.

Eurokoodi 5:n mitoitusmenetelmä muistuttaa yllä kuvattua. Eurokoodi 5:n mukaisesti kaatava voima (siis jäykisteelle tulevan voiman mitoitusarvo) voidaan laskea yhtälöstä

$$q_h = n \cdot \frac{M_d}{k_{f,3} \cdot H \cdot L} \cdot (1 - k_{crit})$$

13-11

- M_d palkin taivutusmomentin mitoitusarvo
- H palkin korkeus
- L palkin jänneväli
- n jäykistettävien pakkien lukumäärä
- $k_{f,3}$ muunnoskerroin ($k_{f,3}=30\ldots80$)
- k_{crit} jäykistämättömän palkin kiepahduskerroin (katso luku 4)

Kerroin ($1-k_{crit}$) ottaa huomioon palkin hoikkuuden. Kun k_{cr} on 1, palkkia kaatava vaakavoima q_h on 0. Tämä tarkoittaa sitä, että jos palkin poikkileikkauksen suhde H/b on pienempi kuin 6...7 voidaan kaatavat voimat jättää huomioonottamatta (q_h on likimäärin 0) jos palkin pituuden ja leveyden välinen suhde on $L/b < 20 \dots 22$.

Eurokoodi 5:n mukaan kerrotaan yhtälön 13-11 oikea puoli pienennyskerroimella k_f joka ottaa huomioon, että suurien rakenteiden työn suoritukselle yleensä asetetaan suuremmat tarkkuusvaatimukset. Koska kerrointa k_f ei käytetä tavanomaisien rakenteiden yhteydessä niin se on jätetty tästä pois.

Jäykistävän rakenteen pitää olla tarpeeksi jäykkä rajoittamaan mitoituskuorman q_h aiheuttama sivusiirtymä arvoon joka on noin $L/700$ ja kokonaiskuorman (esimerkiksi tuulikuorma mukaan luettuna) aiheuttama sivusiirtymä arvoon $L/500$.

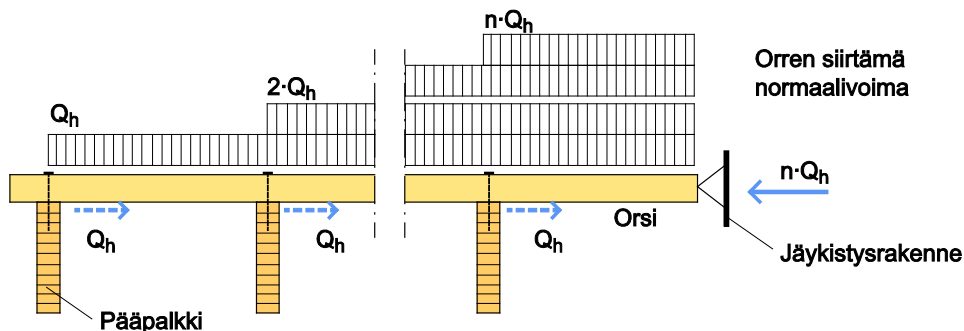
Orsien tai kattolevyn ja pääpalkin välinen liitos mitoitetaan voimalle

$$Q_h = \frac{q_h \cdot a}{n}$$

13-12

- q_h jäykistysrakenteeseen vaikuttava kokonaiskuorma
 a orsien tai kattolevyjen kiinnitysruuvien välinen etäisyys
 n jäykistettävien palkkien lukumäärä.

Jos orsi jäykistää useampia palkkeja, niin se ja sen kiinnityskohdat mitoitetaan voimalle $n \cdot Q_h$. Merkinnot on esitetty kuvassa 13-43.



KUVA 13-43

Pääpalkeilta orsille tulevat vaakavoimat.

13.5 Erityistapauksia

Seuraavassa käsitellään erityisesti sellaisten liimapuurakenteiden jäykistämisen erityispiirteitä, joilla on pitkä jänneväli. Näitä ovat

- sellaisten liimapuisten rakennusosien jäykistäminen, joiden jäykistämätön reuna on puristettu
- geometrian muutosten aiheuttamat voimat.

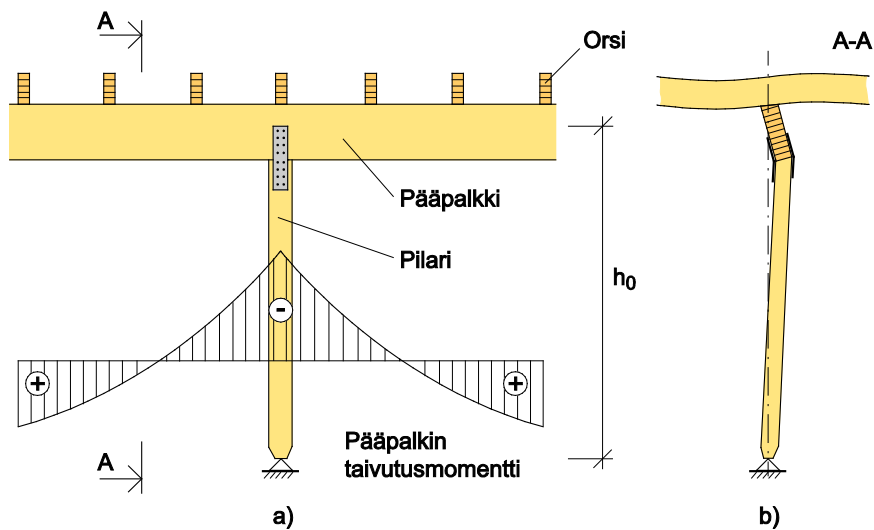
Rakenteet joiden jäykistämätön reuna on puristettu

Painovoiman aiheuttamien kuormien rasittama vapaasti tuettu palkki on alareunastaan vedetty ja yläreunastaan puristettu. Tavallisesti palkki jäykistetään koko pituudeltaan poikkisuunnassa esimerkiksi katemateriaalia tukevin orsin. Jos palkki onkin jatkuva, niin sen alareuna on pu-

ristettu niiltä osin missä vaikuttaa negatiivinen taivutusmomentti. Tällaisessa tilanteessa kuvan 13-44 mukaisesti kriittiset tekijät ovat:

- puristettu pilari
- palkin jäykistämätön alareuna välituella.

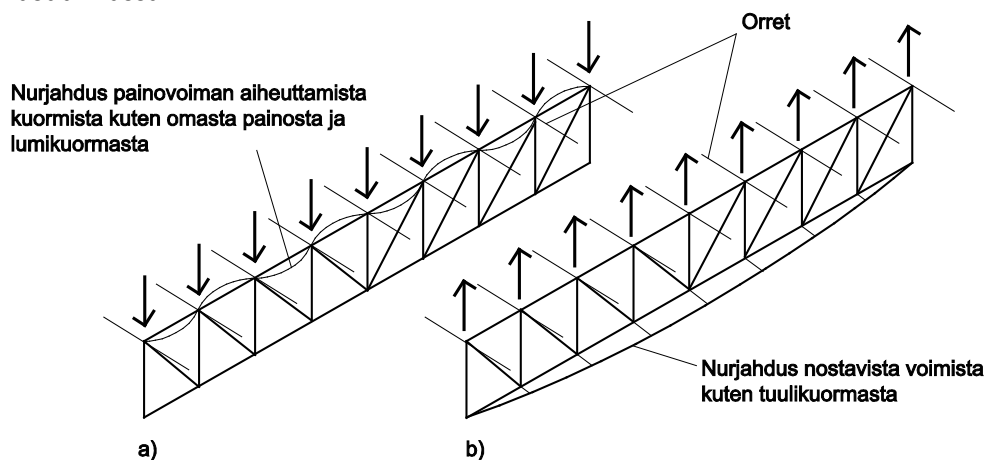
Jos pilarin huippua ei ole kiinnitetty sivusuunnassa, niin sen nurjahduspituus kasvaa huomattavasti. Jos pilari on nivelellisesti kiinnitetty perustuksiin ja sen huippu voi liikkua vapaasti sivusuunnassa (sitä ei ole tuettu), niin sen nurjahduspituus lähenee ääretöntä eikä rakenne ole vakaa. Toinen tarkasteltava rakennusosa on alareunastaan tukematon palkki, joka on jäykistämätön ja siten altis kiepahdukselle negatiivisen taivutusmomentin alueella. Pilari-palkkirakenteita on sortunut negatiivisen taivutusmomentin alueen virheellisen tai puutteellisen jäykistyksen vuoksi.



KUVA 13-44

(a) Jatkuva palkki jonka välituen muodostaa pilari. (b) Nurjahduksesta voi aiheutua sortuma.

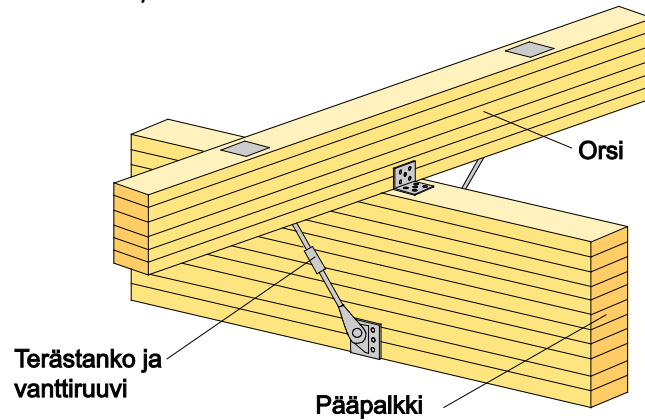
Myös kuormituksen suunnan muutos aiheuttaa puristusjännityksiä palkin alareunaan (tai ristikon alapaarteeseen). Tällainen tilanne voi aiheutua, jos rakenne on kevyt ja siihen vaikuttaa suuri nostava tuulikuorma. Kuvassa 13-45 (b) esitetään nostavan tuulikuorman kuormittama vapaasti tuettu ristikko, jonka alareunaan syntyy puristusjännityksiä ja joka voi siksi nurjahtaa sivusuunnassa.



KUVA 13-45

Erilaisia nurjahdustapoja (a) painovoiman aiheuttamat kuormat (b) tuulen aiheuttama nostovoima.

Palkin tai ristikon alareuna voidaan jäykistää rakennuksen pituussuuntaan asennettavin terässi-
tein. Siteiden keskinäisen etäisyyden pitää olla sellainen, ettei puristetun rakenneosan (ristikon
alapaarten tai palkin alareunan) hoikkuusraja ylitä. Siteet voidaan kiristää päistään jollain so-
pivalla tavalla. Palkki voidaan jäykistää esimerkiksi kiinnittämällä alareuna orteen terästangoin,
kuten kuvassa 13-46 on esitetty.



KUVA 13-46

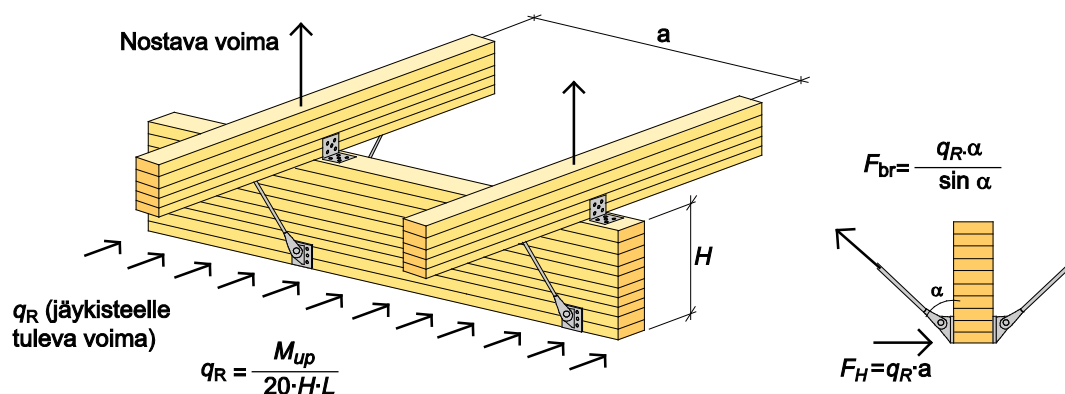
Palkin alareunan jäykistäminen orteen kiinnitetyillä terästangoilla.

Jäykistykseen pitää mieluiten siirtää vain vetovoimia. Tällä tavoin estetään palkin vääntymisen
epäsymmetrisestä kuormituksesta. Jos kovan lumisateen jälkeen tuulee voimakkaasti, niin lumi
kinostuu toispuoleisesti pääpalkin oikealle tai vasemmalle puolelle, ja toinen puoli jää lähes
kuormittamatta. Jos kuvan 13-46 diagonaalit siinä tilanteessa siirtäisivät sekä puristus- että vetovoi-
mia, niin pääpalkille syntyisi vääntöä, jonka seurauksena katto tai sen osa voisi sortua.

Jos vapaasti tuettua palkkia, jonka jänneväli on L , rasittava suurin negatiivinen taivutus-
momentti nostavasta voimasta on M_{up} , voidaan jäykistyksessä vaikuttava vaakasuora voima
laskea kuvassa 13-47 esitetyn mallin perusteella yhtälöstä

$$F_{br} = \frac{M_{up}}{20 \cdot H \cdot L} \cdot \frac{a}{\sin \alpha}$$

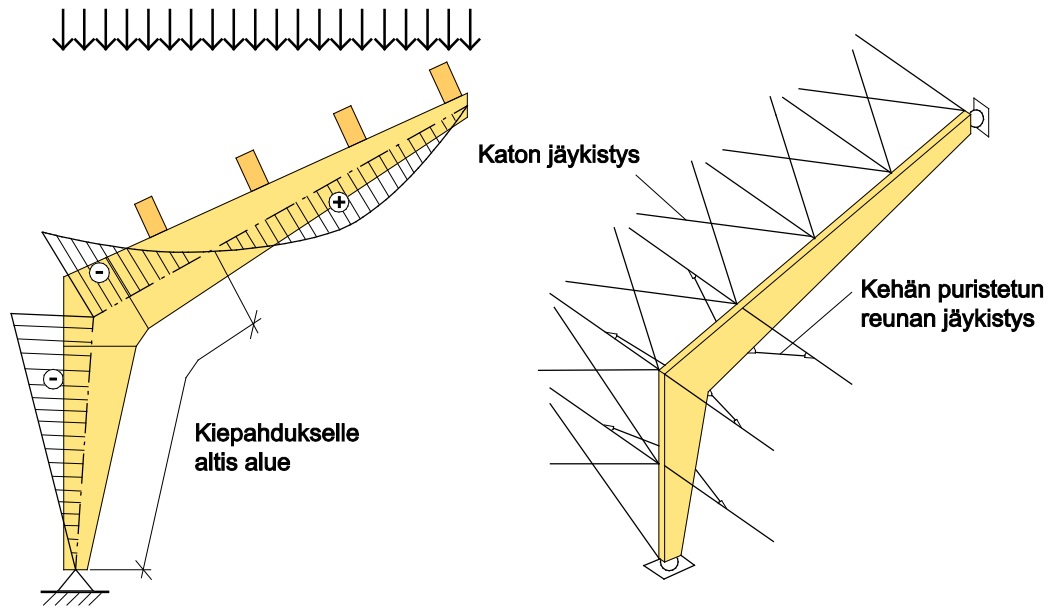
13-13



KUVA 13-47

Terästangoista tehdyille jäykisteelle tulevien voimien arvioiminen.

Kuvassa 13-48 esitetään negatiivisen taivutusmomentin rasittamien kehien ja kaarien vastaavia
jäykistysrakenteita.

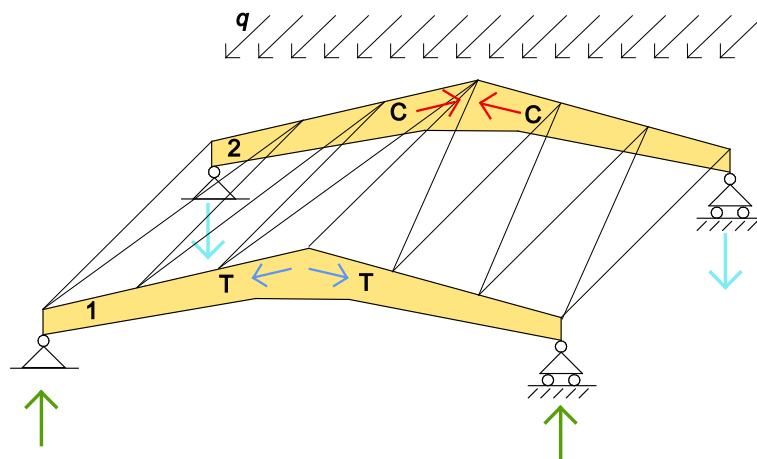


KUVA 13-48

Kehän jäykistäminen.

Geometrian muutosten aiheuttamat voimat

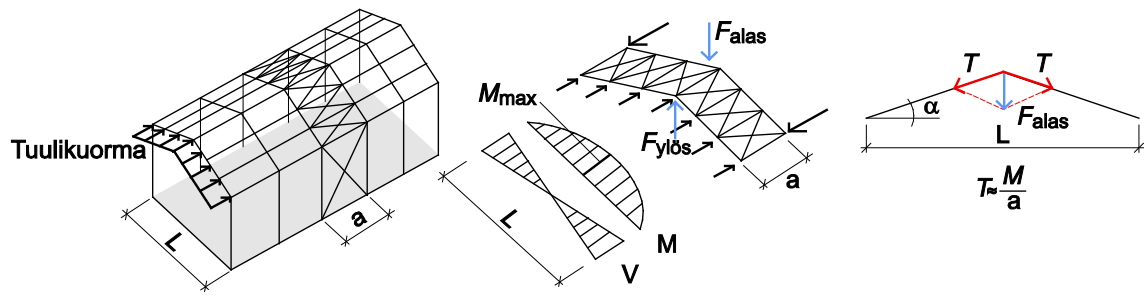
Suunnittelussa on otettava huomioon, että jäykistysrakenteet ovat harvoin vaakasuorassa tasossa. Jos pääkannattajat ovat osa jäykistysrakenteita, voi pääkannattajien kulman muutoksesta aiheutua kuormia, jotka pitää ottaa huomioon. Esimerkiksi kuvan 13-49 mukaisesti vaakavoimasta syntyy harjakaton harjalla tuulen puolelle nostava voima ja vastakkaiselle puolelle alaspäin suuntautuva voima.



KUVA 13-49

Harjakaton geometrian muutoksesta aiheutuvat voimat.

Nämä voimat voivat vaikuttaa pääkannattajien mitoittamiseen. Kuvassa 13-50 esitettyä mallia voi käyttää harjakaton harjalle syntyvien alas- ja ylöspäin suuntautuneiden voimien arvioimiseen.



KUVA 13-50

Harjakaton harjalle syntyvien alas- ja ylöspäin suuntautuneiden voimien arvioiminen.

Alas- ja ylöspäin suuntautuvat voimat voidaan laskea yhtälöstä

$$F_{up} = |F_{down}| \approx 2 \cdot \frac{M}{a} \cdot \sin \alpha$$

13-14

missä M on tuuliristikon suurin tuulikuormasta aiheutunut taivutusmomentti. Alas- ja ylöspäin suuntautuvat voimat kasvavat sitä suuremmiksi mitä jyrkempi katto on.

Monimutkaisemmat rakenteet suositellaan analysoitavaksi kolmiulotteisina, etenkin silloin kun katon kaltevuus on suuri, jotta geometrian muutosten vaikutukset voidaan ottaa huomioon.

14	LIITOKSET	2
14.1	Yleiskatsaus	2
14.2	Mitoitusperiaatteita	3
	Yleistä	3
	Staattiset mallit, pääakselit ja epäkeskeisyys	3
	Kosteuden ja kuormitusajan vaikutus	4
	Halkeaminen	5
	Teräsosien murtuminen	9
14.3	Pilarin alapää	12
	Nivelellinen pilarin alapää	12
	Jäykästi kiinnitetty pilarin alapää	16
14.4	Palkin liittyminen pilariin	21
	Vinoruuviiliitos	21
	Hitsattu palkkikenkä	22
14.5	Palkin liittyminen palkkiin	23
	Ripustettu palkkikenkä rakenteen pinnassa olevin levyin	24
	Toispuoleisesti ripustettu palkkikenkä	24
	Palkin sivuun asennettu palkkikenkä	25
14.6	Pilarin yläpää	26
	Teräslevyjen avulla tehty liitos	26
	Liimaruuviliitos	30
	Loveukseen upotetut palkit	30
14.7	Jatkokset	31
14.8	Vetotangon kiinnitys	33
14.9	Ristikkojen nurkat	35

14 LIITOKSET

Liitokset ovat usein rakenteen heikoin kohta joka määrää koko rakenteen kestävyys. Huonosti suunnitellut liitokset voivat aiheuttaa rakenteen murtumisen hauraasti. Haurasta murtumista pitää välttää – rakenne pitää suunnitella siten että se varoittaa selvästi ennen sortumista. Liitokset mitoitetaan sen vuoksi siten, että niissä tapahtuu suuria ja näkyviä teräksen myötämisen aiheuttamia muodonmuutoksia ennen lopullista sortumaa.

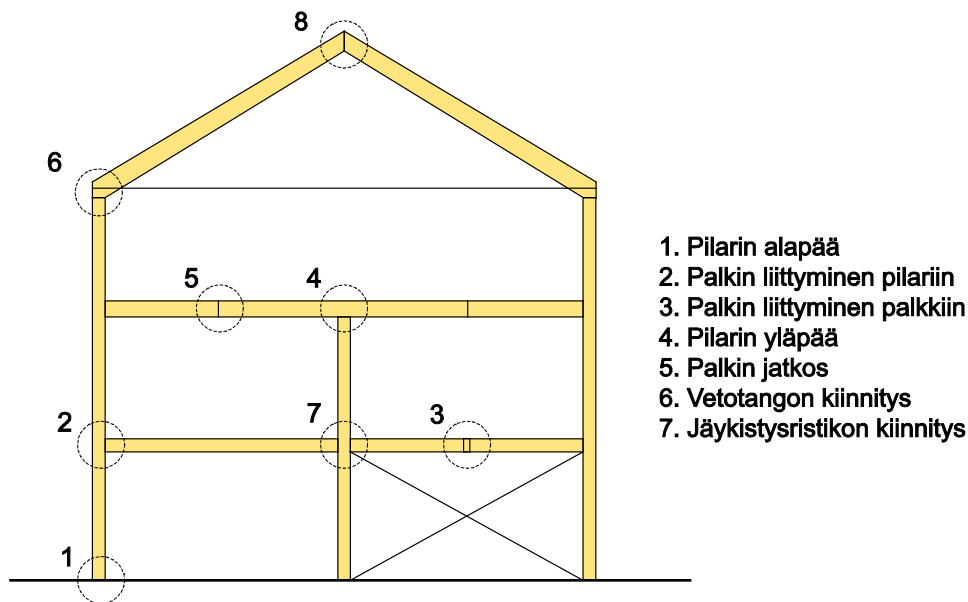
Uuseimmissa liimapuurakenteiden liitoksissa käytetään teräslevyjä tai teräksisiä liitososia, jotka kiinnitetään nauloin, ruuvein tai vaarnoin. Nykyisin käytetään sekä liitoksissa että rakenteiden vahvistamiseen myös itseporautuvia puuruuveja sekä liimaruuveja.

Puurakenteiden mitoittaminen vaatii suunnittelijalta yleensä enemmän osaamista kuin muista materiaaleista tehtyjen rakenteiden suunnitteleminen. Suunnittelijan pitää ottaa huomioon kuorman aikaluokka, käyttöluokka ja rasituksen suunta puun syden suunnan suhteen. Puurakenteiden liitosten mitoituksessa on erityisen tärkeää että suunnittelija ymmärtää puun ortotrooppisen ja hygroskooppisen luonteen.

Kappaleessa 14.1 esitellään lyhyesti puurakenteissa esiintyviä liitoksia. Kappaleessa 14.2 käsitellään puurakenteiden liitosten yleisiä näkökohtia ja esitellään muutamia yleisiä teräsosien mitoitusperiaatteita. Erityyppiset liitokset esitellään sitten yksityiskohtaisemmin kappaleissa 14.3 – 14.9. Näissä esitetään kuinka liitokset voidaan mallintaa ja kuinka ne siirtävät voimia. Esimerkit eivät ole varsinaisia mitoitus esimerkkejä, vaan niitä esitetään Liimapuukäsikirjan osassa 3.

14.1 Yleiskatsaus

Rakenteissa tarvitaan useita erilaisia liitoksia, joista kuva 14-1 esittää yksinkertaisen pilari-palkkirungon tavallisimmat liitokset.



Kuva 14-1

Tyypillisiä pilari-palkkirungossa tarvittavia liitoksia.

Jokainen liitostyyppi voidaan mitoittaa useammalla tavalla. Teknisen kehityksen myötä syntyy uusia liitostyyppiejä. Seuraavassa esitellään liitostyyppit lyhyesti ja niiden mitoittaminen kuvataan yleisesti. Yksityiskohtaisia mitoitus esimerkkejä on Liimapuukäsikirjan osassa 3.

Taloudellisista syistä olisi suositeltavaa käyttää varastotavarana myytäviä liitososia, teräslevyjä ja liittimiä. Liimapuurakenteiden liitososat ovat kuitenkin usein niin suuria että niitä ei ole valmiina varastossa, vaan ne on erikseen tilattava. Nämä voivat olla huomattavasti kalliimpia kuin vakio-osat.

14.2 Mitoitusperiaatteita

Yleistä

Koska liitos usein on rakenteen heikoin kohta, niin suunnittelijan pitää paneutua sen staattiseen toimintaan. Liitosten suunnittelu ei ole pelkkää laskemista, vaan suunnittelijan pitää ymmärtää kuinka liitos välittää voimia ja muotoilla liitos niin, että se voi toimia aiotulla tavalla.

Liitosta mitoittaessaan suunnittelijan pitää ensinnäkin laskea liitoksen voimasuureet. Nämä voimasuureet pitää siirtää liitoksen liittimien avulla. Jotta yksittäisen liittimen kestävä voimaa ei aliarvioitaisi, niin näissä molemmissa vaiheissa on käytettävä oikeita staattisia malleja.

Puu on hygroskooppinen materiaali, jolla on suuret kosteusliikkeet. Metalliosia sisältävää liitosta mitoittaessa pitää ottaa huomioon, että puun turpoamisen ja kutistumisen pitää voida tapahtua vapaasti aiheuttamatta liian suuria pakkovoimia.

Puun lujuus syitä vastaan kohtisuoraan on pieni. Siksi tämän suuntaisia jännityksiä pitää välttää mahdollisimman paljon.

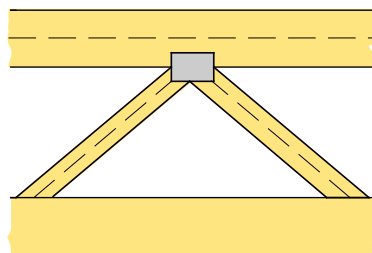
Liitoksen metalliosat kestävät yleensä sekä korroosiota että paloa huomattavasti paremmin kuin itse puuaines.

Liitoksessa tarvittavien liittimien reiät ja kiinnikkeiden urat ja muut työstöt heikentävät liimapuupoikkileikkausta, mikä on otettava huomioon mitoituksessa.

Staattiset mallit, pääakselit ja epäkeskeisyys

Liitoksella tarkoitetaan niitä voimia siirtäviä pieniä rakennusosia, joiden tarkoituksena on kiinnittää yhteen suurempia rakennusosia. Yhteen kiinnitettävät rakennusosat, kuten palkit ja pilarit, mitoitetaan tavallisesti yksinkertaisten yksidimensionaalisten rakennemallien mukaisesti, esimerkiksi palkkiteorian avulla. Näissä tapauksissa malli (esimerkiksi rakennelaskelmiin käytettävän tietokoneohjelman palkkielementti) ja todellinen rakenneos (liimapuupalkki) vastaavat selkeästi toisiaan. Mitoituksessa käytettävät mallit edellyttävät tiettyjen perusedellytyksien täyttyvän, jotta saadaan riittävän tarkka tulos. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että palkin on oltava riittävän hoikka, jotta voidaan käyttää perinteistä palkkiteoriaa, tai että hoikista sauvoista kootun ristikon nurkka voidaan olettaa niveleksi. Jos nämä edellytykset eivät todellisuudessa täyty, niin mallien antama laskentatulos ennustaa huomattavasti rakenteen käyttäytymisen. Jos esimerkiksi ristikon diagonaalin tappivaarnaliitoksen pituus on suuri diagonaalin pituuteen verrattuna, niin diagonaalin nurjahduskuorman arvioiminen voi olla vaikeaa.

Rakenteen osien pääakseleiden pitää yleensä yhtyä mallintavien elementtien painopiste-
viivoihin. Sitä paitsi niiden risteyskohtaan oletetaan yleensä joko nivel tai momenttijäykä liitos. Suuressa liitoksessa voi syntyä suuria momenttirasituksia, ja sitä ei enää voida pitää nivelenä. Huonosti suunnitellussa liitoksessa voi syntyä momenttirasituksia epäkeskeisyyden vuoksi, eikä sitä voi mallintaa kitkattomana momenttia siirtämättömänä nivelenä, missä pääakselit leikkaavat toisensa, riippumatta itse liitoksen todellisesta jäykkyydestä.



KUVA 14-2

Katkoviivoin esitettyihin pääakseleihin nähden epäkeskeinen liitos.

Kosteuden ja kuormitusajan vaikutus

Puun suuret kosteusliikkeet pitää ottaa huomioon liitosten mitoituksessa. Kosteusliikkeitä syntyy puun kuivuessa ensimmäistä kertaa, mutta myös ilman suhteellisen vuodenaikaisvaihtelun vuoksi. Suurissa liitoksissa on usein metalliosia, joiden muoto ei muutu kosteuden vaihdelta. Huonosti muotoiltu liitos voi siten aiheuttaa puuhun suuria lisäjännityksiä. Koska puun vetojännitys syitä vastaan kohtisuoraan on verrattain pieni, niin puu voi haljeta kuivuesaan.

Normaalisti käytössä olevat mitoitusmenetelmät eivät ota tätä huomioon. Kappaleissa 6.2.2 ja 2.3.2 esiteltyt muunnoskertoimet k_{def} ja k_{mod} ottavat huomioon, että lujuus pienenee ja muodonmuutos kasvaa kun puun kosteussuhde kasvaa. Vastaavasti ne ennustavat suurempaa lujuutta kun kosteussuhde pienenee. Estetyn kosteuselämisen aiheuttama halkeamisriski pitää ottaa huomioon toisella tavalla. Yleensä on hyvin vaikea laskea halkeamisen aiheuttavien pakkovoimien suuruutta. Siksi on tarpeen tutkia huolellisesti liitoksen geometristä muotoilua ja osien yhteisvaikutusta.

Tarkastellaan esimerkiksi liimapuupalkin kutistumista ja turpoamista. Pituuden kokonaismuutos on

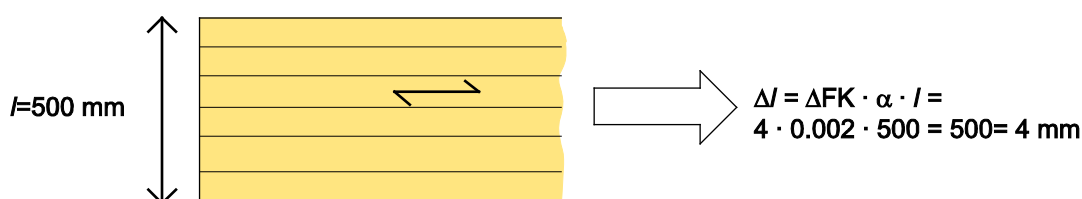
$$\Delta l = \Delta MC \cdot \alpha \cdot l$$

14-1

Δl	mitan pituudenmuutos
ΔMC	kosteussuhteen muutos
l	alkuperäinen mitta

Laajenemiskertoimen tyypilliset arvot ovat noin $\alpha=0.0001$ syiden suunnassa ja $\alpha=0.002$ syitä vastaan kohtisuoraan, kun kosteussuhde muuttuu yhden prosentin.

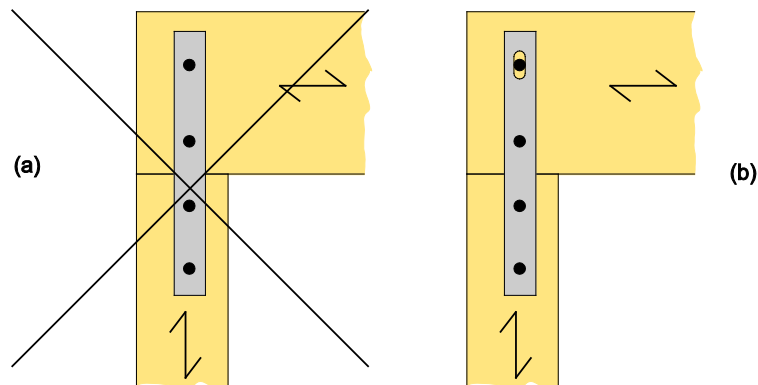
$\Delta MC = 4 \%$ (esimerkiksi 14 prosentista 10 prosenttiin)



KUVA 14-3

Liimapuupalkin kutistuminen kun se kuivuu.

Kosteuseläminen on siten suurin syitä vastaan kohtisuoraan, samassa suunnassa missä myös lujuus on pienin. Siksi pitää välttää liitoksia, joissa kosteuseläminen on estetty ja aiheutuu pakkovoimia syitä vastaan kohtisuoraan. Esimerkki tästä on kuvassa 14-4.



KUVA 14-4

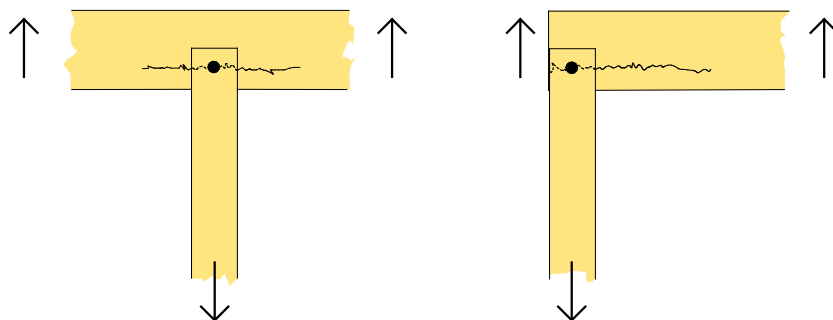
(a) Kosteuseläminen syitä vastaan kohtisuoraan aiheuttaa liitoksessa olevalle palkille pakkovoimia. (b) Tämä liitos sallii kosteuselämisen syitä vastaan kohtisuoraan.

Halkeaminen

Puulla on rakenteensa vuoksi hyvin erilainen lujuus eri suunnissa. Lujuus syitä vastaan kohtisuoraan on noin sadasosa syiden suuntaisesta lujuudesta. Suurten lujuuserojen lisäksi murtumistavat ovat erilaiset. Vetojännitysten aiheuttama murtuminen on yleensä hauras tai hyvin hauras, kun taas puristusjännitysten aiheuttama murtuminen on joskus jopa siinä määrin sitkeä, että murtumiskriteerinä käytetään muodonmuutosta.

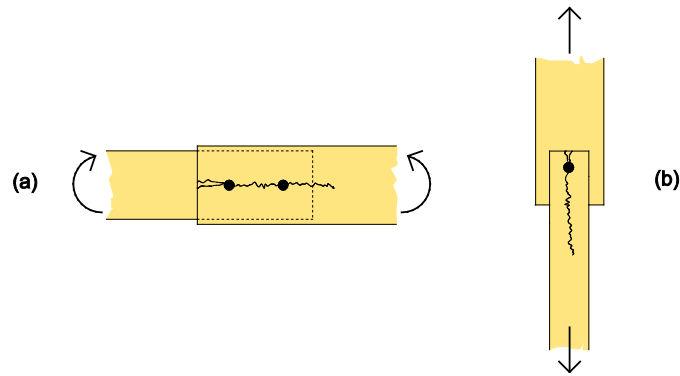
Puuaine on heikointa vedossa syitä vastaan kohtisuoraan ja sellaista rasitusta pitää välttää. Alla olevat kuvat esittävät tilanteita, missä syntyy vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Halkeamisriski on ilmeinen, kun liitin aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan; tällainen esimerkki esitetään kuvassa 14-5.

Momentin rasittamat liitokset voivat myös haljeta hauraasti, jos yksittäiseen liitimeen syntyy syitä vastaan kohtisuora voimakomponentti. Puhtaassa syiden suuntaisessa vetorastituksessakin voi olla halkeamisriski, jos liitimen jäykkyys on sopimaton puun paksuuteen ja liitimen päätyetäisyyteen nähden (katso kuva 14-6).



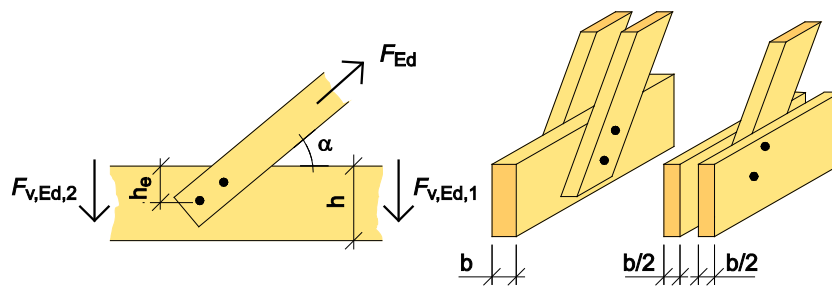
KUVA 14-5

Vetojännitykset syitä vastaan kohtisuoraan voivat aiheuttaa puuaineen halkeamisen.



KUVA 14-6

(a) Momenttirasitus aiheuttaa vetoa syitä vastaan kohtisuoraan. (b) Syiden suunnassa vetorasitetussa liitoksessa on huonon liitossuunnittelun aiheuttama halkeamisriski.



KUVA 14-7

Vinosti syitä vastaan olevan kuormituksen aiheuttama halkeaminen.

Halkeamisriski pitää tarkistaa aina kun puulle tulee vetoa syitä vastaan kohtisuoraan. Eurokoodi 5:n luvun 8.1.4 mukaan pitää kuvan 14-7 tilanteessa täyttyä seuraava mitoitusehto:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \text{ missä } F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad 14-2$$

$F_{v,Ed}$ kuvan 14-7 mukaisen liitoksen jommankumman puolen leikkausvoiman mitoitusarvo

$F_{90,Rd}$ kestävyys mitoitusarvo joka on laskettu ominaisarvosta $F_{90,Rk}$ yhtälön 14-3 mukaisesti

$$F_{90,Rk} = 14b \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad 14-3$$

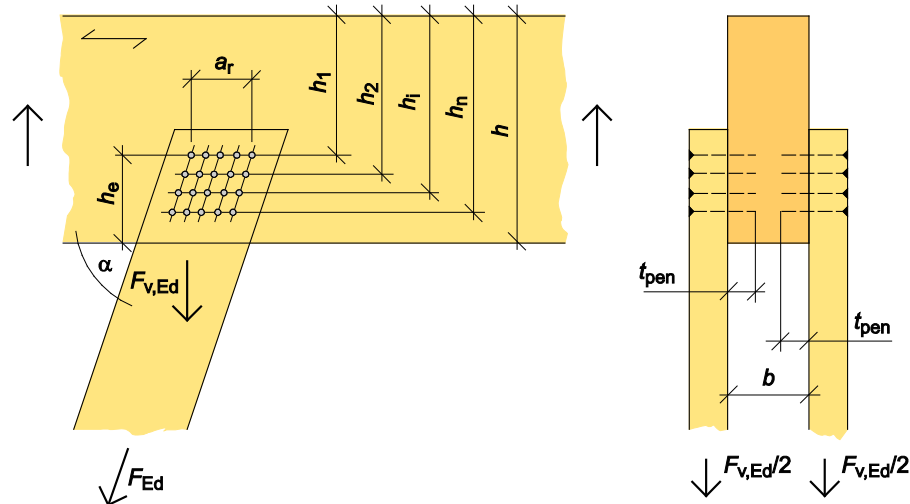
$F_{90,Rk}$ kestävyys ominaisarvo N

h_e kuormitetun reunan etäisyys kauimpana sijaitsevan liittimen painopisteestä mm

h puuosan korkeus mm

b puuosan leveys mm

Edellä esitetty eurokoodi 5:ssä esitetty menettely ei ota huomioon useamman syiden suunnassa perättäisen liittimen vaikutusta tilanteessa, missä syntyy vetoa syitä vastaan kohtisuoraan. Eurokoodi 5:n Saksan kansallinen liite esittää vaihtoehtoisen menettelyn, jolla voidaan käsitellä sellaisia kuvasta 14-7 puuttuvia liitoksia (esimerkiksi liitoksia missä on useampia liitinrivejä syiden suunnassa siinä kappaleessa joka kuormittuu syitä vastaan kohtisuoraan).



KUVA 14-8

Halkeamistarkastelussa tarvittavia suureita.

Kuvan 14-8 mukaisesti kulmassa α syiden suuntaan nähden vaikuttavan voiman rasittaessa poikkileikkaukseltaan suorakulmaista puuosaa voidaan osan halkeamista tarkastella kohtien 1-8 mukaisesti.

1. Liitosta missä $h_e/h > 0,7$ ei tarvitse erityisesti tarkistaa. Liitosta missä $h_e/h < 0,2$ saa kuormittaa vain lyhytaikaisesti (esimerkiksi tuulikuorman aiheuttamalla vetovoimalla).
2. Liitoksen missä $h_e/h \leq 0,7$ pitää täyttää seuraava ehto

$$F_{v,Ed} / F_{90,Rd} \leq 1,0 \quad 14-4$$

missä

$$F_{90,Rd} = k_s \cdot k_r \cdot (6,5 + 18 \cdot h_e^2 / h^2) \cdot (t_{ef} \cdot h)^{0,8} \cdot f_{t,90,d} \quad 14-5$$

$$k_s = \max\{1; 0,7 + 1,4 \cdot a_r / h\} \quad 14-6$$

$$k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i} \right)^2} \quad 14-7$$

$F_{v,Ed} = F_{Ed} \cdot \sin \alpha$ voiman vetojännityksiä aiheuttava komponentti
 $F_{v,Ed}$ voiman syitä vastaan kohtisuoran komponentin suunnitteluarvo N
 $F_{90,Rd}$ rakennusosan kestävyys halkeamista vastaan N
 $f_{t,90,d}$ vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan, suunnitteluarvo N/mm²
 k_s kerroin jonka avulla otetaan huomioon syidensuuntaisten liitinrivien liittimen keskinäinen etäisyys

k_r	kerroin jonka avulla otetaan huomioon, että liitinrivejä on useampi kuin yksi, liimaruuveilla $k_r = h / (h - h_e)$
h_e	kuormitetun reunan etäisyys kauimpana olevaan liittimeen mm; liimaruuveilla h_e on etäisyyden projektio $l_{ad} \cdot \sin \alpha$
a_r	liitinrivin uloimpien liittimien keskiöiden välinen etäisyys syiden suunnassa, saman rivin muiden liittimien välinen keskinäinen etäisyys ei saa olla suurempi kuin $0,5 \cdot h$ kun kappaletta rasitetaan syitä vastaan kohtisuoraan
h	palkin korkeus mm
t_{ef}	liittimen tehollinen tartuntapituus mm, määritelty alempana
n	liitinrivien lukumäärä
h_i	kuormittamattoman reunan etäisyys tarkasteltavasta liitinrivistä

Liitokset joissa $a_r/h > 1,0$ ja $F_{v,Ed} > 0,5 \cdot F_{90,Rd}$ pitää vahvistaa.

3. Jos liitoksessa on vinosauva keskellä tai rakennusosan kummallakin puolella, niin on otettava huomioon ehdot

$t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 24 \cdot d\}$	nauloin tai puuruuvein tehdyissä liitoksissa missä puu on puuta tai puulevyä vasten
$t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 30 \cdot d\}$	naulaliitoksissa missä teräs on puuta vasten
$t_{ef} = \min\{b; 2 \cdot t_{pen}; 12 \cdot d\}$	vaarna- tai ruuviliitoksissa
$t_{ef} = \min\{b; 100 \text{ mm}\}$	rengas-, lautas- tai hammasvaarnaliitoksissa
$t_{ef} = \min\{b; 6 \cdot d\}$	liimaruuviliitoksissa

b	palkin leveys mm
d	liittimen halkaisija mm
t_{pen}	liittimen tunkeuma

4. Jos liitoksessa on vinosauva vain rakennusosan toisella puolella, niin on otettava huomioon ehdot

$t_{ef} = \min\{b; t_{pen}; 12 \cdot d\}$	nauloin tai puuruuvein tehdyissä liitoksissa missä puu on puuta tai puulevyä vasten
$t_{ef} = \min\{b; t_{pen}; 15 \cdot d\}$	naulaliitoksissa missä teräs on puuta vasten
$t_{ef} = \min\{b; t_{pen}; 6 \cdot d\}$	vaarna- tai ruuviliitoksissa
$t_{ef} = \min\{b; 50 \text{ mm}\}$	rengas-, lautas- tai hammasvaarnaliitoksissa

5. Jos rakenneosassa on useampia liitinryhmiä, niin kestävyys halkeamista vastaan voidaan laskea yhtälöstä 14-4 edellyttäen että liitinryhmien vapaa väli syiden suunnassa on suurempi kuin $2 \cdot h$.

6. Liitinryhmiä joiden vapaa väli syiden suunnassa on pienempi kuin $0,5 \cdot h$ pitää tarkastella yhtenä ryhmänä.

7. Jos liitinryhmien vapaa väli syiden suunnassa on suurempi kuin $0,5 \cdot h$ mutta pienempi kuin $2 \cdot h$, pitää yhtälön 14-4 mukaisesti määritettyä kestävyyttä pienentää kertoimella k_g

$$k_g = l_g / (4 \cdot h) + 0,5$$

14-8

l_g vierekkäisten liitinryhmien vapaa väli syiden suunnassa 8.

Jos rakenneosassa on useampi kuin yksi liitinryhmä matkalla $l_g \leq 2 \cdot h$, ja kunkin liitinryhmän voiman syitä vastaan kohtisuoran komponentin suunnitteluarvo, $F_{v,Ed}$, on suurempi kuin puolet rakennusosan kestävydestä halkeamista vastaan, $F_{90,Rd}$, pienennettynä kertoimella k_g , niin rakennusosa pitää vahvistaa. Tämä koskee myös liitoksia joissa liitosryhmän vapaa väli ulokepalkin päästä on pienempi kuin palkin korkeus h , jos $F_{v,Ed} > 0,5 \cdot F_{90,Rd}$.

Hyvin yksinkertaisissakin liitoksissa on halkeamisriski, kun niitä kuormittaa samanaikainen normaalivoima, leikkausvoima ja momentti. Tällaisen yksinkertaisen liitoksen mitoittamiseksi pitää jokaiselle yksittäiselle liittimelle laskea oma kestävyys, sillä jokaisen liittimen kohdalla voiman suunta syiden suuntaan nähden on erilainen. Voiman suunta määrää mitä reunapuristuslujuuden arvoa yhtälöissä käytetään (eurokoodi 5 luku 8.5.1). Annetut arvot eivät kuitenkaan ota huomioon halkeamista. Sen vuoksi on epäselvää kuinka tätä riskiä pitäisi arvioida momenttirasitetuissa liitoksissa, missä on useampia vaarvoja. Mahdollisesti yllä olevia yhtälöitä voisi käyttää liitoksen jokaiselle tappivaarnalle erikseen.

Teräsosien murtuminen

Eurokoodi 5 edellyttää että liitoksen teräsosien kestävyys pitää tarkistaa teräsrakenteiden suunnittelustandardin eurokoodi 3 mukaan. Teräsosien kestävyys voi ylittyä vedon, puristuksen, leikkauksen, taivutuksen tai näiden yhdistelmän vuoksi, tai puuosien reunapuristuslujuus voi ylittyä. Reunapuristumurtumaa ei tarkastella jatkossa, sillä tavanomaisesti käytetyt levy-paksuudet ja liitinkoot on valittu niin että reunapuristuslujuuden ylittymisriski on hyvin harvinaisen.

Teräslevyn murtuminen vedosta

Vetomurtuma pitää tarkastella sekä koko teräsosan poikkileikkauksen että nettopoikkileikkauksen osalta. (Nettopoikkileikkaus on se osa poikkileikkausta joka jää jäljelle kun liittimien reiät vähennetään.) Näistä pienempi kestävyysarvo on mitoittava.

Koko poikkileikkauksen kestävyys $N_{pl,Rd}$ on

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}} \quad 14-9$$

Nettopoikkileikkauksen kestävyys $N_{u,Rd}$ on

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_u \cdot A_{net}}{\gamma_{M2}} \quad 14-10$$

f_y	teräksen myötöraja
f_u	teräksen vetomurtolujuus
A	teräslevyn poikkileikkauksen koko pinta-ala
A_{net}	teräslevyn poikkileikkauksen nettopinta-ala (reikäriivin kohdalla)
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$
γ_{M2}	materiaalin osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen, $\gamma_{M2} = 1,25$

Teräslevyn murtuminen puristuksesta

Jos paikallista lommahdusta ei tapahdu niin teräslevyn kestävä puristava voima $N_{c,Rd}$ on

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad 14-11$$

f_y teräksen myötöraja
 A teräslevyn poikkileikkauksen koko pinta-ala
 γ_{M0} materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$

Liittimien täyttämien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon. Teräslevyn lommahdusta ei tarvitse tarkistaa jos liittimien välinen etäisyys a_1 on pienempi kuin

$$a_1 \leq 9t \cdot \varepsilon = 9t \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad 14-12$$

Jos tämä ehto ei täyty niin lommahdus pitää tarkistaa. Levyn katsotaan silloin toimivan puristettuna pilarina, jota tarkastellaan Eulerin nurjahdussääntöjen mukaan. Nurjahduspituudeksi oletetaan $0,6 a_1$.

Teräslevyn murtuminen taivutuksesta

Jos koko poikkileikkaus plastisoituu täydellisesti niin teräslevyn kestävä taivutusmomentti $M_{c,Rd}$ on

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad 14-13$$

W_{pl} teräslevyn plastinen taivutusvastus (selitetty jäljempänä)
 f_y teräksen myötöraja
 γ_{M0} materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$

Teräslevyn plastinen taivutusvastus määritellään täysin plastisoituneen poikkileikkauksen kestävyden avulla (katso kuva 14-9)

$$M_{pl} = \int_A \sigma z dA = W_{pl} f_y \quad 14-14$$

Suorakulmaisen poikkileikkauksen kestävä taivutusmomentti on kuvan 14-9 mukaisella jännitysjakautumalla

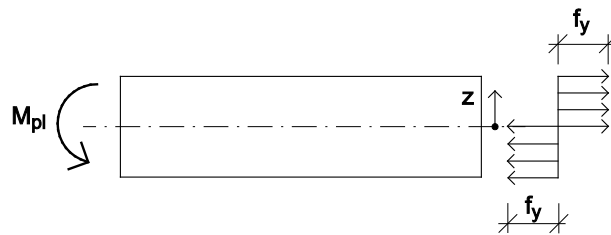
$$M_{pl} = 2 \cdot f_y b \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4} = \frac{f_y b h^2}{4} \quad 14-15$$

h poikkileikkauksen korkeus
 b poikkileikkauksen leveys

Yhtälöistä 14-14 ja 14-15 saadaan

$$W_{pl} = \frac{bh^2}{4}$$

14-16



KUVA 14-9

Plastinen taivutusvastus määritellään täysin plastisoituneen poikkileikkauksen kestäjän taivutusmomentin avulla.

Vedetyllä alueella olevien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon jos seuraava ehto on voimassa

$$\frac{A_{net} \cdot 0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

14-17

f_u	teräksen vetomurtolujuus
A	teräslevyn poikkileikkauksen vetojännitysten rasittama koko pinta-ala
A_{net}	teräslevyn poikkileikkauksen vetojännitysten rasittama nettopinta-ala
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$
γ_{M2}	materiaalin osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen, $\gamma_{M2} = 1,25$

Liittimien täyttämien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon puristusjännitysten rasittamassa poikkileikkauksen osassa.

Teräslevyn murtuminen leikkauksesta

Täysin plastisoituneen poikkileikkauksen leikkauskestävyys voidaan laskea yhtälöstä

$$V_{c,Rd} = V_{pl} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

14-18

missä

f_y	teräksen myötöraja
A_v	teräslevyn poikkileikkauksen leikkausrasitettu pinta-ala
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$

Jännitysten yhteisvaikutus

Kun teräslevyä rasittavat samanaikaiset normaalivoimat ja leikkausvoimat niin käytetään mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$

14-19

$\sigma_{x,Ed}$	teräslevyn pituussuuntaisen normaalijännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{z,Ed}$	teräslevyn poikkisuuntaisen normaalijännityksen mitoitusarvo
τ_{Ed}	leikkausjännityksen mitoitusarvo
f_y	teräksen myötöraja
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_{M0} = 1,0$

Tämä yksinkertaistettu ehto on varmalla puolella, koska se ei pelkästään ota huomioon plastisoitumisen suotuisia vaikutuksia. Teräslevyn kestävyys voidaan arvioida realistisemmin käyttämällä muita poikkileikkauksessa vaikuttavien voimasuureiden (normaalivoima N , leikkausvoima V ja momentti M) vuorovaikutusyhtälöitä. Tällaisia yhtälöitä voidaan soveltaa myös riittävästi poikkileikkauksille, jos käytetään poikkileikkauksen nettopinta-alaa ja taivutusvastuksen nettoarvoa (pienennetty arvo minkä laskennassa reiät on otettu huomioon).

14.3 Pilarin alapää

Liimapuurakenteiden pilarit kiinnittyvät perustuksiin joko nivelellisesti (kiinnitys ei siirrä momenttia) tai jäykästi (kiinnitys siirtää momenttia). Kiinnitystavan valinta vaikuttaa sekä pilarin mitoitukseen että perustuksen mitoitukseen. Pilari voidaan kiinnittää monin tavoin, esimerkiksi valamalla kiinnikkeet betoniin tai hitsaamalla ne betoniin valettuun kiinnityslevyyn. Kolmas vaihtoehto on käyttää kiila-ankkureita tai injektioankkureita. Erilaisten betonikiinnikkeiden mitoitusta ei käsitellä lähemmin. Yleensä ne pitää mitoittaa betonirakenteiden suunnittelustandardin eurokoodi 2:n mukaan.

Pilarin pää pitää erottaa betonista, tiilistä, kevytsoraharkkoista ja muista hygroskooppisista aineista kosteuden siirtymisen estävällä eristeellä, esimerkiksi 3,2 mm paksulla öljykarkaistulla kovalevyllä joka naulataan ja liimataan pilarin pätyyn, tai bitumihuovalla. Jos pilarit ovat jatkuvasti alttiina vedelle esimerkiksi ulkona tai uimahalliolosuhteissa niin ne pitää kiinnittää perustuksiin siten, että ne ovat suojassa kosteudelta ja voivat mahdollisesti kastuessaan kuivua nopeasti.

Kiinnitys tehdään usein pilarin molemmiin puoliin sijoitetuin naulatuin tai ruuvatuin teräslevyin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pilarikenkää, jolloin vältetään pilarin kosketus alustansa. Jos esteettisistä tai paloteknisistä syistä halutaan piiloliitos, niin voidaan käyttää esimerkiksi liimaruuviliitosta.

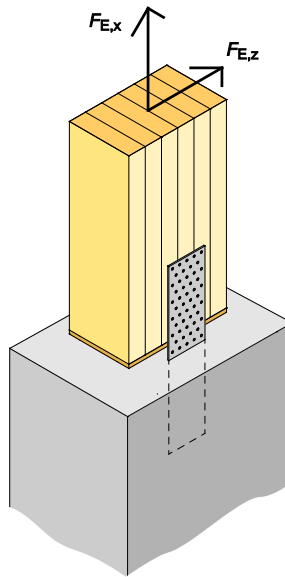
Liitososat toimitetaan irtonaisina paitsi liimaruuvit, jotka aina liimataan paikoilleen liimapuutehtaassa. Ruuvien reiät pitää mieluiten porata asennettaessa, jolloin voidaan välttää asennusongelmia erityisesti silloin, kun osat on valettu kiinni betonirakenteeseen.

Nivelellinen pilarin alapää

Nivelellinen pilarin alapää siirtää vaakasuoria ja pystysuoria voimia. Periaatteessa nivelellinen kiinnitys ei siirrä taivutusmomenttia. Jonkin verran taivutusmomenttia siirtävä liitos helpottaa kuitenkin pilarin asentamista. Liitos pitää suunnitella siten, että pilarin kulman muutos on mahdollinen, sillä kaikki pakkovoimat voivat aiheuttaa halkeamisen.

Teräslevyjen avulla tehty liitos

Yksinkertaisin ja tavallisin pilarin kantanivel muodostuu kahdesta teräslevystä, jotka kiinnitetään kuvan 14-10 mukaisesti pilarin leveämpää sivua vasten nauloin tai ruuvein. Tällainen liitos sopii sekä suurien että pienien vaakavoimien siirtämiseen.



KUVA 14-10

Kahden teräslevyn avulla tehty pilarin alapään nivel. Kaavamainen esitys. Teräslevyt voidaan kiinnittää naulojen tai ruuvein.

Rei'itettyjen teräskiinnikkeiden valmistajilta voidaan tilata teräslevykiinnikkeitä, joiden rei'itys, paksuus ja pintakäsittelyt ovat halutunlaiset. Edullisimpien levyjen reiät on stanssattu, jolloin levyn paksuus ei saa ylittää reiän halkaisijaa. Reiän halkaisijan pitää olla noin 1 mm käytettävän liittimen halkaisijaa suurempi.

Tämän tyyppinen liitos siirtää pystysuoria puristusvoimia pilarin pään ja perustuksen välisen kosketuspaineen avulla. Vaakavoima $F_{E,z}$ ja mahdollinen pystysuora vetovoima $F_{E,x}$ siirtyy naulojen avulla teräslevylle, joka siirtää ne perustuksille. Teräslevyn oletetaan toimivan perustuksiin jäykästi kiinnitettynä ulokkeena.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- pilarin naulakiinnityksen murtuminen leikkautumalla
- lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- halkeaminen
- teräslevyn murtuminen momentista, normaalivoimasta ja leikkausvoimasta (sekä koko poikkileikkaus että nettopoikkileikkaus)
- teräslevyn nurjahtaminen normaalivoimasta.

Vaakavoiman ja mahdollisen pystysuoran vetovoiman oletetaan vaikuttavan naularyhmän painopisteessä. Voimien resultantti F_E on

$$F_E = \sqrt{F_{E,x}^2 + F_{E,z}^2} \quad 14-20$$

Eurokoodi 5:n mukaan halkaisijaltaan pienempien kuin 8 mm naulojen kestävyys ei ole riippuvainen voiman vaikutussuunnasta. Kestävyys liittintä kohti voidaan laskea eurokoodi 5 luvun 8.3 mukaan. Tarvittava naulamäärä n on siten

$$n = \frac{F_E}{F_{v,Rd}} \quad 14-21$$

Kun tarvittava naulamäärä on laskettu, niin naulat pitää sijoittaa liitokseen. Jos niiden keskinäiseksi etäisyydeksi valitaan vähintään $14 d$, niin rivin naulojen tehollista lukumäärää ei tarvitse rajoittaa (eurokoodi 5, taulukko 8.1). Vakionaulauslevyjä käytettäessä naulaväli on myös riippuvainen levyjen reikäkuviosta. Lohkeamismurtuminen tarkistetaan eurokoodi 5:n liite A:n mukaisesti. Halkeamista ei tarvitse tarkistaa, jos kauimpana pilarin reunasta olevan liittimen etäisyys reunasta on suurempi kuin 0,7 kertaa pilarin leveys. Muussa tapauksessa halkeaminen tarkistetaan eurokoodi 5 luvun 8.1.4 mukaisesti.

Teräslevyä rasittaa pystysuora ja vaakasuora voima. Sitä paitsi vaakavoiman epäkeskisyydestä aiheutuu kuvan 14-11 mukainen taivutusmomentti. Teräslevyn jäykästi kiinni olevassa poikkileikkauksessa vaikuttaa taivutusmomentti

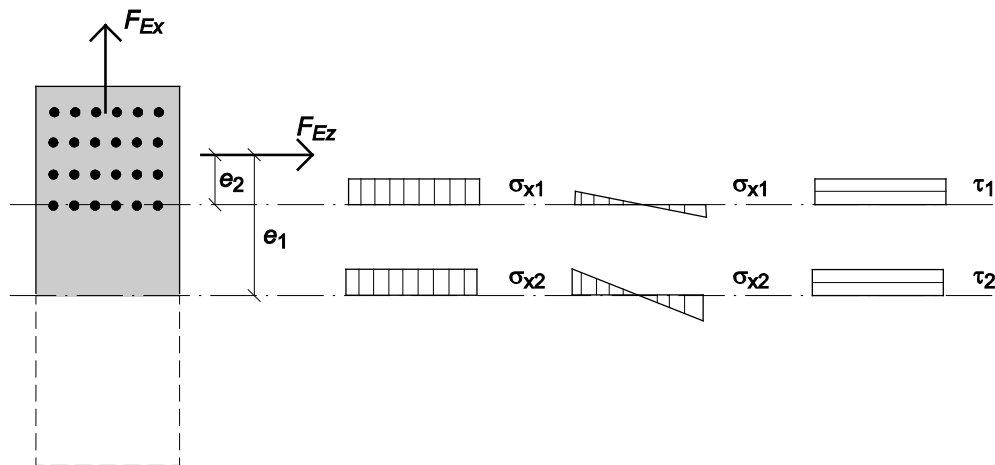
$$M_E = F_{E,z} \cdot e_1$$

14-22

Taivutusmomentti siinä reikärivissä missä vaikuttaa suurin rasitus on

$$M_E = F_{E,z} \cdot e_2$$

14-23



KUVA 14-11

Teräslevyn jännitysten jakautuminen.

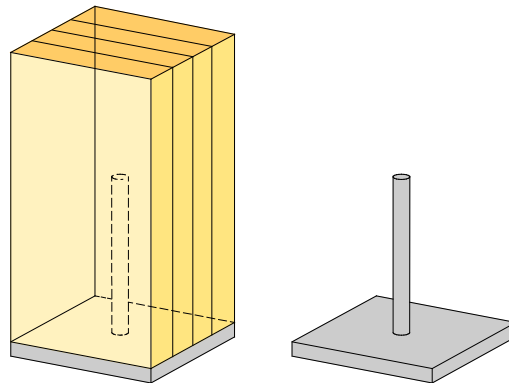
Teräslevyn eri leikkausten jännitykset lasketaan taivutusmomentista ja pystysuorasta ja vaakasuorasta voimasta. Näiden yhteisvaikutus otetaan huomioon kohdan 14.2.5 mukaisesti.

Jos teräslevy on ohut, niin sen nurjahtaminen pitää mahdollisesti tarkistaa. Jos liittimien väliset etäisyydet levyssä ovat sopivat, niin tätä ei tarvitse tehdä. Sen vuoksi teräslevyn reikien välisten etäisyyksien ja ensimmäisen reikärivin etäisyyden perustuksen pinnasta pitää olla enintään pienempi arvoista $14t$ tai 200 mm. Teräslevyn kiinnitys perustukseen pitää luonnollisesti myös tarkistaa. Jos levy valetaan betoniin, niin sen ja betonin välinen tartunta tarkistetaan. Jos se sen sijaan hitsataan kiinni betoniin valettuun kiinnityslevyyn, niin hitsiliitoksen kestävyys pitää tarkistaa.

Liimaruuviliitos

Nivelellinen pilarin alapää voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa kuvan 14-12 mukaisella liimaruuvilla. Tällaisen liitoksen etuna on sen huomaamattomuus ja hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia. Liimaruuveja ei pidä käyttää dynaamisille kuormille alttiissa rakenteissa eikä myöskään käyttöluokassa 3. Liimaus pitää tehdä liimapuutehtaassa erityisen valvonnan alaisena. Liimaruuvia käytetään usein perustuksiin ruuvattavan tai hitsattavan teräslevyn kanssa.

Tällainen kiinnitys sopii vain pilareille joita rasittaa pienet tai keskisuuret voimat. Liitos kestää hyvin vähän taivutusmomenttia, ja pilari pitää sen vuoksi tukea asennusvaiheessa.



KUVA 14-12

Liimaruuvien avulla tehty pilarin alapään nivel.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- ruuvien murtuminen
- ruuvien ulosveto
- puun leikkautuminen ruuvien vierestä
- puumateriaalin murtuminen (halkeaminen, murtuminen vedosta tai puristuksesta).

Eurokoodi 5 ei käsittele liimaruuviliitoksia. Suomessa liimaruuviliitoksille on käytössä vapaaehtoinen varmennustodistusmenettely. Liimaruuviliitosten varmennustodistuksen arviointiperusteissa todetaan, että niiden suunnittelussa käytetään eurokoodijärjestelmän kanssa yhteensopivia, testaamalla varmennettuja liitoksen suunnitteluohjeita. Tietyin edellytyksin voidaan käyttää esimerkiksi ohjeessa RIL 205-1-2009 "Puurakenteiden suunnitteluohje" esitettyä menettelyä. Vaihtoehtoisesti voidaan käytettävälle liitostyypille ja käyttötarkoitukselle laatia tuotekohtainen suunnitteluohje, jossa esitetty yksittäisen liimatangon- tai ruuvien tartuntalujuus on määritetty testaamalla.

Myös puumateriaalin murtuminen pitää tarkistaa. Murtuminen voi tapahtua syiden suuntaisesta vedosta tai puristuksesta, mutta liitos voi myös haljeta syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten vaikutuksesta, jos esimerkiksi ruuvien akseli ei ole syiden suunnassa.

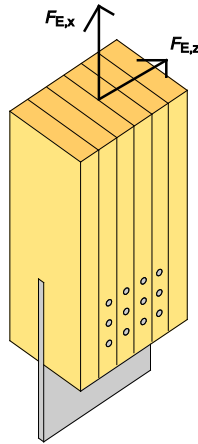
Tappivaarnaliitos

Lähes huomaamaton liitos saadaan myös käyttämällä uriin asennettuja tappivaarnoin kiinnitettyjä teräslevyjä. Teräslevyt hitsataan usein pohjalevyyn, joka puolestaan ruuvataan kiinni perustukseen. Liitoksella on hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia. Lisäksi liitoksella on esteettisiä etuja. Kuvan 14-13 mukainen liitos kestää jossain määrin taivutusmomenttia, mitä voidaan hyödyntää asennusvaiheessa.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- tappivaarnaliitoksen leikkautuminen
- lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- teräslevyn murtuminen momentista, normaalivoimasta ja leikkausvoimasta (sekä koko poikkileikkaus että nettopoikkileikkaus).

Vaarnaryhmän oletetaan kantavan nostavan voiman ja vaakavoiman. Mitoitus tehdään kuten on aikaisemmin esitetty. Jos liitoksessa on useampia teräslevyjä, niin käytetään eurokoodi 5:ssä olevia monileikkeisten liitosten yhtälöitä. Kuormituksen suunta syiden suuntaan nähden pitää ottaa huomioon käytettäessä paksumpia vaarnoja kuin 6 mm.



KUVA 14-13

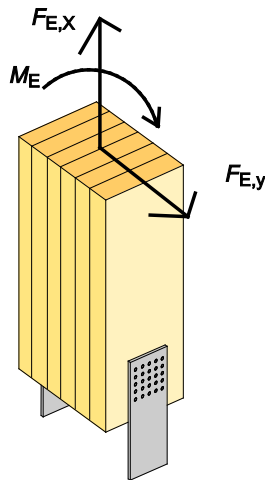
Tappivaarnaliitoksen avulla tehty pilarin alapään nivel.

Jäykästi kiinnitetty pilarin alapää

Jäykkä pilarin alapää on suunniteltava erityisen huolellisesti puun kosteusliikkeiden ja sen taiputuslujuuteen verrattuna pienen vetolujuuden vuoksi. Liitos voidaan tehdä teräslevyjen avulla, jotka kiinnitetään nauloin tai ruuvein pilariin. Liimaruuviliitosta voidaan käyttää, jos halutaan esteettisistä tai paloteknisistä syistä puun suojaamaa liitosta, mutta sellainen liitos sopii vain kiinnitysmomentin ollessa verrattain pieni. Jos kiinnitysmomentti on suuri, niin pitää käyttää teräslevyjen avulla tehtyä liitosta.

Teräslevyjen avulla tehty liitos

Tavallisimmin pilarin alapään jäykkä kiinnitys tehdään kahdesta teräslevystä, jotka kiinnitetään kuvan 14-14 mukaisesti pilarin kapeampaa sivua vasten nauloin tai ruuvein. Liitos on helppo tehdä, ja se sopii sekä suurien että pienen vaakavoimien siirtämiseen. Teräslevyt voidaan valaa kiinni betoniin tai hitsata betoniin valettuun kiinnityslevyyn. Liitos mitoitetaan samaan tapaan kuin vastaava nivelellinen pilarin alapää.



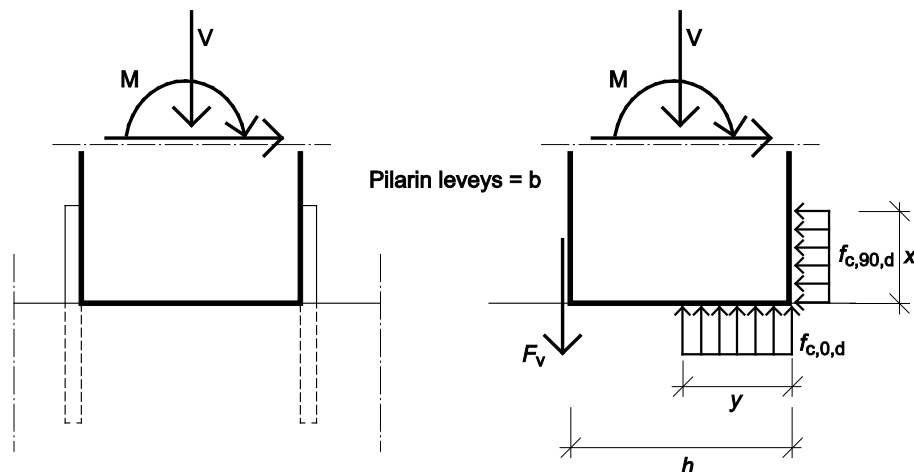
KUVA 14-14

Kahden teräslevyn avulla tehty pilarin alapään jäykkä kiinnitys.

Liitoksen laskentamalli on kuvien 14-15 ja 14-16 mukainen. Osassa 3 esitetään yksityiskohtainen laskentaesimerkki.

Liitos siirtää pystysuoran puristusvoiman pilarin pään ja perustuksen välisen kosketuspaineen avulla. Toinen teräslevy siirtää vetovoiman.

Pilarin pystyvoima $F_{E,x}$ siirtyy kosketuspaineen avulla, jos se on puristusta. Jos se on vetoa, niin liittimet siirtävät sen teräslevyille. Kiinnitysmomentti M_E siirtyy teräslevyille muodostuvan voimaparin avulla. Vaakavoima $F_{E,y}$ siirtyy kosketuspaineen välityksellä teräslevylle. Ohuet teräslevyt ovat alttiita lommahdukselle, ja sellaisessa tapauksessa taivutusmomentin puristuskomponentti siirtyy perustukselle kosketuspaineen avulla. Taivutusmomentin vetokomponentti siirtyy toiseen teräslevyyn syntyvän vetovoiman avulla (ja siirtyy teräslevyyn liittimien välityksellä).



KUVA 14-15

Kahden teräslevyn avulla tehty pilarin alapään jäykän kiinnityksen laskentamalli (puristava voima).

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- liitoksen leikkautuminen
- lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- teräslevyn murtuminen normaalivoimasta (sekä koko poikkileikkaus että nettopoikkileikkaus), myös lommahtaminen

- pilarin ja teräslevyn välinen kosketuspaine, jännitykset syitä vastaan kohtisuoraan
- pilarin ja perustuksen välinen kosketuspaine, jännitykset syiden suunnassa.

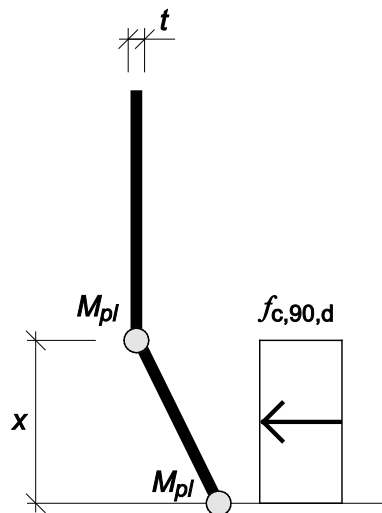
Kestävyys leikkautumista vastaan tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 8.3 mukaan. Teräslevyn kestävyys voidaan laskea kohdan 14.2.5 mukaan. Lisäksi pitää tarkistaa liitinten reunaetäisyys. Laskelmien yksinkertaistamiseksi liitinten keskinäiset etäisyydet pitää valita riittävän suuriksi, jotta ei tarvitse tarkastella niiden tehollista lukumäärää rivissä.

Yhden teräslevyn siirrettäväksi tuleva vetovoima on

$$F_V = f_{c,0,d} \cdot y \cdot b - V \quad 14-24$$

Kuvan 14-15 mukainen etäisyys y saadaan tasapainoehdosta

$$y = h \left(1 - \sqrt{\frac{2M + V \cdot h}{f_{c,0,d} \cdot b \cdot h^2}} \right) \quad 14-25$$



KUVA 14-16

Laskentamalli vaakavoimasta taipuvalle teräslevylle.

Vaakavoima siirtyy jäykästi kiinnitetylle teräslevylle tasaisena kuormituksena. Kuormitetun pinnan korkeus x voidaan laskea plastisuusteorian mukaisesti olettamalla kaksi plastista niveltä. Plastisuusteorian mukainen taivutusmomentti on

$$M_{pl} = \frac{c \cdot t^2}{4} f_{y,d} \quad 14-26$$

missä c on teräslevyn leveys ja $f_{y,d}$ on teräksen myötöraja. Momenttitasapainosta saadaan

$$2M_{pl} = \frac{c \cdot x^2}{2} f_{c,90,d} \quad 14-27$$

missä f_{c90d} on liimapuun puristuslujuus syitä vastaan kohtisuoraan. Korkeus x on siten

$$x = t \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{c,90,d}}}$$

14-28

Vaakavoiman kestävyys on

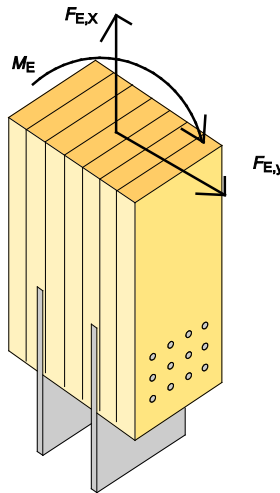
$$F_{E,y} \leq c \cdot x \cdot f_{c,90,d}$$

14-29

Teräslevyn kiinnitys perustuksiin tarkistetaan eurokoodi 2:n ja 3:n mukaan.

Liimaruuviliitos

Jäykästi kiinnitetty pilarin alapää voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa kuvan 14-17 mukaisin liimaruuvein. Tällaisen liitoksen etuna on sen huomaamattomuus ja hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia. Liimaruuveja ei pidä käyttää rakenteissa jotka ovat alttiina dynaamisille kuormille eikä myöskään käyttöluokassa 3. Liimausta pitää tehdä liimapuutehtaassa erityisen valvonnan alaisena. Liimaruuvia käytetään usein perustuksiin ruuvattavan tai hitsattavan teräslevyn kanssa.



KUVA 14-17

Liimaruuvien avulla tehty pilarin alapään jäykkä kiinnitys.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- ruuvien murtuminen
- ruuvien ulosveto
- puun leikkautuminen ruuvien vierestä
- puumateriaalin murtuminen (halkeaminen, murtuminen vedosta tai puristuksesta).

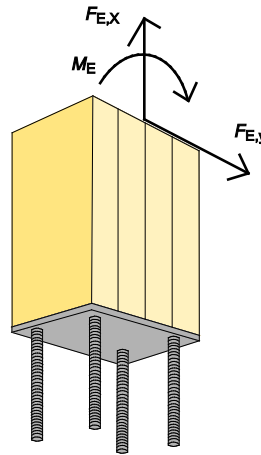
Liimaruuvien kestävyys määritellään kuten aikaisemmin on esitetty kohdassa "Nivelellinen pilarin alapää".

Kiinnitysmomentti aiheuttaa liimaruuveihin voimaparin. Myös pilarin aksiaalinen voima voi siirtyä liimaruuvien välityksellä. Liitoksen geometrian salliessa puristusvoima voi myös siirtyä pilarin ja perustuksen välisellä kosketuspaineella. Ruuveja kuormittaa sekä akselin suuntainen että sitä vastaan kohtisuora voima, ja näiden yhteisvaikutus on tarkistettava.

Teräslevyn kiinnitys perustuksiin tarkistetaan eurokoodi 2:n ja 3:n mukaan.

Tappivaarnaliitos

Lähes huomaamaton liitos saadaan myös käyttämällä kuvan 14-18 mukaisesti uriin asennettuja teräslevyjä jotka kiinnitetään tappivaarnoin. Teräslevyt hitsataan usein pohjalevyyn joka puolestaan ruuvataan kiinni perustukseen. Liitoksella on hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia. Lisäksi liitoksella on esteettisiä etuja.



KUVA 14-18

Tappivaarnaliitoksen avulla tehty pilarin alapään jäykkä liitos.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- tappivaarnaliitoksen leikkautuminen
- lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- teräslevyn murtuminen momentista, normaalivoimasta ja leikkausvoimasta (sekä koko poikkileikkaus että nettopoikkileikkaus)
- pilarin ja teräslevyn välinen kosketuspaine.

Kestävyys leikkautumista vastaan tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 8.3 mukaan. Teräslevyn kestävyys voidaan laskea kohdan 14.2.5 mukaan. Lisäksi pitää tarkistaa liitinten reunaetäisyys. Laskelmien yksinkertaistamiseksi liitinten keskinäiset etäisyydet pitää valita riittävän suuriksi jotta ei tarvitse tarkastella niiden tehollista lukumäärää rivissä.

Liitos mitoitetaan samaan tapaan kuin teräslevyjen avulla tehty pilarin alapään jäykkä liitos. Liitoksen kiinnitysmomentti siirtyy teräslevyihin muodostuvan voimaparin avulla; momenttivarsi on levyjen keskinäinen etäisyys. Pilarin pystyvoima siirtyy kosketuspaineen avulla jos se on puristusta, jos se on vetoa niin liittimet siirtävät sen teräslevyille. Pilarin vaakavoima siirtyy kosketuspaineen avulla kuten muillakin liitostyypeillä. Erona on että kaikki levyt siirtävät voimia, koska ne ovat urissa ja siten aina toiselta puolelta puristettuja.

Urien poikkileikkausta heikentävä vaikutus otetaan huomioon tarkistamalla nettopoikkileikkauksen jännitykset.

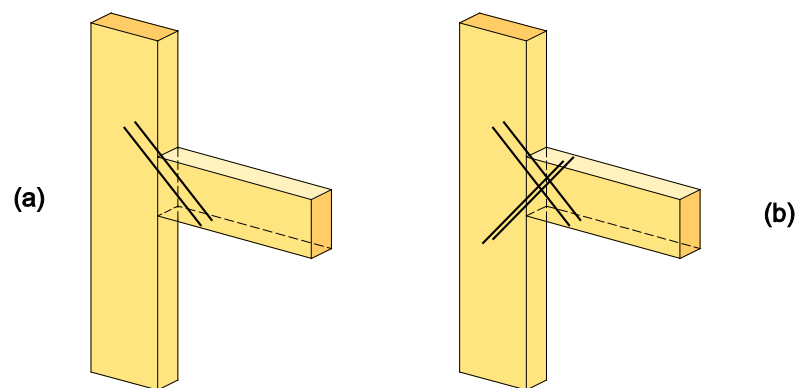
Teräslevyn kiinnitys perustuksiin tarkistetaan eurokoodi 2:n ja 3:n mukaan.

14.4 Palkin liittyminen pilariin

Palkin ja pilarin liitos tehdään usein nivelellisenä, jolloin se siirtää pystysuoria ja vaakasuoria voimia mutta ei taivutusmomenttia. Liitos voidaan tehdä monin tavoin. Nykyisin käytettäneen tavallisimmin palkkikenkää. Valmistajilla on yleensä suuri joukko erilaisia malleja ja kokoja ja heiltä saa myös palkkikenkien mitoitusohjeet. Liimapuurakenteiden palkit ja pilarit ovat usein suuria ja vakiokiinnikkeitä on vain harvoin mahdollista käyttää. Erikseen tilattavat kiinnikkeet ovat kalliimpia kuin vakio-osat. Pienien kuormien siirtämiseen voidaan myös käyttää itseporautuvia vinoon asennettuja puuruuveja.

Vinoruuviiliitos

Kuvan 14-19 mukainen vinoruuvi kiinnitys on yleistynyt 2000-luvulla järeämpien ja pidempien ruuvien tultua markkinoille.



KUVA 14-19

Itseporautuvien ruuvein tehty palkin ja pilarin liitos (a) kaksi vinoruuvia (b) neljä parittaista vinoruuvia.

Tällaista liitosta mitoitettaessa oletetaan, että palkin leikkausvoima ja mahdollinen vetovoima siirretään ruuvien leikkauksen ja ulosvedon avulla. Palkin puristusvoima siirtyy palkin pään ja pilarin välisellä kosketuspaineella.

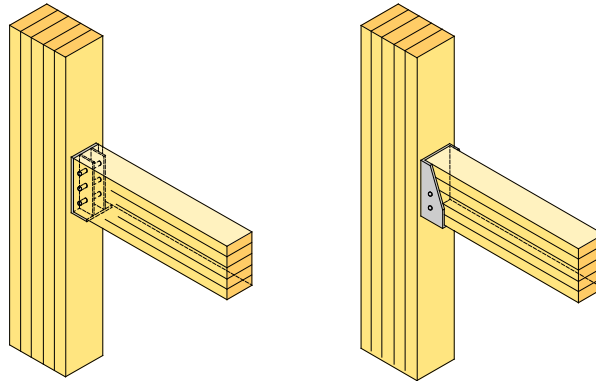
Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- ruuviliitoksen leikkautuminen
- ruuvien ulosveto ja läpiveto
- ruuviliitoksen murtuminen samanaikaisesta ulosvetovoimasta ja leikkausvoimasta
- ruuvien murtuminen samanaikaisesta vetovoimasta ja leikkausvoimasta (teräksen murtuminen)
- leikkausrasituksen ja vedon yhteisvaikutus
- palkin pään ja pilarin välinen kosketuspaine.

Kestävyys leikkautumista vastaan tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 8.2 mukaan ja ulosvetoa vastaan eurokoodi 5:n luvun 8.7 mukaan. Ruuvien ulosvedon ja leikkauksen vuorovaikutus tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 8.3 mukaan. Ruuviteräksen kestävyys tarkistetaan eurokoodi 3:n mukaan. Lisäksi pitää tarkistaa liitinten reunaetäisyys sekä leikkautumisen että vedon kannalta. Käytettäessä kuvan 14-19 mukaisia parittaisia ristikkäisiä vinoruuveja mahtuu useampi ruuvi käytettävissä olevaan tilaan. Eurokoodi 5:n taulukossa 8.6 olevaa päätyetäisyyttä $a_{1,CG}$ koskevaa vaatimusta voi silti olla vaikea täyttää ($a_{1,CG} \geq 10d$).

Hitsattu palkkikenkä

Hitsattuja palkkikenkkiä käytetään suurten voimien siirtämiseen. Kuvassa Kuva 14-20 esitetään kaksi mahdollisuutta. Näiden pääasiallinen ero on teräsosien näkyvyys. Piiloliitoksen etuna on sen huomaamattomuus ja hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia. Kummassakin liitostyyppissä voimat siirtyvät kiinnikkeelle pääasiassa palkin ja kiinnikkeen pohjalevyn välisen kosketuspaineen avulla ja edelleen pilarille liittimien leikkausvoiman avulla.



KUVA 14-20

Kaksi erilaista palkkikengää.

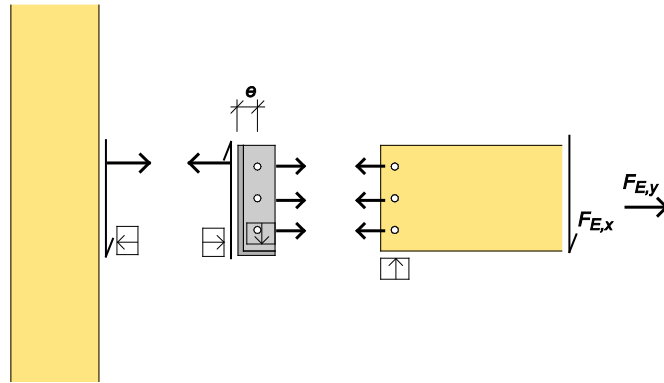
Tappivaarnaliitoksellisen hitsatun palkkikengän laskentamalli esitetään lyhyesti seuraavassa. Osassa 3 esitetään yksityiskohtainen laskentaesimerkki.

Tappivaarnaliitoksellinen palkkikenkä

Tarkastellaan kuvan 14-21 a mukaista tappivaarnaliitoksellista palkkikengää. Palkkikenkä kiinnitetään pilariin selkälevyn läpimenevin ruuvein. Liitosta rasittaa leikkausvoima ja vaakasuora palkin akselin suuntainen puristava tai vetävä voima. Leikkausvoima siirtyy palkin ja kiinnikkeen pohjalevyn välisen kosketuspaineen avulla. Voima siirtyy hitsiliitosten välityksellä keskilevylle ja sitten keskilevyn ja selkälevyn välisen hitsisauman välityksellä selkälevylle. Pohjalevyn vaikuttavan voiman epäkeskeisyyden vuoksi syntyy momenttirasitus, joka siirretään selkälevyn alapuolen kosketuspaineen ja selkälevyn yläosassa olevien ruuvien ulosvetovoiman välityksellä. Puristava vaakavoima siirtyy kosketuspaineella palkin pään ja selkälevyn kautta pilarille. Vetävä vaakavoima siirtyy vaarnojen avulla keskilevylle, keskilevyn hitsisaumojen välityksellä selkälevylle ja kiinnitysruuvien vetovoiman avulla pilarille. Selkälevyn ja pilarin välisiä kiinnitysruuveja rasittaa siten tavallisesti samanaikainen ulosveto ja leikkaus, joille ne on mitoitettava.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- palkin ja palkkikengän pohjalevyn välinen kosketuspaine
- palkissa olevien tappivaarnojen leikkautuminen
- palkin pään lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- palkkikengän hitsiliitokset (pohjalevyn ja keskilevyn väliset hitsit ja keskilevyn ja selkälevyn väliset hitsit)
- kiinnitysruuvien ulosveto pilarista
- kiinnitysruuvien leikkautuminen
- kiinnitysruuvien murtuminen samanaikaisesta vetovoimasta ja leikkausvoimasta
- selkälevyn ja pilarin välinen kosketuspaine
- halkeaminen eurokoodi 5:n luvun 8.1.4 mukaan.



KUVA 14-21

Tappivaarnaliitoksellisen hitsatun palkkikengän laskentamalli.

Kosketuspaine tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 6.1.5 mukaisesti. Liittimien leikkautuminen (sekä vaarnat että ruuvit) tarkistetaan eurokoodi 5:n luvun 8.2 mukaisesti ja ruuvien ulosveto eurokoodi 5:n luvun 8.7 mukaisesti. Lohkeamismurtuminen tarkistetaan eurokoodi 5:n liite A:n mukaisesti.

Palkkikengä rakenteen pinnassa olevin levyin

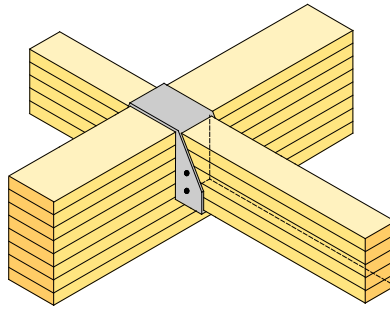
Kuvan Kuva 14-20 b mukainen hitsattu palkkikengä voidaan mitoittaa samoja periaatteita käyttäen kuin tappivaarnaliitoksellinen palkkikengä. Ainoa ero on että liitoksen kestävyys vaakavoimia vastaan tarkastellaan kuten sellaisessa puun ja teräksen välisessä liitoksessa missä teräslevyt ovat puun pinnassa.

14.5 Palkin liittyminen palkkiin

Useilla valmistajilla on kahden pienen tai keskisuuren palkin liittämiseen tarkoitettuja palkkikenkiä. Valmistajat antavat myös tietoja näiden kestävydestä ja yleisiä käyttösuosituksia. Suuria palkkeja varten pitää tilata erikseen suunniteltuja erikoisvalmisteisia, palkkikengää muistuttavia teräskiinnikkeitä. Nämä asennetaan kuvan 14-22 mukaisesti pääpalkin sivuun tai ripustetaan sen yli. Yliripustettavia palkkikenkiä käytettäessä voimien siirtyminen rakenteessa on luontevampaa. Liitokset voidaan muotoilla siten, että ne siirtävät myös taivutusmomenttia leikkausvoimien ja normaalivoimien lisäksi. Sekundääripalkin vakavuuden lisäämiseksi sen yläreuna voidaan kiinnittää pääpalkkiin kulmakiinnikkein.

Yksipuoleisessa kiinnityksessä pääpalkille aiheutuu vääntömomenttia, joka pitää ottaa huomioon pääpalkin mitoituksessa. Halkeamariski kasvaa jos ripustus on pääpalkin korkeuden nähden alhaalla.

Ripustettu palkkikengä rakenteen pinnassa olevin levyin



KUVA 14-22

Ripustettu palkkikengä.

Kuvan 14-22 mukaisen ripustetun palkkikengän suurin etu on että sekundääripalkkien tukireaktiot siirtyvät pääpalkille kosketuspaineen avulla. Näin voidaan siirtää suuriakin pystykuormia.

Voima siirtyy palkin ja kiinnikkeen pohjalevyn välisen kosketuspaineen avulla ja edelleen palkkikengän pystysuorien levyjen välityksellä ja kosketuspaineen avulla pääpalkille. Pohjalevyn vaikuttavan voiman epäkeskeisyyden vuoksi syntyy myös momenttirasitus, joka siirretään selkälevyn alapuolen kosketuspaineen ja kantavaan ylälevyyn syntyvän vetovoiman välityksellä. Puristava vaakavoima siirtyy kosketuspaineella palkin pään ja selkälevyn kautta pääpalkin sivulle. Vetävä vaakavoima siirtyy liittimien avulla palkkikengälle. Jos kuorma on epäsymmetrinen niin pääpalkille aiheutuu vääntömomenttia, joka pitää ottaa huomioon pääpalkin mitoituksessa.

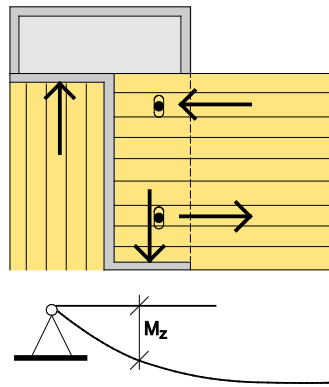
Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- sekundääripalkin ja palkkikengän pohjalevyn välinen kosketuspaine
- pääpalkin ja palkkikengän kantavan ylälevyn välinen kosketuspaine
- liittimien leikkautuminen
- palkkikengän hitsiliitokset
- selkälevyn ja pääpalkin välinen kosketuspaine

Lisäksi pitää tarkistaa kaikkien liitinten keskinäiset etäisyydet ja reunaetäisyydet.

Toispuoleisesti ripustettu palkkikengä

Kuvassa 14-23 esitetään kuinka sekundääripalkki voidaan ripustaa toispuoleisesti. Palkin jäykkä päätylevy siirtää tuella syntyvän pienehkön momentin. Koska päätylevy on jäykkä, niin sekundääripalkin pystysuora tukireaktio siirtyy pääpalkin painopistelinjalle eikä pääpalkille synny vääntömomenttia. Siksi myös ylälevyn pitää olla jäykkä ja se pitää mitoittaa niin, että voima siirtyy pääpalkin keskelle.



KUVA 14-23

Toispuoleisesti ripustettu palkkikenkä.

Yleensä on ehdottoman tärkeää ottaa huomioon toispuoleiselta palkkikengältä pääpalkille tulevien epäkeskeisten kuormien aiheuttama vääntömomentti. Mitoitus yksinkertaistuu jos vääntömomentti vältetään kuvan 14-23 kaltaisella rakenteella.

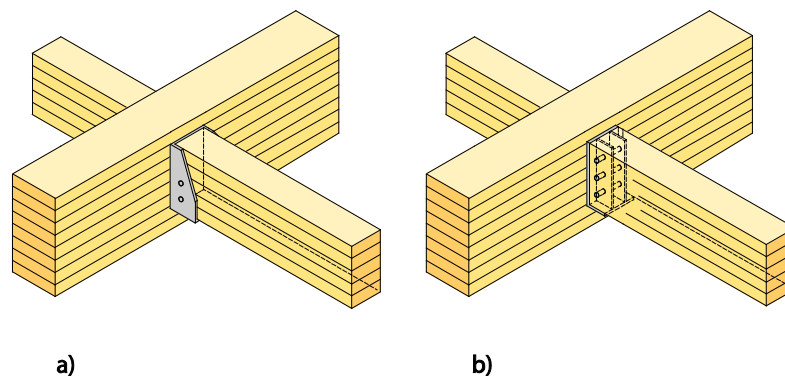
Seuraavat murtumistavat pitää kuitenkin aina tarkistaa:

- sekundääripalkin ja palkkikengän pohjalevyn välinen kosketuspaine
- pääpalkin ja palkkikengän kantavan ylälevyn välinen kosketuspaine
- liittimien leikkautuminen
- palkkikengän hitsiliitokset.

Lisäksi pitää tarkistaa kaikkien liittinten keskinäiset etäisyydet ja reunaetäisyydet.

Palkin sivuun asennettu palkkikenkä

Kuvassa 14-24 esitetään kuinka sekundääripalkki voidaan ripustaa pääpalkin sivuun. Tällaiset palkkikengät ripustetaan ruuvein pääpalkin sivuun ja ne toimivat samalla tavalla kuin kohdassa 14.4.2 esitellyt pilariin kiinnitettävät palkkikengät. Erona on kuitenkin se, että siirrettävä voima vaikuttaa kohtisuoraan pääpalkin syiden suuntaa vasten, kun se pilarissa vaikuttaa syiden suuntaisesti. Tämä pitää ottaa huomioon ja halkeamisriski pitää arvioida kohdan 14.2.4 mukaisesti. Palkkikenkä pitää kiinnittää niin ylös pääpalkin sivuun kuin mahdollista kuvan Kuva 14-7 esittämällä tavalla, jotta $h_e > 0,7 h$.



KUVA 14-24

Pääpalkin sivuun ruuvattavia palkkikenkiä (a) palkkikenkä rakenteen pinnassa olevin levyin (b) tappivaarna-liitoksellinen palkkikenkä.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- sekundääripalkin ja palkkikengän pohjalevyn välinen kosketuspaine
- liittimien leikkautuminen
- palkin pään lohkeamismurtuminen (katso eurokoodi 5:n liite A)
- palkkikengän hitsiliitokset (pohjalevyn ja keskilevyn väliset hitsit ja keskilevyn ja selkälevyn väliset hitsit)
- kiinnitysruuvin ulosveto pääpalkista
- kiinnitysruuvin leikkautuminen pääpalkissa
- kiinnitysruuvin murtuminen samanaikaisesta vetovoimasta ja leikkausvoimasta
- selkälevyn ja pääpalkin välinen kosketuspaine
- halkeaminen eurokoodi 5:n luvun 8.1.4 mukaan.

Lisäksi pitää tarkistaa kaikkien liittinten keskinäiset etäisyydet ja reunaetäisyydet.

14.6 Pilarin yläpää

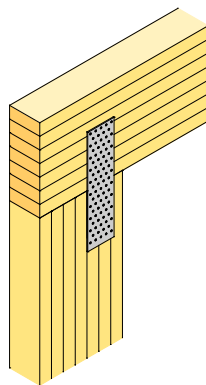
Palkin ja pilarin yläpään välinen liitos tehdään usein nivelenä. Liitos siirtää silloin vain pystysuoria ja vaakasuoria voimia. Halkeamariskin pienentämiseksi liitoksen pitää sallia palkin tuella tapahtuva kulmanmuutos pilarin yläpäähän nähden ja siksi liitososat pitää sijoittaa mahdollisimman lähelle pilarin sisäreunaa. Liitoksen voimat voidaan siirtää naulauslevyihin. Jos esteettisistä syistä halutaan huomaamaton liitos voidaan käyttää liimaruuveja, mutta vain käyttöluokissa 1 ja 2 ja vain silloin kun siirrettävät voimat ovat pienehköjä. Kolmas mahdollisuus on upottaa palkki pilariin, erityisesti päädyissä missä pitää siirtää myös vaakavoimia. Liitos pienentää toisinaan palkin kiepahtamisriskiä, mutta useimmiten tätä vaikutusta ei voida hyödyntää, ja kiepahtaminen pitää estää muilla tavoin.

Teräslevyjen avulla tehty liitos

Naulauslevy

Naulauslevyihin tehty liitos sopii hyvin keskisuurille voimille. Edullisimpien levyjen reiät on stanssattu, jolloin levyn paksuus ei saa ylittää reiän halkaisijaa. Reiän halkaisijan pitää olla noin 1 mm käytettävän liittimen halkaisijaa suurempi.

Liitoksen mahdollinen laskentamalli esitetään lyhyesti seuraavassa. Osassa 3 esitetään yksityiskohtainen laskentaesimerkki.



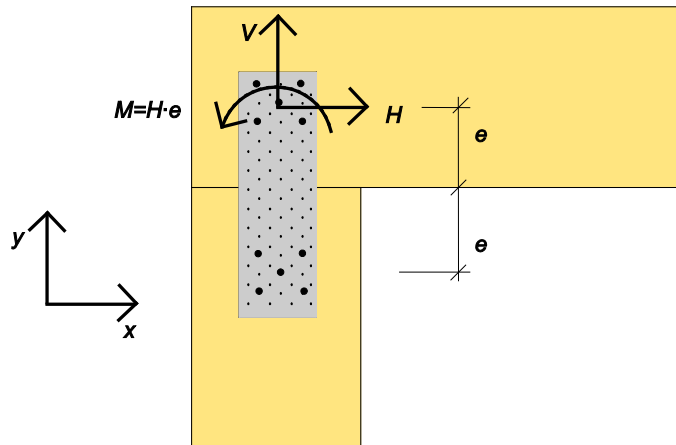
KUVA 14-25

Naulauslevyihin tehty pilarin yläpään liitos.

Laskennassa oletetaan teräslevyn toimivan molemmista päistään jäykästi kiinnitettynä palkkina. Liitos siirtää vaakavoimia ja mahdollisen nostavan pystyvoiman. Puristava pystysuora voima siirtyy liimapuupalkin ja pilarin välisellä kosketuspaineella.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- liittimien murtuminen leikkautumalla
- teräslevyn murtuminen
- teräslevyn nurjahtaminen normaalivoimasta
- palkin ja pilarin välinen kosketuspaine.



KUVA 14-26

Teräslevyn yläpään painopisteessä vaikuttavat voimat ja momentti.

Voimien (vaakavoiman ja mahdollisen nostavan voiman) oletetaan vaikuttavan kuvan 14-26 mukaisesti liitoksen painopisteessä. Teräslevyä pidetään kummastakin päästään jäykästi kiinnitettynä, jolloin vaakavoiman epäkeskeisyys aiheuttaa momentin $H \cdot e$ painopisteessä.

Yksittäiselle liittimelle tuleva voima on

$$F_Y = \frac{V}{n} + \frac{H \cdot e \cdot r_{xi}}{I_p} \quad 14-30$$

$$F_X = \frac{H}{n} - \frac{H \cdot e \cdot r_{yi}}{I_p} \quad 14-31$$

n	liittimien lukumäärä
e	vaakavoiman epäkeskeisyys (painopisteiden välisen etäisyyden puolikas)
r_{xi}, r_{yi}	kunkin liittimen x- ja y- suuntaiset etäisyydet painopisteestä
I_p	liitoksen polaarinen jäyhyysmomentti

$$I_p = \sum_{i=1}^n (r_{xi}^2 + r_{yi}^2) \quad 14-32$$

Yksittäiselle liittimelle tulevien voimien resultantti on

$$F_E = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad 14-33$$

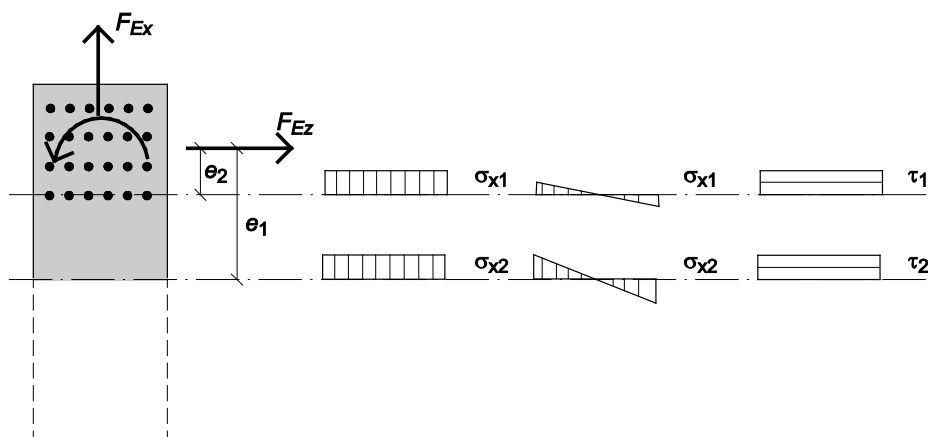
Eurokoodi 5:n mukaan halkaisijaltaan pienempien kuin 8 mm naulojen kestävyys ei ole riippuvainen voiman vaikutussuunnasta. Kestävyys liitintä kohti voidaan laskea eurokoodi 5 luvun 8.3 mukaan. Tarvittava naulamäärä n on siten likimäärin

$$n_{prel} = \frac{\sqrt{H^2 + V^2}}{F_{v,Rd}} \quad 14-34$$

Kun liitinten määrä tunnetaan ne pitää sijoittaa sopivasti. Sijoittelussa otetaan huomioon kaikkien liitinten keskinäiset etäisyydet ja reunaetäisyydet. Lopuksi tarkistetaan, että rasiteuimman liittimen kestävyys on suurempi kuin sille yhtälön 14-34 mukaisesti tuleva voima. Laskelmien yksinkertaistamiseksi liitinten keskinäiset etäisyydet pitää valita riittävän suuriksi, jotta ei tarvitse tarkastella niiden tehollista lukumäärää rivissä. Lohkeamismurtuminen tarkistetaan eurokoodi 5:n liite A:n mukaisesti. Halkeamista ei tarvitse tarkistaa, jos kauimpana pilarin reunasta olevan liittimen etäisyys reunasta on suurempi kuin 0,7 kertaa pilarin leveys. Muussa tapauksessa halkeaminen tarkistetaan eurokoodi 5 luvun 8.1.4 mukaisesti.

Teräslevyä rasittaa kuvan 14-27 mukaisesti sekä vaakavoima että pystyvoima. Sen lisäksi vaikuttaa liitoksen painopisteessä momentti. Teräslevyn taivutusmomentti etäisyydellä e_2 painopisteestä on

$$M_E = F_{Ez} \cdot (e_1 - e_2) \quad 14-35$$



KUVA 14-27

Teräslevyn jännitysjakautuma.

Kun taivutusmomentti sekä vaakasuorat ja pystysuorat voimat tunnetaan, niin voidaan laskea jännitysjakautuma teräslevyn eri poikkileikkauksissa. Pystysuorasta voimasta aiheutuva osuus on

$$\sigma_{xi} = \frac{F_{Ex}}{A} \quad 14-36$$

missä käytetään poikkileikkauksen sijainnin mukaisesti joko koko poikkileikkauksen pinta-alaa tai nettopinta-alaa. Taivutusmomentista aiheutuva osuus on

$$\sigma_{xi} = \frac{M_E z}{I}$$

14-37

z teräslevyn leveyden puolikas
 I teräslevyn hitausmomentti

Hitausmomentin I arvona käytetään poikkileikkauksen sijainnin mukaisesti joko koko poikkileikkauksen mukaista arvoa tai nettopoikkileikkauksen mukaista arvoa. Leikkausvoimasta aiheutuva osuus on (teräslevy oletetaan täysin plastiseksi)

$$\tau_i = \frac{F_{Ez}}{A}$$

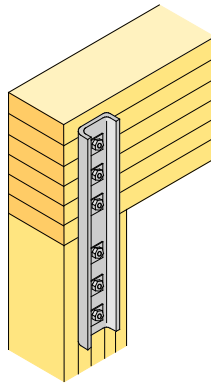
14-38

Poikkileikkauksen sijainnin mukaisesti yhtälössä 14-38 käytetään joko koko poikkileikkauksen pinta-alaa A tai nettopinta-alaa. Normaalijännitysten ja leikkausjännitysten yhteisvaikutus otetaan huomioon kohdan 14.2.5 mukaisesti.

Jos teräslevy on ohut, niin sen nurjahtaminen pitää mahdollisesti tarkistaa. Jos liittimien väliset etäisyydet levyssä ovat sopivat, niin tätä ei tarvitse tehdä. Sen vuoksi teräslevyn reikien välisten etäisyyksien ja ensimmäisen reikärivin etäisyyden perustuksen pinnasta pitää olla enintään pienempi arvoista $14t$ tai 200 mm, missä t on levyn paksuus.

Lattateräs tai U-teräs

Naulauslevyjen asemesta voidaan käyttää kuvan 14-28 mukaista lattaterästä tai U-terästä, kun pilarin päässä vaikuttaa suuria voimia. Niiden voimansiirtokyky on suurempi ja ne pienentävät palkin kiepahdusriskiä. Asennuksen helpottamiseksi kiinnikkeen reiät pitää porata 1 mm ruuvien halkaisijaa suuremmaksi.



KUVA 14-28

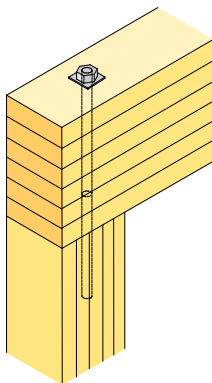
U-teräs läpimenevin ruuvein.

Liitos mitoitetaan kuten naulauslevyin tehty liitos. Käytettävien ruuvien halkaisija on yleensä yli 8 mm ja sen vuoksi pitää ottaa huomioon voiman suunta syiden suuntaan nähden.

Liimaruuviliitos

Liimaruuviliitos on huomaamaton. Ruuvi liimataan pilarin päähän minkä jälkeen palkki pujotetaan pystyssä olevan ruuvin yli ja kiinnitetään kuvan 14-29 mukaisesti aluslevyn ja mutterin avulla. Nämä voidaan upottaa, jolloin liitos jää kokonaan piiloon. Liimaruuveja ei pidä käyttää rakenteissa, jotka ovat alttiina dynaamisille kuormille, eikä myöskään käyttöluokassa 3. Liimaus pitää tehdä liimapuutehtaassa erityisen valvonnan alaisena. Kosteusliikkeiden vuoksi liimaruuvia ei pidä käyttää jos palkin korkeus ylittää 500 mm. Jos palkki on hiukan korkeampi, mutteri voidaan upottaa ettei ruuvin korkeus pilarin huipusta ole yli 500 mm.

Liimaruuvi ei jäykistä palkkia sivusuunnassa ja palkin tuennasta pitää sen vuoksi huolehtia muulla tavalla.



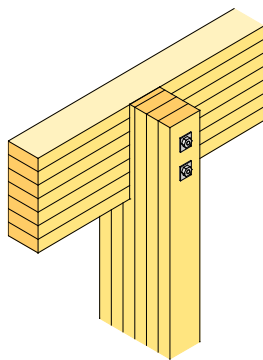
KUVA 14-29

Pilarin yläpään liimaruuviliitos.

Loveukseen upotetut palkit

Rakennusten päädyissä käytetään usein upotettuja palkkeja, jotta vaakavoimien siirtäminen olisi helpompaa. Voimat siirretään ruuvein; pieniä voimia voidaan siirtää kulmakiinnikkein.

Ruuvit siirtävät mahdolliset nostavat pystysuorat voimat ja vetävät vaakasuorat voimat. Pilaria vastaan suuntautuvat vaakavoimat siirtyvät kosketuspaineen avulla palkin sivun ja pilarin pään loveuksen välillä. Palkin pystykuorma tulee pilarille epäkeskeisesti, mikä pitää ottaa huomioon mitoituksessa. Jos kosketuspaineesta tulee liian suuri, niin kosketuspintaa voidaan laajentaa käyttämällä palkin alapinnalla teräslevyä.



KUVA 14-30

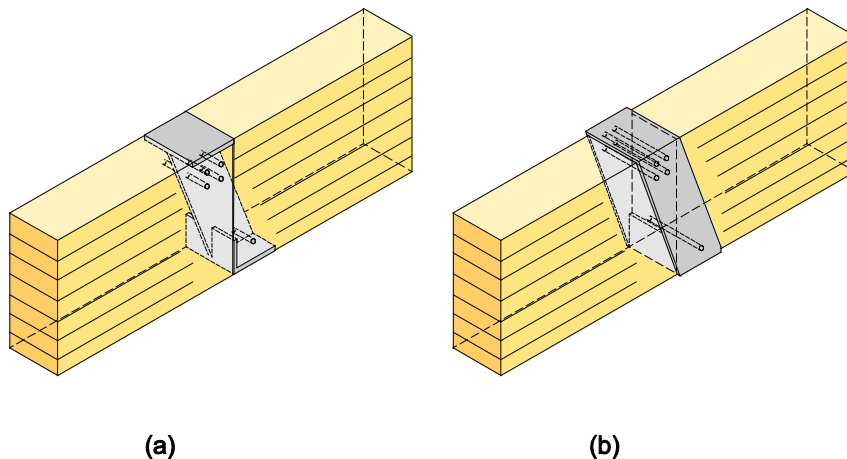
Pilarin yläpään loveukseen upotettu palkki.

14.7 Jatkokset

Nivelellinen palkin jatkos

Palkin nivelellinen jatkos siirtää pystysuoria ja usein myös vaakasuoria voimia. Niveljatkos ei siirrä taivutusmomenttia. Sen vuoksi se pitää suunnitella niin, ettei se estä palkin kulmanmuutosta, jolloin varmistutaan siitä että taivutusmomenttia ei siirry esimerkiksi tuella tapahtuvan ei-toivotun muodonmuutoksen vuoksi. Samalla vähennetään jännityshuippujen muodostumista. Kuvassa 14-31 on esimerkkejä nivelellisen liitoksen tekemisestä niin sanotun Gerber-nivelen avulla. (Näiden käyttöä orsissa käsitellään luvussa 12.2.) Toinen mahdollisuus on käyttää naulauslevyjä, ja jos voimat ovat pieniä voidaan käyttää jopa itseporautuvia paritaisia vinoruuveja.

Suuria leikkausvoimia siirrettäessä käytetään Gerber-niveltä. Tällaisia kiinnikkeitä on saatavana vakiokokoisina pienille ja keskisuurille palkeille. Suuremmille palkeille kiinnikkeet voidaan joutua tilaamaan projektikohtaisesti. Kiinnike on muotoiltu siirtämään leikkausvoimia vain yhteen suuntaan, mutta liitos siirtää pieniä leikkausvoimia myös kiinnikkeen kannalta "väärään" suuntaan käytettäessä ruuveja. Ruuvit pitää sijoittaa mahdollisimman lähelle palkin ylä- ja alareunaa, ettei palkkien päiden kulmanmuutos esty. Jos liitoksessa vaikuttaa vetävä normaalivoima, niin liitos voidaan varustaa vielä päälle hitsatulla levyllä. Gerber-niveliä on kahta tyyppiä; teräslevyt voivat olla joko palkkien ulkopuolella tai liitos voi olla tappivaarnaliitostyyppinen. Jälkimmäisen liitostyyppin etuna on sen huomaamattomuus ja hyvä palonkestävyys, kun teräsosat ovat puun suojaamia.



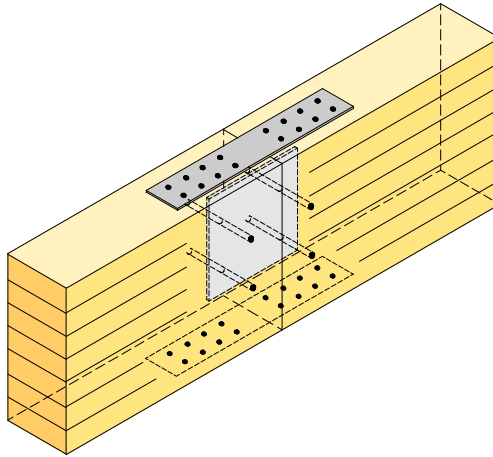
KUVA 14-31

Gerber-nivel (a) tappivaarnaliitostyyppinen (b) ulkopuolisin teräslevyin.

Gerber-nivelen mitoituksessa oletetaan leikkausvoimien siirtyvän palkin osien ja kiinnikkeen ylä- ja alalaattojen välisen kosketuspaineen avulla. Voimien oletetaan vaikuttavan keskellä levyä. Koska nämä voimat muodostavat voimaparin, niin liitososa siirtää tietyn taivutusmomentin. Tämä siirtyy pystysuoran levyn ja palkin alareunan välisen kosketuspaineen ja yläreunan ruuvien välityksellä. Yksityiskohtainen mitoitus esimerkki esitetään osassa 3.

Taivutusmomenttia siirtävä palkin jatkos

Taivutusmomenttia siirtävä palkin jatkos voidaan tehdä pystysuorassa urassa olevan levyn avulla, joka siirtää leikkausvoiman. Taivutusmomentti siirtyy palkin päiden ja puristuspuolen kosketuspaineen avulla ja vedetyllä puolella olevan vaakasuoran naulauslevyn avulla. Liitoksesta ei tule yhtä vahvaa ja lujaa kuin jos poikkileikkaus olisi jatkuva. Tällaista jatkosta käytetäänkin vain jos siirrettävä taivutusmomentti on pieni verrattuna koko poikkileikkauksen kesävytyteen.



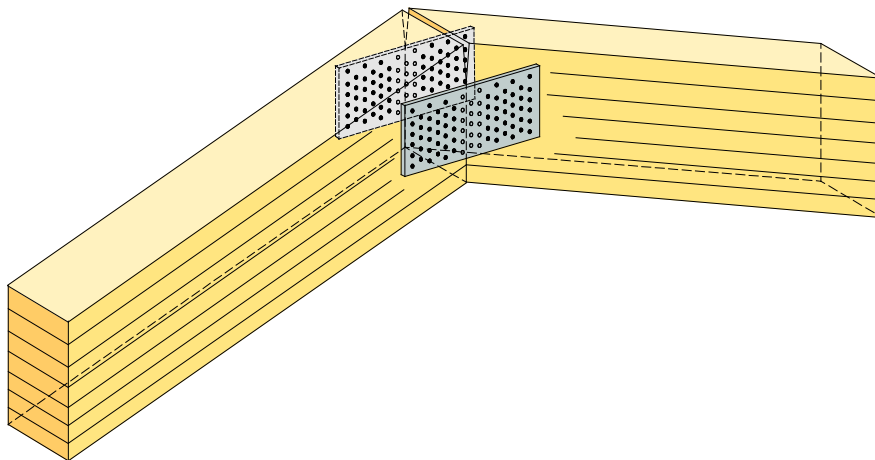
KUVA 14-32

Taivutusmomenttia siirtävä palkin jatkos.

Harjanivel

Harjanivel siirtää pystysuoria ja vaakasuoria voimia. (Nivel ei saa siirtää taivutusmomenttia eikä sitä oteta huomioon laskelmissa.) Liitos pitää suunnitella siten, että osien kulmanmuutos toisiinsa nähden voi vapaasti tapahtua, jolloin ei synny pakkovoimia. Tämän varmistamiseksi palkin yläreuna voidaan viistota kuten kuvassa 14-33 on esitetty.

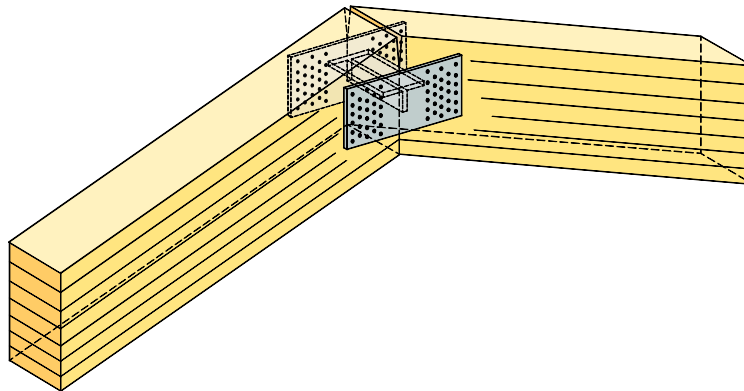
Seuraavassa esitellään kaksi erilaista harjaniveltä. Ensimmäinen on tehty palkin molemmin puolin olevien teräslevyjen avulla. Jos leikkausvoima on suuri, voidaan käyttää kuvan 14-34 mukaista uraan asennettua T-terästä. Palkkien kulmanmuutoksen sallimiseksi liitososat pitää sijoittaa niin lähelle palkin alareunaa kuin mahdollista.



KUVA 14-33

Teräslevyin tehty harjanivel.

Teräslevyjä pidetään kummastakin päästään jäykästi kiinnitettynä, kuten kappaleessa 14.6.1 on esitetty. Liitos siirtää pystysuoran ja vaakasuoran voiman, joiden oletetaan vaikuttavan kuvan 14-26 mukaisesti liitoksen painopisteessä. Liitoksen painopisteen epäkeskeisyys palkin päähän nähden aiheuttaa naularyhmälle lisämomentin. Mitoituksessa otetaan huomioon kiinnityskohdan kestävyys, teräslevyjen kestävyys (veto-, puristus- ja leikkausjännitykset) ja halkeamisriski.



KUVA 14-34

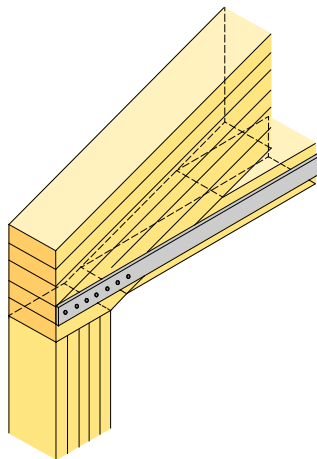
T-teräksen avulla tehty harjanivel.

Kun harjanivel tehdään kuvan 14-34 mukaisesti T-teräksen avulla, niin oletetaan että palkin ulkopuoliset levyt siirtävät vaakavoiman ja että palkin pystysuora leikkausvoima siirtyy T-teräksen ja liimapuupalkin välisellä kosketuspaineella. Mitoituksessa otetaan huomioon kiinnityskohdan kestävyys, ulkopuolisten teräslevyjen kestävyys (vetojännitykset), T-teräksen hitsit ja halkeamisriski.

14.8 Vetotangon kiinnitys

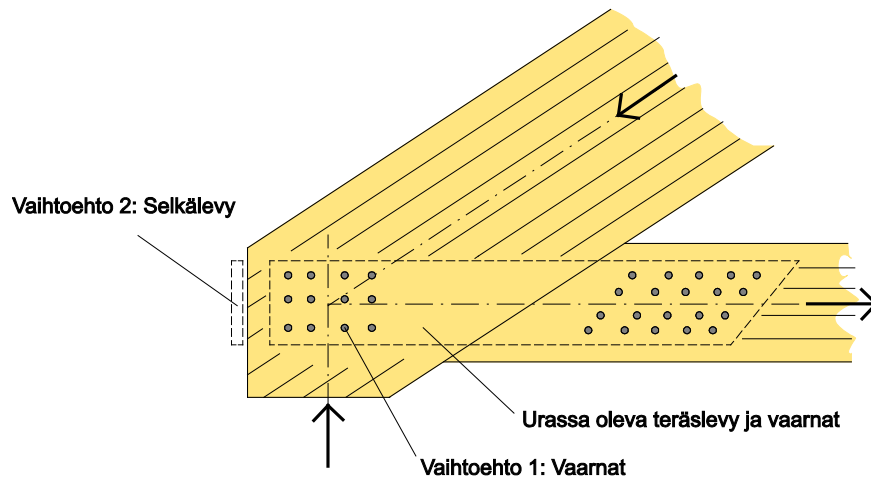
Kattotuolien alareunassa käytetään usein vetotankoa, joka siirtää nimensä mukaisesti vain vetovoimia. Vetotanko suositellaan sijoitettavaksi siten, että sen voima vaikuttaa niin lähellä palkin ja pilarin painopisteviivojen leikkauskohtaa kuin mahdollista.

Pieniä voimia voidaan siirtää myös liimapuisen vetotangon avulla. Siinä tapauksessa voima siirretään kuvan 14-35 mukaisesti naulauslevyllä tai lattateräksellä. Toinen mahdollisuus on käyttää kuvan 14-36 mukaisesti tappivaarnaliitosta.



KUVA 14-35

Liimapuisen vetotangon kiinnitys pinnassa olevalla teräslevyllä.



KUVA 14-36

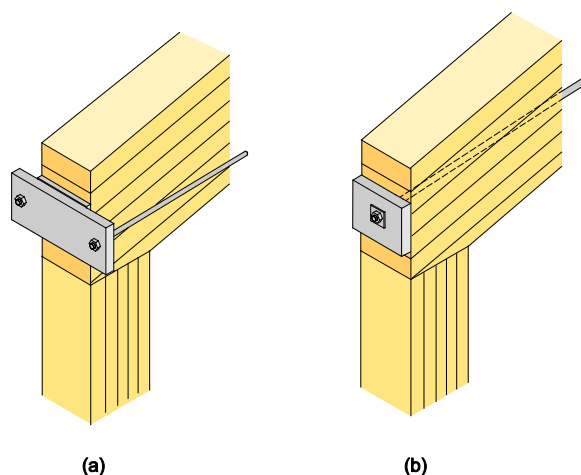
Liimapuisen vetotangon kiinnitys tappivaarnaliitoksella.

Suuren vetovoiman vaikuttaessa käytetään yleensä erikoislujuutta terästä. Vetotanko voidaan ankkuroida kahdella eri tavalla. On teknisesti yksinkertaisempaa käyttää kahta vetotankoa, yhtä palkin kummallakin puolella. Vetotangot kiinnitetään päätylevyn avulla, joka siirtää vetovoiman palkin päätypintaan kosketuspaineen avulla. Vetotanko voi myös kulkea palkin keskellä, jos vetovoima ei ole suuri, jolloin se kiinnitetään kuvan 14-37b mukaisesti palkissa olevan reiän läpi. Jos palkin korkeus on suuri ja katon kaltevuus pieni, niin sellaisen reiän poraaminen on vaikeaa; joskus jopa mahdotonta.

Vetotanko ja sen kiinnitystapa eivät vaikuta palkin kiepahdusriskiä. Palkin kiepahtaminen pitää estää jollain muulla tavalla kuin vetotangolla.

Seuraavat murtumistavat pitää tarkistaa:

- vetotangon kestävyys vetoa vastaan (myös mutterin ja aluslevyn kestävyys)
- naulauslevyn ja naulaliitoksen kestävyys
- palkin pään ja päätylevyn välinen kosketuspaine, jännitykset syitä vastaan vinosti.

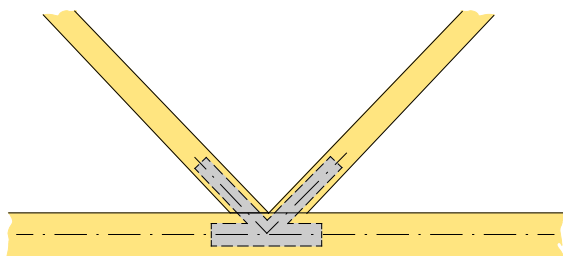


KUVA 14-37

Teräksinen vetotanko (a) kaksi vetotankoa palkin molemmin puolin (b) yksi vetotanko.

14.9 Ristikkojen nurkat

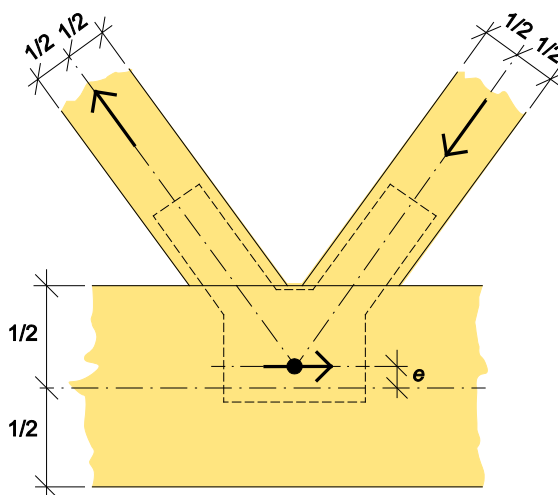
Ristikkojen nurkat tehdään usein puikkoliitoksin, joissa käytetään vaarnoja, ruuveja tai nauloja ja naulauslevyjä, erityisiä nurkan osien päälle tulevia teräskiinnikkeitä tai osissa oleviin uriin asennettuja teräslevyjä. Vain poikkeustapauksessa käytetään liimattuja liitoksia, sillä voimien tehokas siirtäminen suuren liimatun pinnan kautta on vaikeaa. Oleellista liitosten suunnittelussa on välttää epäkeskeisyyttä (sauvojen akselit leikkaavat toisensa samassa pisteessä) ja tavoitella mahdollisimman pientä liitosaluetta.



KUVA 14-38

Ristikon nurkan tappivaarnaliitos.

On tilanteita (kuva 14-39) joissa kaikesta huolimatta on edullista että sauvojen päiden välillä on pieni epäkeskeisyys, mutta liitososat ja niiden väliset liittimet ovat keskeisiä. Tästä saadaan se etu, että voidaan käyttää pienempiä levyjä ja pienempää halkaisua puussa. Tämä tilanne voi esiintyä erityisesti suuressa ristikossa, sillä suurien sauvojen etäisyys painopisteestä tulee hyvin suureksi. Liitoksen epäkeskeisyys aiheuttaa momenttia, joka voi lisätä tai vähentää paarteen kuormitusta. Tämä pitää ottaa huomioon mitoituksessa. Itse liitoksen (levyjen ja vaarnaryhmien) pitää olla keskeinen.



KUVA 14-39

Epäkeskeinen ristikon tappivaarnaliitos.

Ristikon nurkat pitää mitoittaa vain normaalivoimille ja leikkausvoimille (ristikon nurkat ovat niveliä). Käytännössä on usein kuitenkin tarpeen ottaa huomion nurkkien taivutusmomentinkestävyys. Liitos mitoitetaan eurokoodi 5:n luvuun 8.2 mukaan. Yksittäisten liittimien kestävyys lasketaan eurokoodi 5:n lukujen 8.3, 8.5, 8.6 tai 8.7 mukaan.

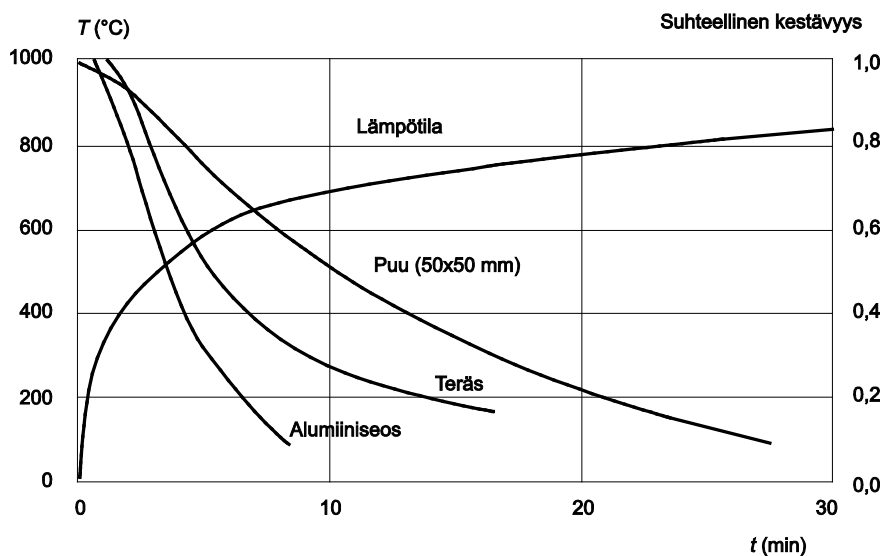
15	LIIMAPUU JA PALO	2
15.1	Puun palaminen ja käyttäytyminen tulipalossa	2
	Johdanto	2
	Puun hajoaminen lämmön vaikutuksesta	3
	Kuumuuden vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin	4
15.2	Palotekninen mitoitus	5
15.3	Palonkestävyyden laskeminen Eurokoodi 5:n mukaan	7
15.4	Liitosten palonkestävyys	10
15.5	Puurakenteiden palosuojaaminen	13
	Rakenneosien suojaaminen	13
	Liitosten suojaaminen	14
15.6	Mitoitus ja suunnittelu	18

15 LIIMAPUU JA PALO

15.1 Puun palaminen ja käyttäytyminen tulipalossa

Vaikka puu on palava materiaali, niin se soveltuu käytettäväksi rakenteisiin, joilta vaaditaan tietty palonkestävyys. Kuva 15-1 esittää eri materiaalien käyttäytymistä standardipalossa. Kuva esittää tietyn määritellyn rakenneosan kestävyuden muuttumista lämpötilan ja ajan funktiona. Kaikkien muiden materiaalien paitsi puun käyttäytyminen on riippumaton rakennusosan mitoista. Näiden materiaalien lämpötilan voidaan olettaa olevan koko poikkileikkauksessa sama, hieman ympäristön lämpötilaa pienempi. Niiden kaikki ominaisuudet muuttuvat samalla tavalla koko poikkileikkauksessa. Puu sen sijaan ei lämpene merkittävästi ja sen materiaaliominaisuudet eivät siksi muutu hiiltyneen kerroksen alla.

Puulla näyttää siten olevan parempi palokäyttäytyminen. Kuvassa esitetään tietyn, poikkileikkaukseltaan alkuaan 50 x 50 mm suuruisen rakenneosan kestävyuden pienenemistä palossa, ei puun materiaaliominaisuuksien muuttumista. Puun käytön etuna ei niinkään ole sen mekaanisten ominaisuuksien muuttumistapa vaan sen poikkileikkauksen hidas ja tietyssä määrin ennustettavissa oleva pieneneminen palossa.



KUVA 15-1

Eräiden rakennusaineiden suhteellisen kestävyuden muutos palossa.

Johdanto

Kasvikunnasta peräisin olevana orgaanisena materiaalina puu on palavaa ja se voi täydellisesti tuhoutua palossa. Tarpeeksi pitkän paloajan jälkeen se kadottaa kaikki fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuutensa. Tämä on seurausta sen kemiallisesta rakenteesta; puun koostumuksesta lähes puolet on hiiltä.

Puun palaessa sen ainesosat hajoavat lämmön vaikutuksesta. Tämän monimutkaisen prosessin tuloksena muodostuu yli 200 erilaista kemiallista yhdistettä. Mutta koska suurin osa puuainesta on selluloosaa, hemiselluloosaa (selluloosaa pienimolekyylisempiä polysakkarideja) ja ligniiniä, niin palaminen on riippuvainen näiden ainesosien lämpöhajoamisesta.



KUVA 15-2

Palossa kestävyytensä säilyttänyt liimapuupalkki.

Palokäyttäytymistä ei voida pelkästään selittää kemiallisen koostumuksen avulla. Materiaalin epähomogeenisuudella on suuri merkitys erityisesti rakenteen sortumisvaiheessa.

Tarkastellaan kahta samanlaista kuusilamelleista tehtyä liimapuupalkkia jotka altistettiin standardipalolle standardin SFS-EN 1363-1 (ISO 834) mukaisesti. Testi lopetettiin toisen palkin osalta, kun standardissa määritelty suurin muodonmuutos saavutettiin (kuva 15-2) ennen kuin palkki menetti kestävyytensä. Toinen palkki sen sijaan menetti kestävyytensä jo paljon aikaisemmin (kuva 15-3). Tämä johtui selvästikin palkin keskimmaisessa lamellissa olevasta oksasta. Ennen paloa oksalla ei ollut juuri mitään merkitystä. Palotilanteessa sen vaikutus oli kohtalokas ulkolamellien menettäessä kantokykynsä hiiltymisen vuoksi.



KUVA 15-3

Yhdessä lamellissa olevan suuren oksan vaikutus liimapuupalkin palamiseen.

Pyrolyysireaktio vaatii lämpöä. Reaktiotulokset joko oksidoituvat kuumassa ympäristössä luovuttaen runsaasti energiaa, tai hajoavat edelleen hiilimonoksidiksi ja vedyksi. Nämä ovat puun palamisessa syntyvät pääasialliset hajoamistuotteet. Tämän seurauksena palamisprosessi on itseään ylläpitävä, kunhan tietty lämpötila on saavutettu.

Hiiltyneen materiaalin rakenteeseen vaikuttaa ligniiniä hieman alemmassa lämpötilassa hajoava selluloosa.

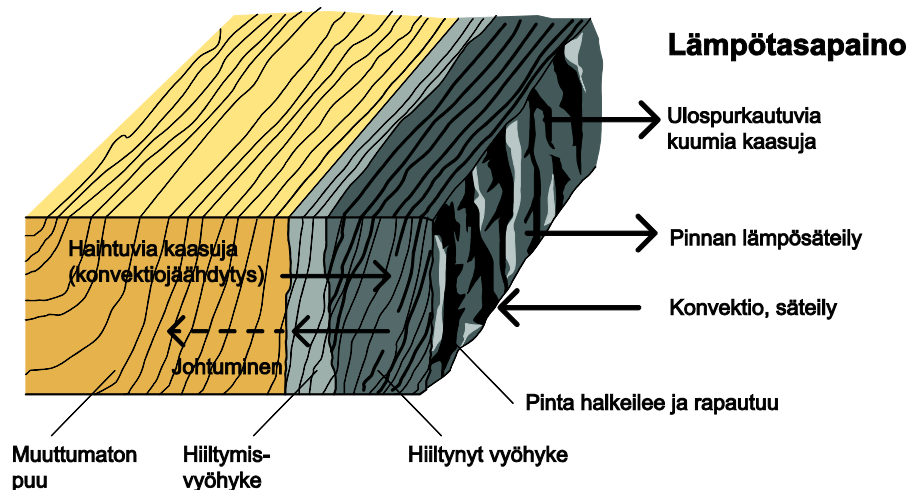
Puun hajoaminen lämmön vaikutuksesta

Taulukko 15-1 esittää kaavamaisesti, mitä tapahtuu palon edetessä lämpötilan noustessa. Eurokoodi 5:n mukaan 300 °C vastaava isoterminen on hiiltyneen ja muuttumattoman materiaalin rajakohta.

TAULUKKO 15-1 Palon kulku.

Lämpötila	Ilmiö
20 °C	Näytteen lämpötila ennen syttymistä
100 °C	Vesi irtoaa
120 °C	Hajoaminen alkaa (ligniini plastisoituu)
170 °C	Terminen hajoaminen alkaa
Yli 170 °C	Hajoamistuotteet palavat

Puun palaminen (ja terminen hajoaminen) etenee palolle alttiilta pinnoilta sisäänpäin määrätyl-
lä äärellisellä nopeudella, joten prosessi ei ole räjähdysmäinen (kuva 15-4. Jos ulkoiset olosuh-
teet ja materiaaliin liittyvät tekijät ovat samanlaiset, niin hiiltymisnopeus on pääasiassa riippu-
vainen puulajista. Ulkoisista tekijöistä suurin merkitys on lämpötilalla, lämmöntuotolla ja il-
manvaihdoilla. Materiaalin kosteuspitoisuus ja mahdollinen palosuojakäsittely ovat tärkeimmät
materiaaliin liittyvät tekijät. Palotilanteessa hiiltymissyvyys on suunnilleen verrannollinen palo-
aikaan, tai tarkemmin sanottuna siihen aikaan jona hiiltymistä on tapahtunut. Hiiltymättömän
puun lämpötila on alle 100 °C lukuun ottamatta välittömästi hiiltymisvyöhykkeen alla olevaa
ohutta, noin 10...20 mm paksua kerrosta.



KUVA 15-4

Hiiltymisprosessin ilmiöitä (Dinwoodie, 1981, mukaillen).

Kuumuuden vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin

Puu johtaa huonosti lämpöä. Palon aikana merkittävä osa lämmöstä siirtyy konvektion avulla kuumien palokaasujen kulkeutuessa puussa. Tämä on voitu todeta vertaamalla sellaisten puu-
lajien erilaisia hiiltymisnopeuksia (esimerkiksi pyökki ja tammi), joilla on lähes sama tiheys,
mutta merkittävästi erilainen kaasujen ja vesihöyryn läpäisevyys.

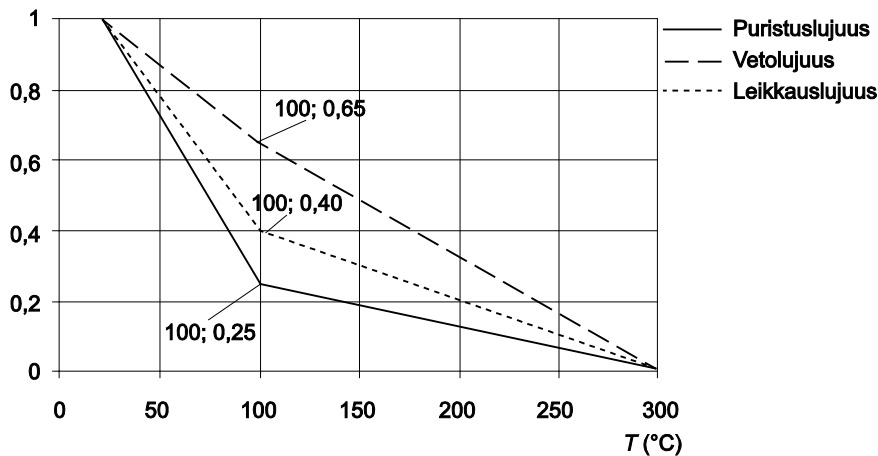
Kun kuumat palokaasut liikkuvat sisäänpäin, lämpötila nousee kunnes puu alkaa hajota ja
hiiltä, kun taas ulospäin kulkeutuessaan samat kaasut vaimentavat hiiltyneen kerroksen läm-
pötilan nousua.

Hiiltymisnopeutta pidetään puumateriaalin palonkestävyyden mittana. Koska puun lämpö-
tila on melkein muuttumaton lähes välittömästi hiiltyneen kerroksen alla, niin voidaan päätellä
että puun hyvän palokäyttäytymisen aiheuttaa

- jo mainittu mekaanisten ominaisuuksien pysyvyys aina lämpötilaan 110 °C-115 °C asti
- hiiltyneen kerroksen eristysvaikutus.

Aivan hiiltyneen kerroksen sisäpuolella on hyvin ohut kerros, missä puu ei ole riittävän kuumaa
hiiltäkseen, mutta sen ominaisuudet ovat heikentyneet. Eri mitoitusmenetelmät ottavat tä-
män kerroksen huomioon eri tavoin. Tämän heikentyneen kerroksen ja tavanomaisissa käyttö-
olosuhteissa olevan muuttumattoman puun raja on noin 120 °C isotermi.

Eurokoodi 5 (EN 1995-1-2) esittää tietyille mekaanisille ominaisuuksille kuvan 15-5 mukaisia pienennyskertoimia. Nämä ovat tieteellisessä kirjallisuudessa esitettyihin verrattuna huomattavasti varmemmalla puolella. Tämä johtuu virheettömän puun ja todellisten rakenneosien erilaisesta käyttäytymisestä. Rakenneosia tarkasteltaessa puun epähomogeenisuus pitää ottaa huomioon, ja sen merkitys kasvaa lämpötilan mukana.



KUVA 15-5

EN 1995-1-2 mukaiset pienennyskertoimet puun syiden suuntaisille lujuusarvoille lämpötilan funktiona (Liite B, Kehittyneet laskentamenetelmät).

15.2 Palotekninen mitoitus

Paloa kestävä rakenne voidaan suunnitella kahdesta erilaisesta näkökulmasta:

- Rakenne suunnitellaan palon vaikutusta kestäväksi
- Rakenteen todellinen kestävyys palotilanteessa arvioidaan laskennallisesti.

Tässä luvussa tarkastellaan lähinnä jälkimmäistä.

Yleisin tapa mitoittaa palonkestäviä puurakenteita on toistaiseksi ollut ulkoisten suojarakenteiden ja pintakäsittelyjen käyttö. Tällaisia käytettäessä suojatun liimapuupalkin poikkileikkaus on palon jälkeen vahingoittumaton ja palonkestävyys on riippuvainen suojauksen materiaalista ja paksuudesta. Sen sijaan suojaamattomalla liimapuupoikkileikkauksella on palon jälkeen pienentynyt poikkileikkaus ja pienentynyt kestävyys. Murtorajatilan kestävyys pitää sen vuoksi laskea pienentyneelle poikkileikkaukselle.

Rakentamisen kehittyminen ja koetulosten määrän lisääntyminen on johtanut uusiin menetelmiin ja teknisiin ratkaisuihin, joissa suunnittelijalla on aikaisempaa selkeämpi vaikutusmahdollisuus. Suunnittelijan pitää tarkastella palolle alttiin rakenteen osia palotilanteen onnettomuuskuorman vaikuttaessa ja osoittaa että jokaisen osalta toteutuu mitoitusehto¹

$$A_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t)$$

15-1

$A_{d,fi}$ palotilanteen kuorman vaikutuksen mitoitusarvo
 $R_{d,fi}$ vastaavan kestävyysmitoitussarvo samoissa olosuhteissa

¹ On huomattava että merkityksessä "Mitoitettava kuorman vaikutus" standardi EN 1995-1-2 käyttää merkintää E_d , eikä tässä käytettyä merkintää A_d . Muutos on tarkoituksellinen, jottei lukija sekoita merkintää A_d ja merkintää E_d jota tässä julkaisussa käytetään puun kimmokertoimelle.

t palon kesto aika

Rakenteeseen välittömästi kohdistuvien kuormien vaikutus lasketaan poikkeuksellisen mitoitustilanteen kuormitusyhdistelmästä, ja se on lukujen 2 ja 6 mukaisesti

$$1,0 \cdot G_k + 1,0 \cdot P_k(t) + 1,0 \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + 1,0 \cdot \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad 15-2$$

G_k pysyvien kuormien ominaisarvo
 $P_k(t)$ esijännitysvoiman ominaisarvo (palotilanteessa yleensä muuttuva ajan funktiona)
 $Q_{k,1}$ määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
 $Q_{k,i}$ muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot
 $\psi_{1,1}$ määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
 $\psi_{2,i}$ muiden muuttuvien kuormien yleinen yhdistelykerroin

Yhdistelykertoimien ψ arvot on annettu standardissa EN 1991-1-1 rakenteen eri kuormille ja osille ja ne ovat yleensä välillä 0...0,7. Erityistä harkintaa pitää noudattaa kun palotilanteessa voi esiintyä hyötykuorman suurin arvo, kuten kirjastoissa, arkistoissa ja varastorakennuksissa. $A_{d,fi}$ voidaan laskea yksinkertaistetulla menettelyllä normaalilämpötilamitoituksen kuormista

$$A_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot A_d \quad 15-3$$

A_d normaalilämpötilan kuormien aiheuttama vaikutus
 η_{fi} kuorman mitoitusarvon pienennyskerroin palotilanteessa

Kerroin η_{fi} on riippuvainen pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuuskertoimista γ_G ja γ_Q ja muuttuvien kuormien palotilanteessa käytettävästä yhdistelykertoimesta ψ_{fi} , joka on joko $\psi_{1,1}$ tai $\psi_{2,1}$ (EN 1991-1-2), ja se on

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} \quad 15-4$$

γ_G pysyvien kuormien osavarmuuskerroin
 $\gamma_{Q,1}$ määräävän muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin

Tämä voidaan myös esittää muodossa

$$\eta_{fi} = \frac{1 + \psi_{fi} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_{Q,1} \cdot \xi} \quad 15-5$$

η_{fi} on siis riippuvainen suhteesta $\xi = Q_{k,1}/G_k$.

Suomessa pienennyskertoimenä käytetään Ympäristöministeriön eurokoodien soveltamista koskevan asetuksen mukaisesti η_{fi} arvoa 0,6, paitsi standardin EN 1991-1-1 luokan E hyötykuormille käytetään η_{fi} arvoa 0,7.

15.3 Palonkestävyyden laskeminen Eurokoodi 5:n mukaan

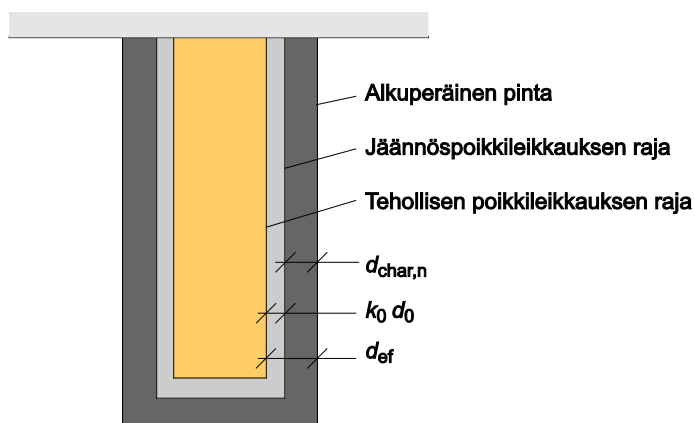
Puun lämpöhajoamisen yksinkertaistaminen tekee mahdolliseksi muodostaa riittävän tarkkoja mitoitusehtoja. Tätä varten on määritelty käsitteet

- *hiiltemissyvyys*, joka on hiiltyneen kerroksen paksuus
- *jäännöspoikkileikkaus*, joka on poikkileikkaus josta on vähennetty hiiltyneen kerroksen paksuus
- *tehollinen poikkileikkaus*, joka on poikkileikkaus josta on vähennetty hiiltyneen kerroksen paksuuden lisäksi sen alla oleva kerros jossa oletetaan kimmokertoimen ja lujuuden olevan nolla.

Eurokoodi 5 (EN 1995-1-2) esittää kolme laskentatapaa:

- *tehollisen poikkileikkauksen menetelmä*, EN 1995-1-2 kohta 4.2.2
- *muunnettujen ominaisuuksien käyttäminen* (pienempi lujuus ja kimokerroin), EN 1995-1-2 kohta 4.2.3
- *kehittyneet laskentamenetelmät* jolloin hiiltemismallit, lämpötilan kehittyminen ja poikkileikkauksen kosteussuhteen muuttuminen ja näiden muutosten vaikutus puun ominaisuuksiin otetaan huomioon, EN 1995-1-2 liite B.

Suomessa käytetään yleensä tehollisen poikkileikkauksen menetelmää, joka esitellään seuraavassa yksityiskohtaisemmin. Myös EN 1995-1-2 liitteen B menetelmää voidaan käyttää.



KUVA 15-6

Jäännöspoikkileikkaus ja tehollinen poikkileikkaus EN 1995-1-2 mukaan.

Eurokoodin mukaan voidaan tehdä erilaisia yksinkertaistuksia:

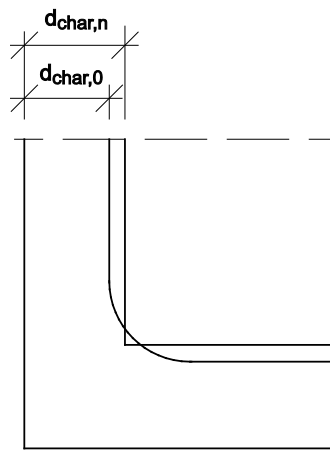
- *Koko rakenne analysoidaan* ja osoitetaan ehdon $A_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ olevan voimassa. Kun kuorman vaikutus ei yleensä kasva palon edetessä, voidaan olettaa että $\eta_{fi} = 0,6$ paitsi luokan E (varastotilat) muuttuvien kuormien osalta jolloin käytetään arvoa $\eta_{fi} = 0,7$.
- *Rakenteen osia analysoidaan* ja arvioidaan niiden välinen vuorovaikutus likimääräisesti.
- *Yksittäisiä rakenneseosia analysoidaan* ja oletetaan että palon alkutilanne vastaa tavallisia käyttöolosuhteita.

Tehollisen poikkileikkauksen menetelmää käytettäessä tehollinen poikkileikkaus lasketaan pienentämällä alkuperäistä poikkileikkausta kuvan 15-6 mukaisella tehollisella hiiltemissyvyydellä d_{ef}

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0$$

15-6

d_{ef}	tehollinen hiiltemissyvvyys (joka vhennet poikkileikkauksen mitoista)
$d_{\text{char},n}$	“todellinen” hiiltemissyvvyys, $d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t$, missä β_n on todellinen hiiltemisnopeus, joka ottaa huomioon halkeilun ja kulmien pyristymisen vaikutuksen (Taulukko 15-2, standardista EN 1995-1-2)
k_0	kerroin jonka arvo on 0 ja 1 välillä (mritell myöhemmin);
d_0	7 mm, jnnspoikkileikkauksen ja tehollisen poikkileikkauksen mittojen suurin poikkeama toisistaan



KUVA 15-7

Poikkileikkauksen pieneneminen kulmissa (standardista EN 1995-1-2).

Kun palo vaikuttaa kulman kummallakin puolella, niin nurkan pyristymisen huomioonottamiseksi voidaan kytt hiiltemisnopeutta β_0 (kuva 15-7). Yksidimensionaalisessa palotilanteessa (jollainen liimapuupalkin palaminen on) voidaan hiiltemissyvvyys laskea hiiltemisnopeuden β_0 avulla. T vastaa hyvin tehtyjä polttokokeita.

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t$$

15-7

Pyristyssteen voidaan olettaa olevan hiiltemissyvvyden $d_{\text{char},0}$ suuruinen. Näin voidaan tehdä jos poikkileikkauksen pienempi mitta on vhint b_{min}

$$b_{\text{min}} = \begin{cases} 2 \cdot d_{\text{char},0} + 80 & \text{jos } d_{\text{char},0} \geq 13 \text{ mm} \\ 8,15 \cdot d_{\text{char},0} & \text{jos } d_{\text{char},0} < 13 \text{ mm} \end{cases}$$

15-8

Hiiltemissyvvyden laskennassa pitää kytt hiiltemisnopeutena β_n arvoa, jos poikkileikkauksen pienempi mitta on pienempi kuin b_{min} .

Kertoimen k_0 arvoksi voidaan olettaa 1, jos palo kestää kauemmin kuin 20 min, ja se muuttuu lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 kun aika muuttuu arvosta 0 arvoon 20 minuuttia. Jos rakenneseosa on suojattu, niin arvoa $k_0 = 1$ vastaava aika on lyhyempi seuraavista ajoista:

- ajankohta jolloin rakenneseosa alkaa palaa
- ajankohta jolloin suojarakenne menettää suojaaavan vaikutuksensa.

Seuraavia yhtälöitä voidaan käyttää poikkileikkauksen lujuuden, kimmokertoimen ja liitosten kestävyysmitoitussarvojen laskennassa:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_k \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-9$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{05} \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-10$$

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_k \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-11$$

f_k	lujuuden ominaisarvo
S_{05}	kimmokertoimen E tai liukumoduulin G ominaisarvo, normaalilämpötilan 5 % fraktiili
R_k	liitoksen kestävyysmitoitussarvo, normaalilämpötilan 5 % fraktiili
k_{fi}	muuntaa 5 %-fraktiilin arvon 20 %-fraktiilin arvoksi massiivipuulle 1,25, liimapuulle ja puulevyille 1,15, puuosien välisissä liitoksissa 1,15 ja puun ja teräksen välisissä liitoksissa 1,05
$\gamma_{M,fi}$	ominaisvarmuuskerroin palotilanteessa, 1,0
$k_{mod,fi}$	muunnoskerroin joka korvaa palotilanteessa normaalilämpötilassa käytettävän muunnoskerroimen k_{mod} ; tässä laskentamenettelyssä $k_{mod,fi} = 1$
η	paloajasta t riippuvainen muunnoskerroin (selitetään myöhemmin yksityiskohtaisemmin)

TAULUKKO 15-2

Puulle ja puumateriaaleille käytettävät hiiltymisnopeuden mitoitussarvot β_0 ja β_n EN 1995-1-2 mukaan.

Materiaali	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Havupuu ja pyökki		
Liimapuu jonka ominaistiheys on $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Sahatavara jonka ominaistiheys on $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,80
b) Lehtipuu		
Sahatavara tai liimapuu jonka ominaistiheys on $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Sahatavara tai liimapuu jonka ominaistiheys on $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
jonka ominaistiheys on $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
d) Levyt ja lautatavara *		
Lautaverhouk	0,90	-
Vaneri	1,00	-
Muut puulevyt paitsi vaneri	0,90	-

* Arvot on annettu tuotteille joiden ominaistiheys on $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ ja paksuus 20 mm. EN 1995-1-2 antaa laskentamenetelmän arvojen korjaamiseksi jos tiheys ja paksuus on joku muu.

Liimapuun hiiltymisnopeus on pienempi kuin samasta puulajista tehdyn sahatavaran. Ilmeinen syy tähän on materiaalin suurempi homogeenisuus. Yleensä liimapuuta ei saa valmistaa termoplastisia liimoja käyttämällä. Jotkut kuumakovettuvat liimat saavuttavat kuitenkin lasituslämpötilansa noin 150–160 °C:ssa, alkavat hajota kemiallisesti lämmön vaikutuksesta ja menettävät tartuntansa alustaan ja mahdollisesti myös leikkauslujuutensa. Liimasauman heikkeneminen hiiltyneen kerroksen sisäpuolella voi aiheuttaa

- leikkausjännityksen kasvamisen alueessa joka sekä jäännöspoikkileikkausmenetelmän että tehollisen poikkileikkauksen menetelmän mukaan lasketaan mukaan palkin kantavaan osaan
- tämän seurauksena lamellien irtoamisen toisistaan jolloin liimasauma jää avoimeksi lämmön vaikutukselle, mikä nopeuttaa edellä kuvattua prosessia ja aiheuttaa kuoppia liimasaumojen kohdalla. Tämä ilmiö voi olla syynä muutamien tutkijoiden havaitsemaan suurempaan hiiltymisnopeuteen alueessa, missä leikkausjännitykset ovat suurimmat.

15.4 Liitosten palonkestävyys

Puurakenteet kootaan mekaanisin liittimin ja liitososin. Erilaisia liitososia käytetään varsinkin kehittyneissä liimapuukurakenteissa. Liitokset ovat oleellisia rakenteen staattiselle toiminnalle. Rakenteen kestävyys laskeminen palotilanteessa edellyttää, että liitosten käyttäytyminen voidaan arvioida ja niiden kestävyys laskea.

Metalliset rakenteen osat, myös liitososat, ovat usein palotekniseltä kannalta rakenteen heikoimmat kohdat. Metallinen liitos edistää rakenteen lämpenemistä, sillä se johtaa hyvin lämpöä. Lisäksi metalli laajenee lämmitessään ja sen muoto muuttuu, mikä voi johtaa rakenteen vakauden menetykseen.

Eurokoodin mukaan suojaamattomien liitoksien paloluokka on R15 tai R20 (taulukko 15-3). Jos halutaan parempi paloluokka, on mitoituksessa otettava huomioon lisävaatimuksia. Näistä tärkeimmät ovat yhteen liitettävien puuosien paksuus ja liittimien (naulojen, vaarnojen) keskinäiset ja reunaetäisyydet. Näin varmistetaan että liitos kestää aiotun palonkestoajan t_{req} .

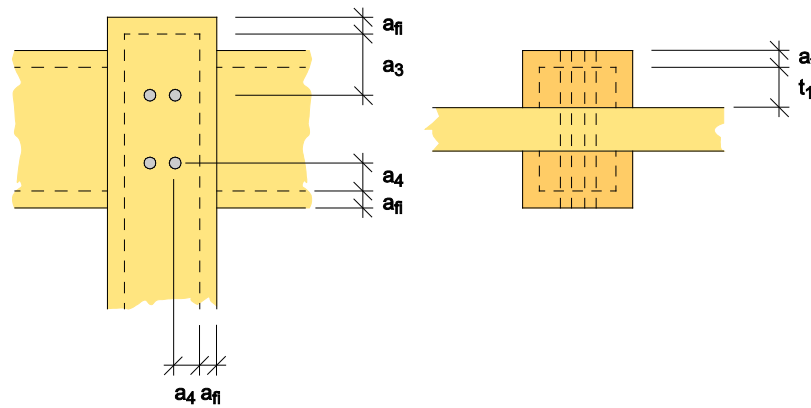
TAULUKKO 15-3

Suojaamattomien liitosten palonkestävyys kun sivukappaleet ovat puuta (EN 1995-1-2).

Liittimet	$t_{d,fi}$ (min)	Ehto
Naulat	15	$d \geq 2,8 \text{ mm}$
Puuruuvit	15	$d \geq 3,5 \text{ mm}$
Ruuvit	15	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$
Vaarnat	20	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$
Sidelevyt (hammasvaarnat ja vastaavat EN 912 mukaiset sidelevyt)	15	$t_1 \geq 45 \text{ mm}$

t_1 sivukappaleen paksuus

d liittimen halkaisija



KUVA 15-8

Kokonaan puun sisässä olevin puikkoliittimin tehtyjen liitosten vaatimukset paloluokassa $t_{\text{req}} \leq 30$ min EN 1995-1-2 mukaan.

TAULUKKO 15-4 Yhtälön 15-15 parametrin k arvo EN 1995-1-2 mukaan.

Liitostyyppi	k	kerrointa k vastaava suojaamattoman liitoksen suurin palonkesto aika (min)
Naulat ja puuruuvit	0,080	20
Puu ruuvattu puuta vastaan ($d \geq 12$ mm)	0,065	30
Teräs ruuvattu puuta vastaan ($d \geq 12$ mm)	0,085	30
Puu tappivaarnaliitoksella puuta vastaan * ($d \geq 12$ mm)	0,040	40
Teräs tappivaarnaliitoksella puuta vastaan * ($d \geq 12$ mm)	0,085	30
Muut liittimet (EN 912 mukaiset)	0,065	30

* Tappivaarnaliitosten arvoa saa käyttää jos neljää vaarnaa kohti on yksi ruuvi. Jos vaarnojen päät tulevat puusta ulos enemmän kuin 5 mm pitää käyttää ruuvien k -arvoja.

Jos palonkesto aika t_{req} on pienempi kuin 30 min sallitaan suojaamattomien, kokonaan puun sisässä olevin puikkoliittimin tehtyjen liitosten mitoituksessa yksinkertaistuksia. Tällöin riittää etä sivukappaleiden paksuutta ja jokaisen liittimen kuvassa 15-8 esitettyjä reunaetäisyyksiä kasvatetaan seuraavasti:

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{\text{flux}} \cdot (t_{\text{req}} - t_{d,fi}) \quad 15-12$$

k_{flux} ottaa huomioon metallisen liittimen aiheuttaman lisääntyneen lämmönsiirron, yleensä oletetaan $k_{\text{flux}} = 1,5$.

β_n hiiltymisnopeus, taulukon 15-2 mukaisesti liimapuulle $\beta_n = 0,70$ mm/min

Leikkausrasitetun liittimen palonkestävyys voidaan myös laskea pienennetyn kestävyuden menetelmällä. Liittimen kestävyuden mitoitusarvo palossa $R_{v,k,fi}$ voidaan laskea kestävyuden arvosta normaaliolosuhteissa $R_{v,k}$ (laskettu EN 1995-1-1 mukaisesti):

$$R_{v,k,fi} = \eta \cdot R_{v,k} \quad 15-13$$

$$\eta = e^{-k \cdot t_{d,fi}}$$

15-14

k liitoksen tyypistä taulukon 15-4 mukaan riippuvainen parametri

Suojaamattoman leikkausliitoksen palonkestävyys voidaan siten laskea seuraavasti:

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{\eta_{fi} \cdot \gamma_{M,fi}}{\gamma_M \cdot k_{fi}} \right)$$

15-15

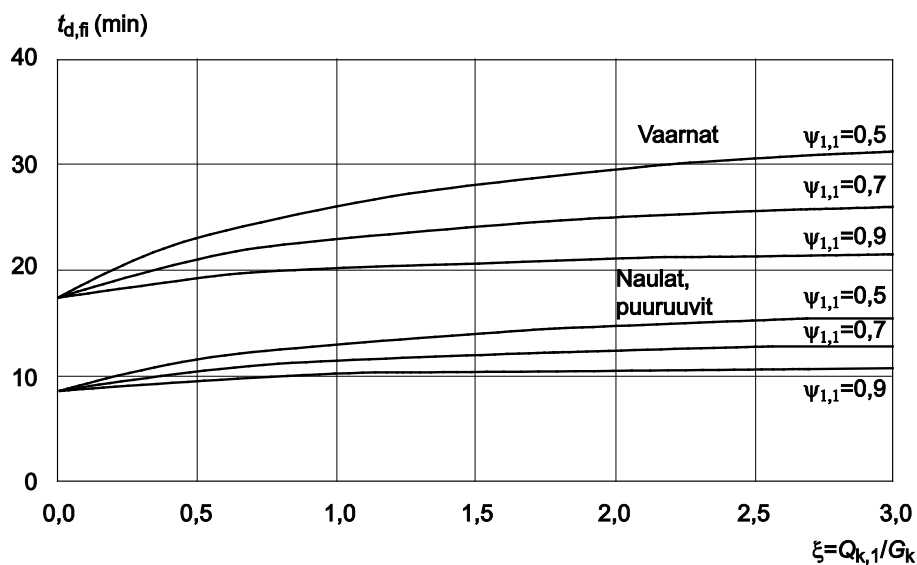
γ_M EN 1995-1-1 mukainen liitoksen kestävyysvarmuuskerroin normaaliolosuhteissa

$\gamma_{M,fi}$ liitoksen kestävyysvarmuuskerroin palotilanteessa

η_{fi} yhtälön 15-5 mukainen palotilanteen mitoituskuorman kerroin

Suojaamattomalla liitoksella ei juuri koskaan voi saada 30 minuuttia parempaa palonkestävyyttä. Kuvassa 15-9 esitetään suojaamattomien leikkausrasitettujen liitosten palonkestävyys, kun liitoksissa on puiset sivukappaleet. Ne on laskettu taulukossa 15-4 annettujen k -arvojen perusteella yhtälöstä 15-15 käyttämällä arvoja² $\gamma_M = 1,3$ ja $k_{fi} = 1,15$. Palonkestävyys on esitetty suureen ξ funktiona ja kuva vahvistaa että luokkaa R30 parempi luokka saavutetaan vain harvoin.

Tämä liitosten yleistarkastelu osoittaa, että jos liitoksien palonkestävyyden pitää olla R45 tai R60, niin suunnittelijan pitää jo varhaisessa vaiheessa ottaa tämä huomioon ja joko suunnitella liitokset suojattaviksi tai käyttää piiloliitoksia.



KUVA 15-9

Suojaamattomien leikkausrasitettujen liitosten palonkestävyys suureen ξ funktiona, kun liitoksen sivukappaleet ovat puuta.

² Suomessa liitosten mitoituksessa käytettävä γ_M arvo on riippuvainen liitoksen materiaaleista. Liimapuun ja teräksen välisessä liitoksessa se on 1,25 ja sahatavaran ja teräksen välisessä liitoksessa 1,4. $\gamma_{M,fi}$ on 1,0.

15.5 Puurakenteiden palosuojaaminen

Rakenneosien suojaaminen

Yleisimmät tavat suojata puuta paloa vastaan on käsitellä koko puuosa tai käyttää suojaverhousta:

- Passiivinen suojaus tarkoittaa tavallisesti tiivistä palamattomasta materiaalista tehtyä suojaverhousta, jonka ainoa tehtävä on eristää puuosa lämmön vaikutukselta.
- Materiaalin palamisprosessiin vaikuttava suojaus tarkoittaa, että puuhun tai sen pintoihin lisätään syttymistä estäviä tai viivyttäviä palonsuojakemikaaleja.

Puuhun lisättävät palonsuojakemikaalit sisältävät tavallisesti sellaisia aineita jotka voivat

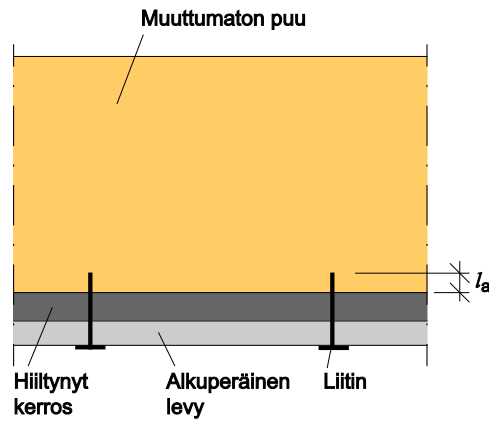
- estää hapettumista neutralisoimalla sellaisia vapaita radikaaleja, jotka muuten ovat taipuvaisia reagoimaan hapen kanssa (esimerkiksi H-, OH- tai vastaavia), tai vapauttamalla reagoimattomia radikaaleja kuten halogeeniyhdisteitä (pääasiassa Br-yhdisteitä)
- kehittää palamattomia kaasuja jotka laimentavat puun termisen hajoamisen yhteydessä syntyviä kaasuja ja estävät siten niiden syttymisen. Tällaisia ovat ammoniumfosfaatit, jotka tietyssä lämpötilassa kehittävät ammoniakkia ja muuttavat siten ilman ja palavien kaasujen suhdetta ja estävät liekkien leviämistä.

Pintakäsittelyyn voidaan käyttää paisumattomia tuotteita, joiden komponentit kehittävät lämmön vaikutuksesta syttymättömiä kaasuja tai kaasufaasin hapettumisen estäviä radikaaleja ja sammuttavat siten palon. Voidaan myös käyttää paisuvia tuotteita, jotka muodostuvat pinta-kerroksen muodostavasta sideaineesta, johon varsinaiset paloa estävät kemialliset yhdisteet kiinnittyvät. Nämä hajoavat lämmön vaikutuksesta palamattomaksi jäännökseksi, vedeksi ja kaasuiksi jotka lämpö muuttaa reagoimattomiksi. Muodostuvat kaasut eivät ainoastaan muuta ilman ja polttoaineen seossuhdetta ja estä siten liekkien leviämistä, vaan myös paisuttavat palamattoman jäännöksen. Näin muodostuu "vaahtoa", joka kemiallisen koostumuksensa mukaisesti jähmettyy joko kevyeksi tai kovaksi kerrokseksi. Tällaisella kerroksella on huono lämmönjohtokyky ja se toimii siten lämmöneristeenä.

Eristyslevyjen avulla tehty passiivinen suojaus pitää sekä mitoittaa oikein että rakentaa huolellisesti, ettei puutteellinen tai löyhä kiinnitys vaaranna suojauksen toimivuutta.

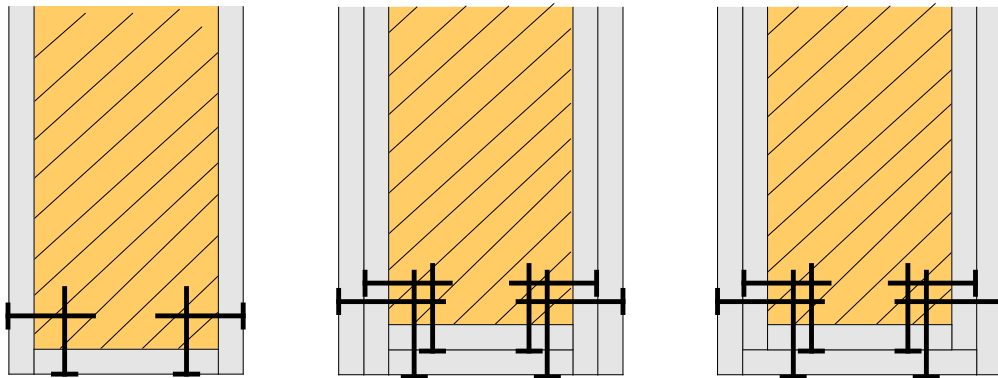
Suojalevyinä voidaan käyttää puulevyjä tai standardin EN 520 tyyppi A:n tai H:n mukaisia kipsikartonkilevyjä. Eristys pitää tehdä levynvalmistajan ohjeiden mukaisesti. Rakenneosan tai liitoksen palonkestävyyttä voidaan parantaa oleellisesti käyttämällä kuituvahvistettuja kalsiumsilikaattilevyjä tai standardin EN 520 tyyppi F:n mukaisia palokipsikartonkilevyjä. Nämä levyt pitää kiinnittää niin, että liittimien tunkeutumissyvyys jäännöspoikkileikkauksessa l_a on kuvan 15-10 mukaisesti vähintään 10 mm.

Kukin monikerroksisen suojauksen osana käytettävä suojalevy pitää kiinnittää kuvien 15-10 ja 15-11 mukaisesti puuhun (eikä pelkästään muihin levyihin) niin, että aiemmin esitetty minimivaatimus täyttyy. Liittimien keskinäisen etäisyyden pitää olla vähintään 60 mm ja se saa olla enintään pienempi arvoista 200 mm tai $17 h_p$ missä h_p on suojalevyn paksuus. Liittimien reuna-etäisyyden pitää olla vähintään pienempi arvoista 15 mm tai $1,5 h_p$ ja se saa olla enintään $3h_p$.



KUVA 15-10

Kipsikartonkilevyjen kiinnitys puuhun, liittimen tunkeuma jäännöspoikkileikkauksessa l_a (EN 1995-1-2).



KUVA 15-11

Esimerkki useampikerroksisen palosuojauksen kiinnittämisestä (EN 1995-1-2).

Liitosten suojaaminen

Aikaisemmin on jo mainittu että liitokset ovat palotilanteessa puurakenteen heikoimmat kohdat. Palonkestävyydeksi voidaan aina olettaa suojaamattoman liitoksen palonkestävyys, mikä kappaleen 15.4 mukaan on tavallisesti alle 30 minuuttia. Liitosten muotoilu ja niiden suojausten mitoittaminen on siten äärimmäisen tärkeää.

Kun liitokset suojataan puulevyillä tai standardin EN 520 tyyppi A:n tai H:n mukaisilla kipsikartonkilevyillä, suojaverhouksen pitää viivyttää hiiltymisen alkamista yhtälön 15-16 mukaisella ajalla t_{ch}

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 t_{d,fi} \quad 15-16$$

t_{req} liitoksen vaadittu palonkesto aika
 $t_{d,fi}$ suojaamattoman liitoksen palonkesto aika

Jos suojaus on tehty standardin EN 520 mukaisen tyyppin F kipsikartonkilevyillä, niin suojakerroksen palonkestoajan tarvitsee olla huomattavasti lyhyempi

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 t_{d,fi} \quad 15-17$$

Suojauksen pitää pysyä paikoillaan ainakin niin kauan että puun hiiltyminen alkaa, siis tyyppin A ja H kipsikartonkilevyille ajan t_{ch} ja luokan F levyille ajan t_{req} . Levyjen ja niiden kiinnikkeiden pitää siksi täyttää kuvan 15-12. minimivaatimukset.

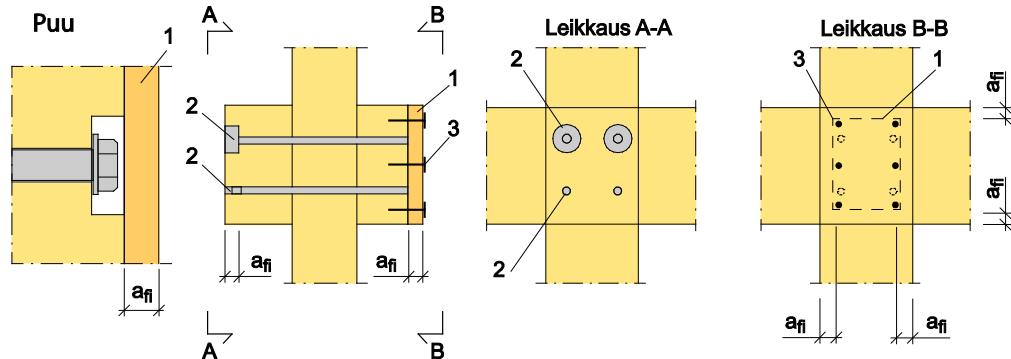
Ruuvien kantojen ja muttereiden suojauksen paksuuden pitää olla ainakin yhtälön 15-12 mukaisesti laskettu a_{fi} . Liittimien reunaetäisyyksien pitää olla vähintään a_{fi} , ja reunarivissä olevien liittimien välinen etäisyys ei saa olla suurempi kuin 100 mm ja keskirivissä olevien 300 mm. Puuruuvien ja naulojen tunkeuman pitää tyyppin A ja H kipsikartonkilevyille olla vähintään niiden kuusinkertainen paksuus. Tyyppin F kipsikartonkilevyille pitää tunkeuman palossa muuttumattomaan puuhun (jäännöspoikkileikkaukseen) olla vähintään 10 mm ajankohtana t_{req} .

Kun liitoksissa on käytetty uriin asennettuja vähintään 2 mm paksuja teräslevyjä, jotka eivät ulotu mistään puun pintojen ulkopuolelle (katso kuva Kuva 15-13 a), niin levyjen leveyden pitää täyttää vähintään taulukossa 15-5 annettu vaatimus.

TAULUKKO 15-5

Reunasuojaamattomien teräslevyjien vaadittu leveys.

		b_{min} (mm)
Suojaamattomat reunat (yleensä)	R 30	200
	R 60	280
Suojaamattomat reunat (yhdelta tai kahdelta sivulta)	R 30	120
	R 60	280



KUVA 15-12

Ruuvien ja vaarujen suojaus: 1) Liitintä suojaava levy; 2) Upotettu liitin on suojattu päälle liimatulla puutapilla; 3) Suojalevyjen kiinnittäminen (standardista EN 1995-1-2 mukailtu).

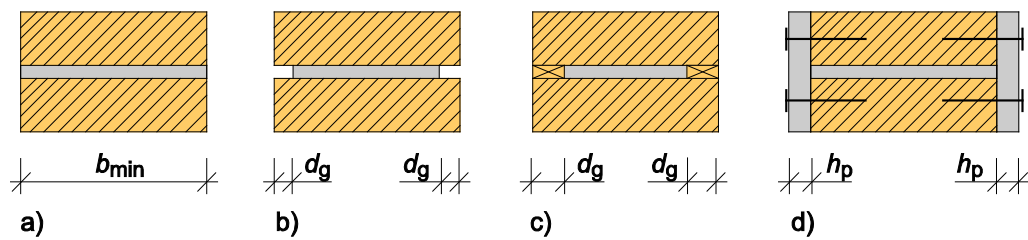
Puuosia kapeampien teräslevyjien katsotaan olevan suojattuja ja niiden leveyden ei tarvitse täyttää taulukossa 15-5 annettuja vaatimuksia jos:

- alle 3 mm paksun levyn reunat ovat suojaamattomat; kun kuvan 15-13 b) mitta d_g ylittää 20 mm luokassa R30 tai 60 mm luokassa R60
- levyn reunat on suojattu puulla tai puulevyllä; kun kuvan 15-13 c) tai d) mitta d_g tai h_p ylittää 10 mm luokassa R30 tai 30 mm luokassa R 60.

Eurokoodi 3:n (EN 1993-1-2) mukaan mitoitettun liitoksen ulkopuolisin teräslevyin tehdyllä suo-
jauksella on hyvin huono palonkestävyys. Vaikka niiden puuta vastaan olevan pinnan voidaan
katsoa olevan suojassa palolta, niin palonkestävyys on aina enintään noin 20-30 min. Sen vuok-
si suojaukseen on parempi käyttää puuta tai puulevyjä. Teräslevyjen käyttöä voidaan harkita
vain, jos ne sekä pinnoiltaan että reunoistaan peittävät rakennusosilla joiden vähimmäispak-
suus a_{fi} on

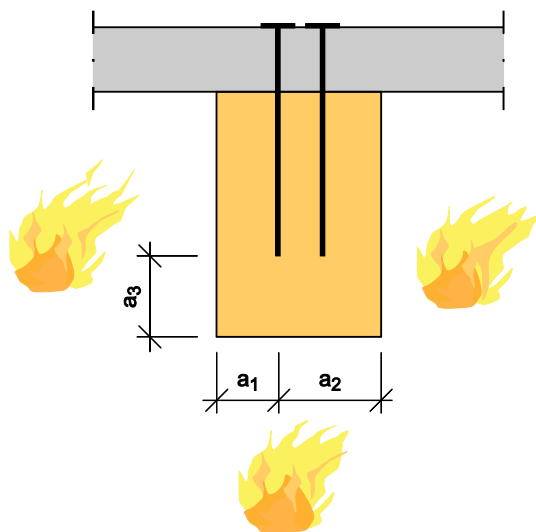
$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - 5) \quad 15-18$$

Tämä yhtälö on analoginen yhtälön 15-12 kanssa, jos teräslevyn palonkestävyudeksi oletetaan
5 minuuttia.



KUVA 15-13

Urassa olevan teräslevyn reunojen suojaaminen (a) suojaamaton levy (b) reunaa suojaa ilmarako (c) reunaa
suoja levy kohdalle liimattu täytelista (d) reuna on suojattu ulkopuolisin levyin. EN 1995-1-2 mukaan.



KUVA 15-14

Liitos missä on käytetty aksiaalisesti kuormitettuja ruuveja (EN 1995-1-2).

EN 1995-1-2 esittää aksiaalisesti kuormitettujen ruuvien suojaamisen puulla (kuva 15-14). Puun
suoja vaikutusta voidaan tarkastella yhtälöiden 15-19 avulla. Yhtälön 15-11 parametriksi η voi-
daan olettaa 1 ja puun suojavaikutus on riittävä kun yhtälöt 15-19 (a)...(c) ovat voimassa

$$a_2 \geq a_1 + 40 \quad 15-19 (a)$$

$$a_3 \geq a_1 + 20 \quad 15-19 (b)$$

$$a_1 \geq \beta \cdot t_{fi,d} + 28$$

15-19 (c)

a_1, a_2, a_3 kuvassa 15-14 määritellyjä mittoja, yksikkö mm
 β arvoksi oletetaan tavallisesti 1 mm/min

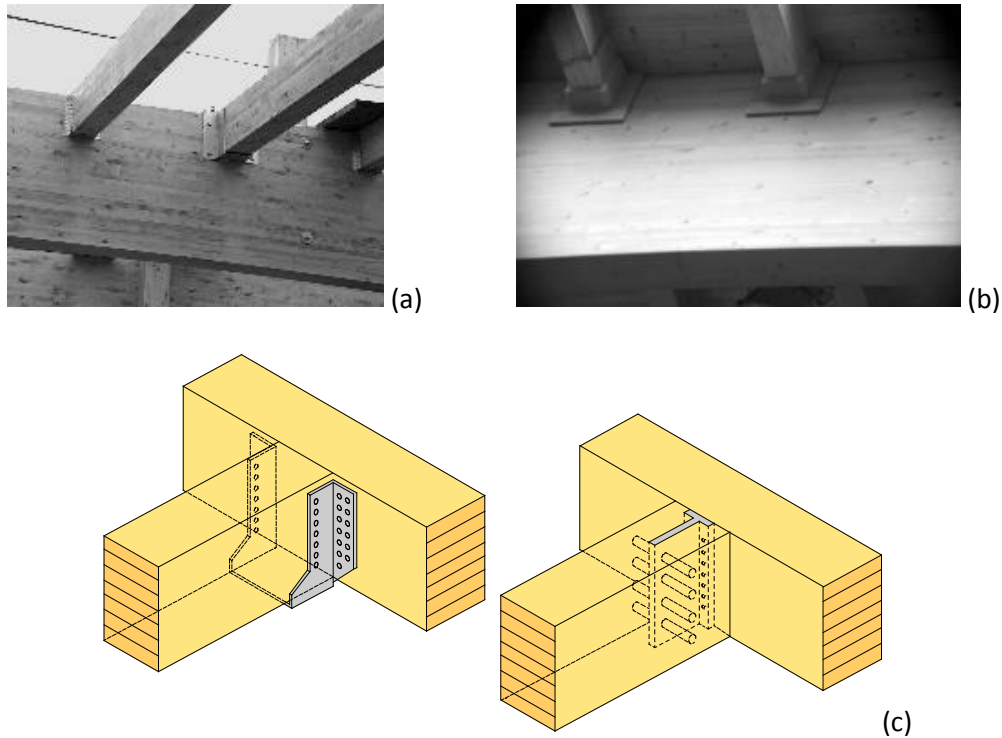
Puuosilla pitää olla riittävä palonkestävyys puurakenteen liitosten suojaamiseksi. Suojavaikutus voidaan saada aikaan verhouksella, mikä on hyvin tehokas tapa joko silloin, kun liitososa ei voida sijoittaa kuvan 15-15 mukaisesti puuosien sisäpuolelle, tai kun on suojattava palolle alttiita T-teräksen avulla tehtyjä liitoksia. Kuvien 15-15 ja 15-16 b) liitokset täyttävät paloluokan R60 vaatimukset.

Kuvan 15-16 c) mukaista pääpalkkien ja sekundääripalkkien välistä liitosta varten on tarjolla erilaisia T-muotoisia liitoskappaleita, jotka on tarkoitettu asennettavaksi rakennusosan sisään, jotta saadaan esteettisempi liitos; katso enemmän luvusta 14.



KUVA 15-15

Asbestivapaiden kalsiumsilikaattilevyjen käyttäminen niveltapillisen kiinnityksen suojaamiseen.

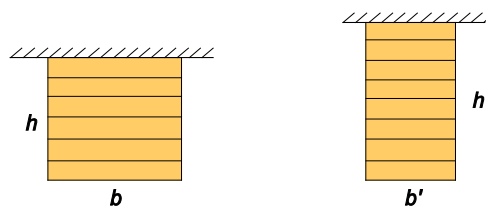


KUVA 15-16

Pääpalkin ja sekundääripalkin välinen liitos (a) suojaamaton liitos (b) kalsiumsiliikaattilevyin suojattuna (c) esteettisempi vaihtoehto missä on käytetty T-muotoista liitoskappaletta.

15.6 Mitoitus ja suunnittelu

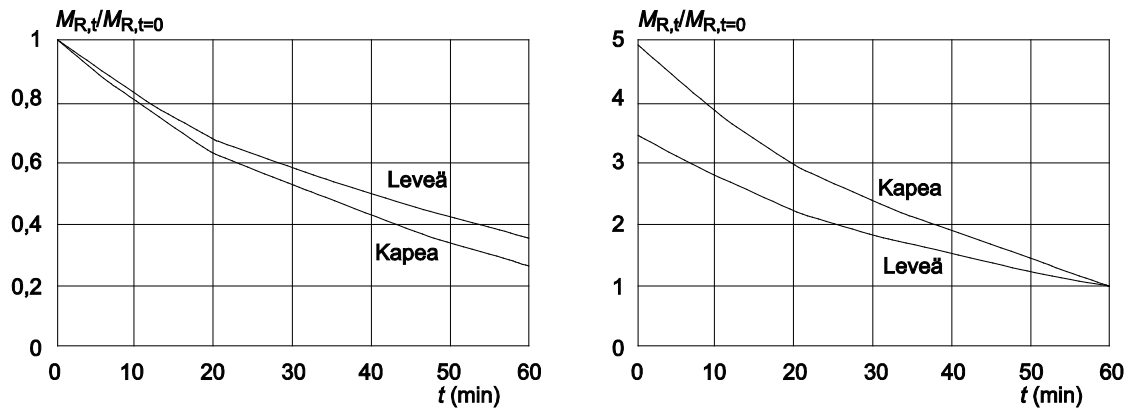
Palotilanne vaikuttaa puupalkkien ja pilareiden mittojen valintaan. Tarkastellaan kuvassa 15-17 esitettyä kahta taivutusmomentin rasittamaa poikkileikkausta ("leveä" ja "kapea"), jotka ovat palolle alttiina kolmelta sivulta ja joilla on sama taivutusvastus, mutta eri korkeus. Ne kestävät silloin normaalitilanteessa saman taivutusmomentin. Liimapuupalkkien poikkileikkaus vastaa yleensä kapeaa vaihtoehtoa.



KUVA 15-17

"Leveä" ja "kapea" liimapuupopikkileikkaus.

Kuva 15-18 esittää näiden poikkileikkausten palokäyttäytymistä. Leveämmillä poikkileikkauksilla kestävyys pienenee jonkin verran hitaammin kuin kapeilla (kuva 15-18, ylempi kuva). Esimerkin leveän palkin koko on 220 x 240 mm ja kapean 160 x 280 mm. Laskelma on tehty tehollisen poikkileikkauksen menetelmällä (laskelmassa on otettu huomioon, että poikkileikkausten alkuperäinen kestävyys eroaa toisistaan noin 1 %).



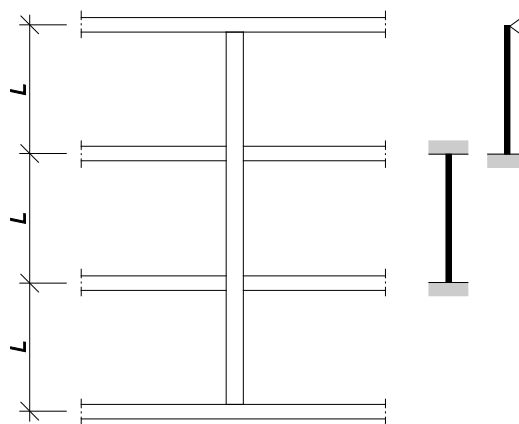
KUVA 15-18

Leveän ja kapean liimapuupoikkileikkauksen taivutusmomentinkestävyyden pieneneminen.

Jos vastaavasti tarkastellaan kahta poikkileikkausta, joiden pitää tietyllä ajan hetkellä t (esimerkissä 60 min) kestää sama taivutusmomentti, niin kapeammalla poikkileikkauksella on koko ajan ennen hetkeä t parempi kestävyys. Kuva 15-18, alempi kuva, esittää leveän palkin, jonka koko on 200 x 200 mm ja kapean 140 x 280 mm, ja joilla on sama kestävyys 60 min palon jälkeen. (Tässäkin tapauksessa laskelmassa on otettu huomioon, että poikkileikkausten kestävyys 60 min palon jälkeen eroaa toisistaan noin 1 %).

Aksiaalisesti puristetut liimapuupilarit ovat usein palolle alttiina kaikilta neljältä sivultaan. Palon edetessä niiden nurjahdus tulee kriittiseksi.

Jos pilari jatkuu useamman kerroksen (ja useamman palo-osaston) yli ja muodostaa jäykistävän rakenteen, niin sille voidaan olettaa edullisemmat reunaehdot kuin normaalilämpötilan mitoituksessa. Kuvan 15-19 mukaisesti keskellä olevissa kerroksissa voidaan olettaa pilari olevan jäykästi kiinni molemmista päistään ja ylimmässä kerroksessa voidaan olettaa pilarin alapää jäykästi kiinnitetyksi. Käytettävä pilarin pituus L on esitetty samassa kuvassa.



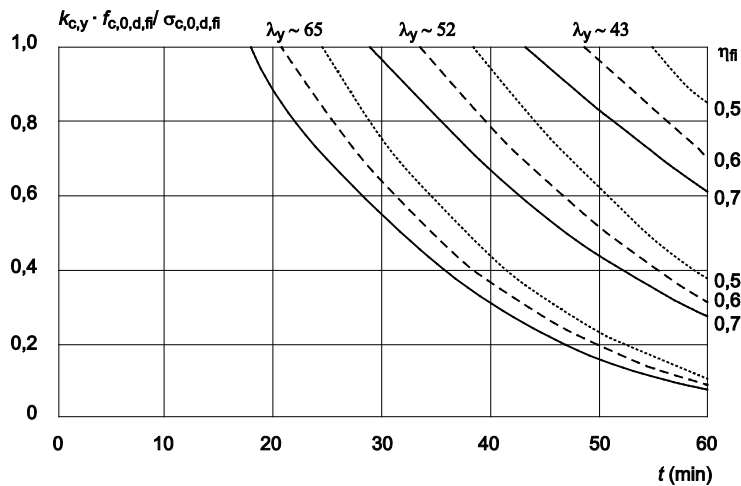
KUVA 15-19

Jatkuvan pilarin nurjahduspituus palotilanteessa (EN 1995-1-2 mukaan).

Pilarin nurjahdus tulee kriittiseksi myös silloin kun sen hoikkuusluku on pieni ja vaadittava palonkestävyys on kohtuullinen. Kuvassa 15-20 on muutamia esimerkkejä luokan GL 24h liimapuupilareista, joiden poikkileikkaus on neliö, sivujen pituudet ovat 160, 200 ja 240 mm ja korkeus $l_0 = 3000$ mm. Hoikkuusluvut λ_y ovat siten noin 65, 52 ja 43. Yhtälössä 15-5 esiintyväksi kuorman mitoitusarvon kertoimeksi η_{fi} on oletettu 0,5, 0,6 ja 0,7. EN 1995-1-2 suosittelee arvoa $\eta_{fi} = 0,6$, paitsi luokan E muuttuville kuormille arvoa $\eta_{fi} = 0,7$.

Kuvan x-akseli esittää paloaikaa. Kukin viiva esittää jäljellä olevan kestävyuden verrattuna alkuperäiseen (jota on merkitty arvolla 1) eri hoikkuuslukujen λ_y ja pienennyskertoimien η_{fi} funktiona.

Kuva osoittaa, että luokan R30 vaatimus täyttyy vain pilarille, jonka hoikkuusluku λ_y on pienempi kuin 50 ja $\eta_{fi} \leq 0,6$. Samaa pilaria voidaan käyttää luokassa R60 vain, jos se ylimitoitetaan normaaliolosuhteissa. Esimerkiksi jos pilarin hoikkuusluku alussa on $\lambda_y \cong 43$ ja pienennyskerroin $\eta_{fi} = 0,7$, niin sillä on paloluokassa R60 vain 60 % alkuperäisestä kestävyydestään.



KUVA 15-20

Pilareiden palonkestävyys hoikkuusluvun vaihdellessa.

Jos liimapuupilareilta vaaditaan parempi paloluokka kuin R30 niin ne pitää mitoittaa huolellisesti, sillä poikkileikkauksen kestävyys on riippuvainen hoikkuusluvusta, joka kasvaa nopeasti hiiltymisen edetessä. Suunnittelijan pitää ottaa huomioon kestävyuden pieneneminen palotilanteessa kasvattamalla liimapuupilarin mittoja.

16	LIIMAPUURAKENTEIDEN YKSITYISKOHTIEN SUUNNITTELU	2
16.1	Kuormien tehokas siirtäminen	2
	Suurten pistekuormien ripustaminen palkille	2
	Palkin ja pilarin liitokset	3
	Vinojen sauvojen, palkkien ja kaarien tuet	3
	Ristikön nurkkien epäkeskeisyys	4
	Diagonaalin kiinnitys pitkien teräslevyjen avulla	5
	Eri korkuisten palkkien väliset liitokset	5
16.2	Kosteusmuodonmuutoksen sallivat liitokset	6
	Kehän nurkka	6
	Palkin jatkos	6
	Kahden palkin liitos	7
16.3	Rakenteellisen puunsuojauksen huomioonottaminen liitoksissa	8
	Puupilarin kiinnittäminen betoniperustukseen	8
	Veden keräytymisen estäminen	8
	Kantavien rakennusosien suojaaminen verhouksella	9
16.4	Yhteenveto	10

16 LIIMAPUURAKENTEIDEN YKSITYISKOHTIEN SUUNNITTELU

Liimapuurakenteissa on esiintynyt paikallisia murtumia ja ne ovat joskus sortuneet kokonaan. Tavallisimmin vaurioiden syynä on ollut joku seuraavista, aikaisemmissa luvuissa käsitellyistä ongelmista:

- Rakennusosaan on tehty sen kokoon nähden liian iso reikä (luku 5).
- Rakennusosaan on tehty liian syvä lovi (luku 5).
- Kaarevan palkin tai kaarevan harjapalkin kaarevan osan kaarevuussäde on liian pieni tai kaltevuus liian suuri (luku 7).
- Palkin kalteva reuna, missä lamellit on viistetty, on vetopuolella (luku 7).
- Jäykistys on riittämätön (luku 13).

Tässä luvussa esitetään kuinka yksityiskohdat pitää suunnitella jotta vältetään murtumilta. Luku käsittelee vain sellaisia yksityiskohtia mitä ei ole aikaisemmissa luvuissa ollut esillä. Oikea yksityiskohtien suunnittelu on tärkeää kaikkien puurakenteiden kestävyydelle, säilyvyydelle ja käytettävyydelle. Koska liimapuu antaa mahdollisuudet tehdä suuria rakenteita, niin liitosten suunnittelu on vielä tärkeämpää.

Liimapuurakenteen liitosten suunnittelun peruseräatteen voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Voiman siirron pitää olla tehokasta ja vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan pitää välttää tai ne pitää ainakin minimoida.
- Liitosten pitää sallia kosteusmuodonmuutokset, joita aiheutuu liimapuun joutuessa vaihteleviin kosteusolosuhteisiin, etteivät ne aiheuta vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan.
- Liitoksissa pitää ottaa huomioon rakenteellinen puunsuojaus, ettei rakenne lahoa.

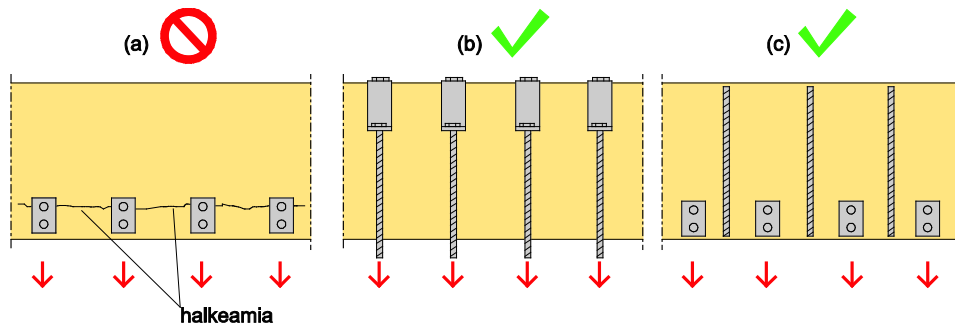
Seuraavilla sivuilla esitellään erilaisia detaljeja. Nämä sisältävät esimerkkejä yleisistä virheistä ja ehdotuksen niiden korjaamisesta. Virheellisen liitoksen mahdollisesti aiheuttama murtuma on myös esitetty.

16.1 Kuormien tehokas siirtäminen

Puurakenteen liitosten pitää aina siirtää kuorma yksiselitteisesti, siis siten että voimat eivät voi välittyä rakenteen osien välillä useammalla eri tavalla. Lisäksi liitos ei saa rakenteen kuormittuessa aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan.

Suurten pistekuormien ripustaminen palkille

Lämmitys- ja ilmastointilaitteiden, nosturiratojen tai rakennuksen seinärakenteiden kiinnittäminen liimapuupalkkeihin aiheuttaa niille suuria pistekuormia. Jos kiinnitys tehdään palkin alareunaan, niin syntyy kuvan 16-1 (a) mukaisesti vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan, ja palkki voi haljeta. Kuvat 16-1 (b) ja (c) esittävät kaksi tapaa millä halkeaminen voidaan välttää.

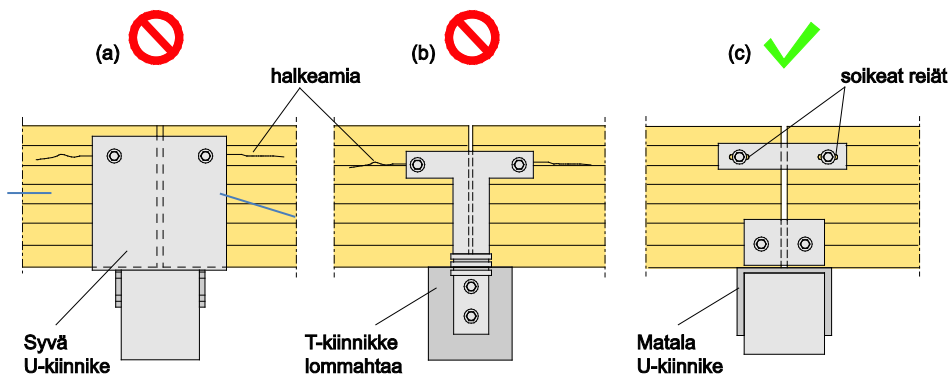


KUVA 16-1

Palkille tulevien suurten pistekuormien siirtäminen (a) alareunaan ripustaminen - halkeamisriski (b) yläreunaan ripustaminen (c) alareunaan ripustaminen ja palkin vahvistaminen.

Palkin ja pilarin liitokset

Kun kaksi vapaasti tuettua palkkia tuetaan samalla tuella – joka voi olla puu-, betoni-, tai teräspilari – käytetään usein kuvan 16-2 (a) tai (b) mukaisesti U- tai T-muotoista teräskiinnikettä yhdistämään palkit pilariin. Jos liitin sijoitetaan korkealle pilarin ja palkin tukipinnasta, se estää kuormituksen aiheuttaman palkin kiertymisen. Tämän seurauksena palkki voi haljeta. Lisäksi jos palkki kutistuu, niin liittimet voivat alkaa tukea palkkia. Kutistuminen voi siten aiheuttaa halkeamisen; lisäksi jos teräsosat ovat liian hoikkia niin ne voivat lommahtaa kuvan 16-2 (b) mukaisesti. Kuva 16-2 (c) esittää tavan millä halkeaminen voidaan välttää.

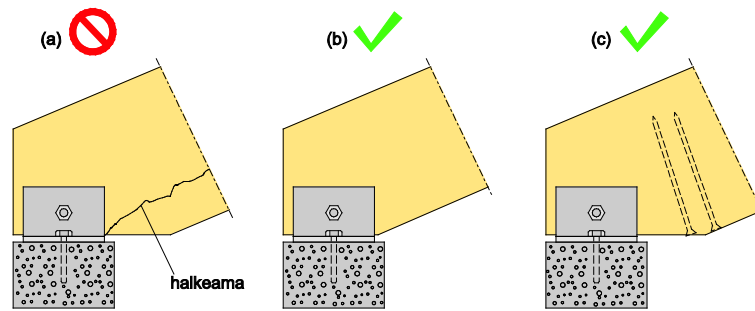


KUVA 16-2

Palkin ja pilarin välinen liitos (a) syvä U-kiinnike - halkeamisriski (b) T-kiinnike - halkeamisriski (c) matala U-kiinnike ja palkin yläreunassa teräslevykiinnike missä on palkin pituussuunnassa soikeat reiät.

Vinojen sauvojen, palkkien ja kaarien tuet

Vinoasennossa olevien rakennusosien ja kaarien tuet pitää muotoilla siten, että vaakasuoraan sahattu puupinta on kokonaisuudessaan rakennusosaa tukevan pilarin tai seinän päällä. Tukipintaa leveämpään vaakasuoraan pintaan aiheutuu vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Tämä ilmiö on samanlainen kuin mitä luvussa 5 on kuvattu, ja sen seurauksena puu voi haljeta. Kuvat 16-3 (b) ja (c) esittävät kaksi tapaa millä halkeaminen voidaan välttää.



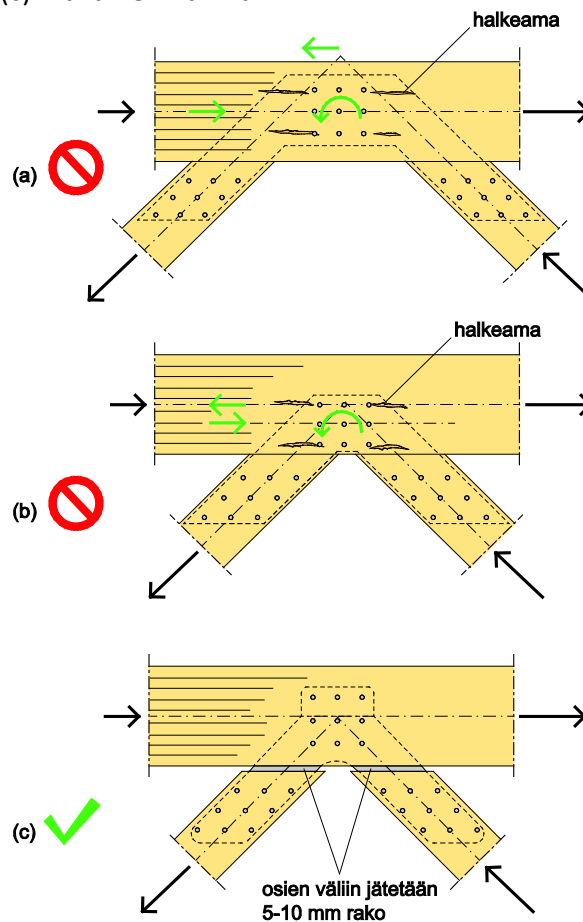
KUVA 16-3

Vinoasennossa olevan rakennusosan tukeminen (a) tukea pidempi vaakasuora sahattu pinta - halkeamisriski (b) vaakasuoraan sahattu pinta kokonaisuudessaan rakennusosaa tukevan pilarin tai seinän varassa (c) vahvistaminen liimaruuvein tai puuruuvein.

Ristikön nurkkien epäkeskeisyys

Nurkkien epäkeskeisyyttä pitää aina välttää halkeamisen estämiseksi. Epäkeskeisyys aiheuttaa sekundäärisen taivutusmomentin, joka puolestaan aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Epäkeskeisyyttä muodostuu jos paarteen ja uumasauvojen neutraaliakselit eivät leikkaa toisiaan samassa pisteessä (kuva 16-4 (a)) tai jos neutraaliakselit leikkaavatkin toisensa samassa pisteessä mutta liitinryhmän painopiste poikkeaa tästä (kuva 16-4 (b)).

Ristikön nurkka voidaan usein suunnitella sellaiseksi ettei siinä ole epäkeskeisyyttä, kuten esimerkiksi kuvan 16-4 (c) mukainen nurkka.

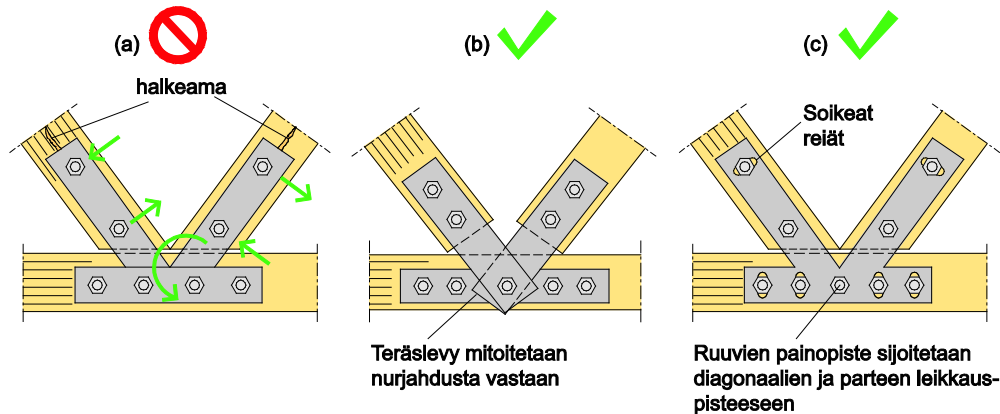


KUVA 16-4

Tappivaarnaliitoksin toteutettuja ristikon nurkkia (a) epäkeskeiset diagonaalit (b) epäkeskeinen liitinten sijoitus (c) nurkka ilman epäkeskeisyyttä.

Diagonaalin kiinnitys pitkien teräslevyjen avulla

Ristikkoa kuormitettaessa sen nurkat kiertyvät. Jos nurkkalevyt ovat pitkiä ja niiden väliset kulmat eivät voi muuttua, ne estävät kuormituksen aiheuttaman sauvojen kiertymisen. Tästä aiheutuu sauvan päälle taivutusmomentti, joka voi aiheuttaa kuvan 16-5 (a) mukaisen halkeamisen kiinnikeriviä pitkin. Halkeamisriskiä voi vähentää pienentämällä diagonaalin kiinnikkeiden keskinäistä etäisyyttä. Kuvat 16-5 (b) ja (c) esittävät kaksi tapaa millä halkeaminen voidaan välttää.

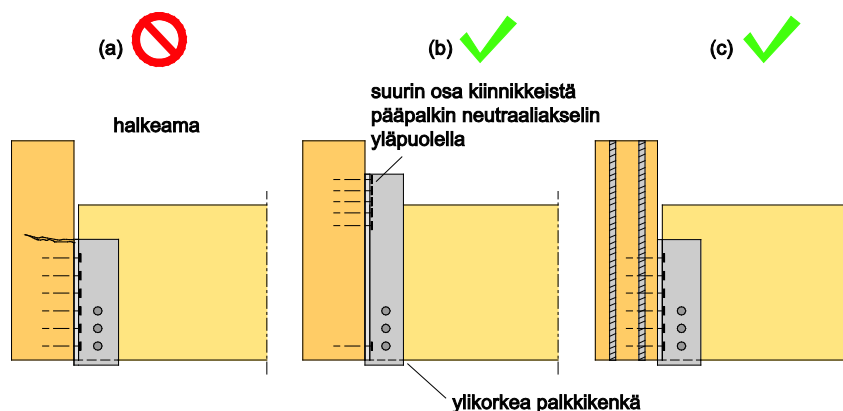


KUVA 16-5

Ristikon nurkka jossa on käytetty pinnalla olevia teräslevyjä (a) ristikon sauvat eivät pääse kuormitettaessa kiertymään - halkeamisriski (b) erilliset teräslevyt ja nivelkiinnitys leikkauspisteessä (c) soikeareikäinen kiinnike.

Eri korkuisten palkkien väliset liitokset

Pääpalkkeilla ja sekundääripalkkeilla voi olla erilaiset korkeudet. Sekundääripalkin kiinnitys pääpalkin neutraaliakselin alapuolelle voi aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan ja kuvassa 16-6 (a) esitetyn korkeamman palkin halkeamisen. Jos suurin osa kiinnikkeistä sijoitetaan kuvan 16-6 (b) mukaisesti neutraaliakselin yläpuolelle tai jos käytetään ripustettavaa palkkikenkää, niin pääpalkin halkeamisriski on pienempi. Toinen mahdollisuus on vahvistaa palkkia kuvan 16-6 (c) mukaisesti liimaruuvein tai puuruuvein. Pääpalkille syntyy vääntöä, jos sekundääripalkki on vain pääpalkin toisella puolella. Tämä on otettava huomioon pääpalkin mitoituksessa.



KUVA 16-6

Sekundääripalkin liittyminen pääpalkkiin (a) voima siirtyy kiinnikkeiden välityksellä neutraaliakselin alapuolelle - halkeamisriski (b) ylikorkea palkkikenkä (c) pääpalkin vahvistaminen.

16.2 Kosteusmuodonmuutoksen sallivat liitokset

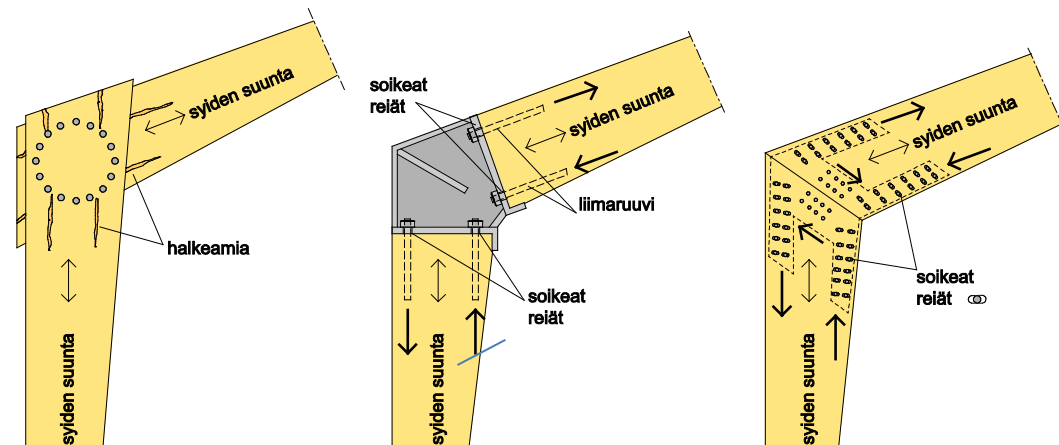
Luvussa 14 on painotettu, että puun kosteusmuodonmuutos pitää ottaa huomioon liimapuura-kenteiden liitosten suunnittelussa. Puun kosteussuhteen muutokset aiheuttavat turpoamista ja kutistumista ja tästä voi aiheutua vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan. Useimmissa ta-pauksissa puun syiden suuntaiset muodonmuutokset voidaan jättää huomioonottamatta. Toi-saalta taas syitä vastaan kohtisuora muodonmuutos voi olla suuri, erityisesti jos poikkileikkauk-sen korkeus on suuri tai kosteusvaihtelut ovat suuria.

Kehän nurkka

Kehän nurkka tehdään joskus vaarnoin, jotka sitovat toisiinsa päällekkäiset puuosat. Tavallisesti palkki on yksinkertainen liimapuupalkki, ja pilari muodostuu kuvan 16-7 (a) mukaisesti kahdes-ta palkin molemmiin puolin olevasta rinnakkaisesta liimapuuosasta.

Yleensä sisätilassa olevat rakenteet kuivuvat asennuksen jälkeen. Kun rakenne kuivuu, niin sekä palkki että pilari kutistuvat syitä vastaan kohtisuoraan. Kiinnikkeet estävät kutistumisen, mikä lisää puun halkeamisriskiä. Puun mahdollinen halkeaminen pienentää sekä liitoksen taivu-tusmomentinkestävyyttä että puuosien leikkauskestävyyttä.

Tällaisen rakenteen halkeamista voidaan välttää käyttämällä luvussa 10.3.3 kuvattua sormi-jatkettua nurkkaa. Halkeamista voidaan myös välttää käyttämällä nurkassa erityistä teräskiinni-kettä. Kuvassa 16-7 (b) olevan kehän nurkkakappale muodostuu teräsosasta, joka on kiinnitet-ty kehän jalkaan ja palkkiin liimaruuvein. Kuvassa 16-7 (c) olevan kehän nurkka on tehty teräs-levyin ja tappivaarnaliitoksin.

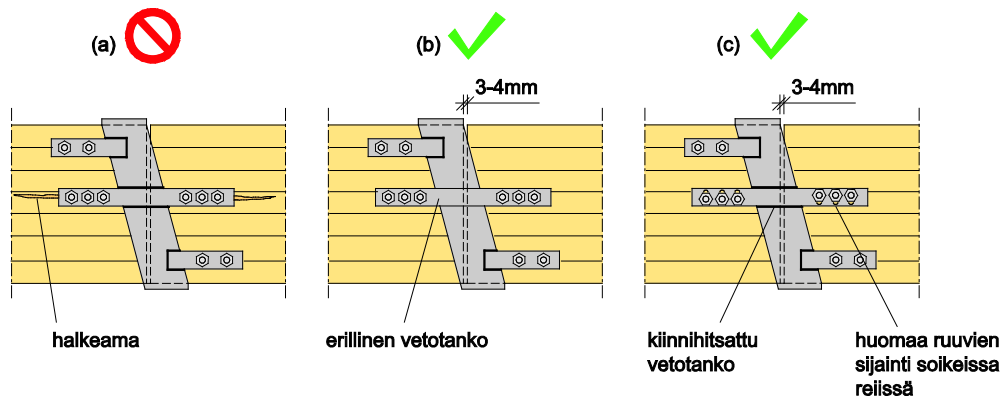


KUVA 16-7

Kehän nurkka (a) läpimenevin liittimin yhdistetty palkki ja kahdesta osasta muodostuva pilari – halkeamisriski (b) teräksinen liimaruuvein kiinnitetty nurkkakappale (c) tappivaarnaliitos.

Palkin jatkos

Gerber-tyyppiseen jatkoskappaleeseen lisätään toisinaan kiinteä vetotanko (vaakasuora teräs-levy hitsattuna tavanomaiseen Gerber-kiinnikkeeseen). Tällainen liitoskappale voi aiheuttaa ve-tojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan ja siis myös halkeamisen puuosien kutistuessa, katso kuva 16-8 (a). Jos vetotankoa tarvitaan, niin voidaan käyttää erillistä teräslevyä, joka ei ole kiin-ni Gerber-kiinnikkeessä (16-8 (b)). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää soikeareikäistä kiinteää ve-totankoa.


KUVA 16-8

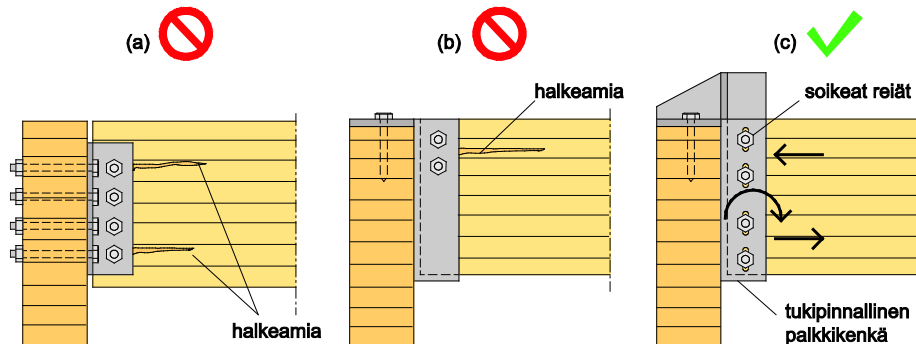
Gerber-tyyppinen vetotangollinen palkkien välinen liitos (a) kiinteä vetotanko – halkeamisriski (b) erillinen teräslevystä tehty vetotanko (c) soikeareikäinen kiinteä vetotanko.

Kahden palkin liitos

Kahden palkin välinen liitos voidaan muotoilla monin tavoin. Yleensä käytetään kulmakiinnikkeitä tai palkkikengkiä. Jos kulmakiinnikkeessä on pitkä rivi liittimiä, niin ne voivat ripustetun palkin kuivuessa aiheuttaa vetojännityksiä syitä vastaan kohtisuoraan ja palkin halkeamisen kuvan 16-9 (a) mukaisesti.

Myös pääpalkin päälle ripustettava, sekundääripalkkiin yläosasta kiinnitettävä palkkikengä voi aiheuttaa halkeamisen, jos sekundääripalkki kutistuessaan nousee palkkikengän tukipinnalta ja kuorma siirtyy liittimien kannettavaksi (kuva 16-9 (b)).

Kuva 16-9 (c) esittää liitoksen missä on käytetty vahvistettua soikeareikäistä palkkikengää, joka sallii ripustetun palkin vapaan kutistumisen. Tällainen palkkikengä kestää myös ripustetun palkin ruuvirivin ja pääpalkin symmetria-akselin välisen epäkeskeisyyden aiheuttaman taivutusmomentin. Liitimet pitää mitoittaa epäkeskeisyyden aiheuttamalle taivutusmomentille.


KUVA 16-9

Kahden palkin välinen liitos (a) pitkä rivi liittimiä – halkeamisriski (b) sivulevyllinen kulmakiinnike, liittimet ovat palkin yläosassa – halkeamisriski (c) vahvistettu soikeareikäinen palkkikengä.

16.3 Rakenteellisen puunsuojauksen huomioonottaminen liitoksissa

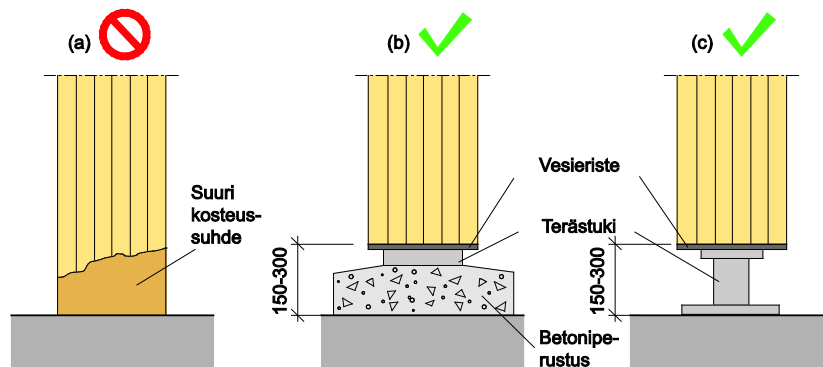
Liimapuurakenteen kaikkien osien pitää olla suojattuja kosteuden kertymiseltä. Suurempi kuin 20 % kosteussuhde suosii lahottavia mikro-organismeja.

Paras tapa suojata puuta laholta on pitää puu mahdollisimman kuivana. Jos puu on alttiina kosteudelle niin rakenneosat pitää muotoilla siten, että ne kuivuvat nopeasti kastumisen jälkeen.

Tässä jaksossa ei käsitellä puun kyllästämistä puunsuoja-aineilla. Esitetyt esimerkit liittyvät lähinnä ulkona oleviin rakenteisiin kuten siltoihin, torneihin, mastoihin ja muihin sellaisiin rakenteisiin, joiden kosteussuhde on tavallisesti paljon suurempi kuin sisätiloissa olevien rakenteiden.

Puupilarin kiinnittäminen betoniperustukseen

Puun ja betonin suoraa kosketusta on vältettävä, sillä betoninen perustus on kostea ja se siirtää kosteutta puuhun. Puu ei pääse kuivumaan ja se voi imeä vettä kapillaarisesti (kuva 16-10 (a)). Puun kostumista voidaan välttää erottamalla puu betonista. Pilarin päätypuu pitää nostaa mieluiten 150–300 mm perustustason yläpuolelle (kuvat 16-10 (b) ja (c)).



KUVA 16-10

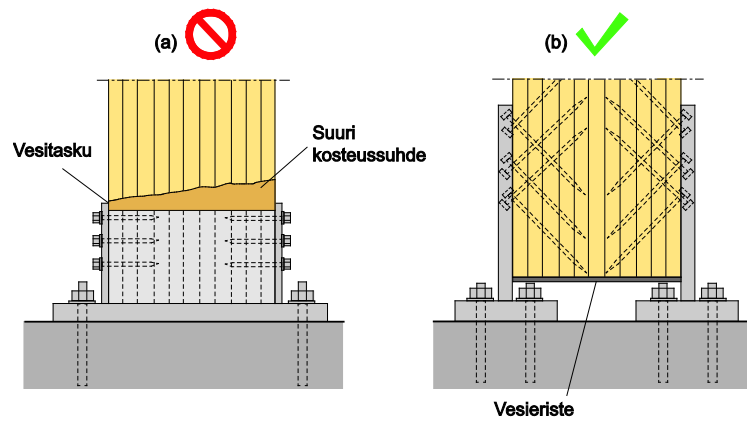
Pilarin jalka (a) puupilari suorassa kosketuksessa betoniin - lahoamisriski (b) puupilari teräksestä ja betonista tehdyn perustuksen varassa (c) puupilari teräksisen pilarin jalan varassa.

Kun rakenne on käyttöluokassa 1 (lämpötila 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus harvoin yli 65 %) on yleensä riittävää estää kosteuden kapillaarinen siirtyminen vesieristyksellä.

Veden keräytymisen estäminen

Veden keräytymistä liitoksiin pitää välttää. Kuvan 16-11 (a) mukaista pilarikenkää käytettiin aikaisemmin pilarien, kehien ja kaarien kiinnityksessä perustuksiin. Tällainen liitos aiheuttaa kosteuden keräytymistä puuosan alapäähän, eikä sellaista siis pidä käyttää.

Parempi liitos on esitetty kuvassa 16-11 (b), missä pilarin alapää on nostettu kiinnikkeen avulla irti perustuksesta. Kiinnike kiinnitetään liimapuupilariin itseporautuvien puuruuvein jotka ruuvataan 45° kulmaan. Veden kapillaarinen imeytyminen estetään pilarin päädyn vesieristeellä.



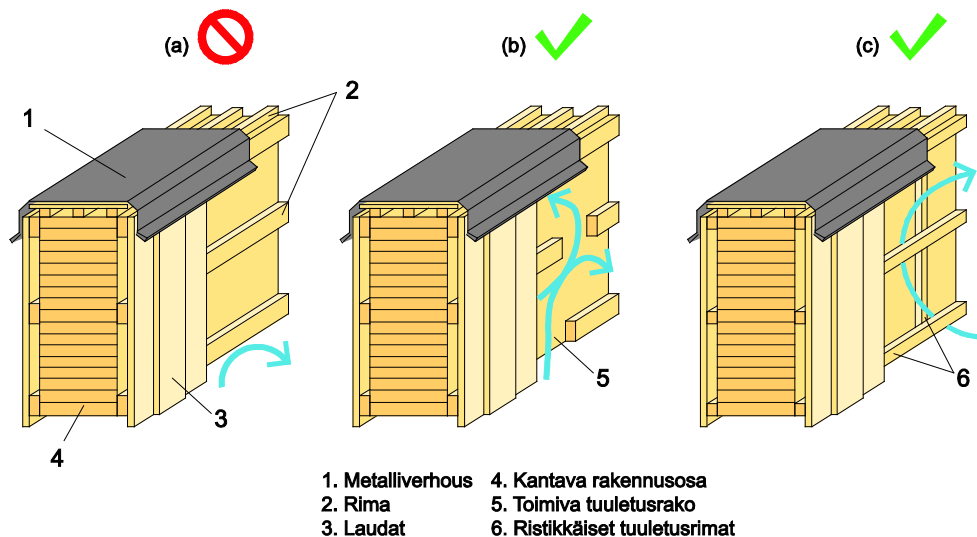
KUVA 16-11

Pilarin, kehän tai kaaren kiinnike (a) vettä keräävä metalliosa (b) itseporautuvin vinoruuvein kiinnitetty kiinnike.

Kantavien rakennusosien suojaaminen verhauksella

Säälle alttiit liimapuuosat suojataan joskus lautaverhouksella. Verhoukseen käytettävien lautojen mitat ovat enintään 30 x 200 mm. Lautojen vääntymisen estämiseksi leveyden ja paksuuden suhde saa olla enintään 8. Sekä pysty- ja vaakalaudoitusta käytetään; kummassakin tapauksessa on tärkeää järjestää riittävä tuuletus verhouksen ja suojattavan rakennososan väliin.

Tuuletus saadaan aikaan käyttämällä tuuletusrimoja. Ne sijoitetaan usein kuvan 16-12 mukaisesti. Kuvan 16-12 (a) mukaisilla tuuletusrimoilla ei saada riittävää tuuletusta. Kuvan 16-12 (b) mukaisella tavalla saadaan jonkun verran parempi tuuletus. Paras vaihtoehto on esitetty kuvassa 16-12 (c), missä on käytetty ristikkäisiä tuuletusrimoja, jolloin saadaan hyvä tuuletus. Päätypuu pitää aina suojata huolellisesti esimerkiksi pellityksellä tai tuuletusrimoihin kiinnitettyllä lautaverhouksella. Myös päädyn verhauksessa on muistettava riittävä tuuletus.



KUVA 16-12

Kantavien rakennusosien suojaaminen (a) jatkuvat rimat, riittämätön tuuletus (b) epäjatkuvat rimat, jonkunlainen tuuletus (c) ristikkäiset rimat, hyvä tuuletus. (Huomaa että päätypuun suojausta ei esitetä tässä.)

16.4 Yhteenveto

Tämän luvun kuvissa esitetään sekä suositeltavia että virheellisiä liimapuurakenteiden yksityiskohtia. Valittujen esimerkkien tarkoituksena on tuoda esiin seuraavaa seitsemää peruseriaa-

tetta:

- Liimapuun kosteusmuodonmuutoksen pitää voida tapahtua vapaasti.
- Liitoksen muotoilu ei saa aiheuttaa syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä.
- Liitoksissa pitää välttää vettä kerääviä kohtia.
- Rakenteiden pitää tuulettua riittävästi.
- Liimapuuta ei saa laittaa suoraan kiinni muurattuun rakenteeseen tai betonirakenteeseen tai muuhun (kapillaarisesti) kosteutta siirtävään rakenteeseen.
- Liitosten epäkeskeisyyttä pitää välttää.
- Päätypuuta ei pidä jättää säälle alttiiksi.