



## Tutkintaselostus

B 2/2003 Y

# Messuhallin katon romahtaminen Jyväskylässä 1.2.2003

Tämä tutkintaselostus on tehty turvallisuuden parantamiseksi ja uusien onnettomuuksien ennalta ehkäisemiseksi. Tässä ei käsitellä onnettomuudesta mahdollisesti johtuvaa vastuuta tai vahingonkorvausvelvollisuutta. Tutkintaselostuksen käyttämistä muuhun tarkoitukseen kuin turvallisuuden parantamiseen on vältettävä.



## TIIVISTELMÄ

Jyväskylässä sattui lauantaina 1.2.2003 kello 9.39 onnettomuus, jossa messuhallin kattoa romahti lähes 2 500 m<sup>2</sup> alueelta ja ulkoseinää kaatui noin 20 metrin matkalta. Rakennus oli uusi, sillä yhteensä 7 766 m<sup>2</sup> kokoinen B-halli oli otettu käyttöön noin kahta viikkoa aikaisemmin.

Messuhallissa olivat päättyneet edellisenä päivänä koulutusalan messut ja lauantaiaamuna B-hallissa oli sekä messujen omaa että näytteilleasettajien henkilöstöä 12 purkamassa osastoja. Hallin katosta kuului yllättäen voimakas paukahdus, jolloin osa paikalla olleista lähti katsomaan, mistä ääni tuli. Silloin joku näki liimapuusta valmistetun kattoristikkoparin toisen alapaarteen katkenneen ohuesta kohdastaan läheltä ristikon päätä. Havainnon tehneet ymmärsivät katon mahdollisesti romahtavan, joten he kehottivat huutamalla hallissa olleita siirtymään ulos. Arviolta kahden minuutin kuluttua kyseinen kattoristikkopari, kolme seuraavaa kattoristikkoparia ja niiden varassa olleet kattoelementit putosivat alas. Kaikki ehtivät pois hallista eikä kukaan loukkaantunut.

Jo ennen romahdusta yksi hallissa olleista soitti hätäkeskukseen. Romahdus tapahtui puhelun aikana, joten hätäkeskus sai tiedon onnettomuudesta välittömästi. Paikalle hälytettiin runsaasti pelastustoimen yksiköitä ja sairausautoja. Noin puolessa tunnissa oli lähes varmaa, että ketään ei ollut jäänyt raunioihin.

Pettäneiden liimapuusta valmistettujen kattoristikoiden pituus 55 metriä oli poikkeuksellisen suuri. Ristikot oli koottu tehtaalla liittämällä liimapuuosat toisiinsa tappivaarnaliitoksilla, joissa puun sisään oli laitettu pääosin kaksi teräslevyä ja niitä vastaan kohtisuoraan liitoksen koosta riippuen 4 – 48 teräksistä tappivaarnaa. Ristikkopari koostui kahdesta ruuveilla toisiinsa rinnakkain kiinnitystä samanlaisesta ristikosta.

Jo onnettomuuden tutkinnan alkuvaiheessa selvisi, että silminnäkijöiden mukaan ensimmäisenä pettäneen kattoristikkoparin ristikon yhdessä liitoksessa oli vain 7 tappivaarnaa, kun niitä suunnitelmien mukaan piti olla 33. Romahdus alkoi tästä ristikkovalmistajan laadunvalvonnan puutteesta johtuneesta virheestä. Lumikuormaa oli tapahtumahetkellä noin neljäsosa (50 kg/m<sup>2</sup>) suunnittelun perustana käytettävästä kuormasta ja tappeja puuttui vain ristikkoparin toisesta ristikosta, joten vaurion olisi pitänyt rajoittua ristikkoparin toiseen ristikkoon. Romahdus kuitenkin syntyi ja eteni pidemmälle siksi, että suurten tappivaarnaliitosten todettiin pettävän lohkeamismurtumalla, jolla tarkoitetaan liitosalueen repeytymistä irti puusta tappiryhmän uloimmaisista riveistä pitkin. Ristikoiden suunnittelussa käytetyissä eurooppalaisissa suunnitteluohjeissa ei tällaista murtumistapaa ollut otettu huomioon, minkä vuoksi suurimpien liitosten lujuus oli vain noin puolet suunnitellusta. Ohjeessa ilmennyt virhe viestii tutkintalautakunnan käsityksen mukaan puutteista normien laatimisessa, käyttöönotossa ja tiedottamisessa normissa havaituista virheistä. Virhe oli korjattu ohjeen uudempaan luonnokseen jo vuosia ennen onnettomuutta ja siitä oli kirjoitettu suomalaisessa ammattilehdessä. Virhe oli siis ollut suppean ammattipiirin tiedossa.

Tutkintalautakunta on laatinut onnettomuuksien estämiseen tarkoitettuja suosituksia yhdessä Mustasaareissa 17.1.2003 sattuneen monitoimihallin katon vaurioitumista tutkivan tutkintalautakunnan kanssa. Suositukset on esitetty erillisessä osassa, joka julkaistaan yhdessä molempien tutkintaselostusten kanssa.



## SAMMANDRAG

### MÄSSHALLSTAKET SOM RASADE NED I JYVÄSKYLÄ 1.2.2003

Lördagen den 1.2.2003 klockan 9.39 inträffade en olycka i Jyväskylä där inemot 2 500 m<sup>2</sup> av taket på en mässhall rasade in och ytterväggen föll ned på en sträcka om ca 20 meter. Byggnaden var ny; B-hallen med sin sammanlagda yta på 7 766 m<sup>2</sup> hade nämligen tagits i bruk omkring två veckor tidigare.

Föregående dag hade en utbildningsmessa avslutats i mässhallen. Under lördagsmorgonen befann sig 12 personer, som hörde till hallens egen personal eller var anställda av utställarna, i B-hallen i färd med att montera ned utställningsmontrar. Plötsligt hördes en skarp smäll från hallens tak. Några av de närvarande skyndade i väg för att se efter varifrån ljudet kom. Då upptäckte någon att en av de undre, av limträ tillverkade sparrarna i ett av takstolsparen hade brustit vid sin avsmalning nära ändan av fackverket. Vid upptäckten förstod de att taket möjligen kunde rasa ned och de ropade till de övriga i hallen att ta sig ut. Uppskattningsvis två minuter senare föll takstolsparet ifråga ned tillsammans med de tre närmast följande takstolsparen och de takelement som vilat på dem. Alla hann ta sig ut ur hallen utan att någon skadades.

Redan innan raset ringde en av de närvarande till nödcentralen. Taket rasade ned mitt under samtalet, varför nödcentralen omedelbart fick meddelande om olyckan. Ett stort antal enheter ur räddningstjänsten och ambulanser larmades till platsen. Inom ca en halv timme stod det med största säkerhet klart att ingen hade blivit kvar under bråten.

De i limträ tillverkade fackverkstakstolarna som givit vika, var med sin spännvidd på 55 meter ovanligt långa. Fackverken hade monterats på fabriken så, att de limmade träkomponenterna var sammanfogade med 4-48 ståldymlingar, beroende på fogens storlek. Ståldymlingarna hade borrats vinkelrätt igenom i huvudsak två stålskivor infällda i träet. Takstolsparen bestod av två, parallella, med skruvar sammanfogade likadana fackverk.

Redan i början av olycksutredningen blev det klart, att det enligt ögonvittnena endast funnits 7 tappdymlingar i en av fogarna till den fackverkstakstol som först gav vika. Enligt ritningarna borde antalet där ha varit 33. Raset fick sin begynnelse i denna punkt beroende på bristande kvalitetskontroll hos tillverkaren. I olycksögonblicket var snölasten endast ca en fjärdedel (50 kg/m<sup>2</sup>) av den last som stått som märkvärde vid planeringen. Dymlingar saknades endast i den ena parten av takstolsparet. Därför borde skadan ha begränsat sig till endast denna ena felaktiga part. Kollapsen skedde dock och spred sig vidare därför, att de stora dymlingsfogarna konstaterades ha gett efter på grund av spjälkningar, vilket betyder att fogförstärkningarna revs loss ur träet längs den yttersta raden av tappdymlingar. De europeiska anvisningar för dimensioneringen enligt vilka fackverken konstruerats, har inte beaktat denna form för brott, varför hållfastheten i de största fogarna endast blivit ca hälften av den som projekterats. Enligt undersökningskommissionen signalerar felet i anvisningarna brister i beredningen och verkställigheten av normerna samt om bristande information om konstaterade fel i dessa. Felet hade rättats till i ett nyare utkast till normerna redan flera år före denna olycka och hade även behandlats i en finländsk facktidsskrift. En begränsad krets av fackmän inom branschen kände alltså till felet.

Undersökningskommissionen har, i samråd med den kommission som undersökt skadorna i samband med takraset 17.1.2003 i allaktivitetshallen i Korsholm, utarbetat rekommendationer i avsikt att förhindra motsvarande olyckor. Rekommendationerna ingår i en separat skrift som ges ut samtidigt med undersökningsrapporterna.



## SUMMARY

### FAIR CENTER ROOF COLLAPSING IN JYVÄSKYLÄ, FINLAND, ON 1 FEBRUARY, 2003

On Saturday February 1<sup>st</sup>, 2003, at 9.39 hours, an incident took place in Jyväskylä, Finland, where a Fair Center roof collapsed over an area of about 2,500 m<sup>2</sup>, with the exterior wall also collapsing over a width of about 20 meters. The building was quite new with its B hall of altogether 7,766 m<sup>2</sup> having only been opened and introduced into service about two weeks earlier.

The previous day, a training and education fair organized in the Fair Center had ended, and on Saturday morning there were 12 Fair Center employees and exhibitors' representatives stripping the stands in the B hall. Suddenly a loud bang was heard from the roof of the hall, and some of the people inside went to see where the noise came from. Then someone discovered that one of the tie beams of the roof truss pair made of laminated timber had broken in its narrow part close to the end of the roof truss. The observers understood that the roof would possibly collapse and they yelled to the others to leave the hall. In an estimated two minutes time, the roof truss pair referred to, as well as the three following roof truss pairs and the roof elements supported by them, collapsed and fell down. All people had managed to leave the hall and no-one was injured.

Already before the collapse, one person in the hall had called the Emergency Exchange. The collapse actually took place during that call, and hence the Emergency Exchange was immediately informed of the incident. Numerous rescue units and ambulances were called out to the scene of the incident. In about half an hour it had been ascertained that there was no-one left buried under the ruins.

The collapsing roof trusses made of laminated timber featured a length of 55 meters which is exceptionally great. The trusses had been mounted in the plant by an interconnection of the laminated timber parts by dowel joints. In the dowel joints two steel plates penetrated the timber and 4 to 48 steel dowels – as depending on the size of the joint - had been installed perpendicularly to them. The truss pair consisted of two identic trusses interconnected in parallel by screws.

Already at the initial phase of the investigation of the incident, it became evident that according to the eye-witnesses, one joint of the truss of the roof truss pair having first collapsed, only had 7 dowels while according to the plans, their number should have been 33. In fact the collapse commenced as caused by this quality control negligence by the truss manufacturer. At the time of the incident the snow load was measured as being about 25% (i.e. 50 kg/m<sup>2</sup>) of the load having served as the basis in the planning, and only one truss of the truss pair displayed missing dowels. Hence the damage ought to have been limited only to one of the trusses. But a collapse was generated and it proceeded as the major dowel joints yielded in a cleavage fracture, that is, the joint section had torn off the timber along the outer rows of the dowel group. The European planning instructions implemented in the planning of the trusses, fail to consider such a type of breaking, and therefore the strength of the biggest joints only featured about 50% of the planned rates. According to the investigation commission, the errors discovered in the instructions imply deficiencies in the drawing up of the norms, in their adoption and implementation, and in the communication of their detection. Already several years before the incident, the errors had in fact been corrected in a more recent draft of the instructions and the problematic issues had been discussed in a Finnish technical journal. Hence the errors were well known by a limited circle of experts.



Jointly with the investigation commission studying the collapsing of the roof of a multipurpose hall at Mustasaari on January 17, 2003, the investigation commission drew up recommendations that target a prevention of such incidents in the future. The recommendations are presented in a separate part to be published simultaneously with both of the relevant Investigation Reports.

## ALKUSANAT

Lauantaiaamuna 1.2.2003 tapahtui Jyväskylässä onnettomuus, jossa messuhallin kattoa romahti lähes 2500 m<sup>2</sup> alueelta. Hallissa juuri ennen romahdusta olleet ehtivät pois alta, joten henkilövahinkoja ei tullut.

Onnettomuustutkintakeskus aloitti kattovaurion tutkinnan samana päivänä ja arvioi tapahtuman suuronnettomuuden vaaratilanteeksi. Tutkintalautakunnan Onnettomuustutkintakeskus asetti 4.2.2003 onnettomuuksien tutkinnasta annetun lain (373/85, muutos 97/97) 5 §:n 3 momentin nojalla.

Tutkintalautakunnan puheenjohtajaksi nimitettiin johtaja, TKT **Tuomo Karppinen** Onnettomuustutkintakeskuksesta ja jäseniksi komisario **Pekka Aho** Jyväskylän poliisilaitokselta, erikoistutkija, DI **Markku Korttesmaa** VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta ja tutkija, DI **Kai Valonen** Onnettomuustutkintakeskuksesta. Lisäksi tutkintalautakuntaan nimitettiin myöhemmin DI **Esa Virtanen** Sosiaali- ja terveysministeriön työsuojeluosastolta. Pelastustoiminnan asiantuntijana on toiminut palopäällikkö **Heikki Ventonen** Raahen palo- ja pelastuslaitokselta.

Tässä tutkintaselostuksessa käsitellään tapahtumat kattovaurion aikaan, kuvataan lyhyesti tapaukseen liittyvää pelastustoimintaa, kerrotaan tutkinnan tuloksista ja analysoidaan kattovaurioon johtaneita syitä. Tutkinnan ensisijaisena tarkoituksena on turvallisuuden parantaminen eikä syyllisyys- ja vahingonkorvauskysymyksiin oteta kantaa.

Tutkinta aloitettiin varmistamalla, että tutkinnassa tarvittava aineisto saadaan talteen. Seuraavien viikkojen aikana tutkittiin ja valokuvattiin sekä vaurioituneen että ehjänä säilyneiden hallin osien yksityiskohtia. Valokuvaustyön teki Jyväskylän poliisin rikosteknisen yksikön tutkija, vanhempi rikoskonstaapeli **Paul Karlsson**.

Tutkintalautakunta on kuullut muun muassa tapauksen silminnäkijöitä sekä rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa mukana olleita. Lisäksi tutkintalautakunta on perehtynyt rakennushankkeeseen liittyviin asiakirjoihin. Pelastustoimien selvittämiseksi tutkintalautakunta on keskustellut pelastustoimintaan osallistuneiden henkilöiden kanssa ja muun muassa kuunnellut Keski-Suomen hätäkeskukseen tulleet hätäilmoitukset. Rakenteiden tutkintaan liittyvät tekniset erillistutkimukset tehtiin VTT:llä Espoossa.

Tämä tutkintaselostus on ollut lausunnolla ympäristöministeriössä, sisäasiainministeriössä, sosiaali- ja terveysministeriössä, Hätäkeskuslaitoksessa ja Jyväskylän kaupungilla. Lisäksi asianosaisilla on ollut mahdollisuus kommentoida tutkintaselostusta ennen sen julkaisemista. Lausunnot ja kommentit on otettu huomioon tutkintaselostusta viimeisteltäessä.

Tutkintamateriaalia on siirretty Onnettomuustutkintakeskuksen arkistoon. Lähdeluettelo on tämän tutkintaselostuksen lopussa.

Tämä tutkintaselostus on myös Onnettomuustutkintakeskuksen internet-sivuilla osoitteessa [www.onnettomuustutkinta.fi](http://www.onnettomuustutkinta.fi).

**SISÄLLYSLUETTELO**

TIIVISTELMÄ.....	I
SAMMANDRAG.....	II
SUMMARY.....	III
ALKUSANAT.....	V
1 ONNETTOMUUS.....	1
1.1 Yleiskuvaus.....	1
1.2 Onnettomuuskohte, tapahtumapaikka ja sääolosuhteet.....	1
1.3 Tapahtumien kulku.....	3
1.4 Pelastustoiminta ja raivaus.....	4
1.4.1 Hälytykset.....	4
1.4.2 Toiminta onnettomuuspaikalla.....	5
1.5 Poliisin toiminta.....	6
1.6 Onnettomuudesta aiheutuneet vahingot.....	6
1.6.1 Henkilövahingot.....	6
1.6.2 Materiaalivahingot.....	6
1.6.3 Ympäristövahingot.....	7
1.7 Tiedottaminen.....	8
2 ONNETTOMUUDEN TUTKINTA.....	9
2.1 Rakennus.....	9
2.2 Olosuhteet.....	19
2.3 Onnettomuuteen liittyvät organisaatiot ja henkilöt.....	20
2.3.1 Hallihankkeen toteutusorganisaatio ja sopimusosapuolten tehtävät.....	20
2.3.2 Rakentamista valvovat viranomaiset.....	23
2.4 Pelastustoimen organisaatio ja toimintavalmius.....	28
2.4.1 Keski-Suomen hätäkeskus.....	28
2.4.2 Jyväskylän kaupungin pelastuslaitoksen operatiivinen organisaatio.....	28
2.4.3 Toimintavalmius messuhallille.....	29
2.5 Tallenteet.....	29
2.6 Asiakirjat.....	30
2.7 Määräykset ja ohjeet.....	31
2.8 Muut tutkimukset.....	37
3 ANALYYSI.....	43
3.1 Onnettomuuden analysointi.....	43





3.1.1 Kuormitus romahdushetkellä .....	43
3.1.2 Ristikon kapasiteetti .....	45
3.1.3 Romahdustapahtuma.....	52
3.1.4 Rakentamisorganisaatio.....	58
3.1.5 Valvontaviranomaisten toiminnan analyysi.....	63
3.1.6 Hallin käytön aikaisen kunnossapidon analysointi.....	64
3.2 Pelastustoiminnan analysointi .....	65
3.2.1 Häätokeskuksen toiminta ja viranomaisradioverkko.....	65
3.2.2 Pelastustoiminta ja johtaminen .....	65
4 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	67
4.1 Toteamukset .....	67
4.2 Onnettomuuden syyt.....	68
5 SUOSITUKSET.....	71

## LIITTEET

Liite 1. Kuormituskokeiden tulokset

## LÄHDELUETTELO

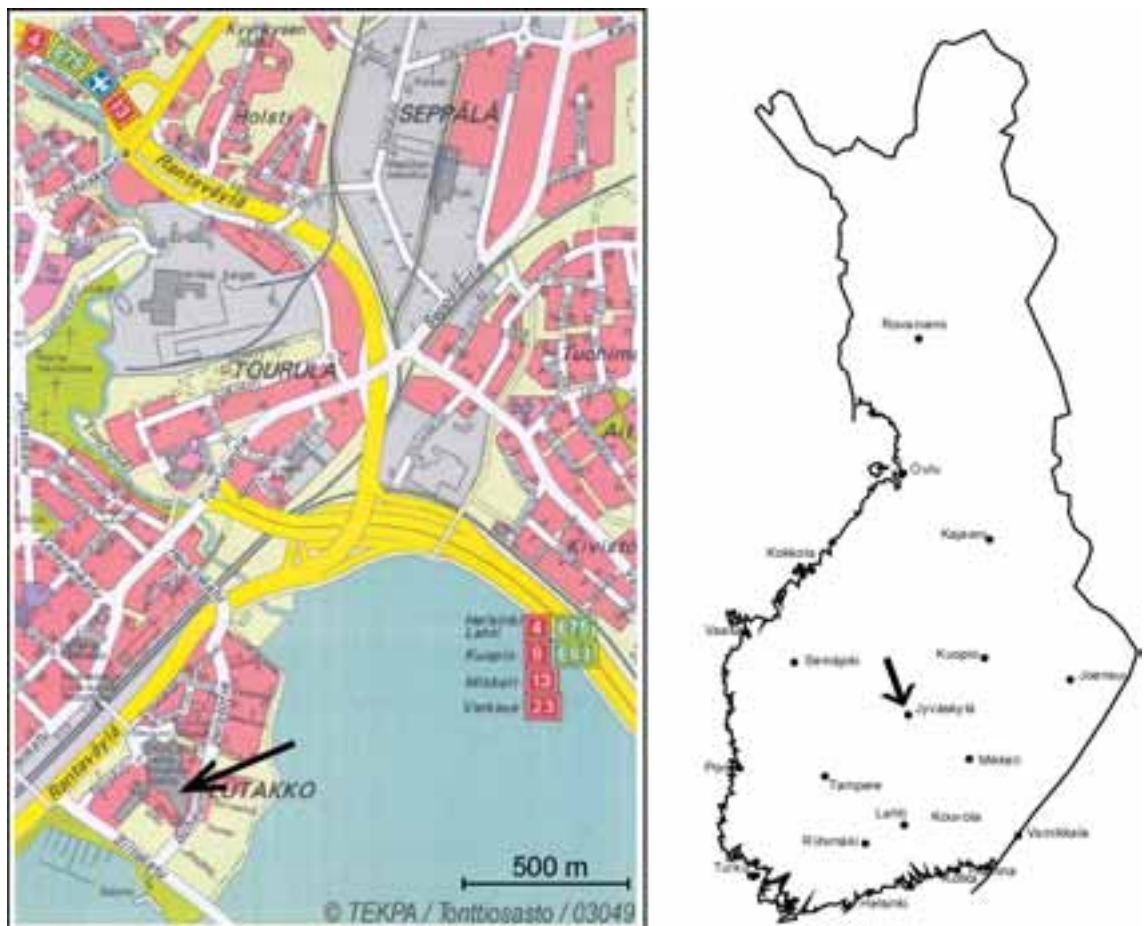
## 1 ONNETTOMUUS

### 1.1 Yleiskuvaus

Lauantaiaamuna 1.2.2003 kello 9.39 tapahtui Jyväskylässä onnettomuus, jossa romahti noin kaksi viikkoa aikaisemmin käyttöön otetun messuhallin osan kattoa lähes 2 500 m<sup>2</sup> alueelta. Samalla kaatui ulkoseinää noin 20 metrin matkalta. Hallissa olleet ehtivät poistua ennen katon romahtamista.

### 1.2 Onnettomuuskohte, tapahtumapaikka ja sääolosuhteet

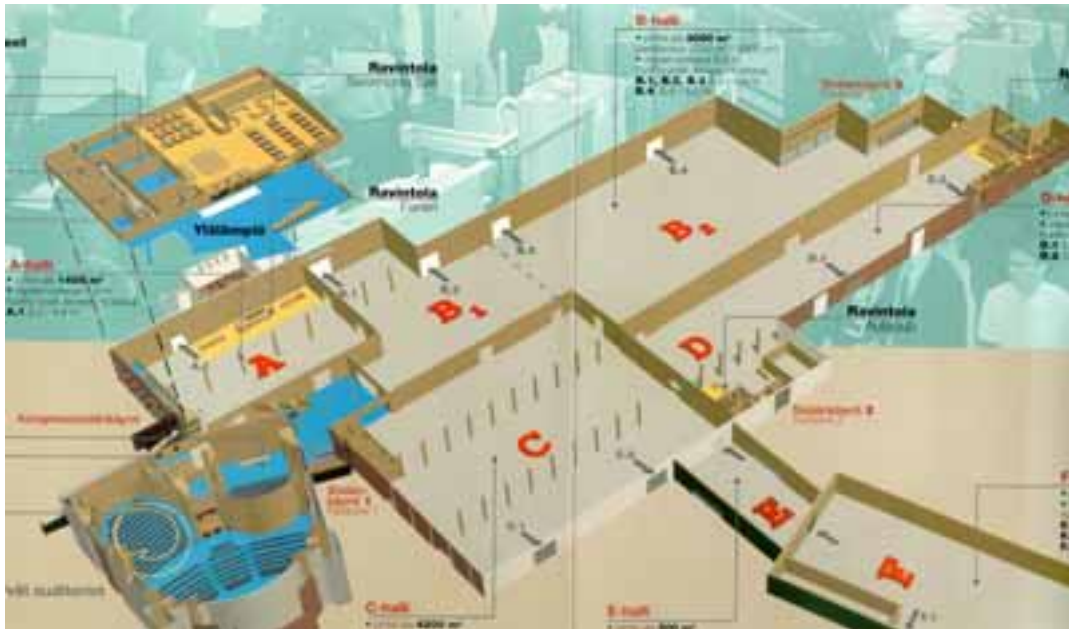
Onnettomuus tapahtui Jyväskylä Paviljonki -nimisessä messuhallissa. Halli on Jyväskylän keskustan tuntumassa Lutakon kaupunginosassa.



Kuva 1. Onnettomuus tapahtui Jyväskylässä Lutakon kaupunginosassa.

Figure 1. The incident took place in Lutakko area of Jyväskylä city in Finland.

Messu-, kokous- ja kongressikeskuksessa on hallitilaa noin 20 000 m<sup>2</sup>. Onnettomuus tapahtui B2-hallissa, jossa näyttelytilaa on 5 543 m<sup>2</sup>. B2 halli on samaa tilaa B1 hallin kanssa, jonka koko on 2 223 m<sup>2</sup>. Uusi B-halli oli luovutettu käyttöön 17.1.2003.



Kuva 2. B1 ja B2 –hallien sijainti. (Kuva: Jyväskylän Messut Oy)

Figure 2. Location of B1 and B2 halls.



Kuva 3. Romahdusalue kuvattuna onnettomuspäivänä likimain kuvassa 2 näkyvän B3-oven suunnasta. (Kuva: Poliisin arkisto)

Figure 3. Scene of collapse at the date of the incident, as seen from the direction of the B3 door shown in Figure 2.

Sää kattoromahduksen tapahtuessa oli selkeä, aurinkoinen, lähes tyyni ja ilman lämpötila oli  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 1.3 Tapahtumien kulku

Jyväskylän messukeskuksessa pidettiin koulutusalan Next Step -messut 29.-31.1.2003. Messuvieraita oli kaikkiaan 33 000. Eniten kävijöitä oli toisena messupäivänä, noin 15 600 henkilöä. Viimeisenä messupäivänä kävijöitä oli noin 10 000. Messut loppuivat 31.1.2003 kello 17. Messujen loppumisen jälkeen osa messuesittelijöistä jäi purkamaan messuosastojaan.

Aamulla 1.2.2003 kello 8 jatkui messuosastojen purkaminen. Aamun aikana paikalle tuli sekä Jyväskylän Messut Oy:n omaa henkilökuntaa että eri osastojen omia purkajia. Noin kello 9 B2-halliin saapui kolme Jyväskylän Messut Oy:n ulkopuolista ryhmää purkamaan messuosastojaan. Kaikkiaan messukeskuksen tiloissa oli yhteensä yli 20 ihmistä, joista B-hallissa romahdusalueella ja sen välittömässä läheisyydessä oli romahdushetkellä yhteensä 12 henkilöä.

Noin kello 9.30 Jyväskylän messukeskuksen pihalle saapui paikallisen hinausliikkeen auton kuljettaja tarkoituksenaan käynnistää B2-hallin sisällä ollut kuorma-auto. Hinausautonkuljettajan päästyä B2-halliin sisälle kuului hallista voimakas paukahdus. Paikalla olleet henkilöt luulivat aluksi, että joku messuosaston purkaja oli kaatanut suuren määrän messuseinää.

Paukahdus oli poikkeuksellisen kova, joten osa B2-hallissa olleista henkilöistä lähti katsomaan, mistä ääni tuli. Silloin joku hallissa olleista henkilöistä havaitsi, että yhden B2-hallin kattoristikon alapaarre oli katkennut läheltä ristikon D-hallin puoleista päätä.

Kolme messujen omaan henkilökuntaan kuuluvaa työntekijää olivat kertomansa mukaan menneet lähes katkenneen ristikkoparin alapuolelle ja tehneet havainnon, että yhden ristikkoparin (numero 32) B1-hallin puoleinen kattoristikko oli katkennut alapaarteen ohuelta kohdalta. Alapaarteen osat olivat kuitenkin vielä tuolloin kiinni toisissaan puunsäleillä.

Samantyyppisen alapaarteen katkeamisen näkivät useat hallissa olleista. Paikalle tullut hinausauton kuljettaja kertoi nähneensä B2-hallin toisesta päästä, että kyseinen alapaarre oli mennyt poikki. Edelleen B2-hallissa olleet kaksi messuosaston purkajaa havaitsivat b3-oven suunnasta, että kyseisestä, suoraan heidän päänsä yläpuolella olevasta kattoristikkoparista oli katkennut toinen alapaarre läheltä D-halliin johtavaa ovea.

Havainnon tehneet ymmärsivät vaurion ja kattoristikon natinan viittaavan siihen, että katto voi romahtaa ja he kehottivat huutamalla ihmisiä siirtymään pois hallista. Vaurioituneen kattoristikon alapuolella olleet henkilöt poistuivat välittömästi ristikon luota messukeskuksen muita halleja tai B2-hallin ulko-ovia kohti. Kattoristikon alapaarteen katkeamisen jälkeen hinausautonkuljettaja soitti matkapuhelimellaan Keski-Suomen hätäkeskukseen ja kysyi neuvoa hätäkeskuspäivystäjältä. Puhelun aikana B2-hallin katto romahti. Kaikki B2-hallissa sisällä olleet henkilöt pääsivät poistumaan turvaan romahta-

neen katon alta, eikä kukaan loukkaantunut. Hallin katosta romahti yhteensä neljä 55 metrin pituista kattoristikkoparia ja niiden kannattamalta alueelta kattoelementtejä noin 2 500 m<sup>2</sup> alalta.

Hinausauton kuljettajan tekemän hätäilmoituksen tallenteesta selviää, että katon romahtaminen kesti noin 15 sekuntia.

## **1.4 Pelastustoiminta ja raivaus**

### **1.4.1 Hälytykset**

Hinausauton kuljettaja soitti B-hallista matkapuhelimellaan Keski-Suomen hätäkeskukseen kello 9.38.25. Soittaja kertoi, että oli kuulunut kova paukahdus ja yksi kattopalkki oli mennyt poikki sekä kuului pauketta. Hän epäili, että katto voi sortua ja kysyi neuvoa mitä tulisi tehdä. Hätäkeskuspäivystäjä ilmoitti, että hälytetään palolaitos selvittämään tapahtunutta.

Puhelun vielä kestäessä messuhallin kattorakenteet romahtivat ja soittaja pääsi pelastautumaan ulos rakennuksesta. Hän kertoi, että koko katto painui sisälle, koko talo sortui ja pyysi lähettämään paikalle sairausautoja. Tuolloin ei selvinnyt jäkö ketään romahtaneiden rakenteiden alle tai loukkaantuiko joku.

Kattorakenteiden romahdettua rikkoontuivat myös rakennuksen sprinkleriputkistot, jotka ruiskuttivat vettä alueelle. Sprinklerijärjestelmän rikkoutuminen aiheutti automaattisen palohälytyksen, joka välittyi hätäkeskukseen kello 9.39.13.

Kello 9.39.30 hätäkeskus hälytti Jyväskylän pelastuslaitoksen peruslähdön, joka sisältää myös yhden sairausauton. Hätäkeskus täydensi hälytystä vielä kahdella sairausautolla.

Hinausauton kuljettaja soitti uudelleen hätäkeskukseen kello 9.40 ja tarkensi tietoja tapahtuneesta romahduksesta. Hän kertoi, että mahdollisesti messurakenteita purkamassa olleita miehiä on voinut jäädä romahtaneiden rakenteiden alle.

Hätäilmoituksia romahduksesta edellä mainitun lisäksi hätäkeskukseen tuli vielä kaksi kappaletta.

Hätäkeskus hälytti onnettomuuspaikalle neljä poliisin partiota kello 9.42 ja teknisen tutkinnan tutkijan kello 9.44.

Pelastustoiminnan johtaja pyysi kohteeseen saavuttuaan kello 9.48 hätäkeskusta hälyttämään vielä Rautpohjan VPK:n, pelastuslaitoksen vapaavuorot, vapaaehtoisen pelastuspalvelun pelastuskoiraryhmän ja 2-3 järeää nosturia.

Nostureiden hälyttäminen teetätti suuren työn hätäkeskuksessa, koska lauantaiamuna nosturiyrittäjien tavoittaminen oli vaikeaa.

Hätäkeskus ilmoitti kello 9.55 onnettomuudesta Jyväskylän palopäällikölle ja kello 10.00 hätäkeskuksen johtajalle.

Kyllön terveyskeskukselle ja Keski-Suomen keskussairaalalle tehtiin hätäkeskuksesta ennakoilmoitus mahdollisista loukkaantuneista kello 9.56.

Mediahälytys tiedotusvälineille annettiin kello 10.10 ja lääninhallituksen pelastustarkastajaa informoitiin onnettomuudesta kello 10.31.

#### **1.4.2 Toiminta onnettomuuspaikalla**

Poliisin kaksi partiota saapuivat kohteeseen kello 9.45 ja pelastuslaitoksen ensimmäinen yksikkö kello 9.47.

Jyväskylän päivystävä palomestari J P3 suoritti alueella alkutiedustelun ja määräsi lääkinnällisen pelastustoimen johtajaksi sairaankuljetusmestarin. Pelastusauton esimiehelle hän antoi tehtäväksi selvittää onko romahduksen alle jäänyt ketään ja sammutusauton esimiehen tuli toimittaa hänelle paloilmoittimen kartat sekä varmistaa, että sprinkleri-venttiili suljetaan.

Poliisi sai J P3:lta tehtäväksi eristää koko onnettomuusalue, koska lisäsortumat olivat vaarana. Poliisin tuli myös selvittää puuttuiko esimerkiksi joku työporukoiden henkilöstöstä.

Paikalla ollut sähkömies varmisti, että sähköt oli katkaistu onnettomuusalueelta.

Messuhallin henkilökunta ilmoitti onnettomuudesta toimitusjohtajalleen, joka pyysi paikalle B-hallin rakentaneen yrityksen edustajan.

Jyväskylän keskustassa olevaan Kriisikeskus Mobileen kuljetettiin kaksi henkilöä, jotka olivat järkyttyneitä ja ilman päällysvaatteita.

Kello 10.15 oli J P3 suhteellisen varma, ettei ketään ollut jäänyt romahduksen alle, kun selvisi, että kateissa ollut siivooja oli löytynyt.

Ensimmäinen tiedotustilaisuus pidettiin kello 11.15 messuhallin tiloissa, jonka jälkeen J P3 perusti johtamispaikan messuhallin sisätiloihin. Toinen tiedotustilaisuus pidettiin kello 15.00.

SPR:n ensiapuryhmän ryhmänjohtaja saapui onnettomuusalueelle kello 11.00 ja päätteli, ettei valmiudessa olevaa ryhmää tarvita kohteessa.

Romahdusalueen tutkiminen oli vaivalloista, koska onnettomuusvaara oli edelleen olemassa. Romahtanutta aluetta alettiin tutkia tarkemmin, kun kolme rauniokoiraa tuotiin paikalle noin kello 12. Kello 16 kaksi rauniokoiraa merkkasivat saman kohdan romahdusalueelta, johon raivaustyöt keskitettiin. Alueelta ei kuitenkaan löytynyt mitään erityistä.

Palokunta teki jälkivahinkojen torjuntaa poistamalla sprinklereistä tullutta vettä D- ja C-halleista.

## **1.5 Poliisin toiminta**

Poliisille tieto onnettomuudesta tuli Keski-Suomen hätäkeskuksen kautta kello 9.42. Hätäkeskus lähetti paikalle neljä Jyväskylän kihlakunnan poliisipartiota, joista kaksi ensimmäistä oli paikalla kello 9.45. Loput kaksi poliisipartiota saapuivat paikalle kello 9.46 ja 9.47. Poliisin toimintaa tapahtumapaikalla johti kenttäjohtajana toiminut Jyväskylän kihlakunnan poliisilaitoksen ylikonstaapeli.

Tapahtumapaikalla poliisi avusti pelastuslaitosta eristämällä onnettomuusalueen turvaten näin pelastustöiden häiriöttömän kulun. Edelleen poliisi poisti tapahtumapaikalle kertynyttä yleisöä vaara-alueen välittömästä läheisyydestä. Poliisi alkoi välittömästi selvittää messukeskuksen tiloissa tapahtuma-aikaan olleiden henkilöllisyyttä sen selvittämiseksi oliko ketään mahdollisesti jäänyt romahtaneen katon alle.

Jyväskylän kihlakunnan poliisilaitoksen rikosteknisen yksikön tutkija aloitti välittömästi paikalle saavuttuaan onnettomuusaineiston taltiointin. Onnettomuuspaikalla suoritettiin paikkatutkintaa useana päivänä vielä onnettomuuden tapahtumisen jälkeen.

## **1.6 Onnettomuudesta aiheutuneet vahingot**

### **1.6.1 Henkilövahingot**

Henkilövahinkoja ei tullut. Kaikki vaara-alueella olleet 12 henkilöä ehtivät pois ennen katon romahdusta.

### **1.6.2 Materiaalivahingot**

Onnettomuudessa romahti neljä kattoristikkoparia, jolloin kattoa romahti viiden kattoristikkovälin alueelta, joka oli mitoiltaan noin 45 x 55 metriä eli noin 2 500 m<sup>2</sup>. Romahduksen jälkeisinä päivinä ja viikkoina jouduttiin rakentamaan väliaikaisia tukia lisäromahdusten estämiseksi ja lämmöneristeitä. Romahdusalueen ja muun B-hallin kuntoon saattamiseksi jouduttiin tekemään muun muassa seuraavia töitä:

- viisi teräsbetonipilaria uusittiin,
- sokkelielementtien ulkokuoria korjattiin,
- ulkoseinäelementtejä uusittiin kuuden pilarivälin matkalta,
- asennettiin yhdeksän uutta teräsristikkoa alkuperäisten puuristikoiden tilalle (ristikkolinjat 31-39)
- kahteen ristikkoväliin asennettiin jäykistysristikot yläpaarten tasoon ja niihin kohdistuvat kuormat johdettiin pilareiden väliin asennettujen vinositeiden kautta perustuksille,
- seitsemälle ristikkovälille asennettiin uudet katto- ja räystääselementit,



- yhdeksällä ristikkovälillä uusittiin LVIS-tekniikka kokonaan ja muualla sitä purettiin ja siirrettiin vahvistusten vuoksi,
- paikallaan pysyneiden lyhyiden tappivaarnaristikoiden liitokset tarkistettiin poraamalla tapit näkyviin. Lisäksi ristikoiden vahvistukseksi asennettiin ristikoiden liitosten kylkiin lattateräsvahvistukset ja yläpaarteisiin U-profiiliteräket.

Rakennuksen korjauskustannukset olivat noin kaksi miljoonaa euroa. Raivaustyöt maksoivat noin 350 000 euroa.

Romahtaneen katon alle jäi edellisenä päivänä päätyneisiin messuihin liittynyttä näytteilleasettajien tavaraa, muun muassa traktori, pakettiauto ja messurakenteita, jotka romuttuivat. Vaurioituneen irtaimiston arvo oli 200 000 – 300 000 euroa.

Keskeytysvahinkojen suuruus oli noin 400 000 euroa. Halli otettiin jälleen messukäyttöön noin puolen vuoden kuluttua onnettomuudesta.



*Kuva 4. Kuva vaurioalueelta raivaustyön alkuvaiheesta. Kuva on otettu b3-oven ulkopuolella. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 4. Site of the incident at the beginning of the clearing work. Photo taken from behind the B3 door.*

### **1.6.3 Ympäristövahingot**

Ympäristövahinkoja ei tullut. Onnettomuuskohteessa ei ollut erityistä ympäristövahingon vaaraa.



## 1.7 Tiedottaminen

Onnettomuuden pelastustöiden käynnistämisen jälkeen päivystävä palomestari järjesti 1.2.2003 tiedotustilaisuuden tiedotusvälineiden edustajille kello 11.15 messuhallin tiloissa. Tiedotustilaisuudessa olivat mukana myös poliisin toimintaa onnettomuuspaikalla johtanut poliisin kenttäjohtaja sekä Jyväskylän Messut Oy:n toimitusjohtaja.

Toinen tiedotustilaisuus pidettiin samana päivänä kello 15. Tuolloin päivystävän palomestarin johtamaan tiedotustilaisuuteen osallistui hänen lisäkseen poliisista päällystöpäivystäjänä toiminut komisario, Jyväskylän Messut Oy:n toimitusjohtaja, kattoristikoiden suunnittelija, Jyväskylän kaupungin johtava palotarkastaja sekä Onnettomuustutkintakeskuksen edustaja.

Sunnuntaina 2.2.2003 pidettiin kolmas tiedotustilaisuus kello 14. Tiedotustilaisuuteen osallistui Jyväskylän Messut Oy:n toimitusjohtaja, vastuuvuorossa ollut palomestari, kattoristikoiden suunnittelija ja kolme Onnettomuustutkintakeskuksen tutkijaa.

Tutkintalautakunta antoi 5.2.2003 STT:lle tiedotteen, jossa kerrottiin, että tapahtumapaikalla suoritetuissa tutkimuksissa oli ensiksi romahtaneen kattoristikon yhdestä tappivaarnaliitoksesta löydetty seitsemän tappivaarnaa, kun liitoksessa olisi pitänyt olla 33 tappivaarnaa. Tutkintalautakunnan kokoonpanosta annettiin lehdistötiedote 6.2.2003. Kolmas lehdistötiedote annettiin 30.10.2003 ja se käsitteli tapahtumien kulkua ja onnettomuuden keskeisimpiä syitä.

Onnettomuus herätti suurta kiinnostusta tiedotusvälineissä ja tutkintalautakunta vastasi lukuisiin tiedotusvälineiden puhelintiedusteluihin koko työn ajan. Lisäksi tutkintalautakunnan jäsenet osallistuivat useisiin asiaa koskeneisiin keskustelutilaisuuksiin.

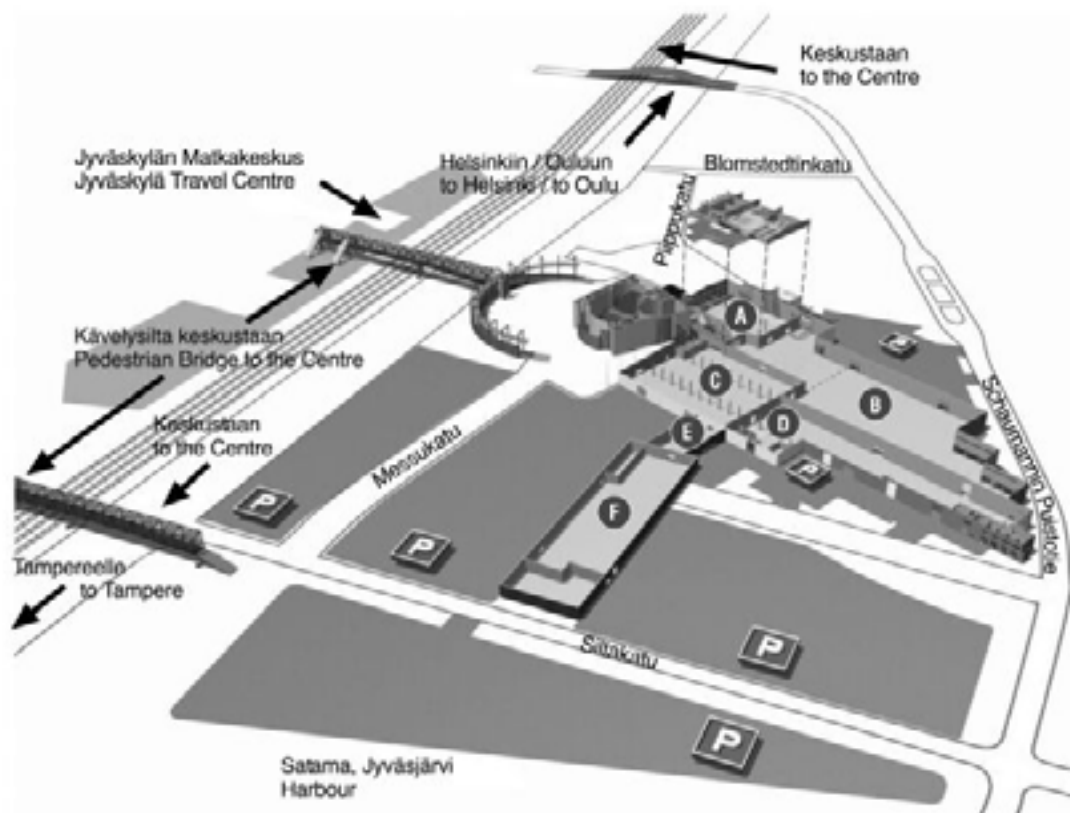
## 2 ONNETTOMUUDEN TUTKINTA

Onnettomuustutkintakeskuksen päivystäjä sai tiedon katon romahtamisesta Länsi-Suomen lääninhallituksesta kello 10.35. Sitä ennen tieto oli jo saatu tiedotusvälineistä, minkä perusteella paikalle oli hälytetty Jyväskylässä asuva Onnettomuustutkintakeskuksen tutkija. Kaksi muuta tutkintalautakuntaan nimitettyä saapuivat paikalle seuraavana päivänä. Paikkatutkintaa tehtiin tuolloin kolmen päivän ajan ja vielä useana päivänä myöhemmin.

### 2.1 Rakennus

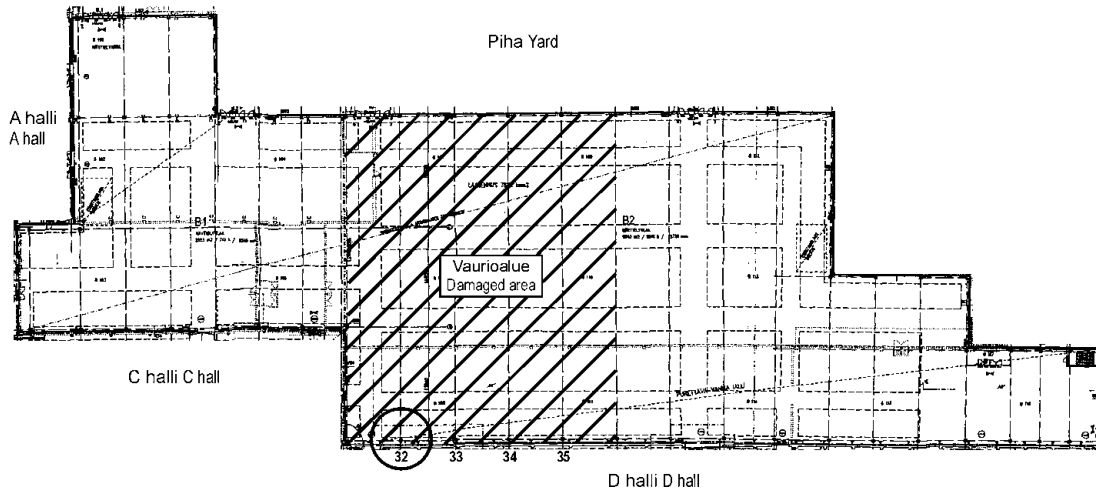
Onnettomuus tapahtui Jyväskylän messu- ja kongressikeskuksessa, joka nimensä mukaisesti on tarkoitettu messu-, kokous- ja kongressikäyttöön. Hallipinta-alaa on noin 20 000 m<sup>2</sup>. Hallitilojen lisäksi rakennuksessa on luentosaleja, kokous- ja ryhmätyötiloja, auditorio ja ravintolatiloja.

Kattovaurio tapahtui B-hallissa, jonka pinta-ala on 7 766 m<sup>2</sup>. Kyseisen hallin rakentaminen aloitettiin kesällä 2002 ja se otettiin käyttöön 17.1.2003.



Kuva 5. Jyväskylän messu- ja kongressikeskus. (Kuva: Jyväskylän Messut Oy)

Figure 5. Jyväskylä Congress and Trade Fair Centre.



Kuva 6. B-hallin pohjapiirros. Vaurioitunut alue on merkitty kuvaan viivoituksella. Romahtaus alkoi ristikosta numero 32 ympäröidyltä alueelta.

Figure 6. Layout of B hall. Damaged area indicated by ruled section. The collapse commenced in the circled area in roof truss 32.

### B-hallin katon rakenne

B-hallissa oli harjakatto, jonka lapekulma oli loiva, noin 3 astetta. Vesikatto oli kuitenkin reunoiltaan nouseva, sillä sadevesi johdettiin noin 2,5 metrin päässä räystäältä oleviin sadevesikaivoihin.

Kattokannattajina hallin leveimmässä osassa olivat 55 metrin pituiset liimapuuristikot, joita oli yhdeksän metrin välein. Kukin ristikkopari koostui kahdesta kyljet vastakkain ruuveilla yhteen liitetystä samanlaisesta ristikosta. Ruuveja oli noin 2 – 3 metrin välein. Ristikot tukeutuivat päistään teräsbetonipilareihin, joiden päälle ristikoiden päässä oleva pystysuora liimapuu oli kiinnitetty pultiliitoksella (kuva 7).



*Kuva 7. Teräsbetonipilareiden yläpäähän oli ankkuroitu teräslevystä valmistetut kiinnityskorvakkeet, joihin ristikkoparit oli kiinnitetty kahdella noin 500 mm pitkällä Ø 20 mm pultilla. Kuvassa ristikkoparin 32 se pää, jonka on todettu pettäneen ensimmäisenä. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 7. The roof truss pairs were fixed in fastening lugs by means of two about 500 mm long Ø 20 mm bolts. The fastening lugs made of steel plate were anchored in the upper end of the reinforced concrete pillars. Photo showing the end of truss pair 32 that was discovered as having first collapsed.*

Ristikoiden päällä oli kaksiaukkoiset, eli kahden ristikkovälin pituiset tehtaalla valmiiksi rakennetut kattoelementit. Kattoelementtien pituus oli 18 metriä ja leveys 2,5 metriä. Katon lappeen pituudella oli vierekkäin yhteensä 11 kattoelementtiä, joiden tehtävänä oli vesikaton lisäksi toimia ristikoiden yläpaarteiden nurjahdustukina. Muita nurjahdustukia ei ollut. Elementtien päällä katemateriaalina oli kattohuopa.

Katon jäykistys suunnitelman mukaan katon pääasiallisena jäykisteenä olivat kattoelementit, jotka oli erikseen jäykistetty yhtenäiseksi levyrakenteeksi B2-hallin ehjäksi jääneessä päässä kahden ristikkovälin matkalla. Jäykistävältä levyrakenteelta kuormien piti siirtyä kolmen kattoristikon kautta yhdellä pystysuuntaisella teräsristikolla perustuksille. Hallin pituussuunnassa kattoristikoiden yläpaarteiden nurjahdustuentaan tarvittavat voimat siirrettiin kulmarauodoilla kattoristikoilta kattoelementeille. Kattoelementiltä toiselle pituussuunnassa voimat siirrettiin kattoelementin palkkien päittäisjatkoksilla, jotka oli tehty teräksisistä naulauslevyistä, jotka oli kiinnitetty kattoelementtien palkkeihin naulaamalla. Kummassakin rakennuksen päässä osa kuormista siirrettiin päätyseinien kautta perustuksille. Suurin etäisyys jäykistävältä levyrakenteelta hallin päähän oli noin 120 m.

Toteutetusta jäykistyksestä puuttui suunnitelmaan merkitty teräksinen vetotanko. Näin jäykistävältä katon levyrakenteelta siirtyi kattoristikoiden yläpaarteeseen ja edelleen teräsristikoiden ja perustuksille vain puolet suunnitellusta kuormasta. Terästangon piti suunnitelmien mukaan olla ulkoseinän yläosassa ristikkolinjojen 38 ja 40 välillä.

### **Kattoristikot**

Paikkatutkinnassa tehtyjen havaintojen sekä silminnäköiden kertomusten perusteella oli jo tutkinnan alussa todennäköistä, että katon romahtaminen alkoi ristikoiden pettämisestä. Sen vuoksi paikkatutkinnassa heti onnettomuuden jälkeen ja raivauksen aikaan pyrittiin selvittämään kattoristikoihin mahdollisesti liittyviä puutteita.

Liimapuutehtaalla valmistetut ristikot oli tehty kyseiseen tarkoitukseen yleisimmin käytettyä puulajista eli kuusipuusta. Lamellien, eli yhteen liimatun sahatavaran paksuus oli 45 mm. Ristikoiden kaikki liitokset olivat tyypiltään tappivaarnaliitoksia, joissa liitettäviin puusiin oli tarpeen mukaan vanne- tai ketjusahalla sahattu raot, joihin asennettiin kaikkiin liitettäviin osiin ulottuvat teräslevyt. Suurissa liitoksissa oli kaksi teräslevyä ja pienissä yksi. Teräslevyjen paksuus oli 8 mm. Puuhun ja teräslevyihin oli porattu sen jälkeen reiät, joista jokaiseen oli työnnetty teräksinen tappivaarna. Reikää ei kuitenkaan porattu läpi, koska palosuojauksen vuoksi terästapin suojaksi piti jättää noin 30 mm puuta. Porauspuolelle jäävä reikä voitiin jättää auki, koska reiät eivät jääneet näkyviin, kun kaksi ristikkoa kiinnitettiin toisiinsa reikäpuolet vastakkain. Keskiliitoksissa, jotka tehtiin työmaalla ja niissä hallin osissa, joissa ei lyhyemmän jännevälän vuoksi tarvittu kaksoisristikkoa, porausreihiin liimattiin puutapit tappivaarnojen palosuojaksi.

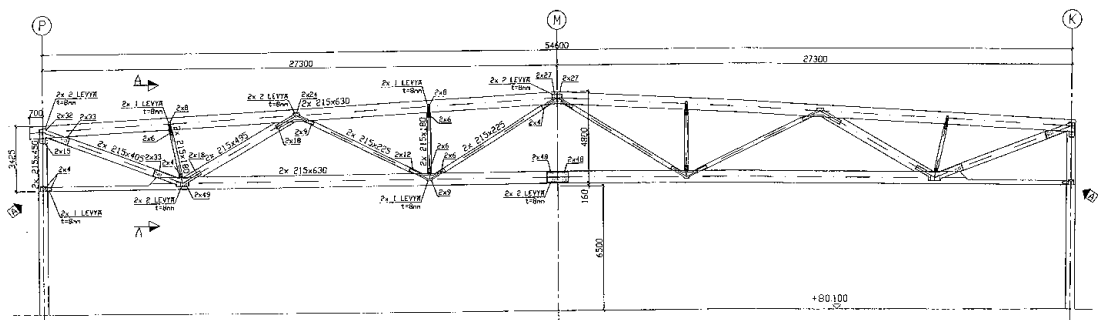
Liimapuun käyttö edellyttää, että se valmistetaan ympäristöministeriön hyväksymän tarkastuselimen tai VTT:n valvonnassa tai että rakenteet tarkastetaan rakennuspaikka-kohtaisesti niiden toimesta. SFS-Sertifiointi Oy:llä on ympäristöministeriön valtuutus toimia kantavissa rakenteissa käytettävien rakennustuotteiden tarkastajana muun muassa puutuotteiden osalta. Kattoristikot valmistanut yritys on SFS-Sertifiointi Oy:n liimapuurakenteiden valmistajien luettelossa ja sillä on L-laatumerkin käyttöoikeus luokkaan L40. SFS-Sertifiointi Oy valvoo liimapuun valmistusta laatimansa liimapuun valmistus- ja laadunvalvontaohjeen mukaisesti. Valmistusohje perustuu alan asianomaisiin standardeihin. Liimapuusta tehtävien ristikoiden valmistuksessa ei edellytetä vastaavaa valvontaa.

Liitokset koottiin ristikkotehtaalla lukuun ottamatta ristikoiden keskiliitoksia. Keskiliitokset tehtiin rakennustyömaalla sen vuoksi, että ristikot toimitettiin työmaalle kahdessa osassa kuljetuksen helpottamiseksi.



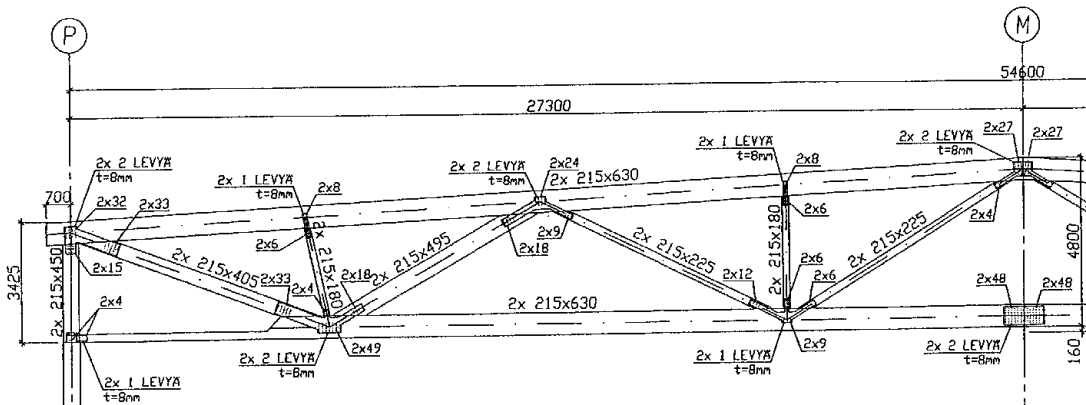
Kuva 8. Rikkoutunut tappivaarnaliitos. (Kuva: Poliisin arkisto)

Figure 8. Broken dowel joint.



Kuva 9. B2-hallissa käytetty 54,6 metriä pitkä liimapuusta tappivaarnaliitosten avulla valmistettu ristikko.

Figure 9. Truss in B2 hall, measuring a length of 54.6 metres and made of laminated timber by utilization of dowel joints.



Kuva 10. Tarkempi kuva ristikosta. Kuvan merkinnöissä "2x" ilmaisee, että levyjä tai tappivaarvoja tarvitaan kullakin ristikkolinjalla kaksinkertainen määrä, koska ristikoita on kaksi rinnakkain. Esimerkiksi merkintä 2x32 tarkoittaa, että yksittäisessä ristikossa kyseisessä liitoksessa on 32 tappivaarvaa.

Figure 10. Detailed photo of truss. Symbol 2x denoting that a double amount of plates or dowels are needed as per truss line as there are two roof trusses in parallel. E.g. 2x32 indicates that the joint in one specific truss has 32 dowels.

Tutkinnan alkuvaiheessa selvisi, että juuri siitä ristikosta (ristikko 32), jonka silminnäkiäjät olivat nähneet pettävän ensin, puuttui tappivaarvoja. Ristikon yläkulman vaarnalevyyn liittyvän vetosauvan liitoksessa, joka oli vaurion yhteydessä pettänyt, puuttui 26 tappivaarvaa. Suunnitelmien mukaan liitoksessa piti olla 33 tappia, mutta niitä oli liitoksessa vain seitsemän. Laskelmien perusteella katon ei olisi kyseisestä puutteesta huolimatta pitänyt romahtaa, minkä vuoksi paikatutkinnassa selvitettiin tarkemmin ristikon 32 ja muiden pettäneiden ristikoiden laatua.

Yksittäisiä tappipuutteita oli useissa muissakin liitoksissa, mutta yhtä merkittäviä tappivaarvojen puutteita ei havaittu. Liitosten laatu vaihteli, sillä muun muassa tappivaarvojen reikien poraussyvyys vaihteli ja näin ollen tappien asema ei ollut täsmällinen. Tappien syvyysasema vaihteli suunnitellusta noin  $\pm 1,5$  cm. Poraustyössä oli havaintojen perusteella ollut ongelmia myös vaarnalevyjen kohdistamisessa, sillä joissakin kohdissa jopa usean tapin tappirivin reiät oli porattu ohi vaarnalevyn, vaikka tappien keskinäinen väli olikin suunnitelman mukainen.



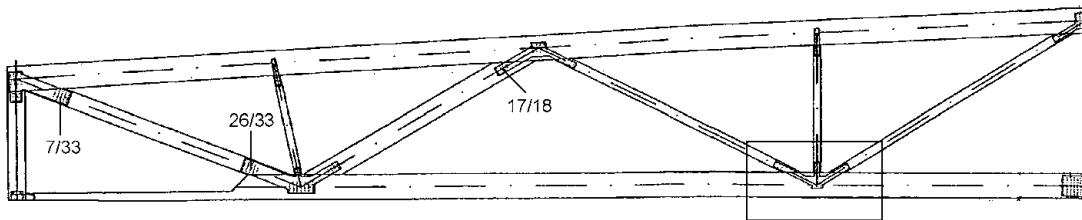


Kuva 11. Kuvakooste joistakin tutkintalautakunnan avaamista tappivaarnaliitoksista, joissa oli puutteita. (Kuvat: Poliisin arkisto)

Figure 11. Series of photos of some deficient dowel joints that were opened by the investigation commission.



Tappivaarnoille poratut reiät olivat melko väljiä, koska tappeja pystyi liikuttamaan käsin vetämällä ja työntämällä. Tapin oikealla syvyydellä olosta ei tapin liikkumismahdollisuuden lisäksi voitu olla varmoja senkään vuoksi, että reikien pohjalle oli mahdollista jäädä porauslastuja. Lisäksi puutteena tappivaarnaliitoksessa oli se, että paarteisiin ja sauvoihin vaarnalevyä varten sahattujen urien leveys vaihteli ja oli monessa kohdassa useita millimetrejä vaarnalevyn paksuutta leveämpi. Myös tappivaarnojen pituus vaihteli enimmillään lähes 10 millimetriä.



Kuva 12. Ristikkolinjan 32 ristikkoparin ristikkolinjan 31 puoleisessa ristikossa havaitut tappivaarnapuutteet. Puutteita oli myös muissa ristikoissa, mutta selvästi merkittävin oli kuvan ristikon vasemmassa yläkulmassa havaittu 26 tappivaarnan puute. Esimerkiksi merkinnällä 7/33 tarkoitetaan, että liitoksessa oli 7 tappia, kun niitä suunnitelmien mukaan olisi pitänyt olla 33. Myös vaarnalevyn ohi porattu tapin reikä luettiin puuttuvaksi tapiksi. Suorakaiteella on merkitty kohta, jossa ristikon alapaarteeseen oli sahattu vaarnalevylle paikka väärään kohtaan. Ylimääräinen ura oli paikattu vanerilla.

Figure 12. Dowels discovered as missing in one truss of the truss pair of line 32. The truss in question is adjacent to truss line 31. Even other trusses displayed shortcomings, but the clearly most important deficiency were the missing 26 dowels in the upper left corner of the truss in the photo. E.g. 7/33 indicates that the joint had 7 dowels instead of the planned 33 dowels. A dowel opening drilled past the toothed retention plate was considered as a missing dowel, as well. The rectangle indicates an area erroneously sawn in the lower flange of the truss for the toothed retention plate. The superfluous slot had been patched with plywood.

Kattoristikot olivat olleet asennettuna teräsbetonisten pilareitten päälle. Pilarit oli suunniteltu mastoiksi eli ne oli tuettu jäykästi alapäästään. Ristikkoparin 34 ulkoseinän puoleinen pilari oli kaatunut ja ristikkoparien 32 ja 33 pilarit olivat silminnähden kallistuneet onnettomuudessa. Lisäksi kaksi muutakin pilaria vaihdettiin hallin korjauksen yhteydessä uusiin. Ristikoiden päät olivat usean pilarin osalta onnettomuuden jälkeen vielä osittain kiinni pilarien yläosassa kallistuneena hallin keskiosaa kohti.

Kuvissa 13 ja 14 näkyy osa ristikoiden päistä ja pilareista onnettomuuden jälkeen. Kuvassa 13 näkyy hyvin ristikkoparin 32 tila. Kyseinen ristikko petti silminnäkijöiden mukaan ensimmäisenä.



*Kuva 13. Etualalla ristikkoparin 33 tukena ollut teräsbetonipilari. Seuraavana oikealla on sortunut ristikkolinja 32, jonka ristikkoparin päät ovat edelleen osittain pilarin päällä. Kuvassa edelleen ylhäällä oleva lyhyempi ristikko on ristikko 31. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 13. In front, reinforced concrete pillar supporting truss pair 33. Closest to the right, the collapsed truss line 32 with the truss pair ends being still partly on the pillar. Moreover in the photo, the shorter truss higher up being truss 31.*



*Kuva 14. Kuvan alareunassa ristikkoparin 34 tukipilari kaatuneena. Kuvan etualalla näkyy ristikkoparin 33 ulkoseinän puoleinen pilari. Taka-alalla on ristikkoparin 35 pilarissa edelleen kiinni oleva osa sekä ylös jäänyt ristikkopari 36. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 14. At the bottom of the photo, the buttress of truss pair 34 having turned over. In front, the exterior wall pillar of truss pair 33. In the background, a part still fastened in the pillar of truss pair 35, and truss pair 36 that did not collapse.*

Tutkinnassa selvitettiin myös ristikoiden päälle asennettujen kattoelementtien kiinnitystä, sillä niillä oli oleellinen merkitys ristikoiden tuennan kannalta. Kattoelementit, jotka ulotuivat kahden ristikkovälin yli, oli kiinnitetty päistään naulaamalla teräksinen asennuskulma elementin sivuun ja kattoristikkoparin toiseen yläpaarteeseen. Keskituella kattoelementti oli kiinnitetty toiseen ristikon yläpaarteeseen. Ohjeena asennuksessa oli ollut, että kiinnitys tehdään aina siihen yläpaarteeseen, joka kyseisessä kohdassa sattuu olemaan korkeammalla. Siten keskitukena olleeseen ristikkopariin tuli vain yksi kulma- rauta, kun päätyukena olleeseen ristikkopariin niitä tuli kaksi. Viereinen kattoelementti nostettiin seuraavaksi edellisen elementin asennuskulmien päälle ja kiinnitettiin vastaavalla tavalla toisesta reunastaan. Kahden vierekkäisen kattoelementin väliin ruuvattiin iso kansiruuvi ja teräslevy, jolla elementit vielä kiristettiin ristikoita vasten. Pituussuunnassa peräkkäisten elementtien toinen palkki kiinnitettiin naulauslevyllä seuraavan elementin vastaavaan palkkiin. Täten vain toinen kattoelementin palkeista siirsi vetovoimia kattoelementin pituussuunnassa.

Hankalinta kattoelementtien kiinnitys oli ollut ristikkolinjalla 31, jossa lyhyemmän jännevälän vuoksi oli vain yksi ristikko. Kun kattoelementtien jatkoskohta tuli vain yhden ristikon päälle, ei kiinnittämiseen ollut yhtä paljoa tilaa kuin ristikkoparin kohdalla. Lisäksi hankaluuksia aiheutti se, että hallin kapeammassa osassa käytettiin 12 mm kapeampi-paarteista kattoelementtiä, jolloin elementin leveydessä oli 24 mm ero ristikon eri puolilla. Elementit oli tällä kohtaa kiinnitetty samoilla asennuskulmilla, mutta yhtä asennuskulmaa oli käytetty kahden elementin kiinnittämiseen. Räystäään lähellä elementtien leveysero oli kertaunut jo niin paljon, että kiinnittäminen pitkittäissuunnassa ei suorilla naulauslevyillä onnistunut ollenkaan. Naulauslevyjä oli jo lähellä harjaakin jouduttu taivuttamaan, jolloin levyillä ei ollut suunniteltua vetokapasiteettia. Hankaluuksia tuli myös siitä, kun elementit jäivät ristikon yläpaarten kapeuden vuoksi vain vähän yläpaarten päälle. Siitä kohdasta elementit olivatkin luiskahtaneet kattovaurion sattuessa pois ristikon päältä.



*Kuva 15. Ristikön 31 yläpaarteen päälle tulevat kattoelementit olivat hiukan eri levyisiä, joten niiden kiinnitys tuotti ongelmia. Kuvaussuunnan puoleinen kattoelementti on pudonnut kattovaurion yhteydessä pois ristikön päältä. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 15. The roof elements mounted on the top beam of truss 31 featured slightly varying widths, and therefore their fastening had been somewhat problematic. In connection with the collapse, the roof element shown in the shooting direction dropped off the truss.*

## 2.2 Olosuhteet

Onnettomuushetkellä sää oli selkeä ja aurinkoinen. Ilman lämpötila oli  $-26\text{ °C}$  ja suhteellinen kosteus 61 %. Tuulen suurin nopeus aamuyön tunteina ja aamulla vaihteli täysin tyynestä 2,2 metriin sekunnissa. Noin kymmenen minuuttia ennen romahdusta, kello 9.30, tehdyssä mittauksessa suurin tuulen nopeus oli 1,3 m/s ja suunta lännen ja koillisen välistä. Säässä ei ollut tapahtunut oleellisia muutoksia onnettomuutta edeltävinä päivinä.

Poliisin teknisen rikostutkimuskeskuksen tutkija mittasi lumen paksuudeksi A-hallin katon 21 – 25 cm ja painoksi noin  $50\text{ kg/m}^2$ . Lumen määrä katolla oli tasainen. Lunta ei onnettomuutta edeltävinä päivinä ollut satanut lisää eikä sitä sää tiedoista päätellen ollut myöskään ollut aikaisemmin samana talvena enempää. Talvi 2003 oli ensimmäinen hallin rakentamisen jälkeinen talvi.

Sisällä messuhallissa lämpötila oli noin  $20\text{ °C}$ . Muutkin olosuhteet sisällä hallissa olivat normaalit.

Tutkijat mittasivat onnettomuutta seuraavalla viikolla kattoristikoiden numero 32 ja 33 liimapuun kosteutta sähköisellä vastusmittarilla sekä puun pinnasta että noin 5 cm syvyydestä. Liimapuun pinnasta mitatun kosteuden keskiarvo oli 9 % ja puun sisältä mitatun 11,5 %. Mitatut kosteusarvot ovat puun ominaisuuksien kannalta lähes ihanteelliset. Puun pinnasta mitattu pienempi kosteusarvo osoittaa, että puu on ollut kuivumassa. Se on normaali ilmiö talvella, kun ulkona on kylmä ja pieni kosteus ja sisällä lämmin.

### 2.3 Onnettomuuteen liittyvät organisaatiot ja henkilöt

Raportissa on käsitelty hankeorganisaatiota siltä osin, kun se on vaikuttanut messuhallin kattoristikoiden ja kattoelementtien suunnitteluun ja toteuttamiseen hallin rakenteiden lujuuden ja stabiiliteetin kannalta.

Viranomaisten toimintaa tarkastellaan rakennushankkeen valmistelun ja rakennustyön valvonnan osalta.

#### 2.3.1 Hallihankkeen toteutusorganisaatio ja sopimusosapuolten tehtävät

##### Hallin toteutusorganisaation muodostaminen

Jyväskylän kaupunki on messuhallin laajentamisesta päättäneen Jyväskylän paviljonkisäätiön omistaja. Hankkeen vetäjänä toimi Jyväskylän kaupungin hankejohtaja, joka laati muun muassa tarjouskyselyt rakennuttajakonsultin palkkaamiseksi hallin laajennuksen toteuttamista varten. Tarjouskysely tehtiin EU:n kilpailuttamissääntöjen mukaisesti niin, että ulkomaisillakin rakennuttajayrityksillä oli mahdollisuus tarjouksen tekemiseen.

Säätiö sai vain kotimaisia tarjouksia, joista rakennuttajakonsultiksi valittiin JP-Terasto Oy. Tämän jälkeen rakennuttamistehtävistä huolehti Jyväskylän paviljonkisäätiö c/o JP-Terasto Oy.

Hankkeen pääsuunnittelijaksi valittiin tarjouskilpailun perusteella Ark.tsto Pekka Paavola Oy, joka laati muun muassa hallin rakennussuunnitelmat (arkkitehtisuunnitelmat).

Rakennusurakoista tehtiin aluksi tarjouskyselyt sillä perusteella, että hallin rakenteet kuuluvat paloluokkaan R30<sup>1</sup>. Tässä vaiheessa kattorakenteiden suunnittelu perustui teräsristikoiden käyttöön. Suomen pelastusalan keskusjärjestöltä (SPEK) pyydytyssä lausunnossa 22.1.2002 todettiin, että paloluokan tulee olla R60. Tämä teki myös liimapuurakenteet kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi katon kannattajina. Paloluokkavaatimuksen muutoksesta johtuen rakennusurakkatarjousten jättämiselle annettiin lisäaikaa 14.2.2002 asti ja urakoitsijoita pyydettiin ottamaan huomioon tarjouksessaan myös liimapuuvaihtoehto. Rakennuttaja pyysi myös suoraan tarjouksia liimapuuvaihtoehtoista puurakenteiden toimittajilta.

---

<sup>1</sup> Rakenteiden paloluokka osoittaa rakenteiden palonkestävyyden. Merkinnässä R30 kirjain R tarkoittaa kantavuutta ja luku 30 palonkestävyyss aikaa minuutteina. Näin ollen paloluokan R30 rakenteen tulee kestää tulipaloa kantavuutensa säilyttäen 30 minuutin ajan. Rakennusten paloturvallisuusvaatimukset perustuvat Suomen rakentamismääräyskokoelman osaan *E1 Rakennusten paloturvallisuus*.

Rakennesuunnittelusta vastasi SCC Viacon Oy, josta oli hankkeen päärakennesuunnittelija. Päärakennesuunnittelijan tehtäviin kuului rakenteiden yleissuunnittelu. Hän on alikirjoittanut myös rakennusvalvontaan toimitetut rakennesuunnitelmat ja lujuuslaskelmat.

Jyväskylän rakennuslautakunta antoi 20.2.2002 tekemällään päätöksellä luvan messuhallin laajennukselle. Päätöksen mukaan hankkeen rakennuttaja on Jyväskylän paviljonkisäätiö c/o JP-Terasto Oy.

Rakennuttaja valitsi pääurakoitsijaksi (samalla työmaan päätoteuttajaksi) Skanska Sisä-Suomi Oy:n. Se oli antanut kaksi erillistä tarjousta, joista toisessa kattokannattajat olivat teräs- ja toisessa liimapuuristikot. Niistä rakennuttaja valitsi puuvaihtoehdon. Rakennuttajan ja pääurakoitsijan välisen sopimuksen mukaan pääurakkaan sisältyi koko työmaan rakennustöiden koordinoinnin lisäksi muun muassa liimapuuristikoiden suunnittelu ja toimitus paikalleen asennettuna. Työmaan koordinointia varten rakennusvalvontaviranomainen hyväksyi 14.2.2002 tekemällään päätöksellä pääurakoitsijan työnjohtajan työmaan vastaavaksi työnjohtajaksi. Toukokuussa työmaan vastaavaksi työnjohtajaksi nimettiin toinen henkilö, joka jatkoi tehtävässä hankkeen loppuun asti.

Pääurakoitsija tilasi liimapuuristikot työmaalle toimitettuna Late-Rakenteet Oy:ltä (Late). Tilauksen 13.2.2002 mukaan ristikoiden ja palkkien suunnittelu ja suunnitelmien hyväksyttäminen sekä kohteen päärakennesuunnittelijalla että viranomaisilla sisältyi hintaan. Tilauksessa todetaan, että ristikoiden ja palkkien asennuksista vastaa SPU-Systems Oy (SPU) sopimusneuvottelun 11.2.2002 mukaisesti.

Late vahvisti pääurakoitsijan tilauksen 20.2.2002 päivätyllä tilausvahvistuksella. Late tilasi puolestaan ristikoiden suunnittelun KPM-Engineering Oy:ltä (KPM). Late valmisti ristikoiden liimapuumateriaalin itse ja tilasi ristikoihin tarvittavat teräksiset vaarnalevyt ja -tapit alihankintana Auranmaan konepaja Oy:ltä. Late kokosi ristikot omalla tehtaallaan Turussa em. materiaaleista ja teräsosista. Lisäksi Late tilasi ristikoiden kuljetuksen Jyväskylään Kuljetusliike U. Teräkseltä.

Pääurakoitsija teki kattoelementtien toimituksesta paikalleen asennettuna sopimuksen SPU-Systems Oy:n (SPU) kanssa. SPU tilasi katon jäykistämisen suunnittelun Insinööri- ja Keroselta. Pääurakoitsija tilasi SPU:lta myös liimapuuristikoiden asennuksen.

Yhteenveto hallin toteutusorganisaatiosta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Hallin toteutusorganisaation sopimussuhteet ja tehtävien määrittelyt

TOIMITTAJA/ URAKOITSIJA	TILAAJA			
	Jyväskylän kaupunki/Jyväskylän paviljonkisäätiö /JP-Terasto Oy	Skanska Sisä-Suomi Oy	Late-Rakenteet Oy	SPU-Systems Oy
JP-Terasto Oy	Rakennuttamistehtävät			
Ark.tsto Pekka Paavola Oy	Rakennussuunnittelu, pääsuunnittelija (arkkitehtikuvat)			
SCC Viacon Oy	Rakenteiden pääsuunnittelu			
Skanska Sisä-Suomi Oy	Pääurakoitsijana toimiminen sekä mm. liimapuuristikoiden toimittaminen paikalleen asennettuina			
Late-Rakenteet Oy		Liimapuuristikoiden toimitus työmaalle kuljetettuna		
KPM-Engineering Oy			Liimapuuristikoiden suunnittelu	
Auranmaan konepaja Oy			Ristikoiden teräsosien valmistus	
Kuljetusliike U. Teräs			Liimapuuristikoiden kuljetus työmaalle	
SPU-Systems Oy		Liimapuuristikoiden asennus ja kattoelementtien toimitus paikalleen asennettuna		
Ins. toimisto Askon Keronen				Katon jäykistyksen suunnittelu

### Hallin käyttökunnosta vastaava organisaatio

Hallin käyttökunnosta vastaa rakennuksen omistaja Jyväskylän paviljonkisäätiö, joka vuokraa tiloja edelleen muun muassa Jyväskylän Messut Oy:lle. Jyväskylän Messut Oy on tilojen käyttäjän ominaisuudessa päässyt vaikuttamaan hallin suunnitelmiin ja sen rakentamiseen.

Hallin laajennus ehti olla käytössä kaksi viikkoa ennen katon romahtamista.

### 2.3.2 Rakentamista valvovat viranomaiset

Rakentamista valvovana viranomaisena toimii rakennusvalvontaviranomainen, jonka tehtävänä on yleisen edun kannalta valvoa rakennustoimintaa sekä osaltaan huolehtia, että rakentamisessa noudatetaan voimassa olevia määräyksiä. Rakentamisen työturvallisuusasiat kuuluvat työsuojeluviranomaisille.

Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL) mukaan rakennusvalvonnan viranomaistehtävistä huolehtii kunnan määräämä lautakunta tai muu monijäseninen toimielin, jona ei kuitenkaan voi toimia kunnanhallitus. Rakentamisen neuvontaa ja valvontaa varten kunnassa tulee olla rakennustarkastaja.

Jyväskylän messuhallin rakentamisen viranomaisvalvonta kuului Jyväskylän kaupungin rakennusvalvontavirastolle. Työsuojelun valvonta onnettomuuskohteessa kuului Keski-Suomen työsuojelupiirille.

#### Rakennusvalvonnan perusteet määräysten mukaan

Rakennustyön valvonnasta on annettu määräykset ja ohjeet Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osassa A1. Määräykset ja ohjeet tulivat voimaan 1.5.2000.

MRL:n mukaan rakennustyön valvonta alkaa luvanvaraisen rakennustyön aloittamisesta ja päättyy loppukatselmukseen. Valvonta kohdistuu viranomaisen päättämässä työvaiheissa ja laajuudessa rakentamisen lopputuloksen kannalta merkittäviin seikkoihin.

MRL:n mukaan rakennustyön valvonnan yksi periaate on, että rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan rakentamista koskevien määräysten sekä myönnetyn luvan mukaisesti. Hänellä tulee olla hankkeen vaatavuus huomioon ottaen riittävät edellytykset sen toteuttamiseen sekä käytettävissään pätevä henkilöstö.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän huolehtimisvelvollisuuteen kuuluvat muun ohessa rakennustyön valvonta sekä työn tarkastaminen ja todentaminen samoin kuin käytettävien rakennustuotteiden kelpoisuuden toteaminen.

Rakennustuotteiden tarkastamisesta MRL:ssä todetaan, että rakennustuotteen, joka on tarkoitettu käytettäväksi pysyvänä osana rakennuskohteessa, tulee olla sellainen, että rakennuskohde asianmukaisesti suunniteltuna ja rakennettuna täyttää rakentamiselle asetetut olennaiset vaatimukset tavanomaisella kunnossapidolla taloudellisesti perustellun käyttöiän ajan.

Rakennustuotteiden tarkastukseen liittyen RakMk:n osan A1 kohdassa 3.2.2 todetaan, että rakentamisen viranomaisvalvonnassa rakennustuotteen kelpoisuus selvitetään keskitetysti tai rakennuspaikkakohtaisesti. Keskitetysti järjestetty kelpoisuuden toteuttamismenettely on mm. standardisointielimen myöntämä standardisointimerkin käyttöoikeus. Rakennuspaikkakohtaisena etukäteiselvityksenä voidaan pitää hyväksytyssä testauslaitoksessa suoritettua koetta ja sen perusteella annettua asiantuntijalausuntoa. Ohjeissa todetaan muun muassa, että jos rakennustuotteesta ei ole aikaisempaa käyttökoke-



musta, tuotteiden käyttö on tarpeen järjestää siten, että niiden käyttökelpoisuutta tarvittaessa seurataan tarkoituksenmukaisella tavalla. Lisäksi kohdassa 3.2.3 todetaan, että jos rakennustyön aikana havaitaan, että esimerkiksi rakennusosat eivät täytä rakentamismääräysten vaatimuksia, rakennusvalvontaviranomaisen tulee tarvittaessa vaatia selvitys toimenpiteistä epäkohdan korjaamiseksi.

MRL:n mukaan kunnan rakennusvalvontaviranomaisen tehtävänä on yleisen edun kannalta valvoa rakennustoimintaa sekä osaltaan huolehtia, että rakentamisessa noudatetaan, mitä laissa tai sen nojalla määrätään. Valvontatehtävän laajuutta ja laatua harkittaessa otetaan huomioon rakennushankkeen vaativuus, luvan hakijan ja hankkeen suunnittelusta ja toteuttamisesta vastaavien henkilöiden asiantuntemus ja ammattitaito sekä muut valvonnan tarpeeseen vaikuttavat seikat.

Suunnitelmien toimittamisesta rakennusvalvontaan MRL:ssä todetaan, että rakennusluvassa, aloituskokouksessa tai erityisestä syystä rakennustyön aikana määrätään erityissuunnitelmien ja selvitysten toimittamisesta kunnan rakennusvalvontaviranomaiselle. Yhtenä tällaisena erityissuunnitelmana MRL:ssä mainitaan rakennesuunnitelmat.

Rakennusvalvontaviranomainen voi MRL:n mukaan vaatia suunnitelmille ulkopuolista tarkastusta, jos se on tarpeen rakennushankkeen arvioimiseksi. Se on mahdollista esimerkiksi tilanteessa, jossa viranomainen katsoo, etteivät hänen mahdollisuutensa arvioida esimerkiksi poikkeuksellista suunnitteluratkaisua ole riittävät. Lisäksi ulkopuolinen tarkastus tulee kyseeseen muun muassa, kun rakentamisessa käytetään rakentamisen turvallisuuteen, terveyteen tai pitkäaikaiskestävyyteen merkittävästi vaikuttavia suunnittelu- tai toteutusmenetelmiä, joiden kelpoisuudesta ei ole varmuutta tai aikaisempaa kokemusta.

Aloituskokouksen merkitys rakentamisessa on suuri, sillä siinä todetaan ja merkitään pöytäkirjaan lupa-asiakirjoissa rakennushankkeeseen ryhtyvälle määrätty velvoitteet, hankkeen suunnittelun ja rakennustyön keskeiset osapuolet, rakennusvaiheiden vastuuhenkilöt ja työvaiheiden tarkastuksia suorittavat henkilöt sekä muut selvitykset ja toimenpiteet rakentamisen laadusta huolehtimiseksi.

Aloituskokouksessa sovitaan rakennushankkeeseen ryhtyvän oman valvonnan järjestämistapa, viranomaisvalvonnan tehtävät työn suorituksen valvonnassa sekä järjestelyt rakennustuotteiden kelpoisuuden toteamiseksi. MRL:ssä määrätään, että rakennustyömaalla pidetään rakennustyön tarkastuskirjaa. Siihen tehdään merkinnät katselmuksista, viranomaisen toimittamista tarkastuksista sekä yksityisen vastattavaksi määräytyistä työn suorituksen tarkastuksista. Aloituskokouksessa tai jo rakennusluvassa voidaan erityisistä syistä johtuen rakennushankkeeseen ryhtyvältä edellyttää selvitys toimenpiteistä rakentamisen laadun varmistamiseksi.

MRL:ssä todetaan katselmuksista muun muassa se, että niitä määrätään toimitettavaksi tarpeen mukaan. Rakennekatselmus on nimetty tällaiseksi tarpeen mukaan määrättäväksi toimenpiteeksi. Lain mukaan rakennekatselmus toteutetaan, kun kantavat rakenteet sekä niihin liittyvät veden-, kosteuden-, äänen- ja lämmöneristystyöt sekä paloturvallisuuteen liittyvät työt on tehty. Ohjeen mukaan katselmuksia voi olla tarpeellista toi-

mittaa vaiheittain ja niin, että tiettyyn rakennusvaiheeseen kuuluvia rakenteita ei ole vielä peitetty.

Loppukatselmukseen liittyvänä asiana MRL:ssa määrätään muun muassa, että katselmusta haettaessa tulee rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeen, jos sellainen on määrätty laadittavaksi, olla riittävässä laajuudessa valmis ja luovutettavissa rakennuksen omistajille.

### **Rakennusluvan ja aloituskokouksen vaatimukset rakentamiselle**

Jyväskylän rakennuslautakunta antoi 20.2.2002 tekemällään päätöksellä luvan messuhallin laajennukselle. Lupaehtoihin sisältyi muun muassa seuraavat vaatimukset:

- Kiinteistön ja siinä toimivien yritysten tai laitosten tulee laatia suojelusuunnitelma kuuden kuukauden kuluessa toiminnan aloittamisesta.
- Ennen rakennustyön aloittamista on rakennuspaikalla järjestettävä aloituskokous.
- Rakennukselle on laadittava käyttö- ja huolto-ohje.
- Suomen pelastusalan keskusjärjestön (SPEK) lausunnossa olevat ehdot on otettava huomioon. Lausunto on päivätty 22.1.2002. Lausunnossa todetaan: Vaikka laajennus varustetaan automaattisella sammuuslaitteistolla, tulee SPEKin käsityksen mukaan kantavan ristikon täyttää vähintään R 60-luokan vaatimukset.
- Saastuneet maa-ainekset on poistettava tai käsiteltävä vaarattomaksi ennen rakentamistoimenpiteisiin ryhtymistä.
- Ennen kunkin työvaiheen aloittamista on rakennusvalvontaviranomaiselle esitettävä mm. rakennesuunnitelmat sekä lujuuslaskelmat.
- Rakennustyön toteuttaminen edellyttää mm. rakennekatselmuksen suorittamista.

Lupaehtoissa mainitulla suojelusuunnitelmalla tarkoitettiin pelastustoimilain edellyttämää turvallisuussuunnitelmaa. Messuhallilla on vuodelta 1997 oleva suojelusuunnitelma. Se olisi kuitenkin pelastustoimilain mukaan pitänyt päivittää turvallisuussuunnitelmaksi syyskuuhun 2000 mennessä ja edelleen päivittää B-hallin käyttöönottoon mennessä. Rakennusluvan ehtojen mukaan suunnitelma tuli kuitenkin laatia kuuden kuukauden kuluttua toiminnan aloittamisesta. Onnettomuuden aikaan käytössä oli edelleen vuoden 1997 suojelusuunnitelma.

Työmaan aloituskokous pidettiin 1.3.2002 Jyväskylän kaupungin tarkastusinsinöörin johdolla. Pöytäkirjan kohdassa 4 ”Laadun varmistus ja rakennustuotteiden kelpoisuus” on todettu, että rakennustyön edistymisestä työmaalla pidetään tarkastuspöytäkirjaa. Rakennustuotteiden kelpoisuuden varmistuksesta ko. kohdassa ei ole ohjeita. Rakennetarkastuksen vastuuhenkilöksi (viranomaisten lisäksi) sovittiin vastaava työnjohtaja.

Rakennusvalvontaan toimitettiin rakenteita koskevat suunnitelmat ja lujuuslaskelmat kuten rakennusluvassa oli edellytetty. Tarkastusinsinööri ei kertomansa mukaan tarkastanut liimapuuristikoiden eikä kattoelementtien lujuuslaskelmia.

Aloituskokouksen pöytäkirjassa mainitun tarkastuspöytäkirjan merkintöjen mukaan tarkastusinsinööri teki työmaalle kolme katselmusta:

- pohjakatselmus 22.4.2002,
- rakennekatselmus 18.7.2002 ja
- rakennusvalvonnan osittainen loppukatselmus 5.8.2002.

Lisäksi tarkastusinsinööri teki osittaisen loppukatselmuksen sisäpuolisille tiloille 16.1.2003. Tarkastuksesta on pöytäkirja, mutta ei merkintää tarkastuspöytäkirjassa.

Tarkastusinsinööri ei kertomansa mukaan todennut katselmuksissa merkittävästi huomautettavaa. Hän ei tehnyt katselmuksia liimapuuristikoiden eikä muidenkaan rakennuselementtien valmistukseen.

### **Työsuojeluvalvonnan perusteet elementtirakennushankkeessa**

Viranomaisen tehtävät työsuojelun valvonnassa määrittelee laki työsuojelun valvonnasta ja muutoksenhausta työsuojeluasioissa (131/73). Em. valvontalaki on vuodelta 1973 ja sitä on myöhemmin täydennetty ja uudistettu. Valvontalain mukaan viranomaisen tehtävänä on työsuojelua koskevien säännösten ja määräysten valvonta.

Valvontalain mukaan työsuojeluviranomaisella on oikeus työsuojelua koskevien tarkastusten toimittamiseen työpaikoilla ja muissa valvonnan toteuttamiseksi tarpeellisissa kohteissa ja oikeus tarvittaessa käyttää asiantuntijoita työsuojelua koskevien tutkimusten suorittamiseen tarkastuskohteissa.

Työsuojelutarkastuksien määrään ja laatuun liittyen valvontalaissa on määrätty, että tarkastuksia on toimitettava niin usein ja niin tehokkaasti kuin valvonnan kannalta on tarpeellista.

Tarkastajalle on valvontalaissa annettu oikeus päästä paikkaan, jossa valmistetaan käyttöön luovutettavaksi tarkoitettuja tuotteita.

Rakennushankkeen organisaation työturvallisuustoimintaa koskevat ja työsuojeluviranomaisen valvonnan piiriin kuuluvat määräykset on pääosiltaan esitetty valtioneuvoston päätöksessä rakennustyön turvallisuudesta 629/1994 (RakVNp). Elementtirakentamisen turvallisuutta koskevat erityismääräykset ovat sosiaali- ja terveysministeriön päätöksessä elementtirakentamisen turvallisuusmääräyksistä (ElemP), jotka astuivat voimaan 1.1.1985. Messuhallin laajennus oli elementtirakentamista ja siten kyseessä olevat määräykset koskivat sitä.

Rakennushankkeen valmisteluun liittyen RakVNp:ssä määrätään, että rakennuttajan on huolehdittava, että arkkitehtonisessa, rakennusteknisessä ja teknisten järjestelmien suunnittelussa sekä rakennushankkeen toteuttamisen järjestelyihin liittyvässä suunnit-

telussa otetaan huomioon rakennustyön toteuttaminen siten, että työ voidaan tehdä turvallisesti. Rakennuttajan toiminnasta riippumatta suunnittelijalla on työturvallisuuslaissa säädetty velvollisuus ottaa suunnitelmissaan rakennustyön turvallisuus huomioon.

Rakentamisen valmisteluun liittyen RakVNp:ssä määrätään myös, että rakennuttajan on laadittava rakennustyön suunnittelua ja valmistelua varten asiakirja, joka sisältää rakennushankkeen ominaisuuksista ja luonteesta aiheutuvat ja sen toteuttamiseen liittyvät tarpeelliset turvallisuustiedot.

Eri urakoihin ja alihankintoihin pilkotun hankeorganisaation toimivuuden varmistamiseksi RakVNp:ssä määrätään, että rakennuttajan on määritettävä eri urakoitsijoiden töiden ja työvaiheiden yhteensovittamisen säännöt työntekijöiden ja muiden työmaalla työskentelevien turvallisuuden varmistamiseksi.

Työmaatason toiminnan eli rakennustöiden turvallisuussuunnittelu on määrätty RakVNp:ssä pääurakoitsijan (pää toteuttajan) huolehdittavaksi. Pääurakoitsijan on ennen rakennustyön aloittamista suunniteltava eri töiden ja työvaiheiden tekeminen sekä niiden ajoitus niin, että ne voidaan tehdä turvallisesti aiheuttamatta vaaraa työmaalla työskenteleville tai muille työn vaikutuspiirissä oleville. Päätöksen mukaan suunnittelussa on otettava huomioon ne erityiset toimenpiteet, jotka koskevat päätöksen liitteessä 2 tarkoitettuja erityisiä turvallisuusvaaroja sisältäviä töitä. Liitteessä 2 tällaisena työnä on mainittu muun muassa työt, joihin liittyy raskaiden esivalmisteisten osien kokoamista tai työt, joissa työntekijöihin kohdistuu korkealta putoamisen vaara.

Turvallisuussuunnittelussa on RakVNp:n mukaan kiinnitettävä huomiota monenlaisiin asioihin, joiden joukossa on mainittu elementtien asennus. ElemP:n mukaan työmaalla on oltava elementtien asennustyötä koskeva asennussuunnitelma. Päätöksen mukaan asennussuunnitelmassa on esitettävä muiden muassa sekä yksittäisen elementin että koko rakenteen eri työvaiheita koskeva vakavuustarkastelu. Asennusaikaisen jatkuvan sortuman vaara on myös estettävä. Muun muassa näistä syistä hyvän käytännön mukaan rakennesuunnittelija tarkistaa asennussuunnitelman, koska hän tuntee parhaiten rakenteiden toimintatavan.

Rakennustyön johtamisen onnistumiseksi RakVNp:ssä vaaditaan, että päätoteuttajan on huolehdittava turvallisuuden kannalta tarpeellisesta yleisjohdosta ja osapuolten välisen yhteistoiminnan ja tiedonkulun järjestämisestä. Päätoteuttajan on nimettävä tähän tehtävään työmaata varten pätevä vastuuhenkilö. Samoin on jokaisen työnantajan nimettävä teettämänsä työn johtoa ja valvontaa varten siihen pätevä vastuunalainen henkilö.

Turvallisuuden varmistamiseksi RakVNp:ssä on määrätty suoritettavaksi erilaisia tarkastuksia. Päätöksen mukaan muun muassa elementtien rakenne ja kunto on rakennustyömaalla todettava niitä koskevien vaatimusten mukaisesti. ElemP:ssä vaaditaan, että asennettava elementti on tarkastettava silmämääräisesti ennen asennusta elementtisuunnittelijan ja valmistajan ohjeiden mukaisesti. RakVNp:n mukaan tarkastuksista on pidettävä pöytäkirjaa tai muuta tallennetta.

Työsuojeluviranomaisen valvontaa varten RakVNp:ssä vaaditaan, että päätoteuttaja tekee työsuojeluviranomaiselle alkamisilmoituksen työmaasta. Ilmoituksen pitää olla päätohterssa esitetyn liitteen mukainen.

### **Toteutunut työsuojeluvalvonta**

Työsuojelupiiristä ilmoitettiin, että sinne on toimitettu hallityömaasta RakVNp:n mukainen alkamisilmoitus.

Työsuojelupiiri teki työmaalle yhden tarkastuksen ennen katon romahtamista. Tarkastus tehtiin 15.8.2002 ja se kohdistui muuraustelineisiin.

Työsuojelupiirin tarkastaja suoritti myös romahduksen jälkeisiin purkutöihin kohdistuvat tarkastukset 3. ja 4.2.2003.

Työsuojelupiiristä kerrottiin, että hallityömaata ei valvottu enempää sen vuoksi, että työmaan vastaava työnjohtaja tunnettiin turvallisuusasiat hyvin hoitavaksi henkilöksi.

## **2.4 Pelastustoimen organisaatio ja toimintavalmius**

### **2.4.1 Keski-Suomen hätäkeskus**

Keski-Suomen hätäkeskuksen toimialueena on 30 kuntaa, joiden alueella asuu noin 263 000 ihmistä.

Messuhallilla tapahtuneen onnettomuuden aikana oli hätäkeskuksessa työvuorossa vuoromestari ja neljä hätäkeskuspäivystäjää, joka on normaali lauantapäivän miehitys.

Alkuvaiheessa vuoromestari ja kolme päivystäjää keskittyivät huolehtimaan onnettomuuden vaatimista hälytystehtävistä ja viestiyhteyksistä. Neljäs päivystäjä hoiti tuona aikana muut sisään tulevat puhelut ja niiden vaatimat toimenpiteet.

### **2.4.2 Jyväskylän kaupungin pelastuslaitoksen operatiivinen organisaatio**

Keskuspaloasemalta toimii vakinainen palokunta, jonka vuorovahvuus on palomestari, kaksi paloiesimiestä ja kuusitoista miehistön jäsentä. Tällä vahvuudella hoidetaan myös kolmen sairausauton valmius, joka sitoo kuusi henkilöä. Onnettomuuspäivänä vuorovahvuus oli kahdeksantoista henkilöä.

Säynätsalon sivupaloasemalla on arkipäivisin töissä palomestari ja sieltä toimii puolivakkinainen palokunta. Säynätsalosta on matkaa kaupungin keskustaan noin viisitoista kilometriä.

Rautpohjan VPK, jolla on sammutussopimus kaupungin kanssa, toimii Metsopaperitehdasalueelta läheltä keskuspaloasemaa.

### 2.4.3 Toimintavalmius messuhallille

Messukeskus sijaitsee I-riskialueella, jolloin palokunnan toimintavalmiusajan tulisi pääsääntöisesti olla alle kuusi minuuttia. Palokunta onkin tavoittanut tämän kohteen vaaditun ajan sisällä, mutta onnettomuuden tapahtuessa oli kaupungin keskusta-alueella tietöstä johtuva kiertotiejärjestely, joka aiheutti palokunnan yksiköille yli seitsemän minuutin toimintavalmiusajan.

Pelastuslaitoksen palomestarit ovat osallistuneet ennen messutapahtumia kohteessa järjestettyihin turvatarkastuksiin, joissa käydään läpi ainakin kulkuväylien ja poistumisteiden määrä ja kunto sekä alkusammuttimien määrä ja saatavuus. Näin ollen kohde on palomestareille tuttu.

Messuhalli on tuttu myös muulle pelastuslaitoksen operatiivista työtä tekevälle henkilöstölle, koska he ovat käyneet kohteessa automaattihälytysten vuoksi ja muuten eri tapahtumien yhteydessä.

Varsinaisia harjoituksia tai kohdekäyntejä ei pelastuslaitoksen operatiiviselle henkilöstölle ole messuhallille järjestetty. Myöskään kohdekorttia tai muuta toimintasuunnitelmaa onnettomuustilanteiden varalle ei pelastuslaitoksella tähän kohteeseen ole.

### 2.5 Tallenteet

Tutkintalautakunta on saanut romahdusta edeltävänä päivänä hallissa otettuja valokuvia. Kuvista näkyy, että kattoristikoihin ei messujen vuoksi ollut ripustettu mitään ylimääräistä kuormaa. Samoin ovat myös messuyhtiön työntekijät kertoneet eikä romahdusalueellakaan mitään sellaista havaittu.

Hallissa oli tallentava videovalvontajärjestelmä, mutta uuden järjestelmän käyttövaikeuksien vuoksi tallenteissa ei ollut kuvaa viimeisen kahden viikon ajalta.

Hätäkeskukseen tulleet hätäilmoitukset ja osa onnettomuuteen liittyvistä muista puheiluista ovat tallentuneet. Ensimmäisessä hätäilmoituksessa kuuluu taustalta myös katon romahtaminen, joten äänten perusteella on voitu arvioida tapahtumiin kulunutta aikaa. Kun puhelu oli jatkunut noin minuutin ajan, katto alkoi romahtaa. Hätäkeskuksen tallentaman puhelun taustalta kuului huutoa ja sen jälkeen ryminää noin 15 sekunnin ajan. Siitä päätellen ristikon alapaarteen katkeamisen jälkeinen varsinainen romahdus kesti kaiken kaikkiaan noin 15 sekuntia.

Hätäkeskus kirjasi tehdyt hälytykset hälytysselesteeseen, jossa on luettelo paikalle hälytetyistä yksiköistä ja niiden toiminta-ajoista. Pelastustoimintaa johtanut pelastusviranomaisen on myös täyttänyt tapahtuneesta onnettomuusselosteen, johon on kirjattu lisätietoja tapahtuneesta ja pelastustoiminnasta tapahtumapaikalla.

Tutkintalautakunnalla on myös ollut käytettävissään useita tunteja rakennustyömaalta kuvattua videonauhaa, jossa on nähtävissä muun muassa ristikoiden puolikkaiden liittäminen toisiinsa, ristikoiden nosto paikoilleen ja kattoelementtien asennusta.

## 2.6 Asiakirjat

Tutkintalautakunta on perehtynyt Jyväskylän rakennusvalvontavirastossa oleviin hallin rakentamiseen liittyviin asiakirjoihin. Asiakirjoja olivat muun muassa arkkitehtipiirustukset sekä kiinnostavimpina rakennelaskelmat ja rakennepiirustukset. Lisäksi tutkintalautakunnalla on ollut käytettävissään lukuisa määrä sopimuksia, projektisuunnitelmia, työmaapöytäkirjoja ja muuta aineistoa, josta on voitu selvittää rakennustyön etenemistä, organisaatiota ja vastuusuhteita. Lautakunta katsoo, että sillä on ollut käytettävissään tutkinnassa tarvittavat asiakirjat.

Tutkintalautakunnalla on myös asiakirjoja, joista ilmenee noin kaksi kuukautta ennen romahdusta havaittu vika ristikkolinjalla 31 olevassa tappivaarnaliitoksessa. Pääurakoitsija on toimittanut asiasta ristikkovalmistajalle 4.12.2002 reklamaation, jonka mukaan ristikon yläpaarteen ja ensimmäisen vinosauvan välissä oli havaittu 54 mm rako. Ristikkoa oli tällöin nostettu työmaalla tunkilla ylöspäin ja liitos oli tarkastettu. Silloin havaittiin, että liitoksessa oli 22 tappivaarnan sijaan vain kaksi tappia. Liitokseen lisättiin tappeja ristikkovalmistajan ohjeiden mukaan. Kyseinen ristikko, joka on lyhyempi kuin romahtaneet ristikot, pysyi onnettomuudessa ylhäällä.

Reklamaatiossa edellytettiin, että ristikkovalmistajan ”tulee tehdä työmaalla ristikoiden liitoskohtien tarkastus luotettavalla tavalla, jotta voidaan varmistua, että ristikot on tehty suunnitelmien mukaan.” Tarkastuksesta on reklamaation mukaan ”laadittava pöytäkirja ja toimitettava se ensi tilassa työmaan vastaavalle mestarille”. Määräajaksi annettiin 13.12.2002.

Ristikkovalmistaja lähetti 13.12.2002 pääurakoitsijalle kirjeen, jossa kerrottiin reklamaation jälkeen tehdyistä tarkastuksista. Niiden mukaan ristikkovalmistaja oli tarkastanut ”kaikki D1 hallin ristikkojen liitokset (linjat 24-31) teräksiset tappivaarnat tunnistavalla ja paikantavalla Hilti PS 20 laitteella”. Lisäksi kirjeen mukaan D1-hallista tarkistettiin kaikki ristikkoliitokset linjoilta 40-42 ja D2-hallin tuplaristikoiden (linjat 32-39) liitoksia tarkistettiin niin paljon kuin niitä päästiin esteettömästi tutkimaan. Tarkastuksessa ei kirjeen mukaan ”havaittu minkäänlaisia poikkeamia tappivaarnojen suunnitelman mukaisista määristä.” Loput linjojen 32-39 liitokset esitettiin tarkistettavaksi 8.1.2003, kun hallin lattiat ovat vapaat tavaroista ja saksilavoilla pääsee kulkemaan joka paikkaan. D-hallilla tarkoitettiin nykyistä B-hallia.

Ristikkovalmistaja laati 9.1.2003 uuden kirjeen, jonka mukaan D2 hallin linjojen 32-39 liimapuuristikoiden tehdasvalmisteisten tappiliitosten tarkastus on saatu 8.1.2003 valmiiksi. Tarkastus oli kirjeen mukaan suoritettu edelleen ”teräksiset vaarnatapit tunnistavalla ja paikantavalla Hilti PS 20 laitteella.” Tarkastuksessa ei kirjeen mukaan havaittu ”minkäänlaisia poikkeamia tappivaarnojen suunnitelman mukaisista määristä.”

Tutkintalautakunta kokeili onnettomuutta seuraavalla viikolla Hilti PS 20 laitetta tarkoituksenaan selvittää laitteen soveltuvuutta tappivaarnojen paikantamiseen ja lukumäärän laskemiseen. Kokeilussa todettiin, että laitetta puun pinnassa kuljetettaessa se antoi silloin tällöin merkkiäänänsä tunnistessaan terästä, mutta yksittäisten tappivaarnojen paikan tunnistaminen ei millään kyseisen laitteen asetuksella ollut mahdollista. Laitteella ei näin

ollen ole voitu todeta ja laskea tappivaarjien lukumäärää edes suuruusluokkatasolla. Lisäksi tappien olemassaolon toteamista ristikkovalmistajan tarkastuksessa on varmasti hankaloittanut se seikka, että tappeja on kaiken kaikkiaan valtava määrä. Yhdessä linjojen 32-39 ristikkoparissa tappeja on yli kolme tuhatta. Näin ollen pelkästään näissä kahdeksassa pitkässä ristikkoparissa on yhteensä noin 25 000 tappivaarjaa. Lisäksi tarkastettavana oli 11 lyhyempää ristikkoa.

## 2.7 Määräykset ja ohjeet

Puurakenteiden rakennesuunnittelu voidaan tehdä Suomessa yhdistelmillä:

- Suomen rakentamismääräyskokoelma B1 (kuormat) ja B10 (puurakenteen kapasiteetti) tai
- Euronormeja käyttäen ENV-1991 (kuormat, suomalainen sovellusohje RIL 201-1999) ja ENV-1995 (puurakenteiden kapasiteetti, suomalainen sovellusohje RIL 205-1997).

Edellä olevien vaihtoehtojen käyttö ristiin ei ole rakentamismääräysten mukaan sallittua. Myös sama kohde tulee suunnitella vain yhtä järjestelmää käyttäen. Kattoristikot oli suunniteltu Euronormeja käyttäen ja rakennuksen jäykistyksen suunnittelussa käytettyjä normeja ei laskelmissa ole erikseen mainittu. Kattoelementtien kiinnitykseen käytettyjen naulaliitosten yhteydessä on viitattu aikaluokkiin B ja C<sup>2</sup>, jotka ovat suunnitteluohjeen B10 aikaluokkia, mutta eivät ole Euronormien luokkia. Edelleen naulaliitosten kapasiteettiarvoista voidaan päätellä, että mitoitus on tehty sallittuja jännityksiä käyttäen, johon B10 antaa mahdollisuuden, mutta eivät Euronormit. Ohjeen B10 käytöstä euronormin sijaan ei tässä tapauksessa ole haittaa, koska jäykistysuunnitelmassa on käytetty ristikkosuunnitelmasta saatuja ominaiskuormia. Lisäksi vaikutus on turvallisempaan suuntaan, koska euronormin lumikuormat ovat suurempia kuin normin B1 lumikuormat.

Euronormeja käytettäessä murtorajatilatarkastelussa rakenteen laskentakuorma saadaan kaavasta

$$F_d = \left. \begin{matrix} 0,9 \\ 1,2 \end{matrix} \right\} G_k + 1,5Q_{k,1} + \sum_{i>1} 1,5\psi_{Q,i} Q_{k,i}$$

missä

$G_k$  on pysyvä kuorma, esimerkiksi rakenteen oma paino,

$Q_{k,1}$  on määräävä yksi muuttuva ominaiskuorma,

$Q_{k,i}$  on muu muuttuva kuorma, esimerkiksi tuuli,

$\psi_{Q,i}$  on kuormien yhdistelykerroin, jolla otetaan huomioon kuormien suurien arvojen samanaikainen esiintymistodennäköisyys. Tuulelle sen arvo on 0,5 ja lumelle 0,7.

<sup>2</sup> Puurakenteiden suunnittelussa kuormat jaetaan kestonensa perusteella kolmeen aikaluokkaan: *A pitkäaikainen*, *B lyhytaikainen* ja *C hetkellinen*. Esimerkkeinä voidaan mainita A-luokkaan kuuluva omapaino, B-luokkaan kuuluva lumikuorma ja C-luokkaan kuuluva tuuli.



Pysyvän kuorman osavarmuuskertoimista valitaan joko 0,9 tai 1,2 riippuen siitä, kummalla saadaan määräävä vaikutus. Muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin on siis aina 1,5.

Puumateriaalin lujuuteen vaikuttaa itse materiaalin lujuuden lisäksi kuormitusaika ja materiaalin kosteus kuormituksen aikana. Materiaalin laskentalujuus saadaan kaavasta

$$X_d = \frac{k_{\text{mod}} X_k}{\gamma_M}$$

missä

$X_k$  on materiaalille saatu ominaislujuus, kun kuormitusaika on 5 minuuttia ja materiaali on tasaannutettu tasapainokosteuteen ilmastoidussa tilassa, jonka suhteellinen kosteus on 65% ja lämpötila 20 °C. Arvo on sellainen, että 95% arvoista on ominaisarvoa suurempia ja siis 5% pienempiä.

$k_{\text{mod}}$  on kuormitusajan ja materiaalin kosteustilan huomioon ottava kerroin. Sen arvo on käytännössä 0,9, kun kuormitusyhdistelmään kuuluu rakenteen pysyvän kuorman lisäksi lumi- ja tuulikuormia. Suurilla pysyvän kuorman arvoilla ( $G_k > 2,5 Q_k$ )  $k_{\text{mod}} = 0,6$ .

$\gamma_M$  on materiaalin osavarmuuskerroin, jonka arvo on puumateriaalille 1,3 murtorajatilatarkastelussa.

Mitoituksessa tarkistetaan, ettei laskentakuorma ylitä laskentalujuutta.

Käyttörajatilatarkastelussa sekä materiaalin että kuorman osavarmuuskertoimet ovat 1. Käyttörajatilatarkastelussa lasketaan tavallisimmin rakenteen taipuma ja tarkistetaan, ettei se ylitä rakenteelle sallittavaa taipumaa, joka on annettu normeissa tai joka voi olla muuten haitallinen rakenteen toiminnan kannalta. Haitallista on esimerkiksi se, että liikaa taipunut rakenne tukeutuu suunnittelemattomasti alla oleviin rakenteisiin, jotka voivat rikkoutua tai alla oleva rakenne toimii lisätukena ja muuttaa rakenteen toimintaa epäedullisesti. Tällainen epäedullinen toiminta voi muuttaa esimerkiksi ristikkorakenteen pitkät hoikat vetosauvat puristetuiksi ja ne murtuvat nurjahtamalla.

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annetussa sallittujen jännitysten menetelmässä kuormien arvoina käytetään kuormitusnormeista saatavia ominaiskuormia ilman kuorman osavarmuuskertoimia ja materiaaliarvoina ohjeesta B10 saatavia sallittuja jännityksiä ja muita sallittuja arvoja. Mitoituksessa tarkistetaan, ettei ominaiskuormista saatava arvo ylitä vastaavaa sallittua arvoa.

### Ristikoiden suunnittelu

Ristikkojen suunnittelussa oli käytetty seuraavia normeja:

- RIL 201-1999 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Euronormi ja
- RIL 205-1997 Puurakenteiden suunnittelu, Euronormi.

Käytetty kuormitus romahtaneella alueella oli seuraava:

- Peruslumikuorma 2,5 kN/m<sup>2</sup> (maassa), joka tarkoittaa kuormaa 2,0 kN/m<sup>2</sup> katolla.
- Yläpaarteella pysyvä kuorma 0,55 kN/m<sup>2</sup> (kattoelementin paino 0,45 kN/m<sup>2</sup> ja ripustuskuorma 0,1 kN/m<sup>2</sup>).

- Alapaarteen ripustuskuorma 0,1 kN/m<sup>2</sup>.
- Tuulikuorma 0,55 kN/m<sup>2</sup>.
- Kuormitusleveys oli keskimääräinen ristikkojako.

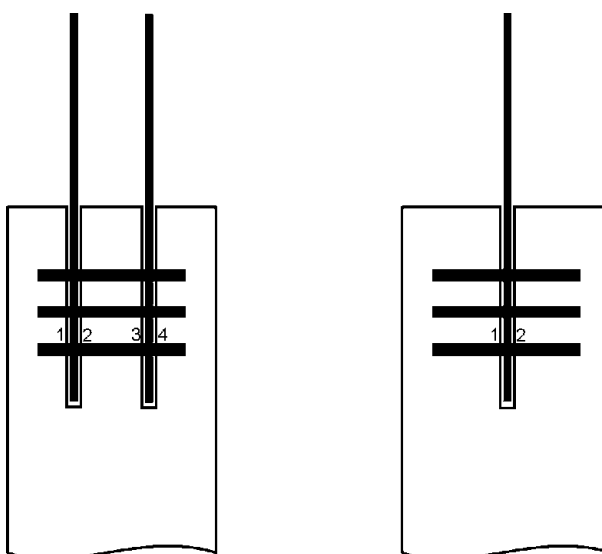
Puumateriaalina suunnitelmissa oli liimapuu GL32, joka vastaa suomalaista liimapuuta L40. Puun leveys oli romahtaneissa ristikoissa 215 mm eli ristikkoparin kokonaisleveys oli 2 x 215 mm = 430 mm. Tappivaarujen teräslaatu oli ristikkosuunnitelmissa 8.8 (lujuus 800 MPa, myötöarvo 640 MPa), halkaisija 12 mm ja pituus romahtaneiden ristikoiden osalta 151 mm. Tappivaarujen minimietäisyydeksi syiden suunnassa oli annettu 84 mm. Syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa minimietäisyys oli 36 mm, 84 mm vedetyn sauvan päässä, 45 mm puristetun sauvan päässä ja 45 mm puun syrjäreunassa. Voiman suunnassa kuudelle peräkkäiselle tappivaarnalle oli laskettu täysi kapasiteetti ja loppuista oli vähennetty 1/3. Teräslevyjien teräslaatu oli S355J2G3.

Ristikkojen voimasuureet oli laskettu ohjelmalla WoDe 2000, joka on SFS-Sertifiointi Oy:n hyväksymä naulalevyrakenteiden suunnitteluun.

Kuormitusyhdistelmiä oli laskettu kaikkiaan 18 kpl. Määrävimmäksi kuormitusyhdistelmäksi laskelmissa oli saatu kuormitusyhdistelmä, jossa on mukana rakenteen omapaino ja täysi lumikuorma. Tämä laskenta-arvo on

$$q_d = 1,2g_k + 1,5q_k = 1,2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2 = 4,2 \text{ kN/m}^2.$$

Tappivaarnaliitosten laskentakapasiteetti määritettiin normin RIL 205-1997 mukaan. Yhtä tappivaarna kohti oli saatu nelileikkeisessä liitoksessa, joita suurin osa liitoksista oli, laskenta-arvoksi puun syiden suuntaan 35,8 kN ja kaksileikkeisessä liitoksessa siitä puolet. Leikkeiden lukumäärä on tappivaarnaliitoksessa puu-teräs -pintojen lukumäärä (kuva 16).



Kuva 16. Vasemmalla nelileikkeinen ja oikealla kaksileikkeinen tappivaarnaliitos.

Figure 16. To the left, a four-cut dowel joint and to the right, a two-cut dowel joint.

Määräavimmasta kuormitusyhdistelmästä saatiin liitosta rasittava mitoittava voima ja tappivaarujen lukumäärä saatiin jakamalla voima yhden tappivaarun kapasiteetilla.

### Lohkeamismurtotarkastelu

Lohkeamismurrolla ymmärretään puun murtumista liitosalueelta siten, että puusta murtuu pala liitinalueen ulkoreunoja pitkin (kuva 17). Tällaista murtumistapaa ei ollut otettu suunnitteluajankohtana voimassa olevissa normeissa huomioon.



Kuva 17. Tappivaarnaliitos, joka on murtunut lohkeamalla puuosasta uloimman tappirivin kohdalta. (Kuva: Poliisin arkisto)

Figure 17. Dowel joint displaying a cleavage fracture in a timber part in the outer dowel row.

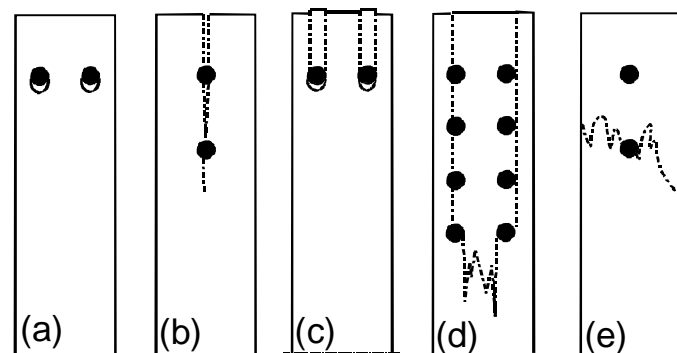
Vuonna 1988 voimassa ollut DIN 1052 –normi on todennäköisesti ollut jonkinlainen esikuva suunnittelussa käytetyille euronormille ENV-1995. Siellä esitetyt liittimien eli tappivaarujen pienimmät sallitut välit poikkeavat vain vähän ENV-1995:ssä esitetyistä arvoista. Pienimmät välit ovat samat puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Syiden suuntaiset arvot ovat liittimien keskinäisille väleille ENV:ssä  $7d$  ja DIN:ssä  $5d$  ja päätyetäisyys kuormitetussa päässä  $7d$  (ENV) ja  $6d$  (DIN), kun  $d$  on liittimen halkaisija. Peräkkäisten liittimien ottaman kuorman redusointikertoimet ovat molemmissa samat. DIN-normissa on rajoitus, että peräkkäisistä liittimistä saa vain 12 laskea mukaan liitosta mitoitettaessa. Tätä rajoitusta ei ole ENV:ssä. Liittimen kapasiteetti on DIN:ssä kaksileikkiselle liitokselle noin 80% ENV:n arvosta. Pienemmät arvot selittyvät sillä, että samat arvot pätevät kaikille havupuiden lujuusluokille.

Euronormin opetuspaketin STEP 1:n luennossa C1 on ilman kaavoja esitetty varoitus, jonka mukaan murtumista estävä pinta-ala on kohtisuorassa liitoksen tasoa vastaan ja puun materiaalihauraudesta johtuen vetokapasiteettia syiden suuntaan ja leikkauskapa-

siteettia ei saa laskea yhteen. Mahdollisia murtumispiintoja on havainnollistettu piirroksin, mutta laskentakaavoja ei ole annettu.

Kun liitos murtuu puusta, se tapahtuu periaatteessa jollain kuvassa 18 esitetyllä tavalla. Puikkoliitosteorian peruskaavan mukaan puu murtuu liittimen alta ja liittimen reikä pitelee kuvan 18 (a) mukaisesti. Puu voi haljeta kuvan (b) mukaisesti tai puusta voi irrota palat kuvan (c) mukaisesti, kun puun leikkauslujuus ylittyy. Kuvan (b) ja (c) mukainen murtotapa otetaan suunnitteluohjeissa huomioon siten, että annetaan pienimmät sallitut arvot peräkkäisten liittinten välisille etäisyyksille ja pienennetään yhden liittimen kapasiteettia peräkkäisten liittinten lukumäärästä riippuen. Kuvassa (d) on esitetty lohkeamismurto, jossa liittinten rajoittamalta alueelta irtoaa pala.

Ristikkosuunnittelija on tarkastellut kuvan (e) mukaista murtumistapaa alapaarteen keskiliitoksen osalta, jossa on ajateltu koko puun katkeavan poikkittaisen reikärivin kohdalta. Saaduissa laskelmissa oli tehty puun vetokapasiteettitarkastelu alapaarteen jatkoksesta, joka tehtiin työmaalla. Siinä oli tarkistettu puun vetokapasiteetti poikkileikkauksessa, jossa puun bruttopoikkileikkauksesta oli vähennetty rinnakkaisten tappivaarnejen tarvitsemat reiät ja teräslevyjien tarvitsemat urat.



Kuva 18. Puikkoliitoksen puustamurtumistapoja.

Figure 18. Modes of fracture of pin joints in timber.

Seuraava lohkeamismurtotarkastelu on esitetty ympäristöministeriön ENV-1995 kansallisen soveltamisohjeen NAD täydennyksen mukaan. Ohje on tehty romahduksen jälkeen ja on annettu 23.9.2003. Siinä on esitetty nykyinen tapa, jolla tappivaarnaliitoksen lohkeamiskapasiteetti pitäisi tarkistaa.

Puun syiden suuntaisesti vedetyissä sauvanpäälliitoksissa tulee tarkistaa liitosalueen puuosan lohkeaminen. Vedetyn sauvan liitosvoima ei saa ylittää sauvanpään lohkeamismurtokapasiteettia

$$R_{l,d} = A_{t,net} \cdot k_l \cdot f_{t,0,d}$$

missä

$f_{t,0,d}$  on puun vetolujuuden mitoitusarvo ilman kokovaikutuskorjausta,

$$k_l = \begin{cases} 1,45 & \text{sahatavaralla ja liimapuulla} \\ 1,15 & \text{tyyppihyväksytyllä kertopuulla Kerto - S, kun } f_{t,0,k} = 38 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

$$A_{t,net} = (n_{\perp} - 1) \cdot (a_2 - d) \cdot t_{ef}$$

missä

$f_{t,0,k}$  on kertopuun ominaisvetolujuus,

$n_{\perp}$  on rinnakkaisten liitinrivien lukumäärä puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa,

$a_2$  on liitinrivien välinen etäisyys puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa (ks. RIL 205-1997 kuva 6.3.1.2a),

$d$  on liittimelle poratun reiän halkaisija ja

$t_{ef}$  on tappivaarnan tai pultin pituuden rajoittama puusauvan tehollinen paksuus, josta on vähennetty esimerkiksi puusauvassa sijaitsevat tappivaarnan viisteet, pultin kierreosuus ja teräksisille liitoslevyille sahatut urat.

Lohkeamismurtotarkastelua ei tehdä sellaisille liitoksille, joissa kaikki liittimet sijaitsevat yhdessä puun syiden suuntaisessa rivissä ( $n_{\perp} = 1$ ) kuten kuvan 18 tapauksissa b ja e.

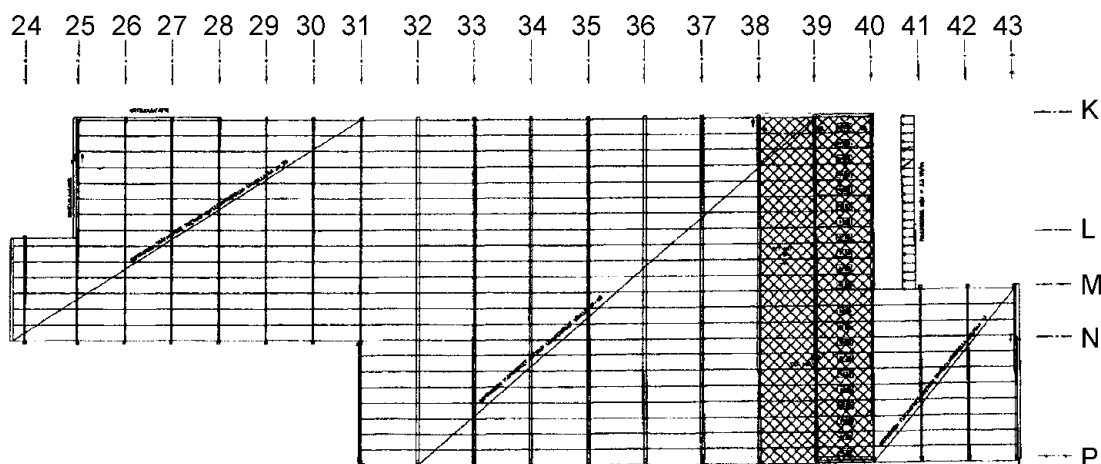
### Katon jäykistyksen suunnittelu

Jäykistämissuunnitelman mukaan:

”Messuhallien D1 ja D2 katto jäykistetään SPU-Systems Oy:n kattoelementeistä levyksi yhdistettävällä rakenteella. Levykenttä rakennetaan välille K-P/38-40. Levyllä siirretään päätyyn K-M/40 kohdistuva tuulikuorma ja välin K-M/32-39 ja L-M/25-31 sekä osa välin K-L/25-31 ristikoiden kiepahduskuormat jäykistävälle pystyristikolle (K/39-40) ja ontelolaatastolle (M-P/43). Välillä M-P ristikoiden nurjahdus estetään tukemalla katto linjalla 43 ontelolaatastolla. Osa välin K-L 25-31 ristikoiden nurjahduskuormasta otetaan vastaan vanhalla rakenteella linjalla 25.

Levyrakenteeseen saadaan aikaan jäykistämällä ko. välillä elementit vinolaudoituksella ja kytkemällä elementtien vasat toisiinsa havuvanerikaistoilla vasojen päältä. Levyrakenteen ja jäykistävän pystyrakenteen liitos mitoitetaan levykentän tukireaktiolle.

Tuuli- ja kiepahduskuormat siirretään levykentille kattoelementtien kertopuuvastoilla, joille kuorma siirretään rasitukselle mitoitetuilla teräsosilla. Vasojen jatkokset mitoitetaan välitettävän voiman perusteella.”



Kuva 19. Jäykistysuunnitelmaan perustuva kuva hallin jäykistyksestä. Kattoelementit ristikkolinjojen 38 ja 40 välillä on yhdistetty vinolaudoituksella levyrakenteeksi.

Figure 19. Drawing of hall stiffening as based on a stiffening plan. Roof elements between truss lines 38 and 40 are interconnected by brace shuttering to form a sheet structure.

Messuhalleista oli suunnittelun aikana käytetty nimiä D1 ja D2, jotka olivat lopullisessa toteutuksessa hallit B1 ja B2. Levykenttämerkintä K-P/38-40 tarkoittaa B2-hallin ehjäksi jääneessä päässä hallin pituussuunnassa kahden ristikkovälin ja leveyssuunnassa koko jännevälin rajoittamaa aluetta. Pääty K-M/40 on B2-hallin ehjäksi jääneen hallin pään se osa, joka rajoittuu ulkoseinään. Väli K-M/32-39 on hallin osa, joka ulottuu edellä mainitusta päädyistä ensiksi romahtaneeseen ristikkoon. Alueen pituus hallin pituussuunnassa on 54 m. Välillä L-M/25-31 tarkoitetaan aluetta, jonka sivumitta hallin poikittaissuunnassa on yksi päätypilarien väli ja sivumitta pituussuunnassa on sama kuin hallin B1 pituus. Pystyristikolla K/39-40 tarkoitetaan B2-hallin nurkassa olevaa jäykistysristikkoa, joka on rakennettu ristikkoja 39 ja 40 kannattavien pilareiden väliin. Linjan 43 ontelolaataston reuna on B2-hallin ehjäksi jääneen pään kapean osan päädyssä. Linja 25 on B1-hallin päässä A-halliin rajoittuvalla väliseinällä.

Jäykistyslaskelmat on tehty sallittuja jännityksiä käyttäen Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeen B10 mukaan, vaikka sitä ei ole erikseen ilmoitettu. Romahtaneiden ristikoiden osalta on käytetty ristikon yläpaarteen puristusvoimana arvoa  $N_k=1\ 756$  kN aikaluokassa B. Laskelmista ei käy ilmi millä tavalla arvo on määritetty.

Puristusvoimasta on laskettu tasainen tasokuorma, jolle kattojäykistysrakenteen tukirakenne on mitoitettava. Tasokuorma on siirretty jäykistäville rakenteille. Myös kattoelementin ja ristikon yläpaarteen välisen liitoksen tarvittava kiinnitysvoima on laskettu.

## 2.8 Muut tutkimukset

### Tutkintalautakunnan teettämät kuormituskokeet

Tutkintalautakunta on teettänyt VTT:llä vetokokeita tappivaarnoille sekä puristus- ja vetokokeita ristikon liitoksille.

Tappivaarnoilla tehtävillä vetokokeilla selvitettiin, vastaako ristikoissa käytetty teräslaatu ristikkosuunnitelmissa esitettyä vaatimusta tappivaarnoille. Puristuskokeilla selvitettiin, nurjahtavatko puun sisään upotetut teräslevyt toteutetussa liitoksessa todellisine valmistustoleransseineen. Ristikon liitoksen vetokokeella määritettiin murtokuorma samanlaisella vajaanappisella liitokselle, josta romahdus katsotaan alkaneeksi.

Tappivaarnoilla tehdyissä vetokokeissa saatiin neljästä kokeesta myötörajojen (0,2-raja<sup>3</sup>) keskiarvoksi 767 MPa ja lujuuksiksi yli 900 MPa. Koetulosten mukaan tappivaarnat täyttivät suunnitelmissa mainitun lujuusluokan 8.8 vaatimukset.

Puristuskokeissa kuormitettiin tuelta lukien ensimmäisen vinon puristussauvan liitoksia. Näistä kaksi oli puristussauvan alapäässä ja kaksi yläpäässä. Murtotilanteessa tappivaarnat painuivat puuhun. Murtokuormat olivat 680, 730, 780 ja 575 kN. Puun tiheydet murtoalueella olivat 391, 422, 390 ja 425 kg/m<sup>3</sup> ja kosteudet 13,0 %, 13,6 %, 10,9 % ja 13,3 %. Viimeisessä kokeessa saatu huomattavasti pienempi murtokuorma selittyi sillä, että liitos ei käytännössä ollut symmetrinen, koska tapit ulottuivat vain 17 mm yli vaarnalevystä, kun niiden olisi pitänyt ulottua moitteettomassa liitoksessa 30 mm yli vaarnalevyn. Jos etäisyys on 20 mm, liitoksen kapasiteetti on noin 75 % ja jos etäisyys on 0 mm kapasiteetti on 52 % teoreettisesti virheettömän liitoksen kapasiteetista.

Ristikkosuunnittelijan laskema suurin puristusvoima kyseisessä sauvassa on 574 kN. Kun tämä kerrotaan materiaalin osavarmuuskertoimella 1,3 ja jaetaan olosuhdekertoimella (kuormitusaika ja kosteus) 0,9, niin päädytään ominaiskapasiteettiarvoon 829 kN. Se olisi pitänyt saavuttaa, jos liitokset olisivat olleet sellaisia kuin suunnittelija oli laskenut. Kokeissa saadut murtokuormat olivat 82 %, 88 %, 94 % ja 69 % ominaiskapasiteetista.

Seitsemän tapin vetokokeet tehtiin ehjäksi jääneen ristikon tuelta lähtevällä nurkkaliitoksella. Alunperin 33 tapin liitoksesta poistettiin 26 tappia, minkä jälkeen liitos vastasi ristikon 32 vetoliitosta, josta romahdus alkoi. Murtokuormiksi saatiin 309 ja 287 kN. Puun tiheydet murtoalueella olivat 407 ja 411 kg/m<sup>3</sup> ja kosteudet 10,8 % ja 11,1 %. Suurempi murtokuorma on noin 85 % ja pienempi noin 79 % ominaiskapasiteettiarvosta. Tämä arvo on saatu, kun ristikkosuunnittelijan antama yhden tapin liitoksen suunnittelukapasiteetti 35,8 kN on kerrottu tappien lukumäärällä 7 ja materiaalin osavarmuuskertoimella 1,3 sekä jaettu olosuhdekertoimella 0,9. Menettely on suunnitteluohjeen RIL 205-1997 mukainen. Liian pieneen arvoon vaikuttavat ainakin seuraavat asiat:

- Puun tiheydet olivat kokeissa 407 ja 411 kg/m<sup>3</sup>, kun suunnittelussa oli käytetty tiheyttä 440 kg/m<sup>3</sup>.
- Tapeille poratut reiät olivat liian matalia. Tästä oli seurauksena se, että tappien tunkeuma läpiporaamattomaan ulkopuuhun jäi noin 13 mm pienemmäksi kuin vastaavaan läpiporattuun sisäpuuhun.
- Liitoksen suunnittelukapasiteetti 35,8 kN on liian suuri, koska suunnitteluohjeen kaavassa on virheellisesti kerroin 1,1. Kyseinen kerroin ei perustu puikkoliitosteoriaan eikä sille ole kokeellista tukea. Asiaa on käsitelty tarkemmin kohdassa 3.1.2.

<sup>3</sup> Materiaalin lujuutta kuvaavalla 0,2-rajalla tarkoitetaan jännitystä, jota vastaa 0,2 %:n pysyvä venymä.

### **Teknillisen korkeakoulun lausunto**

Tutkintalautakunnan käytettävissä on myös ollut sortumamekanismin selvittämistä koskeva Teknillisen korkeakoulun rakenteiden mekaniikan laboratorion antama lausunto B2-hallin kattorakenteesta. Pääurakoitsijan tilaama lausunto on päivätty 8.4.2003. Lausunnossa selostetaan vauriomekanismia ja ristikoiden rakennetta sekä esitetään havainnointia kattorakenteen puutteista. Lausunnon yhteenvetona esitetään merkittävyyssjärjestyksessä seuraavat puutteet:

- ristikon R32K ensimmäisestä vetodiagonaalista puuttuvat tappivaarnat
- liitosalueen lohkeamismurtumista ei ole suunnittelussa otettu huomioon
- muut valmistusvirheet, joita ovat
  - puuttuvat tappivaarnat
  - ohi poratut tappivaarnat ja väärin asemoidut teräslevyt
  - tappivaarnojen liukuminen kuljetuksen ja asennuksen aikana
  - sahausurien leveys- ja sijaintivaihtelut paksuussuunnassa
- jatkuvien kaksiaukkoisten kattoelementtien tuoma lisärasitus
- alapaarteen puuttuva sivuttaistuenta
- ristikkoparien väliltä puuttunut yhteistoiminta
- ristikoiden huono mittatarkkuus ja tästä aiheutunut sovituspalojen käyttötarve

Lausunnossa esitetään suosituksena, että ristikkorakenteen kokonaisstabiiliteetin kokonaistarkasteluun tulisi kiinnittää enemmän huomiota ja näitä tarkasteluja varten tulisi kehittää suunnittelumenetelmiä. Lisäksi kantavien rakenteiden suunnittelijoiden väliseen tiedonsiirtoon pitäisi kiinnittää enemmän huomiota. Tappivaarnaliitoksen osalta suosituksina ovat liitosalueen lohkeamismurtumislilmion mitoitusmallin ja mitoituskriteerien kehittäminen. Liitosten valmistamiseen liittyen suositetaan laadunvalvonnan tehostamista ja laadunvalvonnan menetelmien ja tulosten dokumentoimista esimerkiksi laadunvalvontapöytäkirjaan.

### **Teknillisen korkeakoulun kuormituskoe**

Rakenteiden mekaniikan laboratorion toimittaman lausunnon lisäksi tutkintalautakunnan käytettävissä on ollut samalta laboratoriolta tilattu erillinen selostus kattoristikkoparin numero 38 koekuormituksesta. Kyseinen kattoristikkopari oli romahtaneen alueen ulkopuolella ja pysyi onnettomuudessa ylhäällä. Koekuormitus, jossa oli mukana myös yksi tutkintalautakunnan jäsen, tehtiin 3.4.2003. Selostus on päivätty 12.5.2003.

Kuormituskoe tehtiin, koska romahduksen syyt eivät olleet ristikoita purettaessa vielä selvillä ja todettiin koekuormituksen tuottavan merkittävää tietoa ja hyötyä romahduksen selvitystyöhön.

Koekuormituksessa edelleen paikallaan betonipilarien päällä olleen ristikkoparin alapaarre tuettiin teräksisen haarukkatuen avulla sivusuunnassa siten, että alapaarteen taipuminen pystysuunnassa ja siirtyminen pituussuunnassa oli kuitenkin mahdollista. Ris-



tikkoparin yläpaarten varaan ripustettiin vetotankojen ja ketjujen avulla kahdeksan teräksistä 14 200 – 14 600 kg massaa.

Kokeen yhteydessä mitattiin autonosturilla yhden vastaavanlaisen R1-kattoristikkoparin massa, joka oli 17 900 kg. Samoin mitattiin yhden kattoelementin massa, joka oli 1950 kg.

Koekuormitustilanteessa massat laskettiin yksi kerrallaan hitaasti yläpaarten varaan siinä järjestyksessä, että kuormitus pyrittiin pitämään mahdollisimman symmetrisenä. Kun kuudennesta massasta noin 2/3 oli yläpaarten varassa ristikosta kuului murtumisen ääniä, mutta äänilähteen sijaintia ei pystytty määrittämään. Äänet vaimenivat, jonka jälkeen massa siirrettiin kokonaan yläpaarten varaan. Muutamien minuuttien kuluessa ristikkoparin alapaarten jatkos katkesi.

Koekuormituksen eri vaiheissa mitattiin takymetrillä kyseisen ristikkoparin ja viereisten ristikkoparien siirtymiä. Kokeen jälkeen mitattiin kuormitetun ristikon liitosten siirtymiä, joista ei kuitenkaan ilmennyt sellaisia pysyviä siirtymiä, jotka ilmentäisivät liitoksen vaurioitumista kokeen aikana. Lisäksi kokeen jälkeen avattiin kuormitetun ristikon liitoksia ja kirjattiin niissä havaittuja puutteita. Selostuksessa on arvioitu myös kunkin liitoksen kapasiteettia verrattuna liitokseen, jossa puutteita tappien lukumäärässä tai osumisessa vaarnalevyyden ei olisi. Kapasiteettien arvioitiin olevan 76 – 95 % sellaisen liitoksen kapasiteetista, jossa kaikki tappivaarnat toimivat täysin tehollisina.

Ristikkoparin pettäessä massoja oli asetettuna yläpaarten varaan yhteensä 86 000 kg, joka vastasi lumikuormaa  $1,99 \text{ kN/m}^2$  (noin  $200 \text{ kg/m}^2$ ). Tulos on käytännössä sama kuin mitoituksessa käytetty lumikuorma  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Varmuuskertoimet huomioituna ristikon olisi pitänyt kestää noin kaksinkertainen kuorma.

Koekuormituksesta laaditun raportin mukaan ristikkoparin alapaarten jatkosliitos petti lohkeamismurtumalla. Lisäksi liian lähellä puun pintaa olleet tappivaarnat olivat avanneet liitoksen ulompia puuosia sivulle päin. Suurin vetovoima liitoksessa koekuormituksessa oli 2 539 kN, kun hetkellisen vetokapasiteetin ominaisarvo oli suunnitelmien mukaan 4 964 kN. Suunnittelussa ei kuitenkaan ollut otettu huomioon lohkeamismurtumismekanismia, joka huomioituna liitoksen vetokapasiteetin ominaisarvo on 2 246 kN.

### **Kävelytesti**

Lautakunta on pyrkinyt kävelytestillä mittaamaan kulunutta aikaa ristikkoparin 32 toisen alapaarten katkeamisesta siihen hetkeen kunnes B2-hallin katto alkoi sortua. Testi on tehty kävelemällä B2-hallissa niitä reittejä pitkin, joita hallissa olleet henkilöt ovat kertoneet käyttäneensä tapahtuma-aikaan.

B2-halliin saapunut hinausautonkuljettaja lähti kävelemään paukahduksen kuultuaan b4-oven (kuva 2) lähetyvillä olleen kuorma-auton luota keskemmälle hallia. Paikalle, mistä hän kertoi havainneensa katkenneen alapaarten, kävely kesti noin 20 sekuntia. Havainnon jälkeen hinausautonkuljettaja mietti hetken mistä pyytää tilanteeseen apua ja soitti Keski-Suomen Hätäkeskukseen. Puhelun aikana katto alkoi sortua juuri, kun mies oli poistumassa hallista.



Messujen henkilökuntaan kuuluneet kolme mieshenkilöä olivat alapaarteen katkeamisen aikana b4 oven lähetyvillä olevalla messujen varastolla, mistä he kertomansa mukaan olivat kävelleet lähes katkenneen alapaarteen alapuolelle ja sieltä edelleen takaisin b4 ovelle yhden miehen jatkaessa matkaa kohti D-hallia. Kävelen tuo matka kesti noin 60 sekuntia.

Paikkaan minne yksi henkilökuntaan kuulunut mieshenkilö jatkoi matkaansa D-halliin (D- ja B-hallin väliselle ovelle) ennen katon sortumista kesti kävely noin 90 sekuntia.

B1- ja B2-hallien rajamailla messuosastoa purkamassa olleiden kahden mieshenkilön käyttämään reittiin aikaa kului noin 20 sekuntia, kun he poistuivat ulos b3-ovesta. Tämän jälkeen mieshenkilöt keskustelivat ulkona hetkisen ja palasivat uudestaan B1-halliin b2-ovesta ja olivat palaamassa uudestaan katsomaan katkennutta alapaarretta, kun katto alkoi sortua ja miehet juoksivat takaisin ulos b2-ovesta.

Kävelytestin perusteella voidaan päätellä, että alapaarteen katkeamisesta katon sortumiseen kului ainakin 90 sekuntia, ehkä noin kaksi minuuttia.



### 3 ANALYYSI

#### 3.1 Onnettomuuden analysointi

Tutkintalautakunta on perehtynyt romahtaneen B-hallin katon rakenteisiin tutkimalla vaurioita, ehjäksi jäänyttä katon osaa, katon suunnittelulaskelmia, piirustuksia ja muita asiakirjoja. Seuraavassa analysoidaan kattorakenteen ominaisuuksia ja puutteita.

##### 3.1.1 Kuormitus romahdushetkellä

Kuormitus romahdushetkellä oli rakenteen omapaino  $1 \text{ kN/m}^2$  ja mitattu lumikuorma  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Muut kuormat kuin ristikon oma paino siirtyivät ristikoille kaksiaukkoisen jatkuvan kattoelementin välilyksellä.

Ristikon suunnittelijan laskelmien mukaan ristikoiden päällä oleva kattorakenne on ajateltu yksiaukkoiseksi palkiksi, jolloin kattorakenteelta tuleva kuorma jakautuu tasan kaikille ristikoille. Jos suora kattorakenne menee jatkuvana samalla korkeudella olevien tukien yli, niin tukireaktio jatkuvan rakenteen keskituella on 25 % suurempi kuin tasan jakautunut kuorma. Tällöin tuen täytyy olla painumaton, mutta todellisuudessa ristikko painuu kuormasta. Poikkeama 25 %:sta on suurimmillaan ristikon jännevälin keskellä ja pienimmillään tuella, jossa tulos on tarkka.

Kun otetaan huomioon ristikoiden päällä olevan kaksiaukkoisen kattoelementin jäykkyys ja ristikon jäykkyys, kattoelementin keskituella tulee kattoelementiltä 15 % suurempi kuorma kuin keskimäärin. Esimerkiksi onnettomuuskuormasta ristikon paino  $0,35 \text{ kN/m}^2$  on sama kaikille ristikoille ja muusta kuormasta  $1,15 \text{ kN/m}^2$  tulee keskituella  $1,15$ -kertainen arvo ja päätytuille  $0,85$ -kertainen arvo. Näin saadaan onnettomuuskuorman arvoksi keskituella  $0,35 + 1,15 \cdot 1,15 = 1,67 \text{ kN/m}^2$  ja päätytuella  $0,35 + 0,85 \cdot 1,15 = 1,33 \text{ kN/m}^2$ . Näin onnettomuuskuorman jakautumakertoimet keskituella ja päätytuella ovat  $1,67 / 1,5 = 1,12$  ja  $1,33 / 1,5 = 0,88$ . Kertoimet pätevät, kun kaikki ristikot ovat yhtä jäykkiä. Linjalla 31 tuki koostui ristikosta ja sen jatkeena olleesta liimapuupalkista, joten tuki oli vähän jäykempi. Sen vuoksi keskitukena olevalle ristikolle 32 tulee muutamia prosentteja pienempi kuorma kuin edellä on esitetty.

Kuormia on vertailtu taulukossa 2, jonka sarakkeessa 1 on esitetty tasaisen kuorman arvot eri tapauksissa. Muilla kuin onnettomuuskuormalla jakautumakertoimet poikkeavat hieman edellä annetusta, koska ristikon painon  $0,35 \text{ kN/m}^2$  ja muun kuorman suhde vaihtelee.

Taulukon 2 sarakkeissa 2 ja 3 on esitetty kattoelementin keskituella vaikuttaneet kuormat prosentteina siten, että perusarvo olisi 100 %, jos kuorma olisi jakautunut tasan kaikille ristikoille. Näin saadaan esimerkiksi toisen sarakkeen alimmalle riville  $1,14 \cdot 100 = 114$ . Tämä tarkoittaa sitä, että keskituella tulee tässä tapauksessa  $1,14$ -kertainen kuorma keskimääräiseen kuormaan verrattuna.

Taulukon 2 sarakkeissa 2 ja 4 oleva teksti "Suhde keskiarvoon" tarkoittaa prosentteina sitä osaa kuormasta, jonka rakenteen olisi pitänyt kestää 50 % todennäköisyydellä ja sortua 50 % todennäköisyydellä. Sarakkeissa "Suhde ominaisarvoon" tarkoittaa prosentteina sitä osaa ominaiskuormasta, jonka ristikoiden olisi pitänyt kestää 95 %:n todennäköisyydellä ja sortua 5 %:n todennäköisyydellä. Edellä olevaa menettelyä käyttäen lasketaan kuormat, joilla taulukon 2 ensimmäisen sarakkeen kuormat on jaettava, jotta saadaan taulukon 2 osuudet prosentteina:

$$\frac{6,28}{1,14} = 5,51 \text{ kN/m}^2 \text{ (keskituki ja suhde keskiarvoon),}$$

$$\frac{6,28}{0,86} = 7,30 \text{ kN/m}^2 \text{ (päätytuki ja suhde keskiarvoon).}$$

$$\frac{5,46}{1,14} = 4,79 \text{ kN/m}^2 \text{ (keskituki ja suhde ominaisarvoon) ja}$$

$$\frac{5,46}{0,86} = 6,35 \text{ kN/m}^2 \text{ (päätytuki ja suhde ominaisarvoon)}$$

Näin laskettuna rakenne pysyy teoreettisesti yhtä todennäköisesti ylhäällä kuin romahtaa kuormalla  $6,28 \text{ kN/m}^2$ . Kuorman  $5,46 \text{ kN/m}^2$  rakenne kestää 95 % todennäköisyydellä. Kuormia on käsitelty taulukon 2 yhteydessä.

*Taulukko 2. Tasaisen kuorman numeerisia arvoja ja kuormien suhteita eri tapauksissa. Sarakkeiden "Keskituki" arvot pätevät ristikoille, joiden yli kattoelementti menee jatkuvana ja sarakkeen "Päätytuki" arvot ristikoille, jossa on kahden kattoelementin päittäisjatkos.*

	Keskituki		Päätytuki	
	Suhde keskiarvoon %	Suhde ominaisarvoon %	Suhde keskiarvoon %	Suhde ominaisarvoon %
Onnettomuuskuorma $q = 1 + 0,5 = 1,50 \text{ kN/m}^2$	<b>27</b>	<b>31</b>	21	24
Ominaiskuorma $q = 1 + 2 = 3,00 \text{ kN/m}^2$	54	62	41	48
Suunnittelukuorma $q = 1,2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2 = 4,20 \text{ kN/m}^2$	76	87	58	67
Murtokuorman ominaisarvo $q = 1,3 \cdot (1,2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2) = 5,46 \text{ kN/m}^2$	99	114	75	87
Murtokuorman keskiarvo $q = 1,15 \cdot 1,3 \cdot (1,2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2) = 6,28 \text{ kN/m}^2$	114	131	87	99

On huomattava, että kukin taulukon 2 ensimmäisen sarakkeen kuorma on muunnettava vastaavalla tavalla kuin on muunnettu jakajana käytettävät kuormat, että saadaan taulukon 2 prosenttiluvut. Esimerkiksi onnettomuuskuormaa muunnettaessa käytetään niittäjässä lukua 1,12 luvun 1,14 sijasta ja lukua 0,88 luvun 0,86 sijasta. Tämä johtuu siitä, että onnettomuuskuormalla on ristikon painon suhde muuhun kuormaan erilainen kuin jakajana käytetyillä kuormilla.

Romahdushetkellä 1.2.2003 ristikkoa rasitti oman painon lisäksi lumikuorma, jonka suuruus oli mittausten mukaan  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Tuulesta ei aiheutunut lisäkuormaa, koska ilma oli lähes tyyni. Omaksi painoksi voidaan arvioida  $1,0 \text{ kN/m}^2$ . Tähän sisältyy kattorakenteiden paino noin  $0,425 \text{ kN/m}^2$ , mikä on ehjäksi jääneellä elementillä saatu punnitustulos, ilmastointiputkista ym. aiheutuvat ripustuskuormat  $0,2 \text{ kN/m}^2$ , joka on ristikkosuunnittelijan käyttämä arvo sekä kattoristikon paino, punnitustulos 176 kN, joka tasaiseksi kuormaksi muunnettuna on noin  $0,35 \text{ kN/m}^2$ . Näin saadaan romahdushetken kokonaiskuormaksi  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , joka on keskituella 27 % lasketun murtokuorman keskiarvosta ja 31 % murtokuorman ominaisarvosta ja vastaavasti päätytuella 21 % ja 24 %.

Vastaava suunnittelun perustana käytetty ominaiskuorma ilman tuulikuormaa on edellä mainittu omapaino  $1,0 \text{ kN/m}^2$  ja lumikuorma  $2 \text{ kN/m}^2$  eli yhteensä  $3 \text{ kN/m}^2$ . Kun verrataan tätä onnettomuustilanteen kuormaan, niin huomataan, että romahduksen aikainen kuorma oli noin 50 % suunnittelun perusteena olevasta ominaiskuormasta.

Kun vielä otetaan huomioon suunnittelussa käytettävän kuorman osavarmuuskertoimet kohdan 2.7 mukaisesti (omapaino 1,2 ja lumikuorma 1,5) sekä materiaalin osavarmuuskerroin 1,3, päästään kuorman suunnittelukuormaan  $5,46 \text{ kN/m}^2$  ( $= 1,3 \cdot (1,2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2)$ ), mikä on siis kuorman arvo, jonka rakenne kestää 95 % todennäköisyydellä.

Jos tarkastelun lähtökohtana on se, että rakenne pysyy yhtä todennäköisesti ylhäällä kuin romahtaa, niin päädytään kapasiteetin keskiarvoon  $6,28 \text{ kN/m}^2$  ( $= 1,15 \cdot 5,46$ ).

Käytetty kantavuuden keskiarvon ja ominaisarvon suhde 1,15 on puulle ilmeisesti liian pieni, joten kapasiteetin keskiarvo on ilmeisesti todellisuudessa hieman suurempi. Suhde on sama, mitä käytetään EC5:ssa muunnettaessa palomitoituksessa ominaislujuuksia lujuuksien keskiarvoiksi.

Romahduksen aikainen kuorma oli siis 31 % edellä saadusta ominaiskapasiteetista ja 27 % murtokuorman keskiarvosta eli rakenne kesti kuormaa vain alle kolmasosan siitä, mitä sen olisi suunnitelmien mukaan pitänyt kestää.

### 3.1.2 Ristikon kapasiteetti

#### Suunnitteluohje RIL-205

Ristikon kapasiteetti koostuu puun kapasiteetista ja liitosten kapasiteetista eli ristikko voi pettää joko rakenteen murtuessa puusta tai liitoksen pettäessä. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin liitoksen kapasiteettia, joka määräytyy tappivaarnaliitosten kapasiteetista. Tappivaarnaliitosten suunnittelussa oli käytetty suunnitteluohjetta RIL 205-1997. Ristik-

kosuunnittelija oli saanut yhden nelileikkeisen tappivaarnaliitoksen laskentakapasiteetiksi syiden suuntaan 35,8 kN yhtä tappia kohti.

Suunnitteluohjeen RIL-205 mukaan monileikkeisen liitoksen yhden leikkeen kapasiteetti on pienin leikkeelle saatu arvo, kun liitos on jaettu kaksileikkeisiin osaliitoksiin ja näistä on määritetty kapasiteetti leikettä kohti. Monileikkeisen liitoksen kapasiteetti on yksittäisten leikkeiden kapasiteettien summa.

Tutkittavassa liitoksessa sovelletaan tapausta, jossa keskimäinen osa on terästä. Tällöin suunnitteluohjeen RIL-205 mukaan liitoksen leikkauskapasiteetti liitintä ja leikettä kohti määritetään kaavasta

$$F_{d,leike} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1f_{h,1,d}t_1d \\ 1,1f_{h,1,d}t_1d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,d}}{f_{h,1,d} dt_1^2}} - 1 \right] \\ 1,5\sqrt{2M_{y,d}f_{h,1,d}}d \end{array} \right.$$

Edellä olevassa kaavassa pienin arvo saadaan tutkitussa tapauksessa ensimmäisestä kaavasta. Kahdessa jälkimmäisessä kaavassa tarkastellaan tapausta, jossa tappivaarna myötää. Näin ei tapahdu käytetyillä tappivaarnan ja puun paksuuksilla. Ensimmäisen kaavan kerroin 1,1 ei perustu puikkoliitosteoriaan eikä sillä ole kokeellista tukea. Keskimäisen kaavan kerroin 1,1 pyrkii ottamaan huomioon sen, että liitokseen tulee tappivaarnan taipuessa lisäkapasiteettiä tappivaarnan aksiaalisesta voimasta.

Seuraavassa tarkastelussa ensimmäisestä kaavasta on jätetty kerroin 1,1 pois ja lisäksi on otettu mukaan keskipuun paksuudesta puolet, jolloin saadaan mitoituskaava ja numeeriset arvot

$$F_{d,leike} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,d}t_1d = 22 \cdot 31 \cdot 12 = 8177 \\ 0,5f_{h,1,d}t_2d\beta = 0,5 \cdot 22 \cdot 68 \cdot 12 \cdot 1 = 8968 \end{array} \right. = 8177 \quad N = 8,18 \text{ kN}$$

ja koko liitoksen kapasiteetiksi

$$F_{d,l} = 4F_{d,leike} = 4 \cdot 8,18 \text{ kN} \approx 32,7 \text{ kN}.$$

Edellisessä kaavassa

$f_{h,1,d}$  on puun reunapuristuksen mitoituslujuus osassa 1,

$t_1$  puuosan 1 paksuus,

$d$  tappivaarnan halkaisija,

$t_2$  puuosan 2 eli keskipuun paksuus ja

$\beta$  puuosan 2 ja puuosan 1 reunapuristuksen mitoituslujuuksien suhde, joka on yksi, kun osat ovat samaa puuta

Suunnittelijan ilmoittama arvo on 10 % edellä laskettua kapasiteettia 32,7 kN suurempi, koska suunnitteluohjeen kaavassa on kerroin 1,1.

### Puikkoliitosteoria

Puikkoliitosteorian mukaan suurin mahdollinen liitoskapasiteetti kuorman aikaluokassa ”lyhytaikainen” on

$$F_{d,max} = f_{h,0,d} dt_{max} = \frac{k_{mod} 0,082(1 - 0,01d) \rho_k}{\gamma_M} d(t_1 + t_2 + t_3) =$$

$$\frac{0,9 \cdot 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 12) \cdot 440}{1,3} \cdot 12(31 + 68 + 31) = 22,0 \cdot 12 \cdot 130 = 34290 \text{ N} \approx 34,3 \text{ kN}$$

kun puun lujuusluokka on L40.

Edellä olevassa kaavassa:

$f_{h,0,d}$  on puun reunapuristuksen mitoituslujuus,

$d$  on tappivaarnan halkaisija,

$t_{max}$  on puun yhteenlaskettu paksuus liitoksessa,

$k_{mod}$  on kuormituksen keston ja puun kosteuspitoisuuden muuntokerroin,

$\rho_k$  on puun ominaistiheys ja

$\gamma_M$  on materiaalin osavarmuuskerroin.

Edellä laskettu arvo pätee puikkoliitosteorian perusteiden mukaan silloin, kun tappivaarna pysyy suorana liitoksen suurimmalla rasituksella ja se painuu plastisesti puuhun. Tarkastellussa liitoksessa teräs täyttää tämän ehdon. Saatu arvo on noin 4 % pienempi kuin normin antama arvo.

### Ensimmäisen vetosauvan kapasiteetti

Onnettomuudessa petti ensimmäisenä tuelta lähtevä ensimmäinen vetosauva. Sen laskentavoima oli laskentakuormilla rakennesuunnitelman mukaan 1 123 kN. Onnettomuustilanteessa kyseisen sauvan vetovoimaksi voidaan arvioida

$$N_{sortuma} = 1,12 \cdot \frac{1,5}{4,2} \cdot 1123 = 0,40 \cdot 1123 \approx 450 \text{ kN}$$

missä 1,5 on onnettomuuskuorma, 4,2 suunnittelukuorma ja kerroin 1,12 ottaa huomioon sen, että keskituella tulee 12 % keskimääräistä suurempi kuorma. Ristikkoparin kahden yhteen liitetyn sauvan kuorma oli siis 900 kN.

Koekuormituksessa saatiin kahden vetokokeen keskiarvoksi 298 kN, kun liitoksessa oli seitsemän tappivaarnaa samalla tavalla kuin siinä ristikon liitoksessa, josta romahdus silminnäkijähavaintojen mukaan alkoi. Koska onnettomuusaikana kuormitus oli jatkunut ainakin muutamia viikkoja, niin kapasiteetti-arvo romahtaneessa rakenteessa on ollut koekuormitustulosta pienempi. Jos koetulosten keskiarvo kerrotaan kertoimella 0,9, mi-



kä on sama kuin suunnitteluohjeen olosuhdekerroin lyhytaikaiselle, ei hetkelliselle kuormalle, saadaan seitsemän tapin vetoliitoksen kapasiteettiarvoksi

$$0,9 \cdot 298 \approx 270 \text{ kN.}$$

Saatu arvo on noin 60 % romahdushetken sauvavoimasta, jos kuorma jakautuu tasan kummallekin ristikolle. Tämä tarkoittaa sitä, että vajaatappinen sauva on kantanut vähemmän kuormaa kuin vieressä olleen ristikon sauva, jossa oli kaikki 33 tappivaarnaa. Viimeksi mainitun ristikon vetosauvalle jää ennen vajaatappisen ristikon romahdusta voima

$$N = 2 \cdot 450 - 270 = 630 \text{ kN, jos vajaatappinen ristikko kantaa suurimman mahdollisen kuorman 270 kN.}$$

Jos vajaatappinen ristikko romahtaa, niin koko kuorma jää toisen ristikon varaan ja sauvan vetovoima on 900 kN.

Suunnitteluohjeen mukaan yhden ristikon liitoksen ominaisvetokapasiteetti on

$$R_k = 1,3 \cdot 33 \cdot 35,8 = 1540 \text{ kN,}$$

kun liitoksessa on 33 tappivaarnaa. Liitoksen olisi siis suunnitteluarvojen perusteella pitänyt kestää vajaatappisen liitoksen romahtamisen jälkeen vaikuttanut voima 900 kN.

### Lohkeamismurto

Suunnitteluohjeessa ei erikseen ole kaavoja ns. lohkeamismurron laskemiseksi. Onnettomuuden jälkeen, 23.9.2003, ympäristöministeriö on täydentänyt kansallista EN-1995 soveltamisohjetta NAD. Niissä otetaan huomioon kuvan 18 tapaukset b ja c siten, että annetaan laskentakaavat sille, kuinka peräkkäisten liittimien heikentävä vaikutus otetaan huomioon. Kuvan tapauksen d lohkeamismurto lasketaan täydennyksen mukaan seuraavasti:

$$R_{l,k} = A_{t,net} \cdot k_l \cdot f_{t,0,k} = 21840 \cdot 1,45 \cdot 0,9 \cdot 24 = 0,684 \cdot 10^6 \text{ N} \approx 685 \text{ kN (ominaiskapasiteetti)}$$

ja

$$R_{l,d} = A_{t,net} \cdot k_l \cdot f_{t,0,d} = 21840 \cdot 1,45 \cdot 0,9 \cdot 24 / 1,3 = 0,526 \cdot 10^6 \text{ N} \approx 525 \text{ kN (laskentakapasiteetti).}$$

Edellistä tarvitaan murtokuorma-arvioinnissa ja jälkimmäistä, kun verrataan lohkeamismurron ja liitoksen kapasiteettia ilman lohkeamismurtoa keskenään.

Taulukossa 3 on esitetty ominaiskapasiteetit myös silloin, kun liimapuun lujuusluokat ovat GL28 ja GL24.

*Taulukko 3. 33 tapin liitoksen lohkeamismurtokapasiteetti ympäristöministeriön ENV-1995 kansallisen soveltamisohjeen NAD täydennyksen mukaan*

	Puun lujuusluokka		
	GL32 (=L40)	GL28	GL24
$R_{\text{lohkeaminen}} \text{ (kN)}$	685	599	513

Taulukon 3 lohkeamismurtokapasiteetti liimapuulle L40 on siis 685 kN. Jos tähän lisätään seitsemän tapin aikakorjattu koetuloksen keskiarvo 270 kN, saadaan summaksi 955 kN, mikä on noin 5 % suurempi kuin murtohetkellä arvioitu kahden yhteen liitetyn ristikon molempien sauvojen yhteinen vetovoima 900 kN.

Liimapuu L40 voidaan valmistaa siten, että poikkileikkauksen uloimmat kuudennekset ovat lujuutta L40 ja sisäosat heikompaa lujuutta. Liitosalue on ainakin suurimmaksi osaksi tällä oletetulla heikommalla keskialueella. Kuudessa tehdyssä kokeessa määritettiin murtumisalueen puun tiheys. Keskiarvoksi saatiin  $408 \text{ kg/m}^3$  ja keskihajonnaksi  $15 \text{ kg/m}^3$ . Näistä saadaan ominaistiheydeksi  $383 \text{ kg/m}^3$ , jos ei oteta huomioon pieneen näytelukumäärään liittyvää epävarmuustekijää. Ominastiheysvaatimukset taulukon 3 liimapuun lujuusluokille ovat 440 (GL32), 410 (GL28) ja  $380 \text{ kg/m}^3$  (GL24). Tämän mukaan liimapuiden keskialue kuuluisi tiheydensä vuoksi lähinnä lujuusluokkaan GL24. Tappivaarnaliitoksen kapasiteettiarvoa laskettaessa käytetään puun reunapuristuslujuutta, joka on suoraan verrannollinen tiheyteen. Reunapuristuslujuus määrää liitoksen kapasiteetin silloin, kun liitos murtuu puusta siten, ettei teräksinen tappi myödy. Liitos murtui puusta tutkittavissa liitoksissa.

Lohkeamismurrossa on kysymys puun vetolujuudesta, joka riippuu oksista ja muista puiden vioista enemmän kuin puun tiheydestä. Oksaisuus on myös yksi tärkeä kriteeri puun lujuusluokkaa määritettäessä. Puun keskiosan matalammalla lujuusluokalla on todennäköisesti ollut vaikutusta liitosten kestävyteen.

Ehjäksi jääneen ristikon koekuormituksessa (Teknillisen korkeakoulun kuormituskoee) saatiin ristikon murtokuormaksi suuruusluokkaa omapaino ja ominaislumikuorma eli 50% oletetusta murtokuorman keskiarvosta. Ristikko romahti rakennuspaikalla tehdystä alapaarteen vetojatkoksesta, jolla ristikon puolikkaat oli liitetty toisiinsa. Koekuormitetun ristikkoparin alapaarteen vetojatkoksissa oli murtohetkellä yhteensä vetovoima 2 540 kN eli 26 kN yhtä tappivaarnaa kohti.

Täten aluksi ehjäksi jäänyt ristikon 32 puolikas olisi voinut romahtaa samalla tavalla kuin koekuormitettu ristikko. Alapaarteen vetojatkoksen murtumaa ei kuitenkaan havaittu ristikossa 32 (kuva 20).

Alapaarteen vetojatkoksen lohkeamismurtotarkastelussa saadaan tämän liitoksen murtokuormaksi lujuusluokassa GL32

$$A_{t,net} = (n_{\perp} - 1) \cdot (a_2 - d) \cdot t_{ef} = (8 - 1) \cdot (60 - 12) \cdot (31 + 68 + 31) = 43680 \text{ mm}^2$$

$$R_{l,d} = A_{t,net} \cdot k_l \cdot f_{t,0,d} = 43690 \cdot 1,45 \cdot 0,9 \cdot 24 / 1,3 = 1,052 \cdot 10^6 \text{ N} \approx 1050 \text{ kN}$$

Tämä on noin 60% rakennesuunnitelmassa esitetystä ristikon kapasiteetista 1 718 kN.

TKK:n kokeessa todettu keskiliitoksen kapasiteetti oli 1,2-kertainen laskennalliseen lohkeamismurtokapasiteettiin verrattuna. Tulos osoittaa, että lohkeamismurtokapasiteetissa on jonkin verran hajontaa.

### **Teräslevyjen nurjahtaminen**

Tuelta lähtien ensimmäiseen puristusdiagonaaliin rakennesuunnittelija on saanut suurimmaksi puristusvoimaksi 574 kN. Romahdustilanteessa puristusvoima oli

$$0,40 \cdot 574 \approx 230 \text{ kN,}$$

kun käytetään samoja laskentaperusteita kuin vetosauvan tapauksessa. Puristusliitoksissa voi periaatteessa tapahtua myös teräslevyn nurjahtaminen. Tarkastelua vaikeuttaa se, että teräslevyn nurjahdusta on estämässä teräslevyn kummallakin puolella olevat noin 60 mm paksut puun osat, jotka toimivat ulokkeina.

Lähinnä ulokkeiden päitä olevat tappivaarnat korvataan usein pulteilla, joiden on määrä estää ulokkeiden taipuminen ulospäin. Tästä ei kuitenkaan ole esitetty vaatimuksia suunnitteluohjeissa. Näillä pulteilla on merkitystä silloin, kun liitoksen tappivaarnat ovat niin ohuet, että liitos murtuu tappien myötäessä. Tässä tapauksessa liitos oli suunniteltu siten, että se murtui puusta. Tutkituissa puristusliitoksissa pulteilla olisi merkitystä silloin, kun ne sijoitettaisiin liitosten väliselle alueelle, jossa ne toimisivat nurjahdustukina.

Jos teräslevyt on sovitettu ilman väljyyttä työstettyihin uriin, voidaan tarkastelu tehdä kimmoisalla alustalla olevan puristussauvan nurjahduksena. Jos sovitus ei ole tiukka, kuten tarkasteltavissa ristikoissa oli asia, pelkkiin laskelmiin ei voida luottaa. Ilman sivutukea saadaan liitoksessa romahduksen aikaisella kuormalla teräslevyn nurjahduspituudeksi 380 mm. Mitään liitosta koossa pitäviä sidepultteja tai muita vastaavia ei liitoksiin ollut suunniteltu.

Koetuloksina saadut murtokuormat ovat 2,9-, 3,1-, 3,3- ja 2,4-kertaiset murtohetken kuormiin verrattuna (kohta 2.8). Tämä tarkoittaa, ettei teräslevyjen nurjahtaminen puristusliitoksessa ole romahduksen syy.



*Kuva 20. Ristikkoparin 32 alapaarteen jatkokset, jotka oli tehty työmaalla. Liitokset eivät olleet pettäneet onnettomuudessa. Alemmassa kuvassa puu on rikkoutunut ristikon lattialle putoamisen seurauksena. (Kuva: Poliisin arkisto)*

*Figure 20. Tie beam of truss pair 32, with its splices made at the site. The joints did not collapse in the incident. As resulting from the falling down of the truss on the floor, the wooden part had broken.*

### 3.1.3 Romahdustapahtuma

Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto romahdustapahtuman aikaisista kuormista sekä suhde kapasiteetin keskiarvoon ja kapasiteetin ominisarvoon.

*Taulukko 4. Romahdustapahtuman kuormat ja niiden suhde virheettömän rakenteen kapasiteetin keskiarvoon ja ominisarvoon, kun kapasiteettiarvot on laskettu normin RIL-205-1997 mukaan ilman lohkeamismurtotarkastelua sekä päästä lukien ensimmäisen vetosauvan ja alapaarteiden keskijatkoksen lohkeamismurtokapasiteetin vastaavat suhteet.*

	Suhde keskiarvoon %	Suhde ominisarvoon
Kuorma kattoelementillä, kun ristikko 32 on romahtanut $q = 0,65 + 0,5 = 1,15 \text{ kN/m}^2$	48 <sup>1)</sup>	58 <sup>1)</sup>
Kuorma ristikolla 33, kun ristikko 32 on romahtanut $q = (1 + 0,44) \cdot (1 + 0,5) = 2,16$ <sup>2)</sup> $\text{kN/m}^2$ $q = (1 + 0,5) \cdot (1 + 0,5) = 2,25$ <sup>3)</sup> $\text{kN/m}^2$	<b>34</b> <b>36</b>	<b>40</b> <b>41</b>
Kuorma ristikolla 34, kun ristikko 33 on romahtanut $q = 1,5 \cdot (1 + 0,5) + M_{R,laatta} / 9000^2 = 3,05$ <sup>4)</sup> $\text{kN/m}^2$	<b>&lt;49</b>	<b>&lt;56</b>
Kuorma ristikolla 35, kun ristikko 34 on romahtanut $q = (1 + 0,44) \cdot (1 + 0,5) = 2,16 \text{ kN/m}^2$ $q = (1 + 0,5) \cdot (1 + 0,5) = 2,25 \text{ kN/m}^2$	<b>34</b> <b>36</b>	<b>40</b> <b>41</b>
Kuorma ristikolla 36, kun kattoelementti katkeaa $q = 1,5 \cdot (1 + 0,5) + M_{R,laatta} / 9000^2 = 3,05 \text{ kN/m}^2$	<b>49</b>	<b>56</b>
Romahduspaikalla kuormitetun ehjän ristikon murto-kuorma $q = 3,13 \text{ kN/m}^2$	<b>50</b>	<b>57</b>
Ristikön päästä lukien ensimmäisen vetosauvan lohkeamismurtokapasiteettia vastaava kuorma		
- puun lujuusluokka GL32	42	49
- puun lujuusluokka GL28	37	43
- puun lujuusluokka GL24	32	37
Ristikön keskijatkoksen lohkeamismurtokapasiteettia vastaava kuorma		
- puun lujuusluokka GL32	55	67
- puun lujuusluokka GL28	51	59
- puun lujuusluokka GL24	44	50
<sup>1)</sup> Arvoja kattoelementin kapasiteetille <sup>2)</sup> Kattoelementin jatkuvuus ristikkojen 33-35 välillä otettu huomioon <sup>3)</sup> Oletettu, että kuorma jakautuu tasan ristikoille 33, 34 ja 35 <sup>4)</sup> Kattoelementti ei murtunut, josta syystä on käytetty <-merkkiä		

Kun jokin rakenne pettää, siirtyy kuorma äkisti viereisille rakenteille. Silloin kyseisille rakenteille tuleva kuorma on suurempi kuin staattinen kuorma. Tätä eroa sanotaan kuorman dynaamiseksi lisäksi, joka voi tutkintalautakunnan arvion mukaan olla tässä tapauksessa 10-20%. Tämä tarkoittaa sitä, että taulukon 4 arvot pitäisi kertoa dynaamisen liian huomioimiseksi luvulla 1,1 – 1,2.

Silminnäkijähavaintojen mukaan ensiksi katkesi tuelta laskien ensimmäinen ristikon alapaarteen sauva ristikon 32 siinä puolikkaassa, jossa tuelta lähtevän vinon vetosauvan yläpäähän liitoksessa oli vain seitsemän tappivaarnaa suunnitellun 33 tapin sijasta. Todennäköisesti ensin oli pettänyt tämä vinon vetosauvan liitos ja sen jälkeen havaittu alapaarteen sauva. Alapaarteen sauva oli helpommin nähtävissä kuin ylempänä oleva ja osittain muiden ristikoiden taakse jäänyt sauva.

Jos kuorma olisi jakautunut tasan kummallekin yhteen liitetulle ristikolle, puutteellisen ristikon olisi teoreettisesti ottaen pitänyt romahtaa, koska sen liitoksen kapasiteetti oli vain 21 % ( $=100 \cdot 7/33 = 21$ ) moitteettoman ristikon lasketusta kapasiteetista. Kuorma romahdushetkellä oli 31 % moitteettoman ristikon ominaiskapasiteetista (taulukko 2). Todellisuudessa mekaanisessa liitoksessa syntyy kuormitettaessa aina muodonmuutoksia, joiden seurauksena kuormia voi siirtyä heikolta ristikolta viereiselle. Jos ristikkojen kapasiteetit lasketaan yhteen päästään kapasiteettiin 60 % ( $(100 \cdot (7 + 33))/66 = 60$ ). Äärimmäisessä tapauksessa koko kuorma siirtyy vajaan ristikolta sen vieressä olevalle ristikolle, esimerkiksi vajaan ristikon pettäessä. Tällöin sillä oleva kuorma on 62 % kapasiteetin ominaisarvosta ja 54 % keskiarvosta. Näin ollen täysin kunnossa olevan ristikon olisi pitänyt kestää helposti yksinään koko kuorma. Tästä seuraa se, että ristikon 32 toisen puolikkaan tuelta lähtevän vetosauvan päähän liitoksesta 33 suunnitellusta tapista puuttuneet 26 tappia eivät selitä romahdusta.

Ristikon 32 täystappiselle puolikkaalle tuli vajaan ristikon romahduksesta johtuen siis kuorma, joka oli noin 55 % ristikon kapasiteetin keskiarvosta. Tämä puolikas on voinut romahtaa kahdesta syystä:

- ristikon oma kapasiteetti oli vain noin 55 % oletetusta arvosta tai
- ristikkoa tukevissa rakenteissa oli niin vakavia puutteita, että ristikko menetti kantavuutensa edellä mainitulla kuormalla. Näitä puutteita ovat voineet olla ristikon yläpaarteen nurjahdustuenta tai ristikon kaatuminen sivusuunnassa.

Taulukon 4 mukaan ristikon kapasiteetti oli lohkeamismurtotarkastelulla laskettuna lujuusluokassa GL32 42 % oletetusta kapasiteetista, joten aluksi ehjäksi jäänyt ristikko 32 murtui todennäköisesti ensimmäisen vetosauvan liitoksesta lohkeamismurtona.

### **Romahduksen jatkuminen ristikon 32 murruttua**

Kun toinenkin ristikko ristikkoparista 32 murtui, niin kattoelementit jäivät ristikon 33 ja linjalla 31 ristikon ja sen jatkeena olleen liimapuupalkin varaan.

Kattoelementtien taivutusrasitukset olivat noin 50 % kapasiteetista, jos ristikko 32 oli irronnut kattoelementeistä. Ristikko oli kiinni kattoelementeissä 11 naulalla 4x40 noin 2,5 m:n välein. Naulauksen kapasiteetti oli noin 55 % ristikkoparin painosta, joten ristikkopa-

ri todennäköisesti irtosi kattoelementeistä. Jos ristikko pysyi kiinni, niin kattoelementtien taiputusrasitukset olivat 65 % kapasiteetista. Lisäksi kuormaa kasvatti dynaaminen lisä. Kattoelementin taipuma oli 268 mm, jos ristikko 32 irtosi kattoelementistä, ja 336 mm, jos ristikko pysyi kiinni kattoelementissä. Taipuneen kattoelementin kallistumat tuella olivat 2,6° ja 3,4°. Siitä aiheutui vaakavoima, joka oli noin 4,6 % ja 5,9 % pystyvoimasta. Toisin sanoen vaakavoima oli noin 0,46 kN/m ja 0,59 kN/m. Kattoelementin ja ristikon välinen kulmarautaliitos kesti edellä saadut vaakavoimat.

Kun ristikko 32 romahti, niin kuorma siirtyi ristikoille 31 ja 33. Ristikkoa 33 rasittava kuorma romahdushetkellä ilman murtumisesta aiheutuvaa dynaamista lisää oli tasaiseksi kuormaksi muutettuna

$$q_{33} = (1+0,44)(1+0,5) = 2,16 \text{ kN/m}^2$$

Tämä arvo on 39 % ominaismurtokuormasta 5,46 kN/m<sup>2</sup> ja 34 % murtokuorman keskiarvosta 6,28 kN/m<sup>2</sup>. Jos dynaamiseksi lisäksi otetaan 10 %, prosenttiluvut ovat 43 ja 37. Taulukkoon 4 on laskettu ristikon päästä lukien ensimmäisen diagonaalisauvan vetokapasiteetin keskiarvoksi 32-42 %. Jos dynaaminen lisä otetaan huomioon, kuorma on likimain sama kuin kapasiteetti. Vaikka liimapuu palkkina täyttäisikin lujuusluokan GL32 (L40) arvot, palkin korkeussuunnassa keskialueella oleva puu voi olla heikompaa kuin edellä mainittu luokan GL32 liimapuu. Näin ollen kapasiteetti-arvo voi perustellusti olla pienempi kuin vetokapasiteetin vaihteluvälin yläraja. Ristikon kapasiteetti on alempi kuin edellä on laskettu valmistuksessa tapahtuneiden puutteiden takia. Esimerkiksi tappien syvyys suunnan systemaattiset epätarkkuudet aiheuttavat liitosalueen puuhun epäkeskeisen vetorasituksen, jolloin suurin vetojännitys on suurempi kuin lohkeamismurtotarkastelussa käytetty tasan jakautunut vetojännitys. Sortumahetkellä ristikkkoa 33 on voinut heikentää myös se, että kattoelementtien kiinnitykset olivat rikkoneet ristikon yläpaaretta.

Ristikon 33 romahtamisen jälkeen romahdus jatkui siten, että ulokkeeksi jääneiden kattoelementtien kuormat siirtyivät ristikolle 34. Onnettomuuden jälkeen oli nähtävissä, että kattoelementit eivät olleet katkenneet. Ristikoon 34 romahdushetkellä ristikon 33 puolelta tulevan kuorman ylärajaksi voidaan arvioida kattoelementin katkeamiseen ulokkeena tarvittavan kuorman perusteella. Taulukon 4 mukaan päästään arvoihin, jotka ovat samaa suuruusluokkaa kuin ristikon liitosten lohkeamismurtokapasiteetit.

Ristikon 35 kuormat ovat olleet romahdushetkellä suunnilleen samat kuin ristikon 33 kuormat ja romahdustapahtuma on myös ollut sama kuin ristikolla 33.

Romahdus päättyi siten, että ristikko 36 ei enää romahtanut. Kattoelementit olivat katkenneet ristikon 36 kohdalla ja jääneet nojaamaan ristikkkoa 36 vasten. Kuormien aiheuttama rasitus oli 200 % ulokkeena toimineen kattoelementin kapasiteetista. Koska kattoelementtien katkeamiskapasiteetti (murtotaivutusmomentti) voidaan laskea, saadaan ristikon 36 katkeamishetken murtokuorma, joka vastaa tasaista kuormaa 3,05 kN/m<sup>2</sup>. Tällöin ristikon 36 kuorma oli noin 50 % teoreettisesta kapasiteetin keskiarvosta. Arvo on selvästi suurempi kuin lasketut lohkeamismurtokapasiteetit, jotka olivat 32 – 42 % kapasiteetin keskiarvosta, mutta ristikko ei murtunut. Enimmillään samansuuruiset kuormat

vaikuttivat myös ristikkopariin 34 sen sortuessa, jos ristikot sortuivat järjestyksessä. Ristikkopari 36 säilyi ehjänä, vaikka 34 petti, mahdollisesti siksi, että puun lujuus vaihtelee ja kuormitustilanne oli sortuman edetessä epämääräinen. Lohkeamismurtokapasiteetti on suoraan verrannollinen puun vetolujuuteen, jonka keskihajonta voi olla 15-25 % keskiarvosta.

### **Ristikoiden tukipilarien kaatuminen**

Kattoristikot olivat olleet asennettuna teräsbetonisten pilareitten päälle. Ainakin kaksi pilareista oli kärsinyt vaurioita kattovaurion yhteydessä ja kallistunut ulospäin, minkä vuoksi pohdittiin, olivatko pilarit voineet siirtyä pois ristikon alta. Silminnäkijöiden vaurion alkupaikasta tekemien havaintojen ja paikkatutkinnan perusteella pilarien vauriot olivat kuitenkin todennäköisesti syntyneet kattoromahduksen seurauksena. Lisäksi onnettomuuden jälkeen oli havaittavissa, että ristikoiden päissä olevat pystysuuntaiset sauvat olivat edelleen kiinni pilarin yläosassa joko lähes suoraan ylös osoittaen tai ristikon pituussuuntaan kallistuneena (kuva 13 ja kuva 14). Havainnon perusteella voi päätellä, että ristikot eivät olleet pudonneet tultaan tai kaatuneet sivusuuntaan. Ristikon voitiin todeta romahtaneen muualta kuin tuen kohdasta ja lisäksi suoraan alaspäin, koska ristikon päät eivät olleet kaatuneet sivulle.

### **Ristikon yläpaarten nurjahdus sivusuuntaan**

Ristikkosuunnittelijan laskelmien mukaan ristikon yläpaarre oli tuettava sivusuuntaisen nurjahduksen estämiseksi 3 400 mm välein. Tuentaan tarvittavaa voimaa ei annettu ristikkosuunnitelmassa, mutta jäykistyksen suunnittelija laski sen. Onnettomuuskuormalla tukiväli sai olla korkeintaan 9 300 mm.

Nurjahdustuenta sivusuuntaan piti saada aikaan kattoelementin ja ristikon välisen liitoksen kulmalevyn avulla. Kunkin kattoelementin välissä eli ristikon pituussuunnassa noin 2,5 m välein oli yksi kulmarauta kattoelementin keskituella, joka oli kiinnitetty sekä ristikkoon että kattoelementin kertopuupalkkiin 4 mm paksuilla ja 40 mm pitkillä ankkurinauloilla. Nauloja oli kummassakin liitoksessa 11 kpl.

Tuentaan tarvittava voima saadaan suunnitteluohjeen RIL 205 mukaan seuraavasti.

Suurin yläpaarten puristusvoima yhtä ristikkoparia kohti oli ristikkosuunnittelijan laskelmien mukaan  $N_d = 2 \cdot 1760 = 3520$  kN. Kun otetaan lisäksi huomioon se, että ristikkosuunnittelija oli laskenut ristikon voimasuureet keskimääräiselle jänneväliille, niin jatkuvan kattoelementin keskitukena olevassa ristikossa tulee käyttää 1,14-kertaisia arvoja ja täten saadaan  $1,14 \cdot 3520 = 4010$  kN. Suunnitteluohjeen mukaan puristusvoimalle käytetään koko ristikon yläpaarten "keskimääräistä" arvoa eikä suurinta arvoa. Suurimman arvon käyttö on kuitenkin perusteltua siksi, että suurimmat puristusvoiman arvot ovat jännevälin keskialueella noin 28 m matkalla, mikä on likimain puolet jännevälistä.

Suunnitteluohjeen mukaan nurjahdustuki on mitoitettava voimalle  $N_d / 80$ , mikä tarkoittaa voimaa



$$F_{d,tuki} = \frac{4010 \text{ kN}}{80} = 50,1 \text{ kN}$$

Edellä olevaa voidaan soveltaa, kun tuentaväli on sama kuin nurjahduspituus 3 400 mm. Jos tuentaväli on pienempi kuin nurjahdusväli, kuten oli tarkastellussa tapauksessa, ei suunnitteluohjeessa ole annettu ainakaan selvästi lupaa mitoittavan voiman pienentämiseksi.

Lisäksi annetaan kaava tuen jäykkyyden arvioimiseksi, joka on

$$C = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) \right] \frac{\pi^2 EI}{a^3} = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{54600/3400}\right) \right] \frac{\pi^2 \cdot 10800 / 1,3 \cdot 2 \cdot 630 \cdot 215^3 / 12}{3400^3} = 8610 \text{ N/mm}$$

Liitokseen käytetyn ankkurinaulan leikkauskapasiteetti on

$$F_{d,naula} = 980 \text{ N}$$

ja liittimen jäykkyys vastaavasti

$$k=1120 \text{ N/mm}$$

Tämä tarkoittaa sitä, että yhteen ristikkoparin ja kattoelementin palkin liitokseen tarvittaisiin yhteensä 52 naulaa ja niitä oli 11. Onnettomuuskuormalla nauvoja olisi tarvittu 13 kpl (= 0,31·52/1,3, missä 0,31 onnettomuuskuorman ja ominaismurtokuorman suhde ja 1,3 on materiaalin osavarmuuskerroin).

Vaadittavan jäykkyyden saavuttamiseksi nauvoja olisi tarvittu 8 kpl ja onnettomuuskuormalla 2 kpl. Edellytyksenä kummassakin tapauksessa on, että ristikko olisi tukeutunut täysin jäykkään rakenteeseen. Todellisuudessa tukeva rakenne ei ollut jäykkä, koska jäykäksi suunniteltu rakenne oli 54 metrin päässä ensin pettäneestä ristikosta 32 ja välillä oli kahdeksan naulauslevyjen ja kattoelementin välistä naulaliitosta. Kattoelementtien välisessä liitoksessa sivupalkeissa oli aina linjoilla 25-37 naulauslevy, jonka kummassakin päässä oli 20 naulaa. Myös kattoelementtien sivupalkkien muodonmuutokset pituussuunnassa pienentävät jäykkyyttä.

Edellä olevat laskelmat on tehty olettaen ristikon yläpaarten puristusvoimaksi suurin puristusvoima eikä keskimääräinen voima, joksi katon jäykistyksen suunnittelija oli arvioinut 70 % suurimmasta voimasta. Keskimääräisen puristusvoiman käyttö pienentää tarvittavat naulamäärät 70 %:iin edellä lasketuista. Todellisuudessa tuentavälin pienentyminen nurjahdustuentavälistä 3 400 mm kattoelementtien palkkiväliksi 2 500 mm pienentää tarvittavaa voimaa, vaikka laskentamenetelmästä puuttuu sekä kaavat että periaatteelliset maininnat pienentämismahdollisuudesta. Jos suunnitteluohjeen kaavoja sovelletaan sellaisenaan, vaadittu jäykkyys kasvaa noin kolminkertaiseksi. Suunnitteluohje lähtee aina siitä, että tuentaväli on sidottu nurjahduspituuteen.

Edellä esitetyn perusteella kattoristikoiden tuenta oli alun perin alimitoitettu.

Koko ristikkorakenteen sivuttaistuenta laskettaessa tukeva rakenne on mitoitettava tasaiselle kuormalle kaavalla

$$q_d = \frac{nN_d}{50L} \text{ (viranomaisohje B10)} \quad q_d = k_1 \frac{nN_d}{30L}, \text{ jossa } k_1 = \min\left\{1, \sqrt{15/L}\right\} \text{ (RIL 205-1997)}$$

missä

$n$  on tuettavien ristikoiden lukumäärä,

$N_d$  on ristikon yläpaarteiden keskimääräinen puristusvoima ja

$L$  on ristikon jänneväli.

Jos yksittäisen ristikon yläpaarteiden nurjahdustuen kapasiteetti lasketaan yllä annetuista kaavoista sijoittamalla niihin  $n=1$ , ristikon yläpaarteiden nurjahdustuenta mitoitetaan tapaukselle, jossa koko ristikon yläpaarteet taipuu samalle puolelle. Tällöin tarvittava nurjahdustuen kapasiteetti on suuruusluokkaa promille puristusvoimasta, mikä on aivan liian pieni. Edellä selostettua todennäköisempi nurjahdustapaus on kuitenkin sellainen, jossa yläpaarteet taipuu nurjahtaessaan yhden tai useamman s-kirjaimen muotoon. Tästä syystä ei riitä, että nurjahdustarkastelu tehdään vain edellä mainitun kaavan avulla.

Työmaalle annetun ohjeen mukaan kattoelementti kiinnitettiin kattoelementin keskeltä aina korkeammalla olevaan ristikkoon. Tämä tarkoitti sitä, että alemmaksi jäänyt ristikon yläpaarteet oli kiinnittämättä pitkältä matkalta kattoelementtiin. Tehtyjen havaintojen perusteella tämä matka oli jopa koko lappeen pituus. Ensiksi romahtaneessa ristikossa havaittiin matka 15,1 m. Se havaittiin ristikkoparin siinä ristikossa, josta ei puuttunut tappivaarvoja. Suurelta osalta ristikot olivat tuhoutuneet niin pahoin, ettei niistä voinut päätellä sitä, kummassa ristikossa kattoelementti oli ollut kulmalevyllä kiinni. Jos tukematta oleva matka oli edellä mainittu 15,1 m, niin ristikko kesti tasaista kuormaa, jonka suuruus oli hieman alle 60 % rakenteiden omasta painosta.

Ristikot oli sidottu toisiinsa noin 7 mm paksuilla ja 300 mm pitkillä ruuveilla. Sidontaa ei ollut konstruktiivisesti suunniteltu. Tämä sidonta oli linjalla 39 kummassakin ristikon puolikkaassa sellainen, että ruuviväliksi tuli korkeintaan kaksi metriä. Tällaisen ruuvin laskennallinen ulosvetokapasiteetti on

$$R_d = \frac{1,5 + 0,6d}{1,3} \sqrt{\rho_k} (l_{ef} - d) = \frac{1,5 + 0,6 \cdot 7}{1,3} \sqrt{440} (130 - 7) = 11\,300 \text{ N} = 11,3 \text{ kN}$$

Ristikon yläpaarteiden nurjahdustuentaan tarvittava kiinnitysvoima onnettomuustilanteessa on  $0,31 \cdot 0,5 \cdot 50,1 = 7,8 \text{ kN}$ . Ruuvin laskennallinen ulosvetokapasiteetti on suurempi kuin yhden ristikkopuolikkaan tukemiseen tarvittava arvo. Tämä tarkoittaa sitä, että ristikkoparin sitomiseen toisiinsa käytetty ruuviliitos on riittävä tukemaan kattorakenteesta irti oleva ristikko toiseen ristikkoon romahtuskuormilla, mutta ei normaalimitoituksessa, jossa kuormat ovat suunnittelukuormien suuruiset. Siten ristikoiden yläpaarteet eivät todennäköisesti ole nurjahtaneet.

## Ristikkojen kaatuminen

Kaikkien ristikoiden kaatuminen on estettävä vinotuilla. Suomen rakentamismääräyskoelman viranomaismääräyksissä ja -ohjeissa ei ole annettu voimaa, jolle vinotuet on mitoitettava. Sen sijaan ympäristöministeriön naulalevyrakenteiden suunnitteluohjeissa ja Suomen rakennusinsinööriliiton ohjeissa RIL 144 tästä on annettu ohjeet.

Katon jäykistysuunnittelija on laskenut tarvittavat voimat tuulikuorman ja ristikoiden sivuttaistuennan perusteella ja siirtänyt ne seinäpilarien välisen teräsristikon kautta perustuksille. Mahdollisesta ristikoiden vinoudesta aiheutuvaa kuormaa ei laskelmissa otettu huomioon. Lisäksi teräsristikkorakennetta ei ole toteutettu jäykistysuunnitelmien mukaisesti, koska yksi tärkeä teräksinen vetotanko puuttui. Asialla ei kuitenkaan ollut merkitystä romahduksen kannalta. Ristikoiden kaatumista ei ole todettu tapahtuneen.

### 3.1.4 Rakentamisorganisaatio

#### Rakennuttamiseen liittyvien tehtävien hoitaminen

Rakennuttamisessa tulisi huolehtia ja varmistua siitä, että hankkeen erityispiirteistä johtuvat turvallisuusriskit otetaan huomioon suunnittelussa, rakennuselementtien valmistuksessa sekä työmaatoteutuksessa.

Rakennuttajan laatimassa työturvallisuusasiakirjassa oli kerrottu, mitä työturvallisuussäädöksissä rakennustyöstä määrätään. Asiakirjassa ei ollut selvitetty hankkeen erityispiirteistä johtuvia turvallisuusriskejä eikä rakennuttaja ollut antanut suunnittelijoille tehtäväksi riskien selvittämistä. Hallihankkeeseen ja erityisesti sen kattorakenteisiin liittyi muun muassa seuraavia erityispiirteitä:

- Halli oli tarkoitettu suuria yleisötilaisuuksia varten.
- Alun perin teräsrakenteiseksi suunnitellut katon pääkannattajat vaihdettiin puuristikoiksi muuttamatta muutoin kokonaissuunnitelmaa.
- Pitkien jännevälien vuoksi kattokannattajien ja koko rakennuksen jäykistämisestä tulee huolehtia erikseen.
- Suurten liimapuuristikoiden tappivaarnaliitoksista ei ole Suomessa pitkää kokemusta.
- Isojen ristikoiden nostaminen paikoilleen on vaativa tehtävä muun muassa stabiiliusriskien vuoksi.

Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan em. erityispiirteisiin ei kuitenkaan jälkikäteen ajateltuna varauduttu riittävästi. Rakennuttaja luotti pääurakoitsijan sekä tuoteosakaupoissa toimittajien pätevyyteen ja kokemukseen ja jätti kattoristikoiden suunnittelun ja valmistuksen valvonnan pääurakoitsijalle, jolla oli sopimuksen mukaan vastuu ristikoiden toimittamisesta paikalleen asennettuna. Tässä hankkeessa kattoristikoiden lisäksi muun muassa katon toimitus toteutettiin tuoteosakauppana, johon sisältyi myös suunnittelu.

Kattorakenteiden suunnittelu pilkkoutui hankkeessa viiden eri suunnittelijan, liimapuuristikoiden suunnittelijan, ristikoiden valmistajan suunnittelijan, kattoelementtien suunnittelijan, katon jäykistyksen suunnittelijan sekä rakenteiden pääsuunnittelijan kesken. Tutkinnassa on käynyt ilmi, että tieto ei kulkenut riittävästi suunnittelijalta toiselle. Tätä osoittavat muun muassa seuraavat seikat:

- Kattoristikoiden suunnittelija ja valmistajan suunnittelija eivät käyneet riittävästi keskustelua valmistustoleransseista ja niiden merkityksestä liitosten lujuuden kannalta. Liitoksissa oli muun muassa tappivaarnejen sijaintivirheitä.
- Ristikoiden suunnittelija laski kuormitukset saamiensa tietojen mukaisesti niin, että kattoelementit olisivat yksiaukkoisia. Kattoelementit toteutettiin kuitenkin pääosin kaksiaukkoisina.
- Kattoristikoiden suunnittelijalta ei mennyt katon jäykistyksen suunnittelijalle riittävästi tietoa siitä, kuinka suurille voimille ristikoiden yläpaarteiden nurjahduksen estävä tuenta tarvitsee mitoittaa. Jäykistyksen suunnittelija mitoitti tuennan liian pienille voimille.

Kaksi ensimmäistä ovat sellaisia seikkoja, joilla on ollut oleellinen vaikutus tappivaarnaliitosten kapasiteettiin. Viimeisellä ei ollut välitöntä vaikutusta onnettomuuteen, mutta se merkitsi, että rakennuksen stabiliteetista ei tullut tyydyttävää.

Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan suunnittelijoilla oli riittävä pätevyys ko. rakenteiden suunnitteluun. Pääurakoitsija oli myös riittävän pätevä ja kokenut rakennustyön toteuttamiseen ja ohjaamiseen. Edellä mainitut tiedonkulun puutteet osoittavat, että rakennuttajan ja edelleen pääurakoitsijan suorittama rakennesuunnittelun ohjaus ja valvonta oli kuitenkin liian vähäistä ottaen huomioon rakenteisiin liittyvät riskitekijät sekä suunnittelun pilkkoutuminen useille eri suunnittelijoille. Tästä johtuen muun muassa liimapuuristikkoja koskevien suunnitelmien oikeellisuus jäi kokonaan suunnittelijan oman osaamisen ja huolellisuuden varaan.

Myöskään liimapuuristikoiden valmistusta ei valvottu, joten se jäi ristikoiden valmistajan osaamisen ja huolellisuuden varaan.

### Suunnitteluohjeet

Kattoristikoiden tappivaarnaliitokset mitoitettiin Eurocode 5:n esistandardin ENV 1995-1-1 perusteella. Kyseisessä normissa oli virhe, koska siinä ei ollut otettu huomioon tappivaarnaliitosten lohkeamismurtumista. Tässä normissa annetaan yksinkertaiset kaavat tappivaarnejien minimivälien ja –reunaetäisyyksien laskemista varten, mutta kaavojen pätevyysaluetta ei tarkemmin määritellä.

Normit ovat yleisesti sellaisia, että niiden antamat tulokset ovat ”varmalla puolella”. Lisäksi normin ajatellaan pätevän aina, jos sen pätevyysaluetta ei ole erikseen rajattu. Esistandardin alussa on esitetty suunnittelun perusvaatimukset, joiden mukaan rakenteen on oltava tarkoitukseensa sopiva ja kestävä tarkoituksenmukaisella luotettavuudella kaikki kuormat. Perusvaatimukset ovat niin yleisiä, että niiden perusteella ei yleen-

sä tehdä muita tarkasteluja, kun käytettävissä on tarkoitukseen sopiva erityinen mitoituskaava. Jos suunnittelijan halutaan suhtautuvan varauksellisesti joihinkin normin kohtiin, on tästä oltava normissa selkeät varoitukset, joita normissa joistakin asioista on myös esitetty. Pultti- ja tappivaarnaliitosten osalta ei lohkeamismurtotarkasteluun viittavaa varoitusta ole, vaikka se on Suomessa lisätty naulaliitoksia käsittelevään kohtaan. Suunnittelijalla ei tavallisesti ole tietoa mahdollisesti käynnissä olevasta normin kehitystyöstä eikä hänellä ole edellytyksiä asettaa voimassa olevaa normia kyseenalaiseksi.

Kun kattoristikoita suunniteltiin, Eurocode 5:n uusi versio (prEN 1995-1-1) oli jo käsikirjoituksena olemassa ja ainakin suppean asiantuntijapiirin tiedossa. Normin uudessa versiossa on puurakenteiden mekaanisten liitosten, kuten tappivaarnaliitosten, mitoituskriteereitä muutettu hyvin oleellisesti ankarammiksi kuin vuodelta 1993 olevassa esistandardissa. Näissä uusissa mitoituskaavoissa on otettu huomioon muun muassa lohkeamismurto, tosin vain liitteessä. Normin laatijoiden käytettävissä on ollut koetuloksia, joissa suurten pulttiryhmiä vetokokeiden murtokuorma on huonoimmillaan ollut vain 40 % esinormin mukaan lasketusta kapasiteetista, mikä käy ilmi Rakennustekniikka-lehden numerossa 5/2001 julkaistusta artikkelista *Puurakenteiden uudet liitostekniikat*. Artikkeleissa oltiin huolestuneita erityisesti liitosalueen halkeamisesta tai leikkautumisesta liitinriivien kohdalta. Näistä oli runsaasti julkaistua tietoa.

Eurocode 5:n uusi versio on ollut Suomessa käsiteltävänä ja viranomaisten tiedossa joitakin vuosia ennen onnettomuutta. Myös Rakennustekniikka-lehdessä julkaistun artikkelin on täytynyt herättää jonkin verran huomiota alan asiantuntijoiden keskuudessa. Suomessa käytössä olleen esistandardin oleelliset puutteet eivät kuitenkaan käytössä olleen tiedon perusteella ole tulleet esiin riittävän painokkaasti, koska korjauksia esistandardiin tehtiin vasta Jyväskylän kattoromahduksen jälkeen. Vuoden 2003 lopulla tullessa kansalliseen äänestykseen menevässä normiversiossa lohkeamismurto on edelleen vain liitteessä, joka ei ole velvoittava. Suomessa havaitusta puutteesta ympäristöministeriö on ilmoittanut sekä komissiolle että uuden version laatijoille, mutta lohkeamismurtoasiaan ei ole tehty muutoksia.

Jos (koe)käytössä olevassa normissa paljastuu puutteita, jotka oleellisesti vaikuttavat turvallisuuteen, pitäisi olla selkeät menettelytavat, joilla normia korjataan nopeasti vastaamaan viimeisintä tietoa. Normin muutoksesta pitäisi tehokkaasti tiedottaa kaikille normia soveltaville. Tehokasta tiedottamista varten pitää olla sovitut menettelytavat EU:n piirissä ja kansallisesti alkaen normia kehittävästä työryhmästä ja päättyen suunnittelijoihin ja rakentajiin.

Suunnittelunormissa oleva puute herättää myös kysymyksen siitä, miksi yleisesti hyväksytyyn normiin voi päästä kyseisenlainen puute. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan normien valmistelussa tulisi varmistaa vähintään se, että normien mukainen suunnittelu tuottaa rakenteita, jotka eivät aiheuta ihmisille terveyden tai hengen menettämisen vaaraa, ei rakennustyön aikana eikä valmiina rakenteena.

### Liimapuuristikkoja koskevan rakennesuunnitelman laatiminen ja luovuttaminen

Suunnitelman tehtävä on välittää suunnitelman toteuttajalle oikeat ja riittävät tiedot suunnitelman kohteesta. Suunnitelman on sisällettävä tarvittavat työohjeet suunnitelman oikeaa tulkintaa varten. Lisäksi suunnittelijan ja suunnitelman toteuttajan olisi keskusteltava työhön liittyvistä oleellisista seikoista. Liimapuuristikoiden suunnittelija antoi valmistajalle piirustukset, joissa oli tappien ja teräslevyjen paikat. Valmistajan oma suunnittelija laati niiden perusteella tarkemmat piirustukset valmistusta varten. Ristikoiden suunnittelijan ja valmistajan suunnittelijan olisi pitänyt tutkintalautakunnan mielestä yhteistyössä huolehtia siitä, että valmistuksessa huolehditaan tappien huolellisesta asentamisesta. Tappivaarujen ja teräslevyjen asemoinnissa ei noudatettu riittävää tarkkuutta, vaikka tappien tarkalla sijainnilla, erityisesti tapin pituussuunnassa, on oleellinen merkitys liitoksen lujuuden kannalta. Ristikoiden suunnittelija ei kertomansa mukaan täysin tuntenut valmistajan tuotantomenetelmiä eikä näin ottanut suunnittelussa niitä erikseen huomioon. Ristikoiden suunnittelija oli osapuolista parhaiten perillä ristikoiden ja liitosten kapasiteettiin vaikuttavista yksityiskohdista, joten hän olisi ollut pätevin antamaan ohjeita ristikoiden huolellista valmistusta varten. Yleinen käytäntö kuitenkin näyttäisi olevan se, että suunnittelijat katsovat tehtäväkseen kuuluvan ainoastaan piirustusten toimittamisen.

Tappivaarujen aseman vaihtelun lisäksi liitosten kapasiteettia pienensi se, että suunnittelussa oli käytetty liimapuun nimellislujuutta, vaikka liimapuupalkkien keskiosissa käytetään yleisesti puun reunaosia heikompa puumateriaalia. Ristikoiden suunnittelija ja valmistaja eivät asiasta erikseen keskustelleet tai sopineet vaan kumpikin toimi muissa hankkeissa totuttujen työtapojen mukaisesti.

Rakennusalalla vallitsevan käytännön mukaan rakennesuunnittelija ei ollut antanut ohjeita sisällytettäväksi rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeeseen. Tutkintalautakunnan mielestä tällaisia asioita voisivat olla rakenteiden kunnon ja lujuuden seuranta, esimerkiksi liitosten rakojen tai liimapuun halkeamien tarkkailu. Esimerkkinä mahdollisesti havaittavasta ongelmasta oli jo rakentamisen aikana havaittu rako liitoksessa ristikossa 31.

Ristikosuunnitelmissa oli ilmeisesti annettu ne tiedot, jotka oli suunnittelijalta tilattu.

### Liimapuuristikoiden valmistus

Liimapuun valmistaminen on tarkkaan valvottua ja se perustuu hyväksytyyn laatujärjestelmään. Ristikoiden valmistajalla on pitkäaikainen kokemus liimapuupalkkien valmistuksesta. Kyseessä olevat liimapuuristikot olivat kuitenkin ensimmäisiä Laten valmistamia ristikkoita, mutta muita tappivaarnaliitoksilla koottuja puurakenteita se on valmistanut aikaisemminkin. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan valmistajan kokemuksen vähäisyys tappivaarnaliitoksin toteutetuista ristikkoista oli riskitekijä, johon hallihankkeessa toimivien osapuolten olisi pitänyt paremmin varautua.

Tappivaarujen puuttuminen ja liitosten epätarkkuus johtui osittain siitä, että ristikoiden kokoamisen valvonta oli puutteellista. Tehtaalla ei tunnistettu liitosten ja niiden osien asennustarkkuuden merkitystä, varsinkin kun rakennesuunnittelijakaan ei antanut val-

mistusta koskevia erityisohjeita. Onnettomuuden jälkeen valmistaja on parantanut laadunvalvontaansa.

Ristikoiden laadunvalvonnan tulisi olla vähintäänkin samalla tasolla kuin liimapuun valmistuksessa.

#### Liimapuuristikoiden ja kattoelementtien asennuksen suunnittelu ja toteutus

Asennusurakoitsija laati ristikoiden ja kattoelementtien asennuksesta suunnitelman yhteistyössä vastaavan työnjohtajan kanssa. Työmaan ajoteitä ja nostopaikkoja muun muassa vahvistettiin nostojen turvallisuuden varmistamiseksi. Ristikoiden asennuksenaikainen tuenta suunniteltiin myös niin, että ristikot eivät pääse kaatumaan.

Asennusurakoitsija kävi lisäksi ristikoiden valmistajan tehtaalla opettelemassa tappivaarnaliitosten tekemistä työmaalla tehtäviä liitoksia varten. Ristikoiden valmistaja toimitti asentajalle jokaisesta ristikosta oman sabluunan liitoksen tekemistä varten.

Asennussuunnitelma oli tutkintalautakunnan käsityksen mukaan tehty asianmukaisesti, mutta sitä ei hyväksytetty rakennesuunnittelijoilla, kuten elementtirakentamiseen liittyvissä työturvallisuusmääräyksissä edellytetään. Pääurakoitsijan mukaan asennussuunnitelma toimitettiin päärakennesuunnittelijalle, mutta rakennuttajan mukaan päärakennesuunnittelija ei ole sitä saanut. Myöskään päärakennesuunnittelija ei muista sitä saaneensa. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan ristikoiden asentaminen oli vaativa työ, mistä syystä ainakin päärakennesuunnittelijan olisi pitänyt tarkastaa asennussuunnitelma ja tarvittaessa pyytää siihen muidenkin rakennesuunnittelijoiden hyväksyntä.

Vastaava työnjohtaja kertoi tarkastaneensa kattoristikot silmämääräisesti, kun ne tuotiin työmaalle. Liitokset olivat näyttäneet tiukoilta eikä elementeissä havaittu muutenkaan virheitä.

Asennuksen aikana 3.12.2002 havaittiin kuitenkin yhden ristikon vinoparteiden liitoksessa rako, josta pääurakoitsija reklamoi ristikoiden valmistajalle. Reklamaatio lähetettiin tiedoksi työmaan valvojalle, pääsuunnittelijalle ja päärakennesuunnittelijalle sekä siitä tehtiin merkintä rakennustyömaan päiväkirjaan. Valmistaja korjasi vian ja ilmoitti tarkastaneensa pääurakoitsijan vaatimuksesta muidenkin liitosten tappivaarnojen määrän. Valmistaja antoi pääurakoitsijalle todistuksen siitä, että se ei havainnut muissa liitoksissa puutteita. Pääurakoitsija ei ilmoittanut liitoksessa havaitusta viasta rakennusvalvontaan vaan siirsi vastuun tapahtuneesta ristikkovalmistajalle. Myöskään ristikoiden suunnittelija ei saanut tietoa havaitusta viasta, vaikka sillä olisi ollut parhaat mahdollisuudet arvioida mahdollisten puutteiden vaikutus ristikoiden lujuuteen ja osoittaa järkevimmit ratkaisuehdotukset. Yhteistyö ei tältäkin osin ollut riittävää.

Tutkinnassa kävi ilmi, että onnettomuudessa pettäneessä liitoksessa oli vain seitsemän tappivaarnaa, vaikka suunnitelmien mukaan niitä piti olla 33. Tämä osoittaa, että ristikoiden valmistajan suorittama tarkastus ei ollut luotettava. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan valmistajan tarkastusmenetelmällä, jossa käytettiin Hilti PS20 laitetta, ei ollut mahdollista varmistaa tappien määrää liitoksissa.

Vaikka ristikkovalmistajalla on täytynyt olla tiedossa tarkastustehtävän mahdottomuus käytössä olleilla menetelmillä, se laati pääurakoitsijalle todistuksen ristikoiden virheettömyydestä. Pääurakoitsija oli vaatinut kyseisenlaista todistusta, koska se tappipuutteen havaitsemisen jälkeen ilmeisesti epäili ristikoiden laatua. Todistuksen antamiseen oli annettu lyhyehkö aika, jona aikana ristikkovalmistajan piti etsiä keino ongelman ratkaisemiseksi. Tappien paikan ja lukumäärän tarkistamiseen ei onnettomuuden jälkeenkään ole löydetty toimivaa ratkaisua, joka olisi kohtuudella mahdollinen. Vaihtoehdoiksi ristikkovalmistajalle jäi joko antaa todistus ristikoiden hyvydestä tai ilmoittaa, että todistusta ei sopivan tarkastusmenetelmän puuttumisen vuoksi voida antaa. Jälkimmäinen vaihtoehto olisi mahdollisesti johtanut siihen, että ristikoille olisi pitänyt tehdä merkittäviä vahvistuksia tai ne olisi pitänyt vaihtaa uusiin. Tästä ja rakennuksen valmistumisen myöhästymisestä aiheutuvat kustannukset olisivat olleet hyvin suuret. Ristikkovalmistaja ilmeisesti edelleen arvioi, että ristikoiden kapasiteetti on riittävä ja kirjoitti riskiä ottaen edellä mainitun todistuksen.

### 3.1.5 Valvontaviranomaisten toiminnan analyysi

#### Rakennusvalvontaviranomaisen toiminta

Rakennusvalvontaviranomainen luotti hallin rakentamisen valvonnan laajuutta harkitessaan hankkeen osapuolten asiantuntemukseen sekä ammattitaitoon. Osapuolten toiminnan ja yhteistyön puutteet kuitenkin osoittavat, että vaativissa kohteissa tarvitaan joka tapauksessa viranomaisilta aktiivista osallistumista. Urakoiden ja suunnittelun pilkkominen useille eri toimittajille tuo suuren haasteen eri osapuolten yhteistyön ja tiedon kulun järjestämiselle rakennushankkeessa.

Rakennusluvassa tai aloituskokouksen pöytäkirjassa ei annettu erityismääräyksiä liimapuuristikoiden suunnittelun valvonnasta eikä ristikoiden valmistamisen tarkastamisesta. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan valvontaviranomainen ei ilmeisesti tunnistanut liimapuuristikoiden ja niiden tappivaarnaliitosten rakennesuunnittelun ja valmistuksen vaativuutta. Ehkä osittain tästä syystä rakennusvalvontaviranomainen ei puuttunut ristikoiden valmistukseen eikä kiinnittänyt huomiota niiden lujuuslaskelmiin tai vaatinut niille ulkopuolista tarkastusta. Käytännössä ulkopuolisen tarkastuksen vaatiminen olisi edellyttänyt, että suunnitelmien määräystenmukaisuutta on syytä epäillä. Maankäyttö- ja rakennuslaissa ei kuitenkaan ole tarkoitettu tällaista perustetta vaan tarkastusta voi vaatia, kun viranomaisen mahdollisuudet arvioida esimerkiksi poikkeuksellista suunnitteluratkaisua eivät ole riittävät. Ulkopuolisen tarkastuksen vaatimisen helpottamiseksi tarkastuksen vaatimiselle pitäisi olla rakenteeseen liittyvät neutraalit kriteerit.

RakMk:n osan A1 mukaan, jos rakennustyön aikana havaitaan rakennusosissa määräysten vastaisuuksia, rakennusvalvontaviranomaisen tulee tarvittaessa vaatia selvitys toimenpiteistä epäkohdan korjaamiseksi. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan tappivaarnojen puuttuminen ristikon liitoksista oli edellä tarkoitettu määräysten vastaisuus, jonka korjaamisesta selvitys olisi pitänyt pyytää. Rakennusvalvonta ei kuitenkaan saanut ilmoitusta ristikossa havaitusta puutteesta. Määräyksissä tulisi olla selkeät vaatimukset kantavissa rakenteissa havaittujen vakavien puutteiden ilmoittamisesta rakennusvalvontaviranomaiselle.



### Työsuojeluviranomaisen toiminta

Työsuojelupiiri ei kohdistanut rakennushankkeeseen valvontaa työmaan alkuvaiheessa. Työsuojelutarkastaja teki työmaalle yhden, työtelineisiin kohdistuneen tarkastuksen. Piirin rakennusalan tarkastajat kertoivat, että työmaa ei ollut heidän mielestään erityisiä työturvallisuusriskejä sisältävä kohde eikä vaatinut erityistä valvontaa. Viranomaisvalvonnan tarvetta vähensi myös se, että päätoteuttajan vastaava työnjohtaja oli tunnettu hyvästä työsuojeluasioiden hoidosta. Tarkastajien kertoman mukaan työmaalla ei sattunut vakavia työtaturmia.

Rakennuttamiseen ja siihen liittyvään rakennesuunnittelun ohjaamiseen sisältyi sellaisia puutteita, joiden tunnistaminen ja korjaaminen rakennusvaiheessa olisi saattanut välillisesti johtaa rakenteiden lujuuden ja jäykistyksen puutteiden esilletuloon vaikka tuskin olisi estänyt itse onnettomuutta. Työsuojelutarkastajan tunnistettavissa olevia puutteita olivat:

- Työmaalle toimitettu turvallisuusasiakirja ei sisältänyt määräyksessä tarkoitettuja tietoja hankkeen ominaispiirteistä johtuvista vaaroista.
- Ristikoiden asennussuunnitelmasta puuttui rakennesuunnittelijan hyväksymiskintä, mikä viittaa tutkintalautakunnan muissakin yhteyksissä havaitsemiin puutteisiin yhteistyössä.

Rakennushankkeen työturvallisuusriskien tunnistaminen ja valvontatarpeen määrittely on vaativa tehtävä, johon ei ole käytössä kunnollisia työkaluja. Erityisiä vaaratekijöitä sisältävistä töistä on luettelo muun muassa RakVNP:n liitteessä 2, joka voisi toimia yhtenä apuvälineenä riskien tunnistamisessa. Suurten rakennuselementtien asennus on mainittu tässä liitteessä yhtenä erityistä vaaraa sisältävänä työnä.

### Valvontaviranomaisten yhteistyö

Rakennuselementtien, erityisesti isoja kuormia kantavien kattorakenteiden lujuus ja rakennusten kokonaisstabiilitetti ovat asioita, joiden riittävyyden varmistaminen on sekä rakennusvalvonnan että työsuojeluvalvonnan kannalta tärkeitä. Näiden viranomaisten tiiviimpi yhteistyö olisi saattanut paljastaa hankkeeseen sisältyviä riskejä, joihin olisi voitu suunnata valvontaresursseja kokonaisturvallisuuden näkökulmasta tehokkaammin.

### Pelastusviranomaisen toiminta

Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan paloturvallisuuden valvonnassa ei ole ollut mahdollisuutta paljastaa ristikoiden suunnittelussa ja valmistuksessa ilmenneitä puutteita.

## **3.1.6 Hallin käytön aikaisen kunnossapidon analysointi**

Jyväskylän messuhalli oli ollut käytössä vain kaksi viikkoa ennen sen katon romahtamista. Näin ollen hallin käyttöön ja huoltoon liittyvillä toimenpiteillä ei vielä ehditty vaikuttaa romahduksen ehkäisemiseen.

## **3.2 Pelastustoiminnan analysointi**

### **3.2.1 Hätäkeskuksen toiminta ja viranomaisradioverkko**

Hätäkeskuksen työvuoro keskitti voimavarojaan onnettomuuden alkuvaiheessa tehtävän vaatimalla tavalla. Tällainen painopisteen valinta on mahdollista vain hätäkeskuksissa, joissa on riittävästi henkilökuntaa.

Nosturikaluston saaminen onnettomuuspaikalle teetätti kohtuuttoman paljon töitä hätäkeskuksessa. Sen aiheutti puutteelliset tiedostot sekä viikonloppu, jolloin työmailla ei ollut nosturikalustoa töissä. Kova pakkanen myös hidasti nosturikaluston liikkeellelähtöä.

Erytiskalusto, jota harvoin tarvitaan onnettomuustilanteissa, tulisi tarkemmin kartoittaa hätäkeskuksen ja pelastusviranomaisten toimesta. Myös olemassa olevien tiedostojen ylläpitoon tulee kiinnittää huomiota.

Viranomaisradioverkon päätelaitteita ei ollut vielä kattavasti eri viranomaisilla, joten niiden toimivuutta tässä tilanteessa ei voi arvioida. Myöskään viranomaisradioverkon radiopuhelinliikenteestä ei ole nauhoitteita.

Keski-Suomen hätäkeskus suoriutui onnettomuuden vaatimista tehtävistään hyvin.

### **3.2.2 Pelastustoiminta ja johtaminen**

Pelastuslaitoksen ja poliisin toimintavalmiusajat onnettomuuskohteeseen olivat lyhyet, joten pelastustoiminnan johtajan päätös ratkaista lisäresursointi kohteeseen päästyään oli oikeaan osunut.

Keskeisenä tehtävänä oli selvittää oliko ketään jäänyt romahtaneiden rakenteiden alle sekä estää lisävahingot. Näihin tehtäviin pelastustoiminnanjohtaja heti alkuvaiheessa keskitti poliisin ja pelastuslaitoksen voimavaroja.

Onnettomuusalueen tarkempi tutkiminen tapahtui maltillisesti, koska toiminta romahdusalueella sisälsi riskejä pelastajille. Lisäksi varsin nopeasti saatiin selvitettyä lähes täysi varmuus, ettei ketään ollut jäänyt rakenteiden alle.

Yhteistoiminta eri viranomaisten ja messuhallin henkilökunnan kesken sekä johtamistoiminta onnistuivat pelastustoiminnan aikana hyvin.



## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 4.1 Toteamukset

1. Lauantai-aamuna 1.2.2003 kello 9.36 Jyväskylän messuhallin B2-hallin kattoa romahti lähes 2 500 m<sup>2</sup> alueelta. Kyseinen halli oli uusi, se oli otettu käyttöön kaksi viikkoa aikaisemmin, 17.1.2003.
2. Hallissa oli juuri ennen katon romahtamista 12 henkilöä, jotka olivat purkamassa edellisenä päivänä päättyneiden koulutusalan messujen osastoja.
3. Hallissa olleet kuulivat voimakkaan paukahduksen ja osa heistä havaitsi yhden liimapuusta valmistetun kattoristikon alapaarteen katkenneen läheltä ristikon päätä. Havainnon tehneet osasivat hyvin arvioida tilanteen vakavuuden ja kehottivat huutamalla kaikkia poistumaan hallista.
4. Kaikki ehtivät ulos hallista, jonka jälkeen katto romahti. Alapaarteen katkeamisesta katon romahtamiseen ehti kulua noin kaksi minuuttia. Itse romahdus kesti noin 15 sekuntia. Kukaan ei loukkaantunut.
5. Pelastuslaitoksen yksiköitä ja sairausautoja hälytettiin paikalle hallilta tehdyn hätäilmoituksen perusteella. Pelastustoiminnan johtaja antoi pelastushenkilöstölle alkuvaiheessa tehtäväksi selvittää, oliko romahtaneen katon alle jäänyt ketään ja lisävahinkojen estämisen.
6. Noin puolen tunnin kuluessa oli kyselemällä saatu selville, että romahduksen alle ei todennäköisesti ollut jäänyt ketään. Sortunutta aluetta ei kuitenkaan pystytty kattavasti tutkimaan, koska oli lisäsortuman vaara.
7. Onnettomuuden aikaan katolla oli lunta noin 50 kg/m<sup>2</sup>, kun kelvollisen kattorakenteen tulisi Jyväskylän seudulla kestää yli nelinkertainen lumikuorma.
8. Romahduksessa petti neljä liimapuusta valmistettua noin 55 m pituista kattoristikoparia. Ristikot oli koottu tappivaarnaliitostekniikalla, jossa ristikon sauvat kiinnittyvät toisiinsa teräslevyjen ja teräksisten tappivaarnojen avulla.
9. Tutkinnassa havaittiin, että tappivaarnaliitosten valmistuksessa oli tehty virheitä. Merkittävin puute oli 26 tappivaarnan puuttuminen liitoksesta, jossa piti suunnitelmien mukaan olla 33 tappia. Juuri kyseinen kattoristikko petti silminnäkijöiden kertoman mukaan ensimmäisenä.
10. Tappivaarnaliitosten kapasiteetti ei oikein valmistettunakaan olisi ollut riittävä, koska suunnittelussa ei ollut otettu huomioon tappivaarnaliitoksen lohkeamismurtumista. Liitosten todellinen kapasiteetti oli lohkeamismurtotarkastelun puuttumisen takia vain puolet suunnitellusta. Se tarkoittaa, että katto olisi sortunut noin 200 kg/m<sup>2</sup> lumikuormalla, joka tilastollisesti esiintyy noin kerran 50 vuodessa.

11. Lohkeamismurtumisella tarkoitetaan vetoliitoksen sellaista vaurioitumistapaa, jossa puu lohkeaa tappivaarna-alueen uloimpia tappirivejä myöden. Paikkatutkinnassa kyseinen vaurioitumistapa havaittiin useassa liitoksessa.
12. Suunnitelmiin tuli kyseinen virhe, koska lohkeamismurtumistarkastelu puuttui suunnittelussa käytetystä voimassa olleesta eurooppalaisesta suunnitteluohjeesta. Puute on onnettomuuden jälkeen Suomessa korjattu.
13. Suunnitteluohjeessa ilmennyt puute oli otettu huomioon ohjeen uuden version luonnoksessa jo joitakin vuosia ennen onnettomuutta. Asia oli ollut myös esillä muun muassa ammattilehdessä. Tämä vakava asia ei kuitenkaan ollut saavuttanut ohjeen sisällöstä vastaavia niin, että suunnitteluohjetta olisi Euroopassa tai kotimaassa muutettu ennen onnettomuutta.
14. Tutkinnassa havaittiin puutteita myös rakennuksen kokonaisjäykistyksessä ja ristikkoiden yläpaarteiden nurjahdustuennassa, joka oli hoidettu kiinnittämällä yläpaarteet kattoelementteihin. Puutteilla ei kuitenkaan ollut välitöntä vaikutusta onnettomuuteen.
15. Kattoristikot suunnitteli yksi toimisto eikä liitosten suunnitteluun perehtynyt kukaan muu. Kattoristikoiden valmistus puolestaan oli kokonaan ristikkovalmistajan ja sen oman laadunvalvonnan varassa. Koska mitään järjestelmää tällaisten puutteiden torjumiseksi ei ollut, virheet pääsivät helposti etenemään aina valmiiseen halliin saakka.
16. Rakennushankkeeseen osallistuneet olivat päteviä ja kokeneita. Hankkeen pilkkoutuminen irrallisiin tehtäviin kuitenkin lisäsi virheiden mahdollisuutta. Tärkeät rakennuksen turvallisuuteen vaikuttavat työvaiheet eivät saisi jäädä pelkästään yhden organisaation tai organisaation pienen osan varaan. Tervettä kyseenalaistamista ja toisten työn ristiintarkistusta tarvitaan.

#### 4.2 Onnettomuuden syyt

Katto romahti siten, että ensin yksi ja sen jälkeen kolme seuraavaa tappivaarnaliitoksin koottua liimapuusta valmistettua kattoristikkoparia pettivät. Siihen oli kaksi oleellista välitöntä syytä, joista kumman tahansa poisjääminen olisi estänyt romahduksen:

- tappivaarnaliitosten huono laatu ja etenkin 26 tapin puuttuminen ristikkoparin 32 yhdestä oleellisesta liitoksesta, ja
- lohkeamismurtumistarkastelun puuttuminen eurooppalaisesta puurakenteiden suunnitteluohjeesta ja siitä johtuen kyseisten kattoristikoiden tappivaarnaliitosten suunnittelusta.

Ristikoiden valmistukseen liittyvät virheet olivat seurausta ristikkovalmistajan puutteellisesta laadunhallinnasta ja siitä, että kukaan muu ei kyseenalaistanut tai pyrkinyt var-

mistamaan valmistuksen tasoa. Liimapuun valmistus on sertifioitua toimintaa, mutta liimapuusta valmistettujen ristikoiden ei.

Kattoristikot ja sen tappivaarnaliitokset suunniteltiin käyttäen eurooppalaista suunnitteluohjetta ENV-1995. Koska suunnitteluohjeessa ei lohkeamismurtumista ole otettu huomioon, sen mukaan suunnitellun suuren tappivaarnaliitoksen kapasiteetti oli todellisuudessa vain noin puolet siitä, mitä laskentakaavat osoittavat. Pettäneet kattoristikot oli suunniteltu noudattaen kyseistä suunnitteluohjetta. Suunnitteluohjeen virhe, joka nyttemmin on korjattu, oli sellainen, että suunnittelijan on sitä vaikea huomata. Virhe oli normin uutta versiota laatineiden tiedossa jo vuosia ennen onnettomuutta ja aiheesta oli myös kirjoitettu suomalaisessa ammattilehdessä, mutta virheestä ei ollut informoitu normin vanhaa versiota käyttäviä.

Yleisesti rakenteiden suunnittelussa riskejä aiheutui lisäksi siitä, että suunnittelu oli jakautunut useiden suunnitteluyritysten kesken, joilla kullakin oli oma suunnittelutehtävänsä. Yhteistyö ei ollut saumatonta, jolloin rakenteiden yksityiskohtiin pääsi syntymään virheitä. Näillä esimerkiksi rakennuksen kokonaisjäykistykseen ja kattoelementtien kiinnitykseen liittyvillä puutteilla ei ollut välitöntä vaikutusta onnettomuuteen, mutta viestivät virheiden etenemismahdollisuudesta aina valmiiseen rakenteeseen saakka.



## 5 SUOSITUKSET

Tutkinnan perusteella laaditut turvallisuussuositukset on esitetty erillisessä osassa. Tämän kattovaurion lisäksi suositusten perusteena on Mustasaassa 17.1.2003 tapahtuneen monitoimihallin kattovaurion tutkinta.

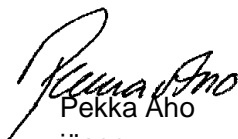
Helsingissä 31.5.2004



Tuomo Karppinen  
puheenjohtaja



Markku Korttesmaa  
jäsen



Pekka Aho  
jäsen



Esa Virtanen  
jäsen



Kai Valonen  
jäsen



## Kuormituskokeiden tulokset

### Puristuskokeet

Puristuskokeen kuormitusjärjestely on esitetty kuvassa L1. Koekappale oli tuettu nivelellisesti kummastakin päästä kuormituskoneen leukojen väliin. Kuormitusta nostettiin tasaisella nopeudella siten, että koekappale murtui noin 15 minuutin kuluttua kuormituksen aloittamisesta. Puristusliitoksista mitattiin siirtymät puuosien välillä koekappaleen kummaltakin puolelta kahdella mitta-anturilla kuormituksen funktiona. Mitta-anturit olivat toisiinsa nähden  $90^\circ$  kulmassa ja liitospintaan nähden  $45^\circ$  kulmassa. Lisäksi mitattiin puristussauvan uloimpien osien etäisyyden muutos kuormituksen funktiona.



Kuva L1. Puristuskokeiden kuormitusjärjestely.

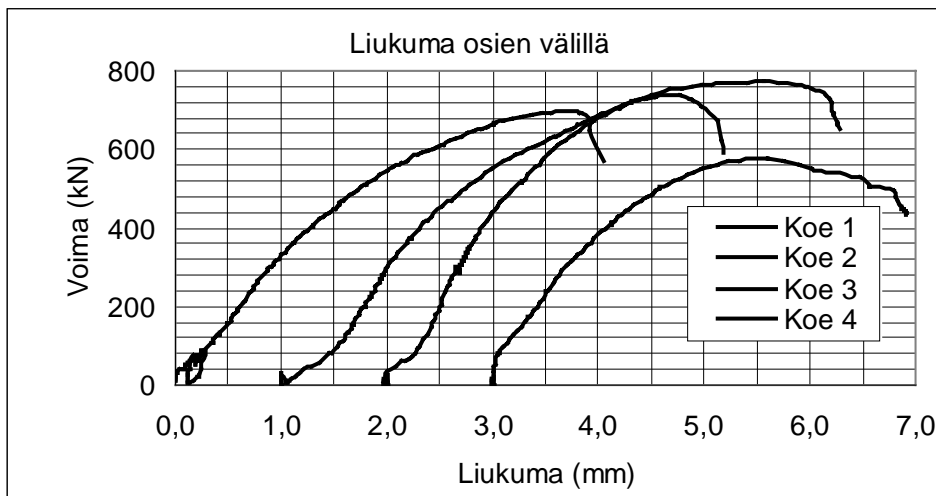
## Liite 1

Koetulokset on esitetty taulukossa L1.

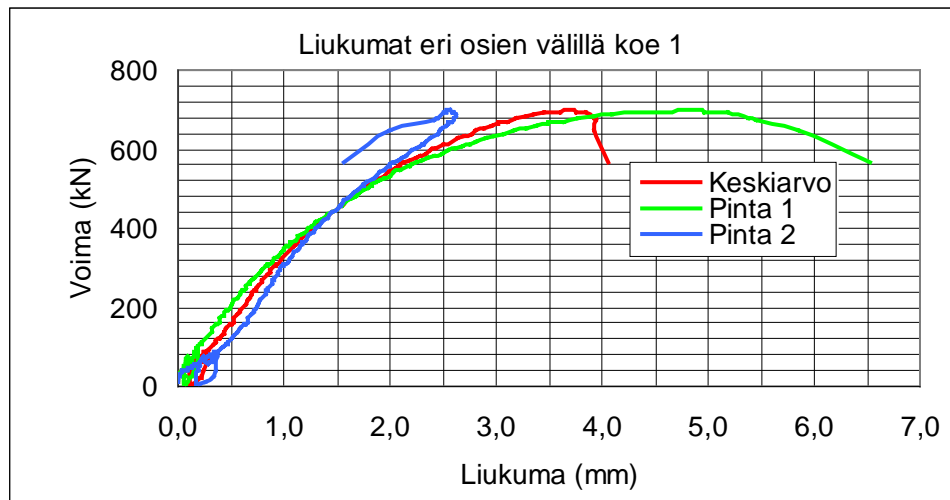
Taulukko L1. Murtokuormat, puun tiheydet murtoalueella ja puun kosteus.

	Murtokuorma (kN)	Puun tiheys $\rho_u$ (kg/m <sup>3</sup> )	Puun kosteus $u$ %
Koe 1	680	391	13,0
Koe 2	730	422	13,6
Koe 3	780	390	10,9
Koe 4	575	425	13,3

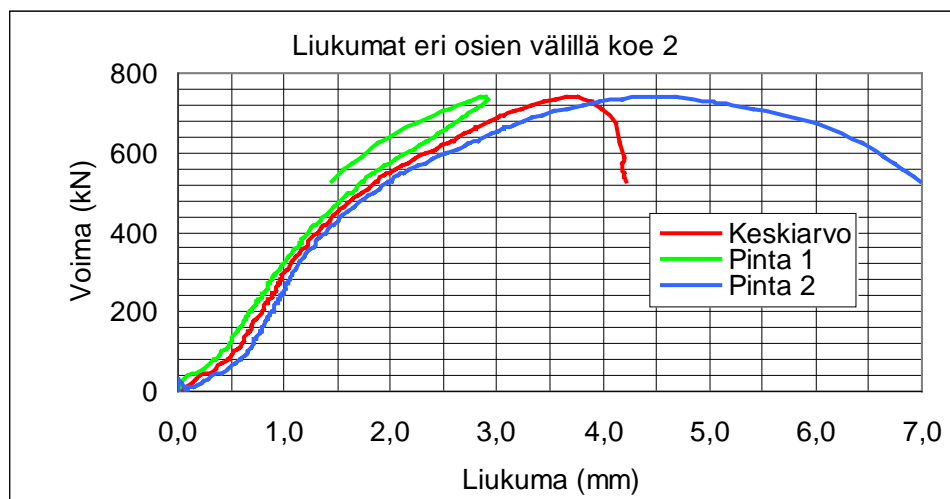
Kuvassa L2 on esitetty kustakin kokeesta mitattu liukuma kuormituksen funktiona. Liukuma on kummaltakin puolelta erikseen mitattujen liukumien keskiarvo. Kuvissa L3-L6 on esitetty koekappalekohtaiset liukumamat kummaltakin puolelta erikseen sekä näiden keskiarvo. Kuvista L3, L4 ja L6 huomataan, että koekappale on murtunut epäkeskeisesti, koska murtohetkellä toisen pinnan liukuma on pienentynyt (käyrä kääntynyt kuvassa vasemmalle). Tämä on johtunut liitoksen kapasiteetin epäkeskeisyydestä. Poikkeus on kuvassa L5, jossa liitoksen molemmat puolikkaat ovat painuneet murtoon saakka melko tasaisesti. Tässä kokeessa saatiin myös suurin murtokuorma. Kokeessa 4 (kuva L6) saatu pienin murtokuorma johtuu siitä, että vaarnatapit olivat liitoksessa epäkeskeisesti, koska liitosta tehtäessä vaarnatapeille poratut reiät olivat jääneet liian mataliksi. Liitokset pettivät, kun puun reunapuristuslujuus ei riittänyt. Teräslevyt eivät nurjahtaneet eivätkä lommahtaneet.



Kuva L2. Puristuskokeissa mitatut puuosien väliset liukumamat kuormituksen funktiona.

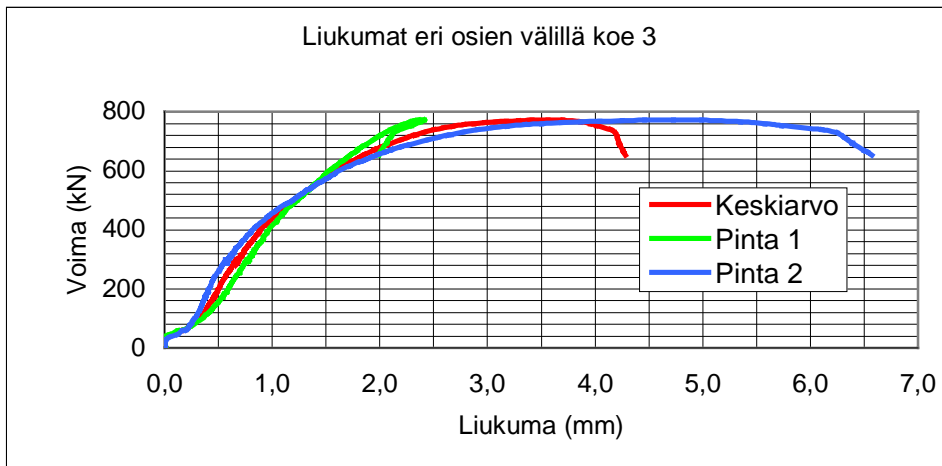


Kuva L3. Puristuskokeissa 1 mitatut puuosien väliset liukummat kummastakin pinnasta ja keskiarvo kuormituksen funktiona.

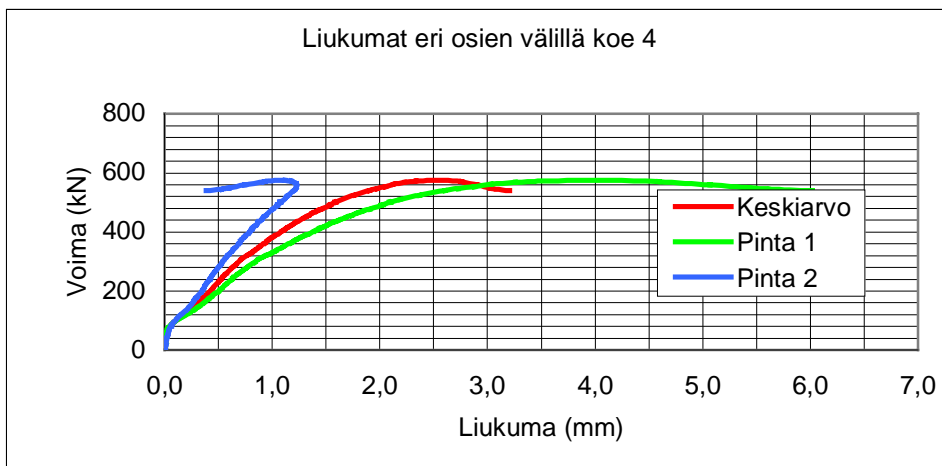


Kuva L4. Puristuskokeissa 2 mitatut puuosien väliset liukummat kummastakin pinnasta ja keskiarvo kuormituksen funktiona.

## Liite 1



Kuva L5. Puristuskokeissa 3 mitatut puuosien väliset liukummat kummastakin pinnasta ja keskiarvo kuormituksen funktiona.



Kuva L6. Puristuskokeissa 4 mitatut puuosien väliset liukummat kummastakin pinnasta ja keskiarvo kuormituksen funktiona.

## Vetokokeet

Vetokokeekappaleissa oli kuormitushetkellä seitsemän vaarnatappia, jotka olivat samoissa kohdissa liitosta kuin siinä liitoksessa, josta sortuminen alkoi. Vetokokeen kuormitusjärjestely on esitetty kuvassa L7. Koekappale oli kiinnitetty kummastakin päästä vetokoneen kitkaleukoihin. Vetokappaleen toiseen päähän rakennettiin apuliitos, joka siirsi vetovoimat puuosilta vetokoneeseen kiinnitettyyn teräkseen. Kuormitusta nostettiin tasaisella nopeudella siten, että koekappale murtui noin 15 minuutin kuluttua kuormituksen aloittamisesta. Tutkitusta liitoksesta mitattiin siirtymät puuosien ja teräksen välillä koekappaleen kummaltakin puolelta kuormituksen funktiona.



Kuva L7. Vetokokeiden kuormitusjärjestely. Tutkittava liitos on kuvassa vasemmalla ja oikealla näkyvä liitos on kokeen vaatima apuliitos.

Taulukossa L2 on esitetty saadut koetulokset. Murtotavat ilmenevät kuvasta L8. Koekappale R1 murtui siten, että siihen tuli halkeama peräkkäisten pulttien välille ja koekappale K1 murtui siten, että vaarnatapid painuivat puuhun toisella reunalla, koska liitos oli työvirheen vuoksi epäkeskeinen.

Taulukko L2. Murtokuormat, puun tiheydet murtoalueella ja puun kosteus.

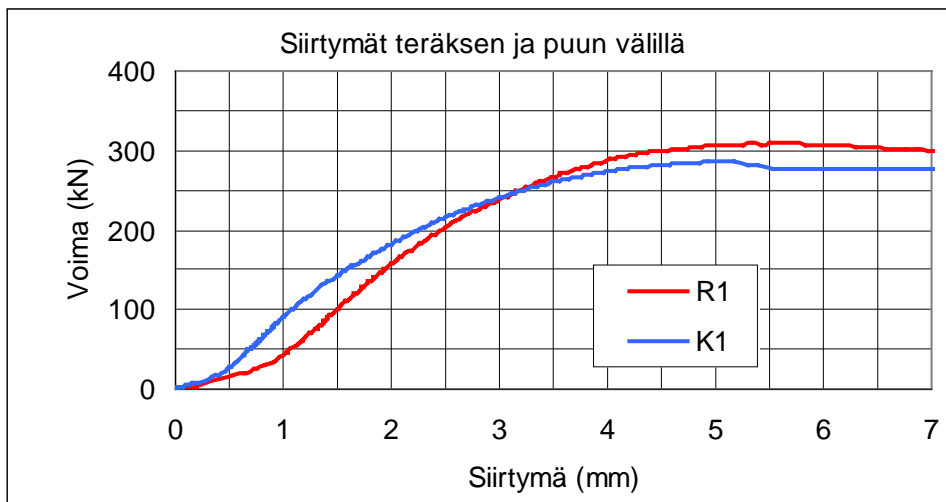
	Murtokuorma (kN)	Puun tiheys $\rho_u$ (kg/m <sup>3</sup> )	Puun kosteus $u$ %
R1	309,2	407	10,8
K1	287,3	411	11,1

# Liite 1

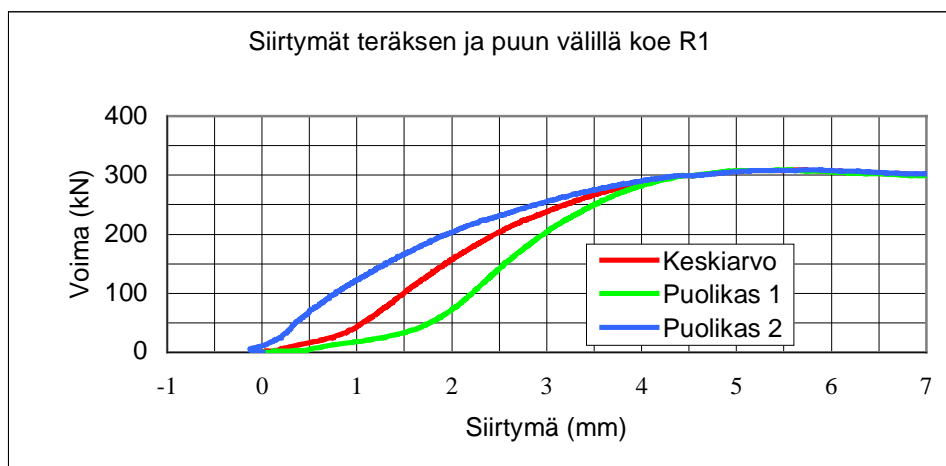


Kuva L8. Vetokokeiden murtotavat.

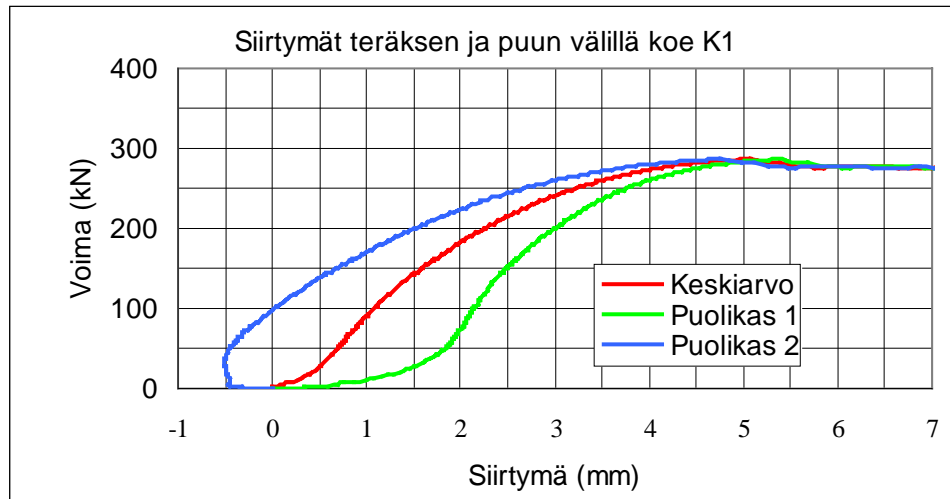
Vetokokeissa mitatut siirtymät on annettu kuvissa L8-L10.



Kuva L8. Vetokokeissa mitatut teräksen ja puun väliset liukumät kuormituksen funktiona.



Kuva L9. Vetokokeessa R1 mitatut teräksen ja puun väliset liukumät kuormituksen funktiona kummassakin puolikkaassa erikseen ja keskiarvo.



Kuva L10. Vetokokeessa K1 mitatut teräksen ja puun väliset liukumät kuormituksen funktiona kummassakin puolikkaassa erikseen ja keskiarvo.

## LÄHDELUETTELO

Seuraavat lähteet on taltioituna Onnettomuustutkintakeskuksessa:

1. Päätös tutkinnan aloittamisesta B 2/2003 Y, 4.2.2003 ja päätös tutkintalautakunnan täydentämisestä 14.2.2003.
2. Onnettomuusilmoitus Onnettomuustutkintakeskuksen päivystäjälle 1.2.2003.
3. Liimapuuristikoiden koskeva tarjous 8.2.2002, tilaus/sopimus 13.2.2002 ja tilausvahvistus 20.2.2002.
4. Kattorakenteita koskeva pääurakoitsijan ja kattorakenteiden toimittajan välinen sopimus, 5.3.2002.
5. Päätös rakennusluvasta 20.2.2002.
6. Kattoristikoiden ja –palkkien asennussuunnitelma, 7.5.2002.
7. Asentajalle tarkoitetut piirustukset kattoelementtien asennuksesta, fax. 15.5.2002.
8. Vaarnatappien vetokokeiden tulokset, 17.4.2003.
9. Pääurakoitsijan tekemä reklamaatio ristikkolinjalla 31 havaitusta viasta 4.12.2002, siihen saadut kirjalliset vastaukset 13.12.2002 ja 9.1.2003 sekä tekniset tiedot tappien paikallistamiseen käytetystä Hilti PS 20 laitteesta.
10. Rakennustyömaan päiväkirja.
11. Säätiiedot Jyväskylässä 29.1.2003 – 1.2.2003 ja säätiiedot lentoasemalta 12/2002 – 1/2003.
12. Häätäkeskuksen tehtäväilmoitukset (3 kpl) ja hälytysseleste.
13. Pelastuslaitoksen onnettomuusseleste.
14. Jyväskylän Messut Oy, Suojelusuunnitelma 10.11.1997.
15. Onnettomuutta edeltävien Next Step –messujen näytteilleasettajien sijoittuminen B-halliin.
16. Alkuperäiset puhtaaksikirjoittamattomat muistiinpanot ristikkoiden liitosten paikkatutkinnasta.
17. Jyväskylän Paviljonki, messu- ja kongressikeskuksen esite.
18. Rakennustekniikka-lehden 5/2001 artikkeli: Puurakenteiden uudet liitostekniikat.
19. Rakennusta ja sen yksityiskohtia koskevat suunnitelmat ja piirustukset.
20. Rakennuttajakonsultin kansio, jossa mm. Suomen pelastusalan keskusjärjestön lausunto messuhallin paloturvallisuudesta, pöytäkirjoja, urakkasopimuksia, aikatauluja, työmaan laatusuunnitelma, sopimusehtoja, tarjouspyyntöjä, urakkatarjouksia, työtur-



vallisuusliite, suunnitteluohjelma sekä rakennuttajakonsultin ja rakennuttajan välinen sopimus, rakennuttajakonsultin tarjous ja hankesuunnitelma.

21. Ympäristöministeriön VTT:ltä tilaama lausunto Eurocode 5 esistandardiin tarvittavista lisäohjeista 9.6.2003.
22. Pääurakoitsijan Teknilliseltä korkeakoululta tilaama lausunto kattorakenteesta 8.4.2003 ja kattoristikon R38 koekuormitus 12.5.2003 sekä kattoristikoiden suunnittelijoiden näkemys kyseisestä selvityksestä 27.6.2003.
23. Valokuvia.
24. Lausunnot tutkintaselostusluonnoksesta:
  - Ympäristöministeriön lausunto 7.5.2004
  - Sisäasiainministeriön lausunto 7.5.2004
  - Sosiaali- ja terveysministeriön lausunto 21.4.2004
  - Messuhallin omistajan kommentit 6.5.2004
  - Pääsuunnittelijan kommentit 30.4.2004
  - Pääurakoitsijan kommentit 5.5.2003
  - Kattoristikoiden suunnittelijan kommentit 30.4.2004