



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATTI PARIKKA  
LAAJARUNKOISEN RAKENNUKSEN RAKENTEELLINEN TUR-  
VALLISUUS ARVIOIMALLA RAKENTEEN VAURIONSIIETOKYKYÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytyt  
2. toukokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**MATTI PARIKKA:** Laajarunkoisen rakennuksen rakenteellinen turvallisuus arvioimalla rakenteen vaurionsietokykyä  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 102 sivua, 1 liitesivu  
Toukokuu 2018  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennesuunnittelu  
Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

Avainsanat: tarkastus, turvallisuus, vaurionsietokyky

Laajarunkoisten rakennusten turvallisuus on noussut suureksi yhteiskunnalliseksi keskustelun aiheeksi. Viime aikaiset kattosortumien aiheuttamat ihmishenkeä uhkaavat vaaratilanteet sekä taloudelliset ja ympäristövahingot ovat herättäneet huolen rakentamisen ja suunnittelun laadusta. Rakennukset ja rakennettu ympäristö muodostavat yhteiskuntamme suurimman kansallisvarallisuuden, joten viranomaiset ja rakennusala ovat päättäneet kehittää sen turvallisuuteen liittyvää tarkastustoimintaa. Rakennusten turvallisuuteen on tehty parannuksia nykyaikaisten suunnittelunormien ja viranomaismääräysten muodossa, mutta etenkin vanhemmassa rakennuskannassa on havaittu selkeitä puutteita.

Laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastus tuli lakimääräiseksi kaikkiiin rakennuksiin, joita käytetään käyttötarkoituksensa mukaan urheilu-, virkistystai vapaa-ajan toimintaan, kaupan palvelujen tarjoamiseen tai muuhun vastaavaan kokoontumiseen taikka eläinsuojana. Laissa on määritelty lain piiriin kuuluvien rakennusten vähimmäispinta-ala sekä pääkannattajan jännevälin vähimmäispituus.

Työn tavoitteena oli tutkia rakenteelliseen turvallisuuteen liittyviä tekijöitä vaurionsietokyvyn kannalta ja tehdä niihin liittyvä tarkastus olemassa olevaan rakennukseen arvioimalla rakenteen vaurionsietokykyä. Tavoitteena oli myös muodostaa suunnitelmien tarkastuksesta toimintamalli, jonka avulla rakennuksen vaurionsietokyky olisi arvioitavissa. Lisäksi tavoitteena oli pyrkiä esittämään niiden perusteella keinoja käytännön suunnitteluun. Rakenteellisen vaurionsietokyvyn arvioinnissa otettiin huomioon kirjallisuudessa esitettyjen keinojen avulla todettavat vaurionsietokyvyn vaikuttavat tekijät.

Tutkimuksen johtopäätöksenä voidaan todeta, että laajarunkoisten rakennusten vaurionsietokyky perustuu ensisijaisesti paikallisen vaurion rajaamiseen hyväksyttävään laajuuteen, etenkin hallimaisissa rakennuksissa, jotka ovat rakennettu esivalmistetuista elementeistä. Kokonaisstabiliteetin varmistaminen ja mahdollisuus kuormien uudelleen jakautumiseen odottamattomissa tilanteissa ovat merkittäviä parannuskeinoja rakennuksen turvallisuuden kannalta. Lisäksi suunnittelun ja rakentamisen huolellisella tarkastuksella ja valvonnalla pystytään ennaltaehkäisemään rakenteen vaurioon ja jopa sortumaan johtaneita syitä.

## ABSTRACT

**MATTI PARIKKA:** The structural safety of the long-span buildings by estimating ductility

Tampere University of Technology

Masters of Science Thesis, 102 pages, 1 Appendix page

May 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

**Keywords:** assessment, safety, ductility

The safety of the long-span buildings has become a major theme in Finnish society. Recent structural collapses, which have endangered human lives and caused economic or environmental damages, have brought up the quality of construction as well as designing. Buildings and constructed environment are the biggest national property of our society, therefore officials and construction branch have decided to develop the action of structural safety assessment. The structural safety of buildings has increased in modern buildings by designing new standards and regulations but there are still severe problems especially in older buildings.

The assessment of the structural safety of long-span buildings became obligatory in all buildings, which are used in sports or free time activity, sale services, animal covering or any other activity, which involves human gathering. The size of the building and the length of the main girder's span are defined by the law.

The primary aim of this study was to examine the ductility of the structures and to clarify the methods how structural ductility is actually used in buildings. The aim of this study was also to make the safety assessment of a real building by estimating its structural ductility. Additionally, the aim was to develop a procedure of structural designing assessment by estimating structural ductility. Another purpose for this study was to provide practical advice for robust designing. Structural ductility estimation was considered with the methods based on the survey from the literature.

As a conclusion, it can be stated that the ductility of long-span buildings is based primarily on the partial collapse limitation, especially in buildings, which are constructed from pre-fabricated elements. Maintaining the overall stability and the possibility of alternative load paths in unexpected situations are the key elements of improving structural safety. In addition, the survey of designing and construction is the most effective way to prevent errors, which may lead to structural failure.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteenä Tampereen teknillisen yliopiston talouden ja rakentamisen tiedekuntaan diplomi-insinöörin tutkintoon. Työn on toimeksi antanut ja rahoittanut Insinööritoimisto Jorma Jääskeläinen Oy.

Työn tarkastajana on toiminut professori Anssi Laaksonen Tampereen teknilliseltä yliopistolta.

Kiitokset työni tarkastajalle ja toimeksi antajalle saaduista kommenteista ja käydyistä keskusteluista. Kiitokset myös Pirkanmaan Osuuskaupan Johanna Häikiölle sujuvasta kiinteistöjen tarkastukseen liittyvästä asian hoidosta.

Projekti, jonka huipennuksena on tämä diplomityö, on kuuden vuoden aikana koetellut niin huumorintajuani, kuin paineenhallintakykyäni. Ilman perheeni, ystäväni ja opiskelutoverini kiistatonta tukea en olisi tästä matkasta selvinnyt, joten haluan esittää heille sydämelliset kiitokseni. Erityiskiitokset haluan osoittaa ennen kaikkea avovaimolleni ja tyttärelleni, joiden tuki ja hymy ovat olleet korvaamaton apu työssäni.

Tuplainsinöörin matka jatkuu!

Tampereella, 20.5.2018

Matti Parikka

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
1.1	Työn tausta .....	1
1.2	Työn tavoite.....	3
1.3	Työn rajaus .....	3
2.	TARKASTUSTOIMINNAN LAINSÄÄDÄNTÖ JA MENETTELYTAVAT.....	5
2.1	Rakennusten katsastusmenettelyn lähtökohdat .....	5
2.1.1	Erityismenettely .....	7
2.1.2	Laadunvarmistusselvitys .....	8
2.1.3	Asiantuntijatarkastus .....	9
2.1.4	Ulkopuolinen tarkastus.....	9
2.1.5	Vertailukohtat muihin aloihin .....	10
2.2	Laki laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista ..	14
2.2.1	Lain sisältö .....	14
2.2.2	Lain perusteluja .....	14
2.3	Tarkastusmenettelyn vaiheet .....	15
2.3.1	Tarpeen arviointi .....	16
2.3.2	Tarkastukset .....	17
2.3.3	Tarkastuksen raportointi.....	18
3.	RAKENTEELLINEN VAURIONSIIETOKYKY .....	19
3.1	Määritelmä .....	19
3.2	Sortumaan johtavat syyt ja niiden välttäminen .....	19
3.2.1	Jatkuva sortuma .....	20
3.2.2	Virhealttius rakennuksen elinkaaren aikana .....	20
3.3	Onnettomuusrajatilamitoitus .....	24
3.3.1	Riskianalyysi .....	25
3.3.2	Seuraamus- ja luotettavuusluokat.....	26
3.4	Sitkeiden rakenteiden teoria .....	30
3.4.1	Lujuus .....	30
3.4.2	Rakenteellinen jatkuvuus ja yhteistoiminta.....	31
3.4.3	Kuormansiirtotavan sisäinen muutos .....	31
3.4.4	Vaihtoehtoiset kuormien siirtymisreitit .....	32
3.4.5	Muodonmuutoskyky haurasmurtoa vastaan.....	33
3.4.6	Jatkuvan sortuman pysäytys.....	34
3.4.7	Sulake-elementti.....	35
3.4.8	Suojarakenteet .....	35
3.4.9	Jäykkyydeltä tarkastelu .....	35
3.4.10	Myötölujuutumisen hyödyntäminen .....	37
3.4.11	Valvonta, nopea reagointi ja evakuointi.....	38
3.4.12	Testaus.....	39

3.4.13	Mekaaniset laitteet.....	39
3.5	Rakennuksen vaurionsietokyvyn käytännön ratkaisut .....	39
3.5.1	Rakennejärjestelmä .....	40
3.5.2	Lisävaakavoimat.....	40
3.5.3	Kuvitteellinen rakenneosan poistaminen .....	42
3.5.4	Hyväksyttävä paikallinen vaurio .....	45
3.5.5	Sidejärjestelmät .....	47
3.5.6	Mitoitus avainasemassa .....	52
3.5.7	Kuormitustapaukset, -yhdistelmät ja osavarmuuskertoimet .....	52
4.	RAKENTEELLINEN TURVALLISUUS ULKOMAILLA .....	54
4.1	Tarkastustoiminta ulkomailla .....	54
4.2	Esimerkkejä sortuneista rakennuksista.....	57
4.2.1	Hartford Civic Center, Yhdysvallat .....	57
4.2.2	Murrah Federal Office Building, Yhdysvallat .....	61
4.2.3	Katowicen messuhalli, Puola .....	64
5.	HALLIMAISTEN RAKENNUSTEN VAURIOT JA NIIDEN TORJUNTA.....	69
5.1	Yleistä.....	69
5.1.1	Riskitekijät .....	70
5.1.2	Suosittelvat toimintaperiaatteet .....	70
5.2	Teräsrunkoiset hallimaiset rakennukset .....	72
5.2.1	Tyypilliset vauriomallit .....	72
5.2.2	Sivusiirtyminen ja pilarirungon siirtymätilan huomiointi.....	73
5.2.3	Kattojen orsirakenteet .....	74
5.3	Betonielementtirunkoiset hallimaiset rakennukset.....	75
5.3.1	Vaurioskenaariot ja menettelytavat.....	76
5.3.2	Vaurionsietokyvyn parantaminen .....	77
5.4	Rakenteiden liitosten vaurionsietokyky .....	77
6.	RAKENTEIDEN VAURIONSIEKOKYVYN ARVIOINTI.....	81
6.1	Tarkastusprosessin kulku .....	81
6.2	Betonielementtirakenteinen myymälärakennus .....	82
6.3	Teräsrakenteinen myymälärakennus .....	89
7.	YHTEENVETO .....	96
	LÄHTEET.....	98
	LIITTEET.....	102

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Laukaan maneesi romahti äkillisesti 13.2.2013. [46].....</i>	2
<b>Kuva 2.</b>	<i>Taitorakenteen suunnitelman tarkastamis- ja hyväksymisprosessi. [37] ....</i>	13
<b>Kuva 3.</b>	<i>Lakisääteisen rakenteellisen turvallisuuden arvioinnin kulku. [33].....</i>	16
<b>Kuva 4.</b>	<i>Asiantuntijan arvioinnin kulku.....</i>	18
<b>Kuva 5.</b>	<i>Kaavio jatkuvan sortuman etenemisestä. [31].....</i>	20
<b>Kuva 6.</b>	<i>Rakennuksen elinkaari jaettuna kolmeen pääosaan. ....</i>	21
<b>Kuva 7.</b>	<i>Riskienhallinnassa käytetty onnettomuuskausaliteetin ”Swiss Cheese”-malli. [9].....</i>	21
<b>Kuva 8.</b>	<i>Turvallisuutta koskeviin virheisiin johtavat syyt rakennuksen elinkaaren aikana.....</i>	23
<b>Kuva 9.</b>	<i>Virheiden eliminointi rakennuksen elinkaaren aikana.....</i>	23
<b>Kuva 10.</b>	<i>Onnettomuusrajatilan mitoituksen kulku. [41] .....</i>	24
<b>Kuva 11.</b>	<i>Sitkeän materiaalin toiminta. [17].....</i>	33
<b>Kuva 12.</b>	<i>Riittävän muodonmuutoskyvyn suunnittelu. [17].....</i>	34
<b>Kuva 13.</b>	<i>Yhdistelmärunгон toiminnan vertailu pelkkään momenttijäykkään kehään. [17].....</i>	36
<b>Kuva 14.</b>	<i>Myötölujittuminen myötörajan ylityttyä. [17].....</i>	37
<b>Kuva 15.</b>	<i>Korkealujuusteräksen jännitys-venymä-käyrä. [17].....</i>	38
<b>Kuva 16.</b>	<i>Rakennuksen ekvivalentit sivusiirtymät. [42].....</i>	41
<b>Kuva 17.</b>	<i>Rakennuksen alkusiirtymästä ja -epätarkkuudesta aiheutuva vaakakuorma. [42].....</i>	42
<b>Kuva 18.</b>	<i>Rakennuksen rungon sidejärjestelmä. [28].....</i>	43
<b>Kuva 19.</b>	<i>Köysivaikutuksen muodostuminen palkissa. [24] .....</i>	43
<b>Kuva 20.</b>	<i>Välipohjan toiminta köysivaikutuksen avulla. [28].....</i>	44
<b>Kuva 21.</b>	<i>Tyypillinen teräsbetonipalkin kuorma-taipuma-käyrä. [24].....</i>	44
<b>Kuva 22.</b>	<i>Mahdolliset tasojen sortumamallit: a) yhden tuen menetys b) molempien tukien menetys. [28].....</i>	45
<b>Kuva 23.</b>	<i>Hallimaisen kaksilaivaisen rakennuksen paikallisen vaurion hyväksyttävä raja. [44] .....</i>	46
<b>Kuva 24.</b>	<i>Pilari-palkki-runkoisen rakennuksen sidejärjestelmä. [4].....</i>	47
<b>Kuva 25.</b>	<i>Sidevoiman kertymäleveyden s määrittäminen vaakasiteiden voimien laskennassa. [44] .....</i>	48
<b>Kuva 26.</b>	<i>Mitan z määrittäminen vaakasiteiden voimien laskennassa. [44].....</i>	49
<b>Kuva 27.</b>	<i>Sidevoiman kertymäleveyden s määrittäminen seinien ja pilarien sidontavoiman laskennassa. [44].....</i>	50
<b>Kuva 28.</b>	<i>Pilarin pystysuuntainen sidonta yläpuoliseen rakenteeseen. [4].....</i>	51
<b>Kuva 29.</b>	<i>Tarkastusten tarkkuustasot. [34].....</i>	56
<b>Kuva 30.</b>	<i>Hartford Civic Centerin katto sortui 18.1.1978. [13].....</i>	57
<b>Kuva 31.</b>	<i>Katon avaruusristikon moduuli. [13].....</i>	58
<b>Kuva 32.</b>	<i>Vaakaleikkaus kattorakenteesta ja sen tuennasta. [12].....</i>	59

<b>Kuva 33.</b>	<i>Asennettujen diagonaali- ja vaakasauvojen liitosdetaljit erosivat merkittävästi suunnitelluista. [13]</i> .....	60
<b>Kuva 34.</b>	<i>Murrah Federal Office Building kärsi osittaisen sortuman. [14]</i> .....	61
<b>Kuva 35.</b>	<i>Murrah Federal Buildingin pohjakuva. [27]</i> .....	62
<b>Kuva 36.</b>	<i>Kadun puoleisen julkisivun rakenne. [27]</i> .....	62
<b>Kuva 37.</b>	<i>Paineaallon vaikutus vasemmalla ja sen jälkeisen painovoiman vaikutus oikealla. [27]</i> .....	63
<b>Kuva 38.</b>	<i>Katowicen messuhalli katastrofin jälkeen. [5]</i> .....	65
<b>Kuva 39.</b>	<i>Aksonometria Katowicen messuhallista. [5]</i> .....	65
<b>Kuva 40.</b>	<i>Messuhallin rakenteen pohjakuva ja leikkaus. [5]</i> .....	66
<b>Kuva 41.</b>	<i>Pilarin ja ristikoiden liitos. [5]</i> .....	67
<b>Kuva 42.</b>	<i>Järjestelmän kytkennät a) sarjaan ja b) rinnan. [5]</i> .....	68
<b>Kuva 43.</b>	<i>Tyypilliset teräs- ja betonirunkoisten hallien rakennejärjestelmät</i> .....	69
<b>Kuva 44.</b>	<i>Erilaisten kehätyyppien vauriomuotoja ennen muuttumista mekanismiksi ja sortumaa. [32]</i> .....	73
<b>Kuva 45.</b>	<i>Kehän sivusiirtyminen tason suunnassa vaaka- ja pystykuorman vaikuttaessa. [10]</i> .....	73
<b>Kuva 46.</b>	<i>Rakenteen kuormitus-muodonmuutoskäyrä a) poikkileikkausluokassa 1 b) poikkileikkausluokassa 3 ja 4. [20]</i> .....	74
<b>Kuva 47.</b>	<i>Moniaukkoisen vesikattoelementin toiminta pääkannattajan sortuman jälkeen. [31]</i> .....	75
<b>Kuva 48.</b>	<i>Palkin nurjahtanut raudoitus harjalla. [1]</i> .....	76
<b>Kuva 49.</b>	<i>Puristettujen pääterästen vajaa sidonta ja ankkurointi. Haka 'a' jää päätankojen päiden väliin. [2]</i> .....	77
<b>Kuva 50.</b>	<i>Suuntaa antava kuvaaja kolmen eri liitoksen kiertymiskyvystä. <math>M_{el,Rd}</math> on liitoksen myötömomentti tai murtorajatilaa vastaava kestävyys. [31]</i> .....	78
<b>Kuva 51.</b>	<i>Paarteista repeytyi irti diagonaaleja siten, että pala paarretta leikkautui irti ja jäi kiinni diagonaalin päähän. [3]</i> .....	79
<b>Kuva 52.</b>	<i>Yläpohjan paikallisen vaurion raja</i> .....	83
<b>Kuva 53.</b>	<i>TT-laattojen pituussuuntaisen sauman sidonta</i> .....	84
<b>Kuva 54.</b>	<i>TT-laattojen päätysaumojen sidonta</i> .....	85
<b>Kuva 55.</b>	<i>Ontelolaatan ja jännebetonileukapalkin välinen liitos</i> .....	85
<b>Kuva 56.</b>	<i>Vaakasiteet ontelolaattojen saumassa ja pilarikaistalla</i> .....	86
<b>Kuva 57.</b>	<i>Nurkkapilarin sidonta vaakarakenteeseen</i> .....	86
<b>Kuva 58.</b>	<i>TT-laatan sidonta HI-palkkiin sallii kiertymän, mutta tuelta putoaminen on estetty. Toisen pään liitos TT-laatan rivin toisella puolella</i> .....	87
<b>Kuva 59.</b>	<i>Pääkannattajat sidottu pilareihin</i> .....	87
<b>Kuva 60.</b>	<i>Leukapalkin liitos yläpohjaan jatkuvaan pilariin. Valokuvassa liitos reunapilariin</i> .....	88
<b>Kuva 61.</b>	<i>Leukapalkin liitos välipohjaan päättyvään pilariin</i> .....	88
<b>Kuva 62.</b>	<i>HI-palkin harja-alue on ehjä ja halkeilematon</i> .....	89



<b>Kuva 63.</b>	<i>Vesikaton elementit ovat moniaukkoisia, jolloin kuormien uudelleen jakautuminen on mahdollista.</i>	90
<b>Kuva 64.</b>	<i>Kattoelementtien kiinnityksessä puutteita.</i>	90
<b>Kuva 65.</b>	<i>Keskialueen pilarin liitos primääri- ja sekundääriristikoon.</i>	91
<b>Kuva 66.</b>	<i>Primääriristikon alapaarteen liitos pilariin.</i>	91
<b>Kuva 67.</b>	<i>Sekundääriristikon liitos primääriristikoon.</i>	92
<b>Kuva 68.</b>	<i>Primääriristikko on kiinnitetty päätykehän pilariin suunnitelmien mukaisesti.</i>	93
<b>Kuva 69.</b>	<i>Sekundääriristikon liitoksessa reunapilariin ei havaittu vaurioita.</i>	93
<b>Kuva 70.</b>	<i>Reunimmaisena kehävälillä vesikattotason suuntaisen ristikon suunnitelmien mukainen liitos sekundääriristikoon.</i>	94
<b>Kuva 71.</b>	<i>Seinälinjan ja vesikattotason vinosauvojen liitoksissa ei havaittu vaurioita.</i>	94
<b>Kuva 72.</b>	<i>Hitsausliitosten kunto.</i>	95

## LYHENTEET JA SELITTEET

ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus
FISE	Rakennus-, LVI- ja kiinteistöalan henkilöpätevyudet FISE Oy
MRL	Maankäyttö- ja rakennuslaki
OTK	Onnettomuustutkintakeskus
<i>Kapasiteetti</i>	Rakenneosan suurin mahdollinen kyky siirtää kuormaa.
<i>Kimnoteoria</i>	Teoria, jossa oletetaan materiaalin muodonmuutoksen olevan lineaarinen myötöraajajännitykseen saakka ja muodonmuutos palautuu alkuperäiseen tilaan kuormituksen poistuttua eli Hooke'n laki on voimassa.
<i>Monoliittisuus</i>	Rakenteen ominaisuus jakaa paikallisia rasituksia mahdollisimman monien rakenneosien kesken perustuen joko rakenteen staattiseen määräämättömyyteen tai rakenneosien välisten liitosten sitkeyteen tai molempiin.
<i>Muodonmuutos</i>	Rakenteen muodon vääristyminen jännityksen vaikutuksesta.
<i>Kausaliteetti</i>	Syy-seuraussuhde.
<i>Plastisuusteoria</i>	Teoriassa rakenteelle hyväksytään myötöraajajännityksen ylityminen sallimalla plastisten nivelten muodostuminen. Tämä edellyttää rakenteelta muodonmuutoskykyä ja sitkeyttä. Plastisten nivelten periaatteella rakenteelle määritellään raja-kuorma, joka vastaa sellaisten sisäisten momenttien jakautumaa, joka on tasapainossa ulkoisen kuorman kanssa ja jossa sisäiset momentit eivät missään poikkileikkauksessa ole suurempia kuin sen taivutuskestävyys tai plastinen momentti.
<i>Sitkeys</i>	Rakenneosan kyky kestää edelleen se kuormitus, joka on kertynyt siihen ennen paikallista vauriota.
<i>Stabiliteetti</i>	Rakenteen tai rakennejärjestelmän vakavuus, tasapainotila.
<i>Toisen kertaluvun teoria</i>	Toisen kertaluvun teoriassa rakenteelle määritetään taipumista ja siirtymistä syntyvä lisämomentti.

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Diplomityön ajankohtana suomalaisen rakentamisen laatua on kyseenalaistettu toistuvien rakennus- ja suunnitteluvirheiden sekä kelvottomien rakennusmateriaalien käytöstä johtuen. Tästä esimerkkeinä ovat rakennusten sisäilma- ja kosteusongelmat sekä valmisbetonin lujusongelmat. Rakentamisen laatuvirheisiin johtaneita syitä on monia, mutta yleisesti voidaan sanoa, että rakennushankkeiden ketjutus ja sitä kautta vastuun jakaminen useiden toimijoiden kesken aiheuttaa tiukentuneiden aikataulujen vaikutuksella laatuvirheitä. Yhteiskunnallinen keskustelu suomalaisen rakentamisen laadusta on hyvin epäileväistä ja laadun parantamiseksi pyritäänkin kehittämään uusia ratkaisuja ja toimintamalleja. Tässä diplomityössä keskeisin rakentamisen laatuun vaikuttava tekijä on rakenteiden kantavuus ja siihen liittyvät ongelmat.

Rakennusten kantavien rakenteiden suunnittelu ja toteutus kuuluvat niihin rakentamisen osa-alueisiin, joissa virheet voivat aiheuttaa erittäin vakavia seuraamuksia, jopa ihmisten menetyksiä. [31] Olemassa olevien rakennusten kantavien rakenteiden sortumat ja vakavat vauriot ovat yleistyneet 2000-luvun alusta lähtien. Ongelmia on esiintynyt etenkin kattorakenteissa, jotka ovat vaurioituneet talvisaikaan lumen aiheuttamasta kuormasta. Joissakin tapauksissa seuraukset ovat olleet erittäin tuhoisat. Vaurioiden syitä ovat olleet rakenteiden rappeutuminen sekä suunnittelussa ja toteutuksessa tapahtuneet vakavat virheet. Lisäksi kiinteistöjen huolto-ohjeet ovat olleet puutteellisia kantavien rakenteiden osalta. [33] Osa sortumistapauksista ovat olleet alakattojen tai katosten sortumia, joilla ei ole ollut vaaraa aiheuttaa rakennusten runkorakenteiden sortumaa, mutta niiden aiheuttamat henkilövahingot ja aineelliset vahingot ovat olleet vähintäänkin suuria.

Yksittäisen rakenneosan tai liitoksen vakava vaurio tai sortuma ei välttämättä ole katastrofaalista, mikäli vaurio pysyy paikallisena eikä se etene rakenneosalta toiselle hallitsemattomasti. Rakennusten kattosortumien onnettomuustutkinnat 2000-luvulla ovat osoittaneet, että kattorakenteiden laajat niin sanotut jatkuvat sortumat ovat johtuneet suunnittelussa ja toteutuksessa tehdyistä virheistä. Useammassa vauriotutkimuksessa on osoitettu, että suunnittelussa ei ole otettu huomioon paikallisen vaurion aiheuttamaa ennakoimatonta onnettomuuskuormitustilannetta, vaikka määräykset ja ohjeet näin edellyttävät. Tältä osin onkin tarvetta lisäohjeistukselle suunnittelukäytännön kehittämiseksi. [31] Ennakoimattoman onnettomuustilanteen hallinta ja toteutus rakennuksen suunnittelussa on kuitenkin äärimmäisen vaikeaa, etenkin jos käytetään uusia ja vähäisen käyttökokemuksen omaavia rakennusmateriaaleja, rakennejärjestelmiä tai niiden yhdistelmiä. Sen

vuoksi ensimmäinen askel rakenteen vaurionsietokyvyn parantamiseksi, on tunnettujen rakenteiden käyttö tunnetulla toiminta-alueella.

Helmikuussa vuonna 2013 tapahtui ratsastusmaneesirakennuksen äkillinen romahdus, joka osoittautui virheellisesti mitoitettujen kehärakenteiden nopeasti edenneeksi sortumaksi. Romahtanut maneesirakennus on esitetty kuvassa 1. Yksi ihminen menehtyi jäätyään romahtaneiden kattorakenteiden alle ja neljä ihmistä loukkaantui, joista kahden vammat luokiteltiin vakavaksi. [46] Romahtaneen rakennuksen rakenteet olivat hyvin tyypilliset vastaavanlaisille maneesirakennuksille.



**Kuva 1.** Laukaan maneesi romahti äkillisesti 13.2.2013. [46]

Onnettomuustutkintakeskuksen raportissa tutkinnan johtopäätöksissä nostettiin esiin huoli vastaavanlaisten rakennusten rakenteellisesta turvallisuudesta. Raportissa esitettiin, että halli- ja maneesirakennuksille kehitettäisiin rakenteellisen turvallisuuden tarkastusmenettely. Menettelyn tavoitteena olisi havaita mahdolliset riskirakenteet ja kriittisten vaurioiden esiasteet ennen, kuin sortumaa tapahtuisi. Vastaavanlaisen tarkastuksen tarvetta on esitetty jo aikaisemminkin tutkintaraporteissa, mutta vasta vuonna 2015 rakenteellisen turvallisuuden tarkastus tuli lakisääteiseksi. [46]

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry on julkaissut rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastamisesta tarkastusohjeen, jossa on käyty läpi tarkastukseen liittyvät asiat ja velvoitteet. Tarkastukseen ei kuitenkaan ole valmista toimintamallia, jonka avulla rakenteellinen turvallisuus voitaisiin varmistaa. Toimintamalli helpottaisi tarkastusten suorittamista sekä tekisi tutkimustuloksista vertailukelpoisia. Tarkastustoiminnan tueksi ja hyvän rakentamistavan edistämiseksi rakennus-, LVI- ja kiinteistöalan henkilöpalveluyksiyksiä toteava FISE Oy ylläpitää rakennusvirhepankkia, johon kerätään yleisimmiksi

ja turvallisuuden kannalta riskialttiimmiksi havaittuja rakennusvirheitä. Rakennusvirhepankin avulla pyritään karsimaan markkinoilta epäkelvoja ratkaisuja, joilla voi olla vaarantavia vaikutuksia rakennuksen turvallisuudelle.

Tässä diplomityössä käytetään aineistona ja esimerkkitapauksina Pirkanmaan Osuuskaupan omistamien rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastuksia. Pirkanmaan Osuuskauppa on yksi suurimmista pirkanmaalaisista kaupan toimintaan kuuluvien kiinteistöjen omistajista, jonka omistukseen kuuluu 37 kaupan myymälätoimintaan liittyvää rakennusta Pirkanmaalla. Rakennusten rakennejärjestelmät, pinta-alat ja tilavuudet vaihtelevat ja runkomateriaaleina on betoni, teräs ja puu.

## 1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on tutkia rakenteellisen turvallisuuteen liittyviä tekijöitä vaurionsietokyvyn kannalta ja tehdä niihin liittyvä tarkastus olemassa olevaan rakennukseen arvioimalla rakenteen vaurionsietokykyä. Tavoitteena on myös muodostaa suunnitelmien tarkastuksesta toimintamalli, jonka avulla arvioidaan rakenteen toimintaa myös vaurionsietokykyä arvioimalla. Lisäksi työn tavoitteena on selvittää hallimaisten laajarunkoisten rakennuksen vaurionsietokykyyn vaikuttavia tekijöitä ja pyritään esittämään niiden perusteella keinoja käytännön suunnitteluun. Rakenteellisen vaurionsietokyvyn arvioinnissa otetaan huomioon kirjallisuudessa esitettyjen keinojen avulla todettavat vaurionsietokykyyn vaikuttavat tekijät.

Työssä tutustutaan myös onnettomusrajatilamitoitukseen Suomessa käytettävien suunnittelustandardien avulla ja tutustutaan myös rakenteellisen turvallisuuden tarkastustoimintaan ulkomailta. Työssä esitellään myymälärakennuksille tavanomaisten teräs- ja betonirunkoisten rakennusten rakennejärjestelmien vaurioriskit sekä niitä ennaltaehkäisevät toimenpiteet.

Diplomityö tehdään pääosin kirjallisuustutkimuksena yhdistettynä havainnoivaan tutkimukseen.

## 1.3 Työn rajaus

Työssä tarkastellaan tyypillisten laajarunkoisten myymälärakennusten rakenteellista turvallisuutta arvioimalla rakenteen ja rakennejärjestelmän vaurionsietokykyä. Laajarunkoisten rakennuksen määritelmänä tässä työssä käytetään Maankäyttö- ja rakennuslain mukaista määritelmää. Rakenteellisen turvallisuuden arviointiin käytetään kirjallisuudesta havaittujen vaurionsietokykyyn vaikuttavia keinoja. Työssä tutustutaan rakenteelliseen sitkeyteen ja sen saavuttamiseen rakenteissa käytännön esimerkein.

Laajarunkoisten rakennusten rakennejärjestelmien ja rakennusmateriaalien variaatioiden laajuus huomioon ottaen työstä rajataan pois kaikki puurakenteiset rakennukset ja keskitytään tyypillisiin betoni- ja teräsrakenteisten laajarunkoisten rakennusten runkorakenteisiin. Esimerkkikohteina työssä käytetään kahta eri materiaaliltaan erilaista myymälärakennusta, joista toinen on teräsristikko-teräspilari-runkoinen ja toinen HI-palkki-betonipilari-runkoinen.

Suunnitelmien tarkastuksessa keskitytään rakennesuunnitelmiin ja niiden sisältöön. Tarkastuskäynneillä keskitytään havaitsemaan rakennuksesta suunnitelmien mukaiset vauri-  
onsietokykyä parantavat tekijät.

Työssä ei tarkastella rakennuksen toissijaisia rakenteita, kuten katoksia ja ripustuksia. Myös talotekniset järjestelmät ja niiden tarvitsemat rakenteet rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

## 2. TARKASTUSTOIMINNAN LAINSÄÄDÄNTÖ JA MENETTELYTAVAT

Tässä luvussa tutustutaan lakiin ja viranomaismääräyksiin, jotka velvoittavat laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arviointiin. Laki laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista tuli voimaan 1. päivä huhtikuuta 2015. Lain voimaantuloon vaikutti monet taloudellisiin tai henkilövahinkoihin johtaneet onnettomuudet, joista valtaosa olisi voitu ehkäistä tapahtumasta asianmukaisella ja järjestelmällisellä rakennusten katsastusmenettelyllä. [35]

### 2.1 Rakennusten katsastusmenettelyn lähtökohdat

Esiselvitys rakenteellisen turvallisuuden parantamiseksi katsastusmenettelyn avulla julkaistiin vuonna 2008. Selvityksen avulla pyrittiin kartoittamaan katsastusmenettelyn tarvetta ja nostamaan esille menettelyn ja toteutuksen tarvittava sisältö. Lähtökohtana oli vuosituhaten alussa tapahtuneet kattosortumat ja niiden tutkimukset ja selvitykset. OTK:n vuonna 2006 tehdyn raportin johtopäätösten mukaan samaisen vuoden kattosortumat olisivat olleet ehkäistävissä tehostetun tarkkailun avulla. Tutkituissa tapauksissa rakennuksissa olevat ongelmat ja puutteet olisi todennäköisesti pystytty tunnistamaan katsastusmenettelyllä. Näin ollen kyseiseen raporttiin kirjattiin Ympäristöministeriölle selkeä vaatimus kehittää rakennusalalle rakennusten katsastusmenettely. [16]

Esiselvityksessä tehdyn tutkimuksen mukaan mahdollisia riskirakenteita sisältävät sekä onnettomuusseurauksiltaan merkittävät rakennukset Suomessa on esitetty taulukossa Taulukko 1 käyttötarkoituksiltaan jaoteltuna. Onnettomuusseurauksina tässä tapauksessa tarkoitetaan onnettomuudesta johtuvan rakennuksen sortumaa, josta koituu merkittäviä henkilö- tai taloudellisia vahinkoja tai ovat teknisesti vaativia käytön, huollon tai olosuhteiden kannalta. Taulukon perusteella voidaankin arvioida, että koko Suomen rakennuskannasta noin 13% on riskillisiä rakennuksia. [16]

*Taulukko 1. Rakennukset Suomessa käyttötarkoituksen mukaan 31.12.2015. Mahdollisia riskirakenteita sisältävät rakennukset korostettu taustavärillä. [16], [43]*

Käyttötarkoitus	Rakennusten lukumäärä (kpl)	Osuus kaikista rakennuksista (%)
KAIKKI RAKENNUKSET	1 505 138	100
<b>Asuinrakennukset yhteensä</b>	<b>1 283 291</b>	<b>85,3</b>
Erilliset pientalot	1 143 896	76,0
Rivi- ja ketjutalot	79 896	5,3
Asuinkerrostalot	59 499	4,0
<b>Muut rakennukset yhteensä</b>	<b>221 847</b>	<b>14,7</b>
Liikerakennukset	43 058	2,9
Toimistorakennukset	10 828	0,7
Liikenteen rakennukset	56 530	3,8
Hoitoalan rakennukset	8 756	0,6
Kokoontumisrakennukset	14 151	0,9
Opetusrakennukset	8 935	0,6
Teollisuusrakennukset	43 524	2,9
Varastorakennukset	30 429	2,0
Muut rakennukset	5 636	0,4

Taulukon 1 mukainen riskillisten rakennusten luokittelu ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen. Tilastollisesti ne ovat vaativuudeltaan korkean riskin rakennuksia koon, rakennejärjestelmän ja onnettomuusseurauksien vuoksi, mutta se ei suoranaisesti tarkoita, että ne olisivat vaarassa sortua. Saman käyttötarkoituksen rakennuksissa rakennejärjestelmien kirjo on varsin suuri, joten niiden vaurionsietokyky jo pelkästään sen perusteella vaihtelee.

Ympäristöministeriön ohjeet korkean riskitason rakennusten tarkastusmenettelyyn koskevat ensisijaisesti suunnitelmien ja toteutuksen tarkastukseen. Joskus ne toimenpiteet ovat kuitenkin liian myöhäisiä kiireellisten aikataulujen tai kustannusvaikutusten vuoksi. Tämän vuoksi suunnittelun ohjauksella on merkittävä rooli suunnittelun aikaisiin valintoihin jopa kantavien rakenteiden osalta. Valintoihin vaikuttaa usein taloudelliset tekijät. Suunnittelun ohjaajalla on oltava riittävä aikaisempi kokemus vastaavanlaisista rakennusprojekteista ja niiden suunnittelun ohjauksesta.



### 2.1.1 Erityismenettely

Korkean riskitason rakennusten rakentamisen ja suunnittelun tarkastus on Suomen lainsäädännössä otettu huomioon erityismenettelyn avulla. Erityismenettelyn ohjeissa annetaan esimerkkejä rakennuksista, jotka kuuluvat korkeimpaan riskitasoluokkaan, joita ovat: [16]

- Urheiluhallit, konsertti- ja kokousrakennukset, kauppahallit, muut vastaavat yleisötilat,
- korkeat rakennukset,
- urheilu- ym. katsomot,
- uimahallit ja kylpylät,
- suuret teollisuuskiinteistöt,
- suuret maatalousrakennukset.

Erityismenettelyllä tarkoitetaan rakennushankkeen suunnittelussa toteutettavaa suunnitelmien tarkastus- ja selvitystoimintaa uudis- tai korjaushankkeessa. Sitä voidaan edellyttää poikkeuksellisen vaativassa rakennushankkeessa, jos kohteeseen liittyy erityinen riski siitä, että rakenteellisen turvallisuuden, paloturvallisuuden, terveellisyyden tai rakennusfysikaalisen toimivuuden vaatimuksia ei saavuteta tai että kulttuurihistoriallisia arvoja menetetään. Erityismenettely on määritelty MRL 150 d §:ssä. [44]

Lähtökohtana useimmiten on, että rakennushankkeeseen ryhtyvä suunnittelijoinen on itse tunnistanut riittävän varhain erityisen riskin ja sen välttämiseksi tarvittavat toimenpiteet. Näin riskiarvio ja mahdollinen riskianalyysi erityismenettelyehdotuksineen sisältyisi jo rakennuslupahakemukseen. Rakennusvalvontaviranomainen määrää erityismenettelytoimenpiteen hakemuksen mukaisesti tai se voi edellyttää sitä myös silloin, kun rakennushakkeeseen ryhtyvä ja suunnittelijat eivät sitä itse esitä. [44]

Rakennusvalvontaviranomainen voi lisäksi lain nojalla määrätä, että rakennuksen vaatimustenmukaisuutta seurataan ja valvotaan sen käytön aikana. Käytönaikainen seuranta kohdistuu rakennuksen olennaisiin teknisiin vaatimuksiin erityismenettelyn kohteena olevien rakenteiden tai rakennuksen ominaisuuksien osalta. Seurannan tarkoituksena on varmistaa valmiin rakennuksen olennaisten teknisten vaatimustenmukaisuus ja olosuhteista johtuvat tekijät huomioon ottava huolto ja ylläpito. [44]

Esimerkkejä erityismenettelyn toimenpiteistä: [44]

- Laadunvarmistusselvityksen laatiminen.
- Erityissuunnitelmien, valmisosien valmistuksen ja/tai asennuksen ulkopuolinen tarkastus tai työmaatoteutuksen ulkopuolinen tarkastus.
- Suunnittelijoiden tehostettu työmaatoteutuksen tarkastaminen.
- Tehostettu käytönaikainen seuranta ja huolto.

## 2.1.2 Laadunvarmistus selvitys

Laadunvarmistus selvityksessä tarkoituksena on varmistaa, että rakennustyöt suoritetaan asianmukaisesti. Selvitys kohdistuu lähinnä rakennushankkeen riskien arvioimiseen ja tätä koskevan tarkastuksen tai lausunnon hankkimiseen. Rakennusvalvontaviranomainen voi edellyttää laadunvarmistus selvitystä erittäin vaativassa rakennushankkeessa tai rakennushankkeessa, jossa aloituskokouksessa osoitettujen järjestelyjen ja menettelyjen perusteella ei voida perustellusti olettaa, että rakentamisessa saavutetaan rakennuksen turvallisuutta, terveellisyttä tai pitkäaikaiskestävyyttä koskevien säännösten ja määräysten mukainen lopputulos. [44]

Harkittaessa laadunvarmistus selvityksen tarvetta, rakennusvalvontaviranomainen ottaa huomioon hankkeeseen tai sen osaan liittyvät seikat, joita voivat olla esimerkiksi rakennuksen turvallisuuteen, terveellisyteen tai pitkäaikaiskestävyyteen eri rakennusvaiheissa liittyvät riskit, rakennustyömaan sää- ja olosuhdesuojaukseen liittyvät seikat, rakennuksen korjaus- tai muutostyössä rakennuksen kuntotutkimuksen ja rakennushankkeeseen ryhtyvän oman tai sopimusjärjestelyin hankitun valvonnan riittävyyden sekä rakennushankkeeseen ryhtyvän henkilöstön. Laadunvarmistus selvitykseen voidaan edellyttää seuraavia selvityksiä ja toimenpiteitä tapauksesta riippuen: [44]

- Selvitys erityissuunnittelun, rakennustyön ja käytön riskeistä turvallisuuden, terveellisyden tai pitkäaikaiskestävyyden kannalta,
- esitys rakennustyön tarkastusasiakirjaksi laadunvarmistustoimenpiteineen,
- jo olemassa olevaa rakennusta koskeva kuntotutkimus rakennuksen korjaus- ja muutostyössä,
- erityissuunnittelijan, vastaavan erityissuunnittelijan, asiantuntijatarkastuksen tai ulkopuolisen tarkastuksen käyttäminen rakennustyön valvonnassa ja rakennustuotteiden valmistuksen tarkastamisessa,
- rakennusvaiheiden tarkastusten vastuuhenkilöt ja muut työvaihetarkastuksia suorittavat henkilöt sekä heidän koulutuksensa ja kokemuksensa, rakennusaikataulu toteutumisarvioineen toiminnan arvioimiseksi,
- tarjous- ja sopimusvaiheen vaatimukset laadun varmistamisen osalta,
- suunnitelmatarkastukset,
- rakennushankkeeseen ryhtyvän hyväksymä työmaan laatusuunnitelma, joka sisältää laadunvarmistukseen liittyvät laadunohjaus- ja valvontamenettelyt sekä urakoitsijan sisäiset laadunvalvontatoimenpiteet,
- tarkastusten vastuuhenkilöiden johdolla toteutettavat työvaiheiden mallitarkastukset sekä muut laadun varmistamiseksi sovitut tarkastukset, vastaanottotarkastukset ja mittaukset.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on noudatettava laadunvarmistus selvityksessä osoitettuja menettelyjä. Myös vastaavalla työnjohtajalla ja pääsuunnittelijalla on noudattamisvelvollisuus, jos kyse on heidän velvollisuuksiinsa kuuluvista asioista. [44]

### 2.1.3 Asiantuntijatarkastus

Asiantuntijatarkastuksessa rakennushankkeeseen ryhtyvä tai hänen palveluksessaan oleva asiantuntija tarkastaa rakennustyön suunnitelmanmukaisuuden. Rakennusvalvontaviranomainen hyväksyy asiantuntijatarkastuksen, joka täydentää rakennustyön aikana viranomaisvalvontaa. Yleisimmin asiantuntijatarkastus henkilöineen todetaan aloituskokouksessa tai työmaakatselmuksessa. Asiantuntijatarkastuksesta huolimatta viranomaisella on edelleen toimivalta puuttua tarvittaessa luvanvastaiseen tai säännöksistä tai määräyksistä poikkeavaan rakentamiseen.

Rakennushankkeeseen ryhtyvällä on vastuu siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan säännösten ja määräysten sekä myönnetyn luvan mukaisesti. Vastaavan työnjohtajan on puolestaan huolehdittava siitä, että rakennustyö tehdään myönnetyn luvan, rakentamista koskevien säännösten ja määräysten sekä hyvän rakennustavan mukaisesti. On rakennushankkeeseen ryhtyvän oman edun mukaista, että hän käyttää omia asiantuntijoitaan suunnitelmanmukaisuuden tarkastamiseen. [44]

### 2.1.4 Ulkopuolinen tarkastus

Rakennusvalvontaviranomainen voi lupahakemusta käsitellessään tai rakennustyön aikana vaatia rakennushankkeeseen ryhtyvältä riippumattoman ja pätevän asiantuntijan lausunnon siitä, täyttääkö suunniteltu ratkaisu tai rakentaminen sille säädetyt vaatimukset. Edellytyksenä ulkopuolisen tarkastuksen vaatimiselle on, että rakentamisessa käytetään sellaisia rakennuksen turvallisuuteen, terveellisyys- tai pitkäaikaiskestävyyteen merkittävästi vaikuttavia suunnittelu- ja toteutusmenetelmiä tai tuotteita, joiden toimivuudesta ei ole yleisesti varmuutta tai aikaisempaa kokemusta. Ulkopuolinen tarkastus voidaan myös edellyttää tilanteissa, joissa havaitaan rakentamisessa tapahtuneen virhe tai laiminlyönti, jonka vaikutuksia ei voida arvioida luotettavasti. Esimerkkejä ulkopuolisen tarkastuksen vaativista tapauksista: [44]

- Erityisen vaikeiden lujuslaskelmien ja laskennallisesti osoitettavien rakenteellista paloturvallisuutta koskevien suunnitelmien arviointi,
- suuria yleisötiloja sisältävä rakennushanke,
- kantavan rakenteen kannalta keskeisen rakenteen valmisosatoimitus, jos tuotteen valmistaja on ottanut vastatakseen myös rakenneosan suunnittelusta (ns. tuotesakauppa)
- hankkeissa, missä rakenteisiin tai laitteisiin käytettävän rakennusmateriaalin tai -tuotteen kelpoisuus joudutaan esimerkiksi vaativien ympäristöolosuhteiden, kuten lämmön, kosteuden tai kemiallisten tekijöiden johdosta selvittämään rakennuspaikkakohtaisesti,
- hankkeissa, missä rakennesuunnittelutehtävä on poikkeuksellisen vaativa.

Asiantuntijan on oltava tarkastettavan kohteen vaatimukset huomioon ottaen riittävän pätevä ja riippumaton, joka merkitsee, ettei asiantuntija voi tulla varsinaisen suunnittelutyön

tehneestä yhtiöstä tai sen tytäryhtiöstä. Suunnitteluun liittyvissä asiantuntijatarkastuksissa riippumattoman ja päteväksi tunnetun suunnittelutoimiston tai erityissuunnittelijan käyttäminen on yleensä riittävää. [44]

Tarkastuksen sisältöä ei ole säädelty. Esimerkiksi rakennesuunnittelun ulkopuolisessa tarkastuksessa lausunnon olisi kuitenkin suositeltavaa sisältää ainakin tiedot laskentamenetelmistä, kuormituksista ja kuormitusyhdistelmistä, sisäisistä ulkoisista rasitusolosuhteista, rakennuksen perustamisesta, rakennuksen kokonaisvakavuudesta, tärkeimmistä kantavien rakenteiden liitosten ja paloturvallisuuden periaatteista sekä rakennusfysikaalisista ominaisuuksista. [44]

### **2.1.5 Vertailukohdat muihin aloihin**

Suomessa eri aloilla on toimialakohtaisia katsastusmenettelyjä, joiden yksityiskohdista on löytynyt monia hyviä esimerkkejä systemaattisen rakennusten katsastusmenettelyn luomiseen.

#### **AUTOT**

Ajoneuvojen katsastusmenettely perustuu muun muassa ajoneuvolakiin sekä katsastusasetukseen. Määräaikaikatsastuksessa tarkastetaan auton turvallinen toiminta niin liikenteen kuin ympäristön kannalta. Katsastuksessa määrätyt korjauskehotukset tallennetaan valtakunnalliseen ajoneuvotietojärjestelmään, josta ne tulostuvat ajoneuvokohtaiselle katsastustodistukselle. Kyseiset kehotukset poistuvat järjestelmästä seuraavassa katsastuksessa, mikäli ne ovat korjattu. Ensimmäinen määräaikaikatsastus on suoritettava viimeistään kolmen vuoden kuluttua käyttöönottopäivästä, seuraava viiden vuoden kuluttua. Sen jälkeen määräaikaikatsastus on suoritettava vuoden välein.

Määräaikaikatsastuksia suorittavat yksityiset katsastustoimipisteet, joiden toimilupia valvoo liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Se ylläpitää katsastustoiminnan arvostelupöytäkirjoja, joiden tarkoituksena on yhdenmukaistaa katsastuspäätösten tekoa sekä tuottaa oikeudenmukaisia ja tasapuolisia katsastuspäätöksiä. Ajoneuvon varustus ja rakenteet tarkastetaan pääosin silmä määrällisesti ja kokeilemalla ilman, että ajoneuvon osia tarvitsee purkaa, mutta tietyt kohteet tarkastetaan aina mittamalla. Katsastuksessa ajoneuvo voidaan määrätä ajokieltoon, mikäli viat ovat liikenteen turvallisuutta tai ympäristöä vaarantavia. [16]

#### **PADOT**

Patojen turvallisuudesta Suomessa säädetään patoturvallisuuslailla ja -asetuksella. Patoturvallisuustoiminnan tarkoituksena on ehkäistä padoista aiheutuvat onnettomuustilanteet. Lainsäädännön mukaisesti patojen omistajat vastaavat patojensa turvallisuudesta ja sen valvonta ja kehitys kuuluvat alueellisille elinkeino-, liikenne-, ja ympäristökeskuksille, eli ELY-keskuksille. [16]

Padon omistajat ovat lain nojalla velvollisia suorittamaan padolla patoturvallisuusviranomaisen hyväksymän tarkkailuohjelman mukaisesti säännöllistä tarkkailua, jota tehostetaan muun muassa tulva-aikoina. Suuremmat padot ovat jatkuvassa kaukovalvonnassa. Patojen tarkastusvelvollisuuteen kuuluu kerran vuodessa tehtävä tarkastus, jossa asiantuntija tarkastaa padon rakenteellisen kunnon. Patoturvallisuusviranomaiset osallistuvat vähintään kerran viidessä vuodessa padon tarkastukseen, jolloin padon kunto voidaan selvittää perusteellisemmin konsulttien avulla. [16]

Padon omistajan tulee säilyttää patoturvallisuuden kannalta merkityksellinen aineisto turvallisuuskansiossa. Turvallisuussuunnitelmat on laadittava niille padoille, jotka sortuessaan saattavat aiheuttaa vaaraa henkilöturvallisuudelle tai huomattavaa vaaraa ympäristölle tai omaisuudelle. Käyttönottotarkastuksessa padon kelpoisuus selvitetään niin, että kaikki patoturvallisuuteen vaikuttavat seikat tulevat riittävästi huomioon otetuiksi. [16]

Patoturvallisuuden hoidossa on käytössä patojen luokittelu kolmeen luokkaan niiden aiheuttaman vahingonvaaran mukaan. Onnettomuuden sattuessa vaaran laatu ja padon väliaikaisuus arvioidaan ja luokka määräytyy arvioinnin mukaisesti: [8]

- *1-luokka*: Pato, joka onnettomuuden sattuessa saattaa aiheuttaa ilmeisen vaaran ihmishengelle tai terveydelle taikka ilmeisen huomattavan vaaran ympäristölle tai omaisuudelle.
- *2-luokka*: Pato, joka onnettomuuden sattuessa saattaa aiheuttaa vain vähäistä vaaraa.
- *3-luokka*: Pato, joka onnettomuuden sattuessa saattaa aiheuttaa vain vähäistä vaaraa.

Jokaiselle 1-luokan padoille on laadittava turvallisuustarkkailuohjelma vahingonvaaran vähentämiseksi. Ohjelman laatii tai hankkii padon omistaja tai haltija ja sen laatijalta vaaditaan sama pätevyys kuin vastaavan rakenteen suunnittelijalta. Padon turvallisuustarkkailuohjelma hyväksytetään joko rakennustyön aikana tai viimeistään käyttöönoton yhteydessä alueelliselta ELY-keskukselta. Padon tarkkailu käsittää mm. seuraavat seikat: [8]

- Altaan veden tai muun padotun aineen korkeuden seuranta,
- patorakenteiden näkyvien osien sekä padon taustan tarkastukset jokaisen tarkkailukäynnin yhteydessä,
- tarkkailuohjelmassa määrätyt havainnot ja mittaukset sekä muut patokohtaiset seikat,
- jätepatojen osalta mahdolliset muut patoturvallisuuteen liittyvä erityiskysymykset.

Vuoden aikana tehtyjen mittausten tulokset ja muut havainnot kirjataan ylös ja vuositarkastuksen yhteydessä ne käydään läpi ja tutkitaan korjauksia vaativat kohdat padosta.

Viiden vuoden välein tehtävä määräaikaistarkastukseen osallistuu padon omistajan tai haltijan edustajan sekä riittävän pätevyyden ja kokemuksen omaava henkilön lisäksi patoturvallisuusviranomainen sekä pelastusviranomainen tarvittaessa. Määräaikaistarkastuksessa arvioidaan padon kunto ja turvallisuus sekä tarkastetaan luokituksen ajantasaisuus. [8]

Patoturvallisuuslain piiriin kuuluvien patojen tiedot rekisteröidään Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämään tietojärjestelmään, jonka avulla valvotaan lain mukaista patoturvallisuutta. [8]

## SILLAT

Suomessa siltojen kokonaismäärä on yli 20 000. Huonokuntoisten siltojen osuus on kasvamassa nopeammin kuin niitä on mahdollista korjata, sillä voimakkaan tienrakennuskauden sillat tulevat korjausikään. Siltarakenteiden kunnossapitovastuu on väylän omistajalla, jota rakenne liikenteellisesti palvelee. Suurimmat vastuulliset väyläomistajat ovat Liikennevirasto ja kunnat ja tarkastustoimintaa valvoo alueelliset ELY-keskukset. [16]

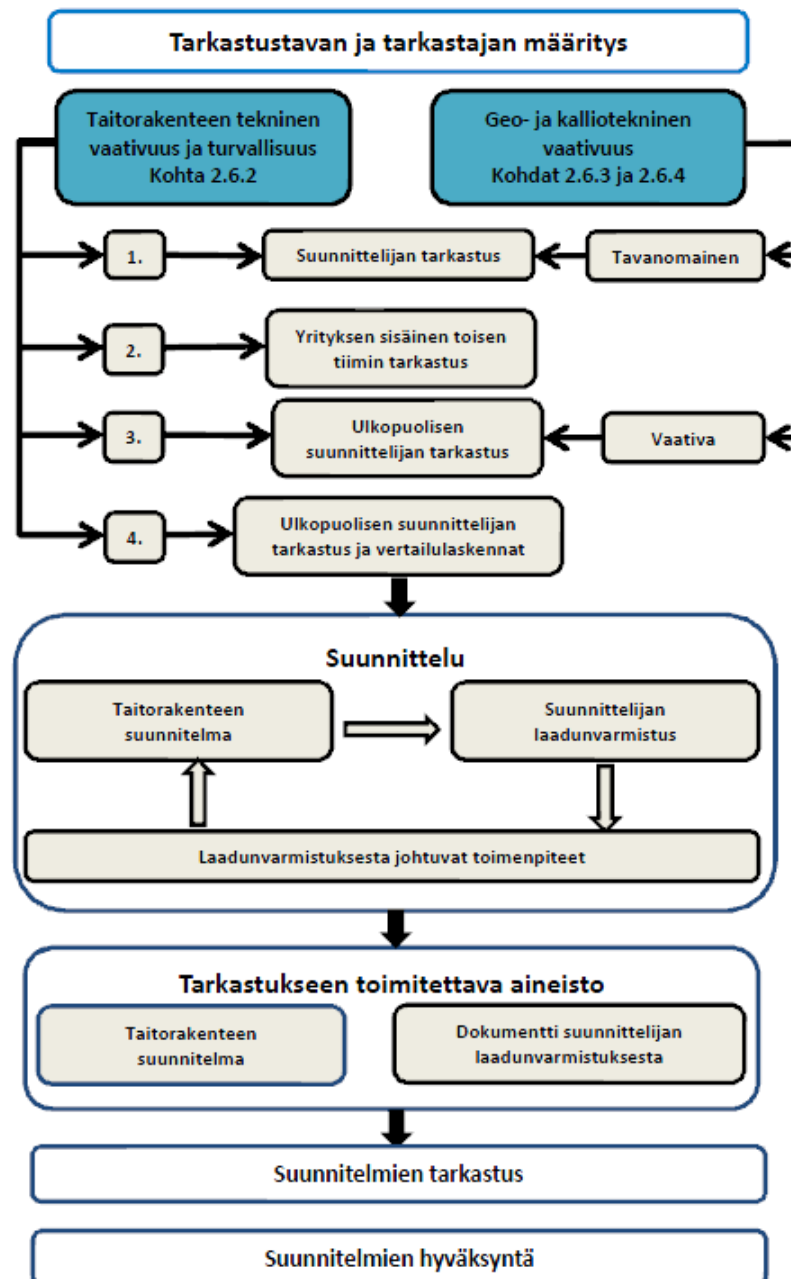
Siltarakenteiden tarkastustoiminnan ensisijainen päämäärä on taata liikenneturvallisuus, varmistaa taitorakenteiden toimivuus ja säilyvyys sekä palvelutaso. Lisäksi tarkastuksista kerätyn tiedon avulla pystytään vähitellen estää sopimattomien materiaalien ja virheellisten ratkaisujen käyttö. Tätä tavoitetta voidaan rinnastaa talorakenteiden puolella FISE Oyn ylläpitämän rakennusvirhepankin käytön tavoitteisiin. [16]

Siltarakenteiden tarkastus voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: sillan rakennussuunnitelmien tarkastus sekä siltarakenteiden tarkastus. Olemassa olevan sillan rakenteiden tarkastus on rinnastettavissa rakennuksen kuntoarvioon tai -tutkimukseen, jotka tässä tapauksessa ovat eri asioita rakenteellisen turvallisuuden tarkastukseen verrattuna. Sen sijaan sillan rakennussuunnitelmien tarkastus on osa suunnitelmien laadunvarmistusta ja Liikenneviraston valvomana ja tarkastusohjetta ylläpitämänä oleellinen osa sillan liikenneturvallisuutta. Tarkastusohje sisältää toimenpide- ja raportointiohjeet, jolloin tulokset ovat vertailu- ja toimenpidepäätöskelpoiset.

Siltarakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastuksen tarkoituksena on selvittää täyttääkö suunnitelman mukaan toteutettava rakenne sitä koskevissa määräyksissä, ohjeissa, tuotevaatimuksissa ja mahdollisissa hankekohtaisissa suunnitteluperusteissa sille asetetut vaatimukset sekä selvittää ovatko suunnitelmissa esitetyt ratkaisut kelvollisia lopputuotteen turvallisen käytön, halutun käyttöiän, taloudellisten käyttö- ja korjauskustannusten ja muiden hoidon ja ylläpidon asettamien vaatimuksien kannalta. [37]

Kuvassa 2 on esitetty taitorakenteiden suunnitelmien tarkastusprosessi. Tarkastuksessa edellytetään, että suunnittelija laatii suunnitelmansa dokumentoituun laatu- ja toimintajärjestelmään perustuvan laadunvarmistuksen mukaisesti ja toimittaa siitä laaditun dokumentin tarkastettavaksi suunnitelman yhteydessä. Nämä kaksi dokumenttia toimivat siis

tarkastuksen aineistona. Ennen suunnitelman hyväksymistä tarkastaja on tarvittaessa pyytänyt suunnittelijaa antamaan vastineensa tarkastusdokumenttiin kirjattuihin asioihin, tekemään tarvittavat toimenpiteet ja toimittamaan tarvittaessa suunnitelman uudelleen tarkastettavaksi. Tarkastajan laatiman raportin ja siinä esitetyn toimenpide-ehdotuksen perusteella Liikennevirasto hyväksyy suunnitelman joko ehdottomana tai ehdollisena. Ehdollisella hyväksymisellä tarkoitetaan suunnitelman hyväksyntää, jonka edellytyksenä on esimerkiksi tarkastusraportin mukaiset korjaukset suunnitelmiin. [37]



**Kuva 2.** Taitorakenteen suunnitelman tarkastamis- ja hyväksymisprosessi. [37]

Mikäli hanke on vaativuudeltaan tavanomainen, riittää että suunnittelun ja tarkastuksen suorittaa ammattitaitoiseksi todettu suunnittelukonsultti ilman ulkopuolista tarkastusta. Vaativimmissa siltakohteissa rakennussuunnitelmat tarkastaa suunnitteluorganisaation

ulkopuolinen tarkastaja, joka omaa hankkeen vaativuustason mukaisesti riittävän pätevyyden. [37]

## 2.2 Laki laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista

### 2.2.1 Lain sisältö

Lain piiriin kuuluvat rakennukset, joita käytetään pääasiallisen käyttötarkoituksen mukaan urheilu-, virkistys- tai vapaa-ajan toimintaan, kaupan palvelujen tarjoamiseen tai muuhun vastaavaan kokoontumiseen taikka eläinsuojana, ja joka lisäksi täyttää seuraavat tunnusmerkit: [18]

- Rakennuksessa on laajarunkoinen osa, jonka kerrosala jossain kerroksessa on vähintään 1000 neliömetriä ja
- rakennuksen kattokannattajat ovat:
  - tehdasvalmisteiset ja niiden jänneväli on vähintään 18 metriä, tai
  - paikalla valmistetut ja niiden jänneväli on vähintään 15 metriä.

Laki velvoittaa kiinteistön omistajaa huolehtimaan rakennuksen laajarunkoisen osan keskeisten rakenteiden asianmukaisesta tarkastuksesta. Tarkastajan kelpoisuuteen sovelletaan maankäyttö- ja rakennuslain 120 e §:ää. Arvioitavan rakennuksen alkuperäinen kantavien rakenteiden suunnittelija ei saa arvioida rakennusta.

Lakia ei sovelleta rakennuksiin, joiden kantavia rakenteita koskevien rakennesuunnitelmien ja kantavien rakenteiden toteutuksen vaatimuksenmukaisuus on varmistettu erityismenettelyssä tai ulkopuolisessa tarkastuksessa tai muulla vastaavalla tavalla, joka täyttää lain arviointivelvoitteen vaatimukset.

Laki astui voimaan 1.4.2015 ja lain piiriin kuuluvien rakennusten tarkastukseen valtioneuvosto antoi kaksi vuotta aikaa. [18]

### 2.2.2 Lain perusteluja

Lakiehdotuksen perustelumuihistiossa soveltamisalaa tarkennetaan muun muassa seuraavasti: [33]

- Urheilu-, virkistys-, tai vapaa-ajan toiminnassa käytettäviä rakennuksia ovat esimerkiksi urheiluhalli ja -rakennukset, jäähallit, uimahallit, erilaiset näyttelyhallit auditoriot ja monitoimihallit. Kaupan palveluiden tarjoamiseen tarkoitettulla rakennuksella tarkoitetaan myymälärakennuksia, sisältäen myymälähallit ja noutovarastot.
- Muita kokoontumisrakennuksia ovat rakennukset, joissa voidaan järjestää yleisölle tai jäsenistölle tarkoitettuja esityksiä, juhlia, näyttelyitä, kilpailuja tai muita

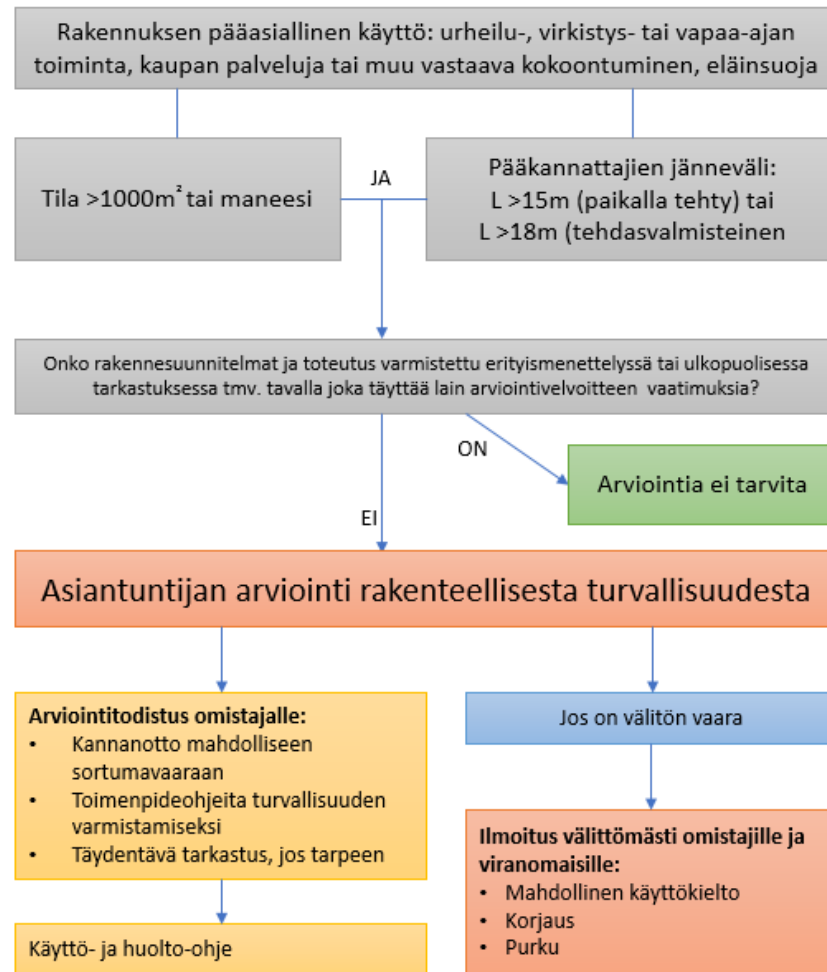


tilaisuuksia. Eläinsuojarakennuksia ovat erilaiset eläintenpitoon tarkoitetut rakennukset, kuten hevostallit, navetat, kanalat ja sikalat.

- Koko rakennuksen kerrosala ei ole ratkaiseva, vaan ainoastaan rakennuksen laajarunkoisen osan kerrosala. Rakennus voi olla kokonaisuutena hallimainen tai jokin osa rakennusta muodostaa hallimaisen osan. Rakennus voi koostua useammasta, jänneväliiltään toisistaan suurestikin poikkeavasta osasta. Lakia sovelletaan tällöin vain rakennuksen laajarunkoiseen osaan. Laki ei velvoita arvioimaan rakennusta muilta usein, vaikka tämä tietysti voi olla käytännössä perusteltua.
- Jänneväliillä tarkoitetaan etäisyyttä kattokannattajien tukipisteiden välillä, joka yleensä sijaitsee tukialueen keskikohdassa.
- Arvioinnin ulkopuolelle jäävät edellä mainituista rakennuksista ne, joiden suunnitelmien ja toteutuksen vaatimustenmukaisuus on rakennuslupavaiheessa tai rakennustyönäikaisen valvonnan aikana maankäyttö- ja rakennuslain mukaisessa erityismenettelyssä tai ulkopuolisessa tarkastuksessa taikka muussa vastaavassa menettelyssä osoitettu. Näin arvioijien resursseja voidaan ohjata niiden rakennusten arviointiin, joissa arviointia ei ole vielä lainkaan tehty, eikä rakennusten omistajille aiheudu kohtuuttomia kustannuksia tarpeettomasta tarkastuksen uusimisesta.
- Arviointi kohdistuu rakennuksiin, joille on myönnetty rakennuslupa ennen lain voimaantuloa eli 1.4.2015. Ajallisen rajauksen perusteena ovat yleiseen rakentamista koskevaan lainsäädäntöön tehdyt muutokset ja informaatio-ohjaus, joiden yhdessä arvioidaan riittäväällä tavalla turvaavan rakenteellisen turvallisuuden uudisrakentamisessa.

## 2.3 Tarkastusmenettelyn vaiheet

Tarkastusmenettelyssä on suositeltavaa toimia johdonmukaisesti tarkastusmenettelyn ohjeen mukaisesti. Sillä pyritään rakennuksen elinkaaren aikana havaitsemaan ja eliminoidaan kantavien rakenteiden rakenteellisia puutteita ja näin vähentämään kantavien rakenteiden sortuman mahdollisuutta. Kuvassa 3 on esitetty lakisääteisen rakenteellisen turvallisuuden arviointiprosessin kulku. [33]



*Kuva 3. Lakisääteisen rakenteellisen turvallisuuden arvioinnin kulku. [33]*

Tavoitteena on välttää rakenteiden sortumasta aiheutuvia henkilövahinkoja sekä yhteiskunnallisia vahinkoja, kuten taloudelliset ja ympäristövahingot.

### 2.3.1 Tarpeen arviointi

Tarkastusmenettelyssä arvioidaan aluksi tarkastuksen tarve, eli kuuluuko rakennus lakisääteisen laajarunkoisten rakennusten arvioinnin piiriin. Mikäli rakennus ei täytä laissa määritellyt tekniset vaatimukset, voidaan rakennus jättää tarkastamatta, mutta rakennuksen omistajalla on myös mahdollisuus teettää oma-aloitteinen tarkastusmenettely. Mikäli – lakisääteinen tai oma-aloitteinen – tarkastus todetaan tarpeelliseksi, tulee rakennuksen omistajan käynnistää tarkastusmenettely hankkimalla tehtävään rakennetekninen asiantuntija, jolla on rakennesuunnittelijan koulutus ja kokemus. [33] Tarkastaja ei saa olla tarkastettavan kohteen suunnitellut rakennesuunnittelija. [18]

Tarkastajan kelpoisuuteen sovelletaan maankäyttö- ja rakennuslain 120 e §:ää, jossa rakennesuunnittelutehtävän vaativuus määrittelee vaatimukset rakennesuunnittelijan koulustasolle ja kokemukselle. Suunnittelutehtävät jaetaan kolmeen vaativuusluokkaan, joiden kelpoisuusvaatimuksena on: [22]

- vaativassa suunnittelutehtävässä kyseiseen suunnittelutehtävään soveltuva, rakentamisen tai tekniikan alalla suoritettu korkeakoulututkinto, aiempi ammatillisen korkea-asteen tutkinto tai sitä vastaava tutkinto sekä vähintään neljän vuoden kokemus tavanomaisista suunnittelutehtävistä ja vähintään kahden vuoden kokemus avustamisesta vaativissa suunnittelutehtävissä;
- tavanomaisessa suunnittelutehtävässä kyseiseen suunnittelutehtävään soveltuva, rakentamisen tai tekniikan alalla suoritettu tutkinto, joka on vähintään aiemman tekniikan tai sitä vastaavan tutkinnon tasoinen, sekä vähintään kolmen vuoden kokemus avustamisesta vähintään tavanomaisessa suunnittelutehtävässä;
- vähäisessä suunnittelutehtävässä rakennuskohteen ja suunnittelutehtävän laatu ja laajuus huomioon ottaen riittävä osaaminen.

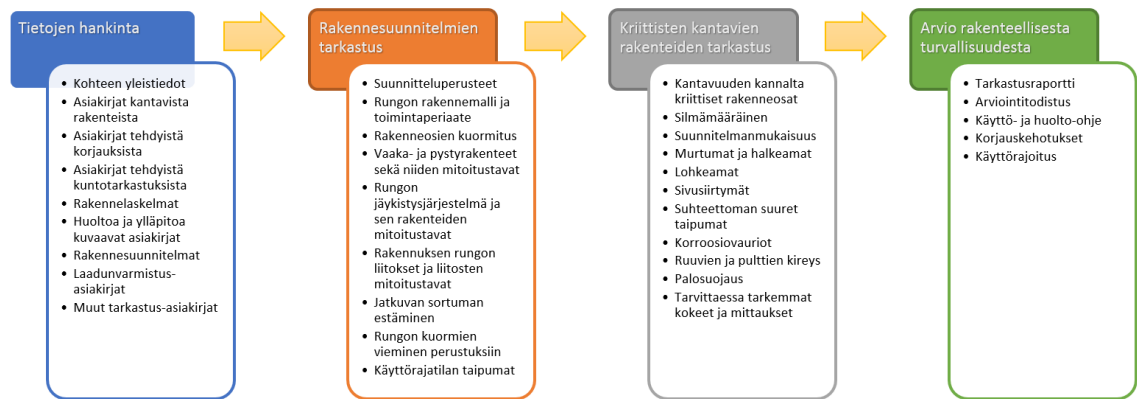
Lisäksi vuonna 2014 voimaan tullut lakimuutos lisää vaativuusluokitukseen poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän, jossa suunnittelijalta edellytetään kyseiseen suunnittelutehtävään soveltuva, rakentamisen tai tekniikan alalta suoritettu ylempi korkeakoulututkinto sekä vähintään kuuden vuoden kokemus vaativista suunnittelutehtävistä. [19]

Vaikka tarkastajalla olisikin lain edellyttämä kelpoisuus, ei se välttämättä tarkoita sitä, että tarkastaja olisi riittävän pätevä tarkastamaan kohteen rakenteita. Tarkastajalla tulisi olla hyvä substanssiosaaminen juuri tarkastettavan kohteen rakenteista, jotta hän osaa puuttua rakenteellisen turvallisuuden kannalta merkittäviin asioihin.

### 2.3.2 Tarkastukset

Tarkastusmenettely aloitetaan hankkimalla käyttöön kohteen rakennesuunnitelmat, jotka sisältävät piirustukset, rakennelaskelmat ja muut tekstiasiakirjat. Myös rakennuksen käytön aikaiseen huoltoon, korjauksiin ja tarkastuksiin liittyvät asiakirjat ovat tärkeitä tarkastuksen lähtötietoja.

Ensimmäinen tarkastus, joka on tarkastusmenettelyn määrittelemä niin sanottu perustarkastus, on rakenteiden asiantuntijan tekemä tarkastus. Siinä tarkastetaan rakennuksen kriittisten kantavien ja tarvittaessa ei-kantavien rakenteiden turvallinen toiminta. Tehtävään kuuluu suunnitelmien tarkastus sekä oleellisten rakenteiden arviointitasoinen tarkastus kohdekohtaisesti tarvittavalla tavalla ja laajuudella. Tarkastuksen tulosten perusteella tehdään arvio rakenteellisesta turvallisuudesta ja laaditaan siitä arviointitodistus tarvittavine toimenpidesuosituksineen. Kuvassa 4 on esitetty arvioinnin prosessikaavio.



*Kuva 4. Asiantuntijan arvioinnin kulku.*

Perustarkastuksen yhteydessä tarkastaja saattaa huomata tarpeen toiselle, yksityiskohtaisemmalle tarkastukselle, joka voi keskittyä johonkin tiettyyn rakenneosaan jonka toiminnan analysoimiseksi voidaan käyttää tarkempaa mittaustekniikkaa.

### 2.3.3 Tarkastuksen raportointi

Rakenteellista turvallisuutta tulee seurata ja ylläpitää erikseen laaditun käyttö- ja huolto-ohjeen avulla ja siinä määritellyillä toimenpiteillä. Ohje sisältää MRL:n mukaisesti laadittuna rakennesuunnittelijan toimesta määriteltynä tarvittavia seuranta- ja huoltotietoja: [33]

- rakennuksen suunniteltu käyttöikä,
- rakenteiden ja rakennusosien käyttöikätaipumat,
- tärkeimpien kantavien rakenteiden kriittiset ja tarkastettavat kohdat, tarkastustapa sekä tarkastusväli,
- tärkeimpien kantavien rakenteiden huoltovälit ja arvioidut huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet,
- kantavien rakenteiden toimintaan liittyvät erityishuomioidut kohdat ja ohjeet.

## 3. RAKENTEELLINEN VAURIONSIIETOKYKY

### 3.1 Määritelmä

Rakenteellisella vaurionsietokyvyllä tarkoitetaan ominaisuutta, joka mahdollistaa yksittäisen rakenteen tai kokonaisen rakennejärjestelmän toiminnan odottamattomissa ja epätodennäköisissä olosuhteissa. Tämä ominaisuus tunnetaan myös sitkeytenä. Tyypillisesti rakenteen mitoitus perustuu normaaliin käyttö- ja onnettomuustilanteeseen, joka pystytään määrittelemään etukäteen rajaamalla rakenteeseen kohdistuvat olosuhteet. Tämä rajoitus kuitenkin jättää rakenteen haavoittuvasiksi kaikille rajauksen ulkopuolelle jätetyille olosuhteille. Odottamattomien tapahtumien, olosuhteiden ja kuormitusten kirjo voi olla erittäin suuri ja vaikka osaan niistä olisikin varauduttu, voi niiden voimakkuus olla odottamattoman suuri. [17]

Sitkeä rakenne ei tarkoita ylimitoitusta, vaan sen vaurionsietokyky on saavutettu arvioimalla koko rakennejärjestelmän toimintaa onnettomuustilanteissa. Sitkeä rakenne pystyy lieventämään paikallisen vaurion aiheuttamat vaikutukset jakamalla kuormituksen uudelleen ja pysäyttämään niin sanotun jatkuvan sortuman etenemisen. [17]

Esimerkki rakenteen sitkeästä toiminnasta on tavallinen taivutusrasitettu teräsbetoni-palkki. Palkkiin kohdistuvan kuormituksen kasvaessa sen poikkileikkauksen yläpinnassa betonin puristusjäännitys kasvaa ja vastaavasti alapinnassa terästen vetojäännitys kasvaa. Kriittisen kuorman ylittyttyä normaaliraudoitettun palkin rauditus myötää ennen kuin puristuspuolen betoni murtuu. Ennen lopullista murtoa ja palkin kuormansiirtokyvyn menetystä siihen syntyy suuria plastisia muodonmuutoksia, jotka ilmenevät leveinä halkeamina palkin vedetyllä puolella. Täten palkin ylikuormitustila on helposti havaittavissa ja tarvittavat korjaavat toimenpiteet ehditään tekemään. Yliraudoitettussa palkissa puritettu betoni murtuu ennen kuin terästen vetojännitys saavuttaa myötörajan. Näin ollen palkki menettää kuormansiirtokyvynsä hyvin nopeasti äkillisen murtumistavan vuoksi, eikä ylikuormitusta ehditä huomaamaan palkin halkeamien puuttuessa. [25]

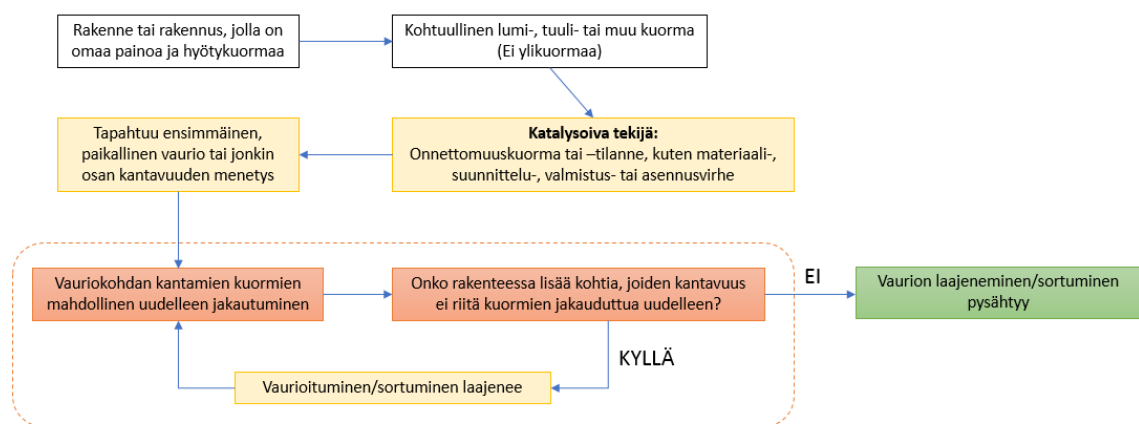
### 3.2 Sortumaan johtavat syyt ja niiden välttäminen

Rakenteen vaurionsietokyvyllä pyritään estämään henkilöturvallisuutta vakavasti vaarantava jatkuva sortuma. Jatkuvan sortuman on todettu olevan suurin rakennusten turvallisuutta heikentävä tekijä, jonka välttämiseksi onkin tunnistettava siihen johtavat syyt.

### 3.2.1 Jatkuva sortuma

Jatkuvalla sortumisella tarkoitetaan paikallisen vaurion hallitsematonta leviämistä rakenteelta toiselle aiheuttaen lopulta koko rakennuksen tai sen suhteettoman suuren osan sortumisen. [7]

Rakennuksen hallitsemattoman jatkuvan sortumisen riski on historian valossa pieni, mutta onnettomuuden vakavuus kuolonuhrien ja vakavien loukkaantumisten määrässä on erittäin suuri. Näin ollen rakenteiden suunnittelussa pyritään puuttumaan rakenteiden kyvyn selvitä odottamattomissa olosuhteissa. Rakenteiden jatkuva sortuma johtuu rakenteiden puutteellisesta kyvystä jakaa kuormat uudelleen paikallisen vaurion jälkeen. [31] Jatkuvan sortuman eteneminen on esitetty kulkukaaviona kuvassa 5.

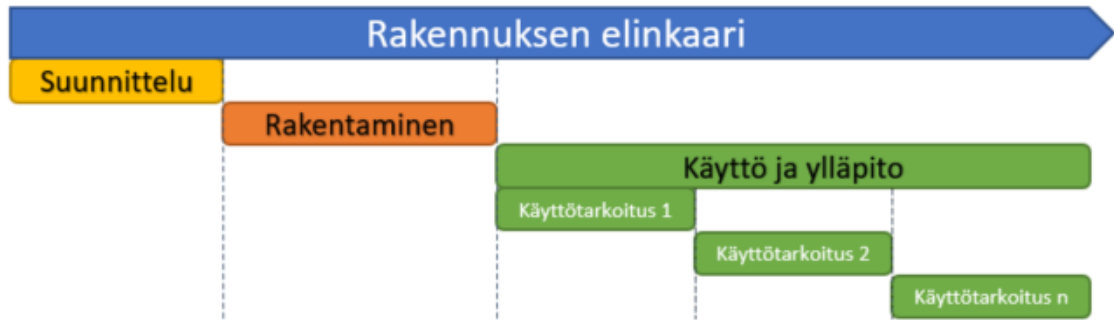


**Kuva 5.** Kaavio jatkuvan sortuman etenemisestä. [31]

Ensimmäinen vaurio voi syntyä jopa mitoituskuormaa pienemmällä kuormituksella, mikäli rakenteessa on jokin vika tai puute. Vaurioitilanteessa kantavuuden menetettyään rakenneosalle alun perin siirretyt kuormat jakautuvat rakenteessa uudelleen, josta voi aiheutua uusi vaurio muualla rakenteessa. Tämä on riskialtis tapahtuma, jos muut rakenneosat ovat vähintään yhtä rasitettuja kuin alkuperäinen vaurioitunut osa. Seurauksena saattaa olla rakennuksen jatkuva sortuma. [31]

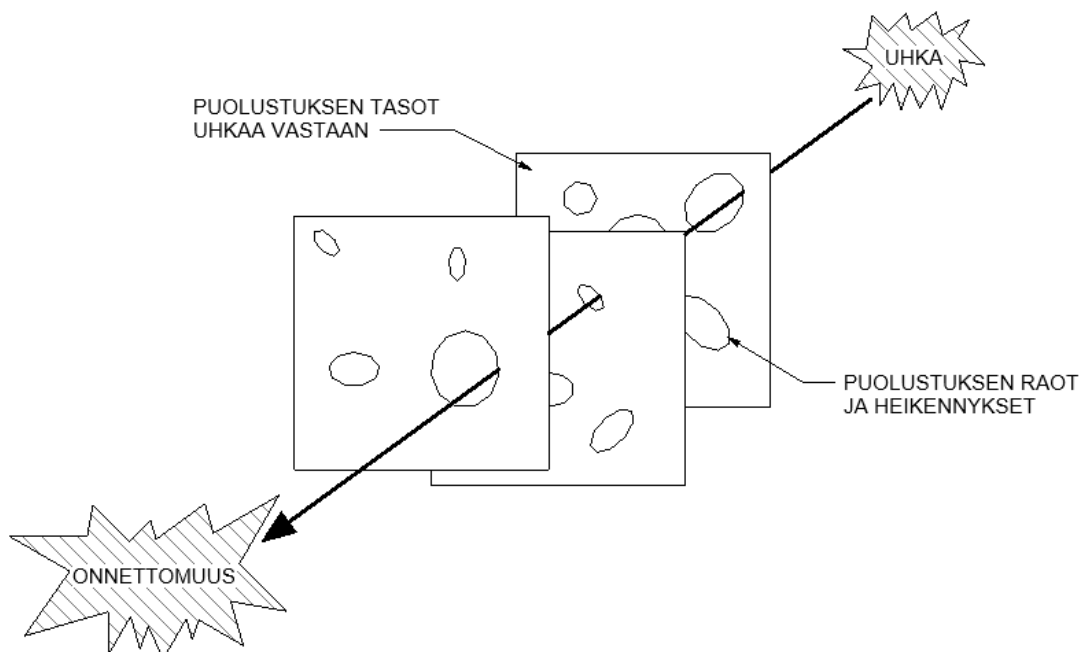
### 3.2.2 Virhealttius rakennuksen elinkaaren aikana

Rakennusten sortumiin johtaneita syitä on monenlaisia suunnittelu- ja tuotantovirheistä aina käytön aikaisiin olosuhdemuutoksiin sekä kunnossapidon laiminlyönteihin. Suunnittelu- ja tuotantotekniikan ohjeilla pyritään näitä virheitä välttämään tai ainakin niiden riskiä minimoimaan. Rakennus kokee elinkaarensa aikana karkealla jaottelulla kolme eri vaihetta, jotka on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Rakennuksen elinkaari jaettuna kolmeen pääosaan.

Yksittäinen rakennuksen turvallisuuteen liittyvä virhe rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa ei johda katastrofaaliseen lopputulokseen, ellei se ole poikkeuksellisen vakava. Uhan on läpäistävä useampi puolustuksen taso, jotta onnettomuus pääsee tapahtumaan. Kuvassa 7 on esitetty riskien hallinnassa käytettävä ”Swiss Cheese”-malli, joka havainnollistaa onnettomuuden syy-seuraussuhdetta. Rakennuksen riskienhallinnassa puolustuksen tasot voivat olla koko rakennuksen elinkaareen liittyvät turvallisuuteen liittyvät toimet, kuten suunnittelu, rakentaminen, valvonta, kunnossapito, jne. Toisaalta jokainen edellä mainituista rakennuksen elinkaaren osista voi myös sisältää oman ”Swiss Cheese”-mallinsa. Esimerkiksi rakennuksen suunnittelussa tasot voivat olla osaaminen, laatujärjestelmä, tarkastus, jne. Jokainen näistä tasoista huolehtii omalta osaltaan rakennuksen turvallisesta toiminnasta, mutta ne eivät kuitenkaan ole täysin läpäisemättömiä tasoja, vaan ne sisältävä heikkouksia, joista uhka voi päästä läpi.



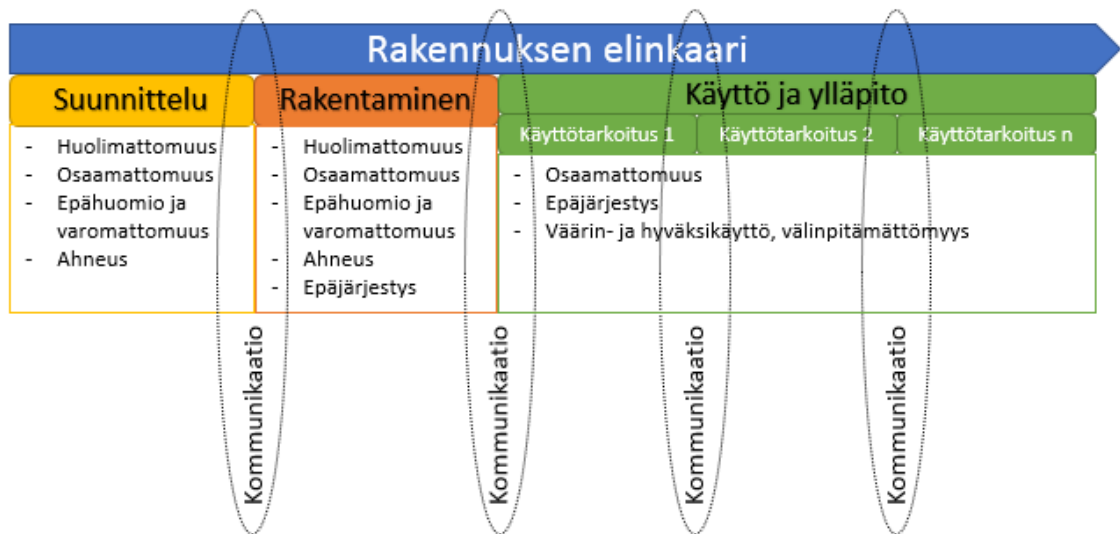
**Kuva 7.** Riskienhallinnassa käytetty onnettomuuskausaliteetin ”Swiss Cheese”-malli. [9]

Mikäli uhka läpäisee heikkouksien kautta kaikki puolustuksen tasot, rakennus sortuu. Heikkoudet ovat yleensä inhimillisiä virheitä, jotka ovat seurauksia yhdestä tai useammasta seuraavista tapahtumista: [9]

- *Huolimattomuus*: tahallinen epäonnistuminen suunnitelman analysoinnissa ja suunnittelutarkkuudessa sekä tahallinen suunnitteluohjeiden ja -standardien laiminlyönti.
- *Osaamattomuus*: ei ymmärretä insinöörityön periaatteita tai materiaalin tai rakennusjärjestelmän teknisiä ominaisuuksia ja rajoituksia.
- *Epähuomio ja varomattomuus*: epäonnistuminen seurata suunnitteluohjeita ja turvallista rakentamistapaa.
- *Ahneus*: oikotiet; tahallinen toimialakohtaisten vaatimusten ja turvatoimien laiminlyönti.
- *Epäjärjestys*: epäonnistuminen selkeän organisaation ja vastuualueiden luomisessa.
- *Kommunikaatio*: osapuolien huono keskinäinen kommunikaatio.
- *Väärin- ja hyväksikäyttö, välinpitämättömyys*: kiinteistön käyttötarkoituksen tahallinen väärinkäyttö.

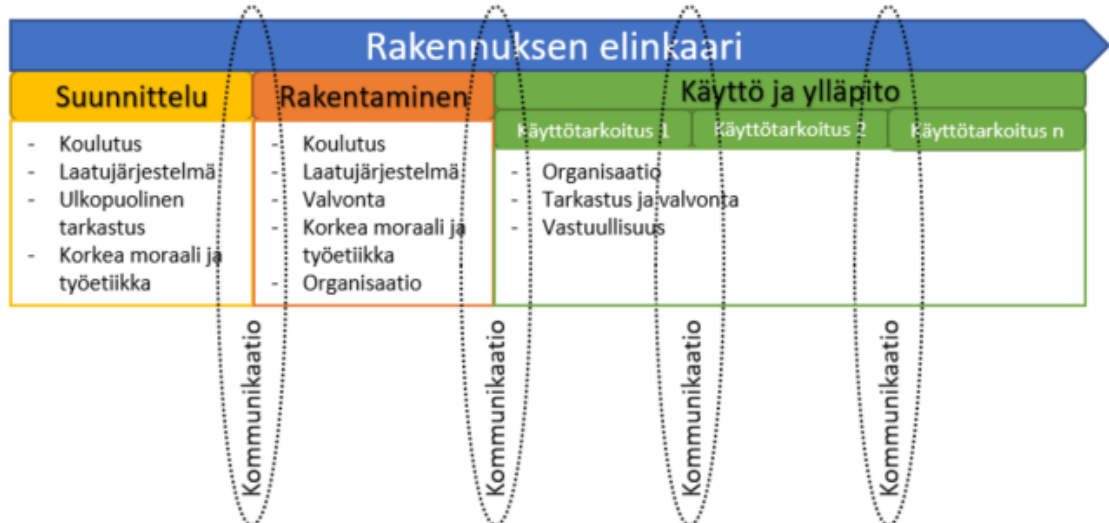
Tapahtumien jaottelu rakennuksen elinkaareen on esitetty kuvassa 8. Suunnitteluvaiheessa virheet johtuvat usein osaamattomuudesta tai huolimattomuudesta, joista hyvänä esimerkkinä ovat suunnittelussa tehty väärä oletus, väärä kuormitus, väärä lujuus tai virheellinen analyysi. Lisäksi suunnitelmien tarkkuuteen, luettavuuteen ja kattavuuteen liittyy usein virheitä. Rakentamisvaiheen virheet liittyvät yleensä huonoon ammattitaitoon tai huolimattomuuteen, eikä rakentamiseen liittyvää laatu- tai tarkastusjärjestelmää ole joko noudatettu tai laadittu lainkaan. Käytön ja ylläpidossa tehty suurin yksittäinen sortumaan johtuva virhe liittyy käyttötarkoituksen muutoksiin. Suunnitellusta poikkeavat kuormitukset voivat aiheuttaa kapasiteetin ylityksiä ja sitä kautta rakennuksen sortuman. Yhteisenä virhetekijänä kaikkiin rakennuksen elinkaaren vaiheisiin on huono kommunikaatio hankkeen osapuolten välillä. [9]





**Kuva 8.** Turvallisuuksiin virheisiin johtavat syyt rakennuksen elinkaaren aikana.

Virheisiin on kuitenkin mahdollista puuttua ja ne voidaan jopa kokonaan eliminoida, kuten kuvasta 9 nähdään. Kommunikaatio ja tarkastustoiminta ovat erinomaisia keinoja rakennuksen elinkaaren jokaisessa vaiheessa.



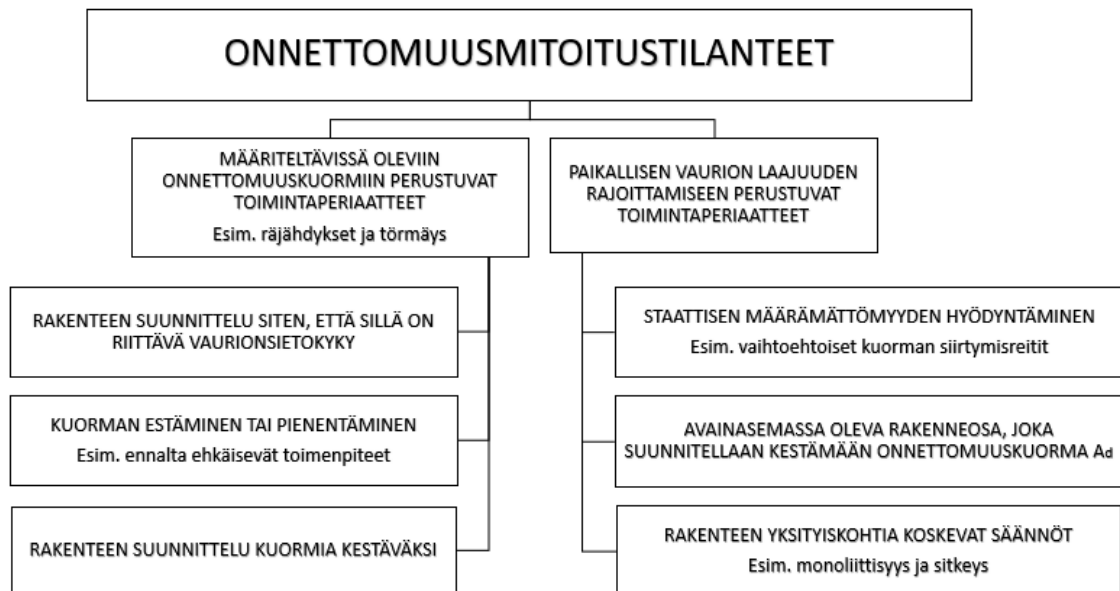
**Kuva 9.** Virheiden eliminointi rakennuksen elinkaaren aikana.

Vain ympäristöön ja olosuhteisiin liittyvien ilmiöiden vaikutuksia ei voida kokonaisuudessa välttää. Kaikki muut virheet koko rakennuksen elinkaaren aikana on mahdollista eliminoida tarkalla koko elinkaaren kattavalla laatu järjestelmällä ja kommunikaatiolla. Lainsäädäntö, suunniteluohjeet, -määräykset ja -standardit ovat suuressa osassa rakennuksen turvallisessa toiminnassa.

### 3.3 Onnettomuusrajatilamitoitus

Eurooppalainen rakenteiden suunnittelua ohjaava standardikokoelma Eurokoodit koostuu suunnittelun yleisohjeista, rakenteiden kuormituksista ja materiaaliakohtaisista suunnitteluohjeista. Eurokoodi SFS-EN 1991-1-7 on standardi, jossa esitetään rakennusten ja siltojen onnettomuuskuormien määrittämistä koskevat periaate- ja soveltamissäännöt. [41]

Kuvassa 10 on esitetty suunnittelun kannalta kaksi strategiaa onnettomuustilanteiden varalle. Kuvassa vasemmanpuoleinen strategia on ennakoitavissa olevien onnettomuustilanteiden mitoittamiseen ja oikeanpuoleinen vastaavasti ennakoimattomien tilanteiden mitoituksen toimintaperiaatteet. Toimenpiteet ennakoimattomien onnettomuustilanteiden varalta parantavat rakennuksen vaurionsietokykyä suunnittelu-, toteutus- tai materiaali- virheiden kannalta. [41]



**Kuva 10.** Onnettomuusrajatilan mitoituksen kulku. [41]

Onnettomuustilanteet voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan seuraavalla tavalla:

- **Ennakoitavat:** Tunnetut onnettomuustilanteet, kuten räjähdys, törmäys, tulipalo tai maanjäristys
- **Ennakoimattomat:** Onnettomuustilanteet, joita ei kyetä tunnistamaan etukäteen suunnitteluhetkellä ympäristön ja rakennuksen kannalta tai joiden todennäköisyys on häviävän pieni, kuten rakenneosan kantavuuden pettäminen tai irtoaminen joutuessa esimerkiksi ennakoimattomasta inhimillisestä virheestä tai perustusten painumista, rungon epäsymmetrisistä lämpö- tai kosteusliikkeistä, ennakoimattomasta räjähdyksestä tai törmäyksestä jne. Ennalta arvaamaton sisäinen tai ulkoinen tapahtuma, jonka kuormitusvaikutusta tai intensiteettiä ei tiedetä. Voi aiheutua myös tunnetusta kuormasta, jos kuorma vaikuttaa ennakoimattomasta suunnasta.

Teoriassa suurin osa rakenteista on alttiina ennakoitaville onnettomuustilanteille, mutta rakenteen mitoitus jokaista siihen kohdistuvan onnettomuustilanteen kuormitusta vastaan ei ole taloudellisesti järkevää. Siksi huomioon otettavat onnettomuuskuormat riippuvat seuraavista tekijöistä: [41]

- toimenpiteistä, joihin on ryhdytty onnettomuuskuorman estämiseksi tai sen vaikutuksen pienentämiseksi,
- määriteltävissä olevan onnettomuuskuorman esiintymistodennäköisyydestä
- määriteltävissä olevasta onnettomuuskuormasta johtuvien vaurioiden seuraamuksista,
- yleisestä suhtautumisesta vaurioitumiseen,
- hyväksyttävästä riskitasosta.

Hyväksyttävä riskitaso riippuu pääosin onnettomuuden seurauksista, julkisesta käsityksestä sekä poliittisista ja taloudellisista tekijöistä. Riskitasoon vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi mahdollisten kuolonuhrien määrä, taloudelliset seuraamukset, varotoimenpiteiden kustannukset, jne. [11] Riskitasosta ja -analyysistä kerrottu enemmän kohdassa 3.3.1.

Rakenteiden suunnittelussa onnettomuusmitoitustilanne on yksi kuormitustapausta muiden joukossa. Muiden kuormitustapausten edellyttämät rakenteet tai rakenneosat voidaan hyödyntää onnettomuustilannetarkastelussa suunnitteluohjeiden mukaisesti. [31]

### 3.3.1 Riskianalyysi

Rakennusta ei voida suunnitella eikä rakentaa täysin riskivapaaksi vaan rakennuksille joudutaan valitsemaan tietty riskitaso. Riskien tunnistaminen sekä niiden hallinta ovat olennainen osa rakenteiden suunnittelua ja suunnittelun yhtenäistämällä suunnittelunormien avulla pyritäänkin tunnistamaan rakenteellisen turvallisuuden riskit. Normien lisäksi erilaiset riskianalyysit toimivat suunnittelua ohjaavina tekijöinä.

Riski käsitteenä sisältää kolme tekijää: uhka, seuraus ja yhteys. Uhka on mahdollisesti vahingollinen tapahtuma, toiminta tai luonnontila. Uhan toteutuessa, sillä on seurauksensa: rakennuksen vaurio, henkilövahingot, taloudelliset vahingot tai ympäristövahingot. Seuraukset ovat oltava mitattavissa, jotta riskianalyysi ja -hallinta on mahdollista. [7]

Kun uhan syyt on tunnistettu ja seuraukset arvioitu, voidaan määritellä kyseisen riskin suuruus, johon vaikuttavat tapahtuman todennäköisyys ja seurausten vakavuus. Riskin suuruuden vertailuluvun – tässä tapauksessa riskiluvun – tai erityisesti siihen liittyvän todennäköisyyden määrittäminen on hyvin subjektiivista, mikäli käytössä ei ole tilastoja sattuneista onnettomuuksista ja niiden vahingoista. Vaikeasti ennakoitavien onnettomuuksien todennäköisyyksiä on mahdotonta arvioida luotettavasti, koska ne ovat yksittäistapauksia. [21]

Rakenteen suunnittelu ja mitoitus perustuvat normaalin käyttötilanteen sekä onnettomuustilanteen mitoitukseen Eurokoodien mukaan. Näissä suunnittelunormeissa pyritään määrittämään rakenteelta vaadittavat vähimmäisominaisuudet eri olosuhteissa, kuten esimerkiksi lumen tai käyttötarkoituksen kuormitusvaikutukset. Lumi-, tuuli-, jääkuormat ovat luonnonkuormia, jotka perustuvat niiden esiintymiseen kerran 50 vuoden aikana. Näin ollen niitä voidaan pitää hyvin luotettavina rakenteen mitoituksen perustana, mutta ylikuormitustilanteet ovat kuitenkin mahdollisia. [31]

Määriteltävissä olevat onnettomuustilanteet eli uhat ovat ilmeisiä ja ennustettavissa olevia, vaikkakin harvinaisia. Rakennuksen käyttötarkoituksen ja sijainnin perusteella voidaan onnettomuustilanteet tunnistaa ennalta vaikkakin onnettomuuskuorman tarkkaa suuruutta tai suuntaa ei aina voida ennakoida. Tyypilliset ennakoitavat onnettomuustapaukset ovat esimerkiksi törmäykset, räjähdykset ja tulipalot. Näitä harvinaisempia ja vaikeammin ennakoitavissa olevia tapauksia ovat muun muassa hirmumyrskyt, tulvat, lumen- tai maanvyöryt sekä maanjäristykset. Onnettomuustapausten toteutumisriskiä voidaan pienentää joko pienentämällä tapahtuman seurauksia tai riskin todennäköisyyttä. [31]

Tarkempi riskitasoluokitus on mahdollista suorittaa kaavan 3.1 avulla: [21]

$$R = T * (H + M + K), \quad (3.1)$$

jossa  $T$  on tapahtuman suhteellinen todennäköisyys,  $H$  on tapahtuman suhteelliset henkilövahingot,  $M$  on tapahtuman suhteelliset materiaalivahingot ja  $K$  on tapahtuman suhteelliset keskeytysvahingot.

Kaavan mukainen menettely soveltuu erityisen hyvin tunnetuille onnettomuuskuormille, missä esimerkiksi kuormituksella tai joillakin muilla olosuhdetekijöillä voi olla suurikin hajonta. [21]

Systemaattiseen riskien arviointiin kuuluu onnettomuustilanteesta aiheutuvien henkilö- ja ympäristövahinkojen sekä taloudellisten vahinkojen arviointi. Taloudelliseen tarkasteluun kuuluvat muun muassa korjaus-, osien vaihto- sekä toiminnan tai käytön keskeytyskustannusten suuruuden arviointi. Rakenteiden osalta mahdolliset henkilövahingot ovat merkitykseltään tärkeimmät. Riskin arviointiin tarkoitettujen toimenpiteiden valintaan vaikuttaa hyväksyttävän vaurion suuruus ja riskin todennäköisyys. Jos riskitasoa ei voida pitää hyväksyttävänä, on välttämätöntä ryhtyä toimenpiteisiin onnettomuustilanteen estämiseksi tai lieventämiseksi. [31]

### 3.3.2 Seuraamus- ja luotettavuusluokat

Rakennuksen seuraamusluokitusta CC käytetään yleisesti rakennusten luotettavuuden hallintaan. Seuraamusluokan valinnalla määritellään rakennuskohteen sortumasta aiheu-

tuvat seuraamukset henkilöturvallisuudelle sekä taloudellisten, sosiaalisten ja ympäristövahinkojen vaikutukset. Seuraamusluokan perusteella kohteelle määritellään myös luotettavuusluokka RC. [40]

Normaalissa murtorajatilamitoituksessa rakennuksen luotettavuusluokka vaikuttaa kuormitusyhdistelmien  $K_{FI}$ -kuormakertoimeen. Luokittelu on olennainen osa rakenteiden suunnittelua ja se tulee tehdä heti kohteen suunnittelun alussa. Murtorajatilamitoituksen seuraamus- ja luotettavuusluokat sekä  $K_{FI}$ -kuormakertoimet on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Rakennusten ja rakenteiden seuraamusluokat ja kuormakerroin. [29], [40]

Seuraamus- ja luotettavuusluokka, kuormakerroin	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3 RC3 $K_{FI} = 1,1$	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Rakennuksen kantava runko <sup>1)</sup> jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuskissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä, kuten <ul style="list-style-type: none"> <li>• yli 8-kerroksiset <sup>2)</sup> asuin-, konttori- ja liikerakennukset</li> <li>• konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelytilat, katsomot</li> <li>• raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset</li> </ul> <p>Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit, luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisiin maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä.</p>
CC2 RC2 $K_{FI} = 1,0$	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Rakennukset, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.
CC1 RC1 $K_{FI} = 0,9$	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä, kuten esim. varastot. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa, kuten <ul style="list-style-type: none"> <li>• matalalla olevat alapohjat ilman kellaritiloja</li> <li>• ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.</li> <li>• standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokkien II ja III muotolevyrakenteet</li> <li>• standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokkien I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille <sup>3)</sup>.</li> </ul>
<p><sup>1)</sup> Ylä- ja välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaa CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena. Rakennuksen koostuessa erilaisista toisistaan riippumattomista rakennusosista määritetään kunkin osan seuraamusluokka erikseen.</p> <p><sup>2)</sup> Kellarikerrokset mukaan luettuina.</p> <p><sup>3)</sup> Ei koske kuormituksia, jotka syntyvät, kun muotolevyrakenteita käytetään siirtämään levytason suuntaisia leikkausvoimia (levyvaikutuksen hyväksikäyttö) tai normaalivoimia.</p>		

Seuraamusluokalla ei pelkästään määritellä kuormitusyhdistelmien kuormakerrointa, vaan se on myös keino luokitella rakennuksen riskitaso, jolla on vaikutuksia suunnittelun ja toteutuksen aikaisiin tarkastuksiin sekä laadunvarmistustoimenpiteisiin.

Eurokoodissa EN 1990 määritellään myös suunnittelun valvonnalle oma tasoluokituksensa, johon kuuluu monia erilaisia suunnitteluorganisaation laadunvalvontatoimenpiteitä. Taulukon 3 mukaiset kolme suunnittelun valvontatasoa voidaan liittää rakenteen merkityksen ja kansallisen vaatimusten tai käyttöohjeen mukaisesti valittuihin luotettavuusluokkiin.

**Taulukko 3. Suunnittelun valvontatasot. [40]**

Suunnittelun valvontatasot	Ominaisuudet	Laskelmien, piirustusten ja eritelmien tarkastamisen suositetut vähimmäisvaatimukset
DSL3, liittyy tasoon RC3	Laaja valvonta	Kolmannen osapuolen suorittama tarkastus: Tarkastuksen suorittaa muu kuin suunnitelman laatinut organisaatio.
DSL2, liittyy tasoon RC2	Normaali valvonta	Tarkastuksen suorittavat muut henkilöt kuin alun perin suunnittelusta vastuussa olleet ja se suoritetaan organisaation oman menettelytavan mukaisesti.
DSL1, liittyy tasoon RC1	Normaali valvonta	Itse suoritettava tarkastus: Tarkastuksen suorittaa suunnittelija itse.

Suunnittelun valvonnan tasoluokituksen kuuluu usein myös suunnittelijoiden ja tarkastajien luokitus, joka on MRL:n 120 e §:n pätevyysluokituksen mukainen. Luokituksen voi sisältyä vaihtoehtoisesti joko tarkennettu, rakenteen kannettavaksi tulevien kuormien yksityiskohtaisen luonteen ja suuruuden arviointi tai siihen voi sisältyä mitoituksen vaikuttavien kuormien hallintajärjestelmä, jolla aktiivisesti tai passiivisesti hallitaan näitä kuormia. Eurokoodissa EN 1990 on esitetty myös toteutuksen aikaisille tarkastuksille tarkastustasot, jotka ovat rinnastettavissa taulukon 3 mukaisiin suunnittelun tarkastusten valvontatasoihin. [40]

Onnettomuusrajatilamitoituksessa rakennusten tai rakenneosien seuraamusluokitus ei johda kuormakertoimen määritykseen, koska  $K_{FI}$ -kerrointa ei käytetä lainkaan onnettomuustilanteiden kuormitusyhdistelyssä, vaan sillä pyritään selvittämään rakennuksen riskitaso ja menettelytapa rakenteiden vaurionsietokyvyn varmistamiseksi. Taulukossa 4 on esitetty onnettomuustilanteen seuraamusluokat.

**Taulukko 4.** Rakennusten ja rakenteiden onnettomuustilanteen seuraamusluokat. [31]

Seuraamus-/ alaluokka	Rakennukset ja niiden käyttötarkoitus
CC1	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä, kuten esimerkiksi varastot.
CC2a melko pienen riskin ryhmä	Rakennukset, joissa on korkeintaan 4 maanpäällistä kerrosta tai joiden korkeus maanpinnasta on enintään 16m. Asuinrakennukset, joissa on korkeintaan 2 maanpäällistä kerrosta, voidaan suunnitella onnettomuustilanteessa seuraamusluokan 1 mukaisesti.
CC2b melko suuren riskin ryhmä	Kaikki muut rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu alaluokkiin 1, 2a tai 3.
CC3a	9-15 kerroksiset asuin-, konttori-, ja liikerakennukset, ja muut 9-15 kerroksiset käyttötarkoitukseltaan ja rungoltaan samantyyppiset rakennukset; kerrosten lukumäärään luetaan kellarikerrokset mukaan.
CC3b	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) muut yli 8-kerroksiset rakennukset kellarikerros mukaan luettuna</li> <li>b) konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot</li> <li>c) raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset, joissa usein on suuri joukko ihmisiä</li> <li>d) erikoisrakenteet tapauskohtaisesti harkinnan mukaan.</li> </ul>

Samassa rakennuksessa saattaa olla onnettomuustilanteen kannalta useampaan seuraamusluokkaan kuuluvia rakenneosia. Rakennuksen kantava runko saattaa kuulua korkeampaan seuraamusluokkaan, kuin rakenteet, jotka eivät toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenneosana, kuten esimerkiksi erillinen IV-konehuone rakennuksen katolla.

### 3.4 Sitkeiden rakenteiden teoria

Rakennuksen ja sen rakenteiden muodonmuutoskyky ja sitkeys voidaan saavuttaa usealla eri tavalla. Kirjallisuudesta löytyy paljon teoreettisia menetelmiä, jotka vaativat suunnittelijalta kokonaisvaltaista käsitystä rakennejärjestelmän toiminnasta. Useat teorioista lähestyvät rakenteellista sitkeyttä samasta suunnasta, mutta jokainen niistä on silti oma erillinen versio sitkeyden saavuttamiseksi. [17]

#### 3.4.1 Lujuus

Rakenteiden lujuuskapasiteetin kasvattaminen on usein ainoa ja taloudellisin keino kasvattaa rakennuksen sitkeyttä, etenkin kun hauraiden materiaalien ja rakenneosien käyttöä ei pystytä välttämään. Suunnitteluohjeissa tähän pyritään vaikuttamaan määräämällä pienempiä pienennyskertoimia materiaalien tai rakenneosien lujuuksille. Nämä ohjeet ovat



kuitenkin laadittu tyypillisten rakennejärjestelmien suunnitteluun, joten niistä poikkeaville rakenteille on suunnittelijan määriteltävä eri rakenneosille rationaaliset varmuudet.

Tämän päivän rakennesuunnittelussa kriittisten rakenneosien suhteellisen lujuuden määrittäminen ja lisäkestävyyden takaaminen luovat perustan kapasiteettimitoitukselle. [17]

### 3.4.2 Rakenteellinen jatkuvuus ja yhteistoiminta

Useat rakenteet etenkin vanhoissa rakennuksissa, on rakennettu yksinkertaisesti laittamalla elementtejä päällekkäin niin, että pystykuormat on välitetty perustuksiin kantavien rakenteiden kontaktilla. Vaakasuuntaisista kuormista ei olla välitetty tai ne on oletettu riittävän pieniksi, että ne eivät ylitä pintojen kitkavaikutusta. Tämä on osoittautunut yhdeksi suurimmaksi riskitekijäksi monissa sortumissa, jotka ovat johtuneet yksittäisten elementtien siirtymisistä pois tuelta maanjäristyksen, räjähdysten tai pitkäaikaisten siirtymien vuoksi. Rakenteellisen jatkuvuuden saavuttamiseksi, on rakenneosat sidottava kiinni toisiinsa tavalla, joka estää tämän tyyppiset siirtymiset. [17]

Tyypillinen rakenneanalyysi olettaa, että kaikki rakennejärjestelmät – ellei niitä ole tarkoituksella erotettu toisistaan liikuntasauvan avulla – toimivat kokonaisuutena. Siirtymien eroavaisuudet syntyvät ainoastaan rakenneosien pienistä muodonmuutoksista. Tämä hypoteesi on osoittautunut kuitenkin vaaralliseksi etenkin maanjäristysalueilla, missä rakenteen toiminta on poikennut oletetusta dynaamisten kuormitusten vaikutusten vuoksi. [17]

Rakenteellinen jatkuvuus ei välttämättä ole joka tilanteessa taakka rakenteen vaurionsietokyvystä. Jos suunnittelussa tai toteutuksessa on tehty systemaattinen virhe esimerkiksi orsi-rakenteissa, voi jatkuvuus edesauttaa sortuman etenemistä rakenneosalta toiselle liian vähäisen kapasiteetin tai muodonmuutoskyvyn takia.

### 3.4.3 Kuormansiirtotavan sisäinen muutos

Rakenneosaan kohdistuvan kuormituksen ylitettyä sen kapasiteetin, on rakenneosalla vielä toinen tai joissain tapauksissa useampi keino siirtää siihen kohdistuvia kuormia.

Esimerkiksi, jos maantien törmäyskaiteen taivutuskestävyys ylittyy kuorman kohdistuessa kohtisuoraan sauvan neutraaliakselin suhteen, syntyy siihen kineettisen mekanismin avulla muodonmuutos, luoden siihen tietyn määrän plastisia niveliä. Nämä nivelet mahdollistavat materiaalin myötäämisen takia suuriakin muodonmuutoksia, mutta riippumattomaisen yhteisvaikutuksen avulla se ei katkea ja näin ollen pitää törmäävän ajoneuvon tiellä. Vaikka törmäyksen jälkeen kaide on käyttökelvottomassa kunnossa ja näky sen mukainen, on se kuitenkin täyttänyt sen tehtävän mihin se on suunniteltukin.

Talorakenteissa pilarin menetys ei johda laatan hallitsemattomaan ja suhteettoman suureen romahdukseen, mikäli laatta on suunniteltu kestäväksi köysivaikutuksen avulla ilman pilaria. Suunnittelussa ei kuitenkaan kovin usein näin tehdä, koska suunnittelua ohjaa taloudelliset syyt. On edullisempaa suunnitella pilari kestäväksi suurempia ja poikkeavia kuormitustilanteita.

Mikäli rakenteelta edellytetään toissijaisia kuorman siirtomuotoja, on sen onnettomuuden jälkeisen tilanteen suunnittelu ja analysointi suoritettava huolellisesti, mahdollisimman todennukaisesti odotettuun tilanteeseen nähden. [17]

### 3.4.4 Vaihtoehtoiset kuormien siirtymisreitit

Periaatteeltaan samanlainen kuin kuormansiirtokyvyn muutos, mutta tässä tapauksessa useat eri kuormien siirtymisreitit ovat jo suunnittelussa otettu käyttöön ohjaamalla rakenteen kuormat niiden kaikkien läpi. Jos yksi tai useampi niistä vaurioituu, loput ovat silti toimintakykyisiä siirtämään kuormat. Tämän toimintatavan takaamiseksi on rakenteiden suunnittelussa kuitenkin huolehdittava seuraavista asioista: [17]

- Jäljelle jäävien rakenteiden kestävyys on oltava riittävä vaurion jälkeisten kuormien siirtämiseen.
- Rakenneosien on kyettävä muodonmuutokseen menettämättä kestävyytään niin, että muut rakenneosat eivät ehdi jakamaan kuormia uudelleen. Jos tämä ei onnistu, on mahdollista, että syntyy vetoketjumaisesti etenevä jatkuva sortuma.
- Jäljelle jäävät kuormien siirtymisreitit täytyy varustaa lisärakenteilla kuormien siirtämiseksi vaurioituneelta rakenneosalta toiselle.
- Vaurion jälkeinen rakennejärjestelmä on oltava rakenteelliselta toiminnaltaan täysin alkuperäisen korvaava systeemi, huomioiden muun muassa kokonaisstabiilius.

Esimerkkinä tällaisesta ylimääräisestä rakenteesta on puupalkkilattia, missä suurimman osan ajasta yllä luetellut tilanteet ovat hallinnassa: [17]

- Puupalkki on mitoitettu kaksin- tai kolminkertaisella kokonaisvarmuudella, riippuen tarkasteltavasta tilanteesta. Näin ollen vaurioituneen puupalkin molemmiin puolin olevat palkit pystyvät siirtämään ylimääräisen kuorman. Tilanne on toki vakavampi, mikäli useampi vierekkäinen palkki menettää kestävyytensä. Etenkin kun puu on lähtökohtaisesti hauras materiaali, jolloin kapasiteetti katoaa kokonaan nopeasti ylikuormituksen jälkeen.
- Puupalkkilattiat ovat yleensä tuettu poikittain palkkien lommahdusta vastaan laudoin tai ristikoin, jotka toimivat edelleen palkin vaurioitumisen jälkeenkin.

Mitä useampi kuorman siirtymisreitti sisältää hauraita tai muodonmuutoksiltaan rajoitettuja rakenneosia, sitä suurempi on jatkuvan sortuman riski. [17]

### 3.4.5 Muodonmuutoskyky haurasmurtoa vastaan

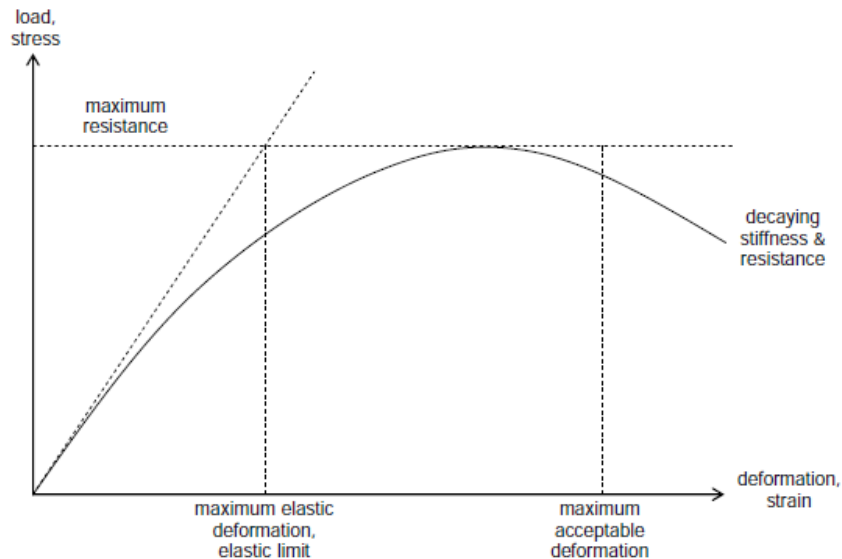
Yleisesti ottaen muodonmuutoskyky voidaan esittää kaavan 3.2 mukaisena suhdelukuna.

$$\text{Muodonmuutoskyky} = \frac{\text{Muodonmuutoksen maksimi}}{\text{Kimmoisen muodonmuutoksen maksimi}} \quad (3.2)$$

Kimmainen muodonmuutoksen maksimi, eli ns. kimmoraja voi usein olla väittelyn aihe, etenkin materiaaleilla, joilla on asteittainen jäykkyyden menetys. Niiden jäykkyys määritellään kaavan 3.3 mukaan.

$$\text{Jäykkyys} = \frac{\text{Kuorman kasvu}}{\text{Muodonmuutoksen kasvu}} \quad (3.3)$$

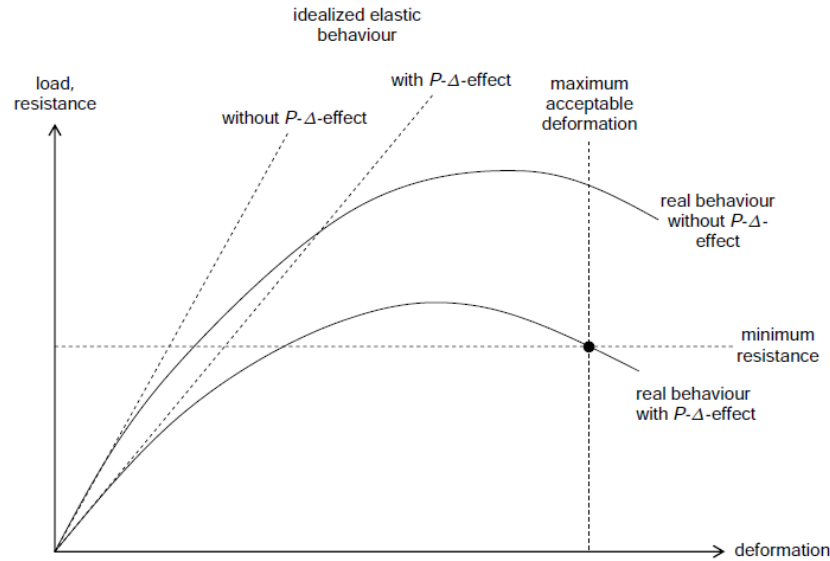
Materiaalin muodonmuutoskykyä voidaan havainnollistaa esimerkiksi kuvassa 11 esitetyn kaavio avulla. Vaaka-akselilla on kappaleen tai materiaalin muodonmuutos/rasitus ja pystyakselilla on kuormitus/jännitys. [17]



**Kuva 11.** Sitkeän materiaalin toiminta. [17]

Kimmoisen muodonmuutoksen maksimi määritellään kahden kohtisuoran viivan leikkauspisteeseen ja materiaalin muodonmuutos ajatellaan suoraviivaisena. Todellisuudessa sitkeä materiaali käyttäytyy kuitenkin kaavion paraabelin mukaisesti, eli muodonmuutos ei ole lineaarinen. [17]

Suurin sallittu muodonmuutos on samalla tavoin hyvin vaihteleva ja sen määritelmän tulisi olla riippuvainen tarkasteltavasta tilanteesta. Ehkä kattavimpana yhteisenä nimityksenä on suurin mahdollinen muodonmuutos, jonka järjestelmä kestää säilyttäen tarvittavan kapasiteetin. Tämä määritelmä johtaa automaattisesti sitkeän rakenteen suunnitteluun ja sitä kautta kuvan 12 mukaiseen iteratiiviseen menettelytapaan, jossa suunnitteluratkaisuun päädytään yrityksen ja erehdyksen kautta. [17]



**Kuva 12.** Riittävän muodonmuutoskyvyn suunnittelu. [17]

Suurin osa rakennejärjestelmistä ja materiaaleista ovat luonteeltaan kuvien 25 ja 26 mukaisia, joissa kestävyuden saavutettua maksimiarvonsa, pienenee se asteittain esimerkiksi toisen kertaluvun, kumulatiivisen vaurion tai kriittisen poikkileikkauksen pienentymisen takia. Poikkeuksia ovat tietyt metallit ja metalliseokset, joille on tyypillistä niin kutsuttu myötölujittuminen myötörajan ylittyttyä. Myötölujittumista voidaan käyttää hyväksi rakenteen sitkeydessä, josta kerrottu enemmän kappaleessa 3.4.10.

Haurasmurtuma on rakenteen kantavuuden kannalta vaarallinen murtumismekanismi, jossa materiaali on kykenemätön plastiseen muodonmuutokseen riittävän nopeasti. Murtuma etenee alkusärön syntymisen jälkeen hyvin nopeasti pienellä energiamäärällä. Tästä johtuen rakenne menettää nopeasti koko tai ainakin suurimman osan kuorman siirtokapasiteetistaan. Haurasmurtumaan liittyviä tekijöitä: [17]

- Materiaaliominaisuudet,
- paikalliset heikennykset,
- rakenneosaa heikommat liitokset,
- väsyminen,
- hoikkuudesta aiheutuva stabiliteetin menetys.

### 3.4.6 Jatkuvan sortuman pysäytys

Huomattava osa erilaisista rakennejärjestelmistä ovat taipuvaisia tietyn tyyppiseen jatkuvaan sortumaan, jota kutsutaan vetoketju- tai dominoefektiksi. Sortuma etenee rakenneosasta toiseen edellisen osan vaurioitumisen seurauksena, johtaen lopulta koko rakennuksen sortumaan.

Dominoefektin pysäyttämiseksi on hauraiden rakenneosien sekaan suunniteltava riittävän sitkeitä osia tai alueita, joiden kestävyys ja muodonmuutoskyky ylittävät sortuman etenemisestä syntyvät rasitukset. [17]

### 3.4.7 Sulake-elementti

Rakenejärjestelmässä sulake-elementti eroaa paremmin tunnetusta sähköjärjestelmän sulakkeesta, joka pysäyttää sähkövirran kulun kokonaan ylikuormitustilanteessa. Rakenteellinen sulake säilyttää kuorman välityskyvyn tiettyyn pisteeseen asti rakenteen muodonmuutoskyvyn ansiosta. Tällä tavalla se rajoittaa toiselle rakenneosalle siirtyvän kuorman määrää. Sulake-elementin muodonmuutoskyky on rajoitettu ja sen sitkeys edellyttää, ettei sitä ylitetä. [17]

### 3.4.8 Suojarakenteet

Jos rakenteisiin on mahdotonta saada sitkeyttä parantamalla niiden muodonmuutoskykyä ja kapasiteettia, on järkevää harkita kantavien rakenteiden suojaamista erillisillä suojarakenteilla. Pilarin tai seinän kestävyyttä esimerkiksi kuorma-auton törmäystä vastaan saattaa olla tietyissä tilanteissa taloudellisesti mahdotonta saavuttaa, joten kantavan rakenteen ja törmäyskuorman väliin suunnitellaan rakenne suojaamaan pilarin ensisijaista toimintaa. [17]

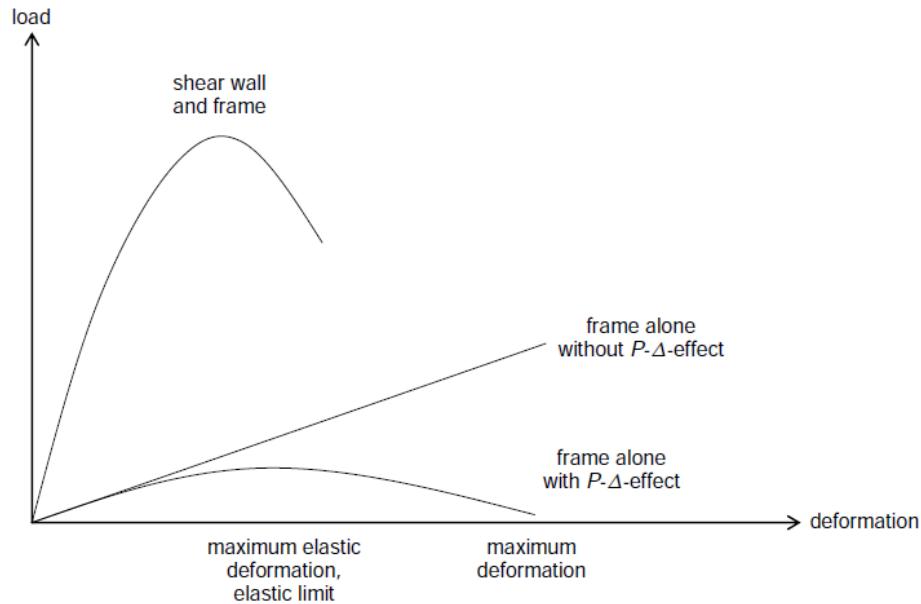
Rakenejärjestelmän sisäistä suojarakennetta hyödynnetään niin sanotussa knock-out-teoriassa. Siinä rakenejärjestelmässä uhrataan osa tai osia törmäyksen tai räjähdysten aiheuttamien kuormien vaikutuksille. Uhrattava osa absorboi räjähdysten aikaansaaman paineaallon energian tuhoutumalla heikentämättä koko rakenejärjestelmän toimintaa. Tämä tapa on yleinen liikenneväylien viereisten tai räjähdevarastojen seinä- ja kattorakenteissa, joihin lisätään paneeleja, jotka hajoavat päästäten paineen purkautumaan suljetusta tilasta. [17]

### 3.4.9 Jäykkyydystarkastelu

Monessa tapauksessa rakenneosan muodonmuutoksia on rajoitettava, koska ne vaarantavat sitkeyttä menettämällä stabiilisuutensa toisen kertaluvun teorian mukaan tai taipunut rakenne ei enää kykene palvelemaan tarkoitustaan.

Perinteisesti muodonmuutokset ovat kääntäen verrannollisia jäykkyyteen. Poikkeuksia ovat muodonmuutosrajoitetut tapaukset, kuten seismisten alueiden rakennukset. Niissä rakenteen on kestettävä maanjäristyksen aiheuttama värähtely sallimalla tarvittava muodonmuutos rakenteille värähtelytaajuuden mukaan. Normaalitilanteen tuulikuormille on rakennuksen rungolta löydettävä kuitenkin riittävä jäykkyyttä toimiakseen hyväksyttävällä tavalla. [17]

Kuvassa 13 on esitetty kolmen eri runkovaihtoehdon jäykkyysominaisuudet. Ylin käyrä on leikkausjäykkä seinä ja kehä -yhdistelmä. Lineaarinen viiva on pelkkä kehä ilman toisen kertaluvun teoriaa, alin käyrä sama kehä toisen kertaluvun teoria otettuna huomioon. [17]



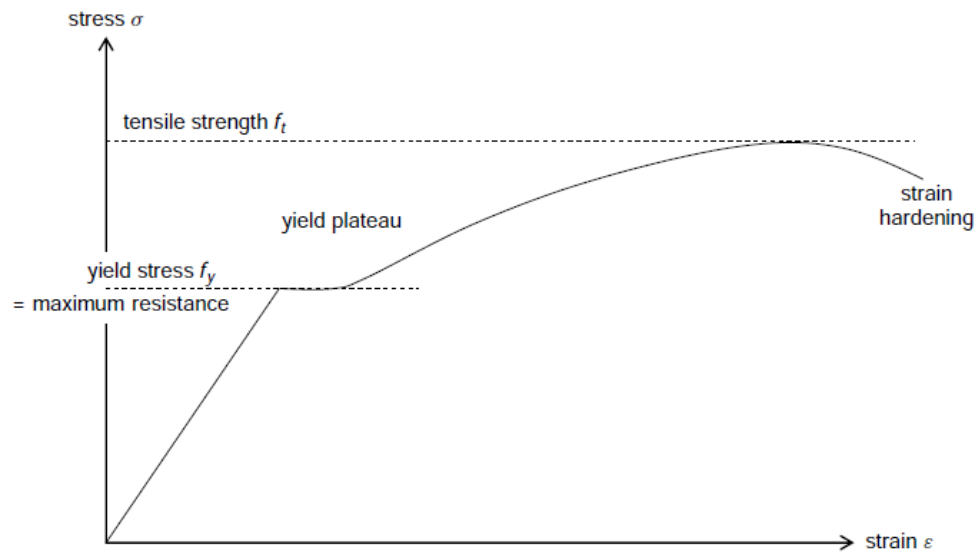
**Kuva 13.** Yhdistelmärungon toiminnan vertailu pelkkään momenttijäykkään keuhään. [17]

Jäykkyys on muuttuva määre, joka yleensä heikkenee kuormien kasvaessa ja kuormitusjaksojen tihtyessä. Tämä on erityisen tärkeä asia tapauksissa, joissa rakenne sisältää useita rinnakkaisia eri jäykkyysominaisuuksilla varustettuja kuormien siirtymisreititejä. Hyvänä esimerkkinä on rakennejärjestelmät, joissa keuharakenteen yhteydessä on käytetty jäykistäviä seinärakenteita. Ne ovat olleet hyvin yleisiä seismisten kuormitusten altistamille rakennuksille. Ideana on kehittää rakenteelle kaksi puolustuslinjaa. Ensimmäinen niistä on leikkausjäykkä seinä rajoitetulla muodonmuutoskyvyllä, toinen on momenttijäykkä muodonmuutoskykyinen keuhä, jonka leikkausjäykkyys on vähäinen. [17]

Tämän tyyppisissä rakenteissa ongelmana on leikkausjäykkyysien suuri ero. Käytännön esimerkkejä tästä on 1960-1980-luvulla suunnitellut korkeat rakennukset, joista on havaittu, että epäedullisin tapahtumaketju kehittyi suurten kuormitusten aikaansaamana. Leikkausjäykät seinät kannattelevat suurimman osan leikkausvoimista niin kauan, kunnes niiden kapasiteetti ylittyy ja kantokyky katoaa nopeasti. Sen jälkeen keuhä jää yksin kaikkia rasituksia vastaan. Vaikka teoriassa keuhä pitäisi mitoittaa 25%:n osuudelle pohjakerroksen leikkausvoimia vastaan, on sen jäykkyyskapasiteetti usein heikompi keuhän sivusiirtymäherkkyyden vuoksi. Tämä johtaa huomattavaan muodonmuutokseen ja sitä kautta sortumariskiini toisen kertaluvun teorian mukaan. [17]

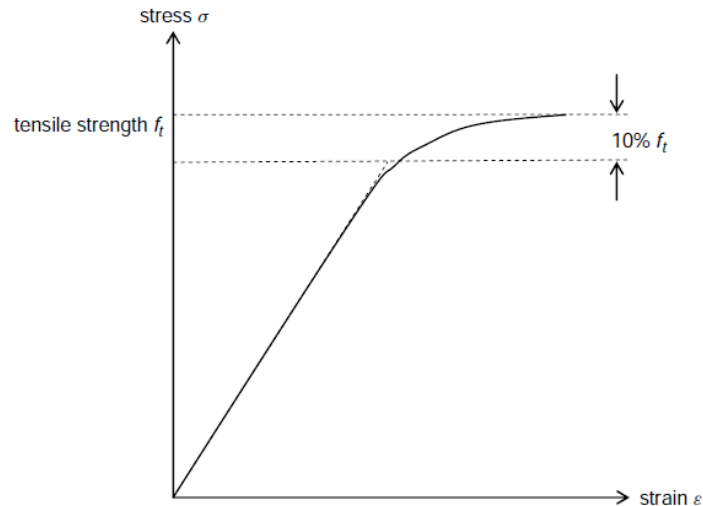
### 3.4.10 Myötölujittumisen hyödyntäminen

Myötölujittumiseksi kutsutaan materiaalin ominaisuutta, jossa jäykkyys kasvaa venymän kasvaessa. Myötölujittumisilmiö on esitetty kuvassa 14. Kappaleessa vallitsevan jännityksen ylitettyä materiaalin myötörajan, kasvaa sen suhteellinen pituus huomattavasti nopeammin, mutta kuitenkin jännitystilän voimistuessa. Jännityksen saavuttaessa materiaalin murtorajan, jännitys laskee ja kappale lopulta katkeaa. Materiaalin jännityskapasiteetti on kuitenkin suurempi hauraisiin materiaaleihin verrattuna, vaikkakin myötörajan ylityttyä kappaleeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia. [17]



**Kuva 14.** Myötölujittuminen myötörajan ylityttyä. [17]

Ominaisuus on yleinen matalan myötörajan omaavilla teräsladuilla. Nykyään tarjolla olevien korkealujuusterästen myötöraja on jo teräksen valmistusvaiheessa nostettu myötölujittumisalueelle, joten niiden toiminta selvästi erilainen. Korkealujuusteräksen jännitys-venymäkäyrä on esitetty kuvassa 15. Murtojännitys ylittää myötöjännityksen vain noin kymmenellä prosentilla. [17]



**Kuva 15.** Korkealujuusteräksen jännitys-venymä-käyrä. [17]

Myötölujittumisen etu sitkeyden kannalta on selkeä: reservistä löytyy lujuutta, jota voidaan hyödyntää ennen kuin liialliset muodonmuutokset aiheuttavat sortuman. Muodonmuutos myös toimii varoituksena käyttäjälle rakenteen ylikuormittumisesta. [17]

### 3.4.11 Valvonta, nopea reagointi ja evakuointi

Ihmisen toiminnalla onnettomuustilanteessa tai sen ehkäisyssä on merkittävä rooli. Rakennuksen ylläpitoon ja huoltoon tulee kiinnittää huomiota mahdollisten rakennevaurioiden välttämiseksi ja havainnoimiseksi. Rakenteelliseen turvallisuuteen liittyviä varoitusmerkkejä ovat: [17]

- halkeamat rakenteessa tai pintamateriaalissa,
- suhteettoman suuri taipuma tai siirtymä,
- sirpaloituminen, rapautuminen,
- ruostuminen, mädäntyminen, lahoaminen, homeinen haju,
- jumittuminen, liikkeen puute paikoissa, joiden on tarkoitus liikkua,
- kasvava tärinä, äänentaajuuden muutos,
- äänet,
- kiinnittimen löystyminen tai niiden puute,
- vuoto, värien haalistuminen,
- vedettyjen sauvojen tai kaapeleiden löystyminen,
- kuluma, jne.

Rakennukselle tulisi olla laadittuna turvallisuussuunnitelma sujuvan evakuoinnin mahdollistamiseksi. [17]



### 3.4.12 Testaus

Useassa sitkeän rakenteen matemaattisessa tarkastelussa on mahdotonta arvioida rakenteen todellista käyttäytymistä onnettomuustilanteiden aiheuttamissa ääriolosuhteissa, jolloin testaus saattaa olla ainoa varma tapa sitkeyden analysointiin. [17]

Kokonaisia rakennejärjestelmiä on käytännössä mahdotonta testata suuressa mittakaavassa, mutta tuoteosatoimittajat ja kansalliset testauslaitokset tekevät yksittäisten rakenneosien tai liitosten testausta. Näillä testituloksilla on merkittävä asema suunnittelijalle ajatellen rakennuksen sitkeyttä. [17]

### 3.4.13 Mekaaniset laitteet

Voimien ja siirtymien mittaamiseen on kehitetty useita erilaisia mittauslaitteita, jotka voidaan jakaa kahteen eri luokkaan:

- Passiiviset laitteet, jotka toimivat itsenäisinä ilman erillistä energianlähdettä.
- Aktiiviset laitteet, jotka ovat tarvitsevat toimiakseen ainakin osan ajasta sähköä.

Passiivisten laitteiden toiminta on huomattavasti varmempia toiminnaltaan, sillä ne eivät ole sidonnaisia toiseen järjestelmään. Tässäkin asiassa pätee sama kuin monessa muussa niin teknisessä kuin rakenteellisessa järjestelmässä: Mitä monimutkaisempi ja hienostunut laite on, sitä alttiimpi se on toimintahäiriöille. [17]

## 3.5 Rakennuksen vaurionsietokyvyn käytännön ratkaisut

Rakenteellinen sitkeys eli vaurionsietokyky otetaan huomioon onnettomuusrajatilamitoituksessa. Onnettomuustilanteen seuraamusluokan määrittäminen on olennainen osa sitä. Seuraamusten luokitteluperuste on rakenteen tai tarkasteltavan rakenneosan merkitys henkilöturvallisuuden ja sortuman aiheuttamien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen seuraamusten kannalta. [31] Seuraamusluokittelusta on kerrottu kohdassa 3.3.2.

Keinoja sitkeiden rakenteiden suunnitteluun on useita ja ne voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan:

- Vaaka- ja pystysiteet: Sidejärjestelmä.
- Vaihtoehtoinen kuormien siirtyminen: Rakennejärjestelmä, paikallisen vaurioitumisen hyväksyttävä raja, kuvitteellinen rakenneosan poistaminen.
- Kapasiteettimitoitus: Rakenneosan mitoitus avainasemassa, lisävaaka- ja -pystyvoimat.

### 3.5.1 Rakennejärjestelmä

Rakennejärjestelmän valinnalla on merkittävä rooli rakennuksen vaurionsietokyvyn kannalta. Perinteinen monta kantavaa seinää sisältävä kuorirakenne takaa järkevän sitkeyden rakennukselle, sillä yhden seinän äkillinen tuhoutuminen ei johda suureen rakennuksen osan jatkuvaan sortumaan. Vastakohtana on suuren jännevälin vaakarakenne, joka tuetaan helposti vaurioituvan ja herkästi sivusiirtyvän pilarin avulla. Alla listattuna esimerkkejä rakennejärjestelmistä, jotka ovat osoittautuneet erityisen vaurioalttiiksi: [28]

- Järeät siirtopalkit, jotka kannattelevat useaa pilaria tai muuta pystykuormia välittäviä rakenneosat,
- selvästi pienemmät rakenneosat, jotka varmistavat suurempien ja merkittävämpien rakenneosien stabiiliuden,
- suuret ulokepalkit,
- suuren jännevälin, yksinkertaisesti tuetut palkit.

Rakenteiden suunnittelijalla tulee olla selkeä käsitys valitun rakennejärjestelmän vaurioista ja taattava, että rakenne pystyy välittämään sille aiheutuvat vaaka- ja pystykuormat turvallisesti perustuksille. Sitkeyden takaamiseksi rakennejärjestelmän on vältettävä tilanteita, joissa pienen alueen tai yhden rakenneosan vaurio laajenee suureksi sortumaksi. On kuitenkin tilanteita, jolloin edellä mainittu luotettavuus on mahdollista suunnitella vain tiettyihin rakenneosiin mitoittamalla ne riittävän kestäviksi.

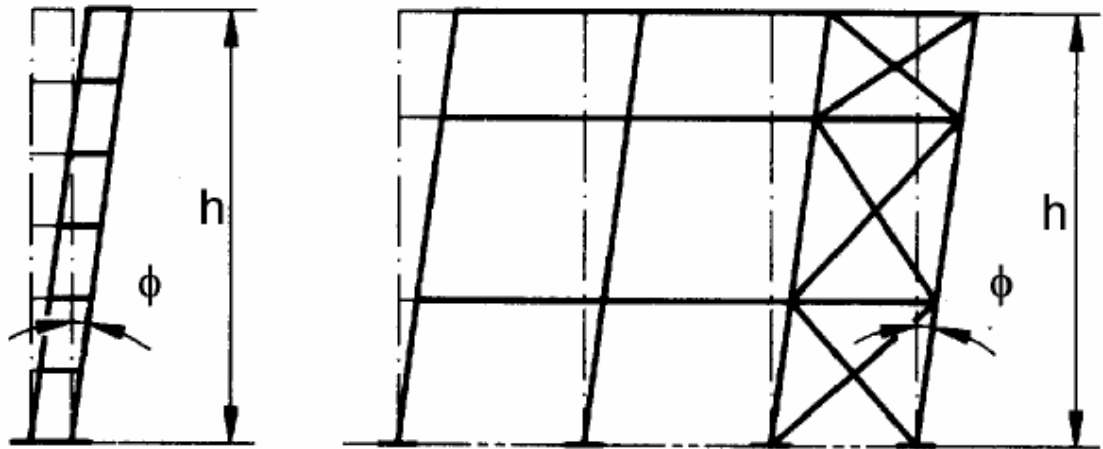
Rakennesuunnittelun aikana on huomioitava, että osan rakenneosista saattaa suunnitella, joku muu kuin kohteen päärakennesuunnittelija. Tämä ei kuitenkaan poista hänen vastuutaan taata koko rakennuksen turvallinen toiminta kaikissa oletettavissa olosuhteissa. Näin ollen riittävä dokumentaatio koko suunnitteluprosessin aikana on ensiarvoisen tärkeää. Suunnittelun valmistuttua on päärakennesuunnittelijan tarkastettava suunnitelmat varmistaakseen, että alkuperäiset oletukset rakenteen toiminnalle on saavutettu ja tarvittavat kuormat ja niiden siirtymisreitit on huomioitu. [28]

### 3.5.2 Lisävaakavoimat

Jokaisen rakenteen olisi kyettävä siirtää vaakasuuntaiset kuormat perustuksille, kohdistuivat ne rakenteelle mistä tahansa vaakasuuntaisen tason suunnasta. Yleensä tuulikuorma aiheuttama vaakakuorma on riittävä kuorma määrittämään rakenteen vakavuus, mutta on kuitenkin tilanteita, missä tuulikuorma ei vaikuta tai on muuten vähäinen.

Eurokoodeissa rakenteille kohdistetaan mittaepätarkkuuksien johdosta vaakakuorma, joka on riippuvainen rakenneosalle kohdistuvasta normaalivoimasta ja rakenteen vinoudesta. Epätarkkuuksien vaikutukset sivusiirtyvien kehärakenteiden sauvojen nurjahduksessa otetaan huomioon kehän rakenneanalyysissä käyttämällä alkusivusiirtymän muo-

dossa olevaa ekvivalenttia sivusiirtymää ja yksittäisten sauvojen alkukaarevuuden muodossa olevia epätarkkuuksia. Kuvassa 16 on esitetty sivusiirtyvän kehärakenteiden ekvivalentit alkusivusiirtymät. [42]



**Kuva 16.** Rakennuksen ekvivalentit sivusiirtymät. [42]

Alkusivusiirtymä voidaan laskea kaavan 3.4 mukaan:

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m, \quad (3.4)$$

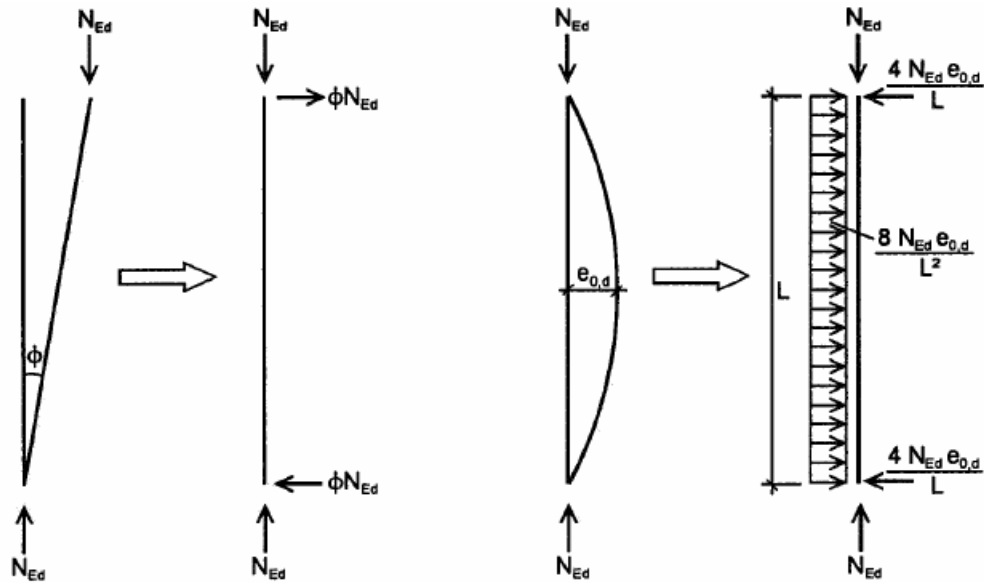
jossa  $\phi_0$  on perusarvo:  $\phi_0 = 1/200$ ,  $\alpha_h$  on kaavan 3.5 mukainen pilareihin sovellettava korkeuden  $h$  pienennystekijä ja  $\alpha_m$  on kaavan 3.6 mukainen pienennystekijä, joka ottaa huomioon rivissä olevien pilarien lukumäärän.

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ mutta } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0, \quad (3.5)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}, \quad (3.6)$$

jossa  $m$  on niiden rivissä olevien pilarien lukumäärä, joiden kantama pystysuuntainen kuorma  $N_{Ed}$  on vähintään 50 % tarkasteltavassa pystysuuntaisessa tasossa olevan pilarin keskimääräisestä kuormasta.

Kuvassa 17 on esitetty rakennuksen alkusiirtymästä ja sen epätarkkuudesta aiheutuvan vaakakuorman suuruus. Vaakakuorma vaikuttaa mahdollisen tuulikuorman kanssa yhtä aikaa kuormitusyhdistelmien mukaisesti, kuitenkin vain yhdestä suunnasta kerrallaan.

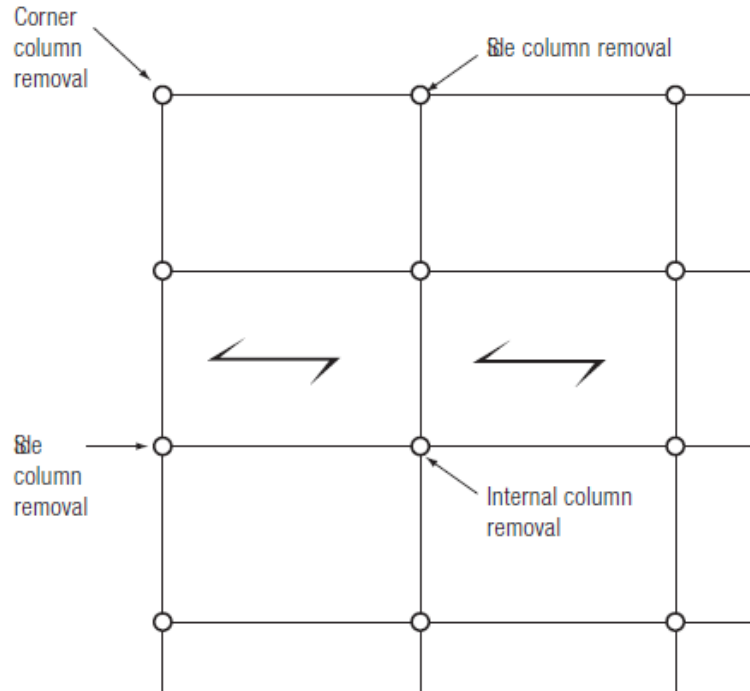


*Kuva 17. Rakennuksen alkusiirtymästä ja -epätarkkuudesta aiheutuva vaakakuorma. [42]*

### 3.5.3 Kuvitteellinen rakenneosan poistaminen

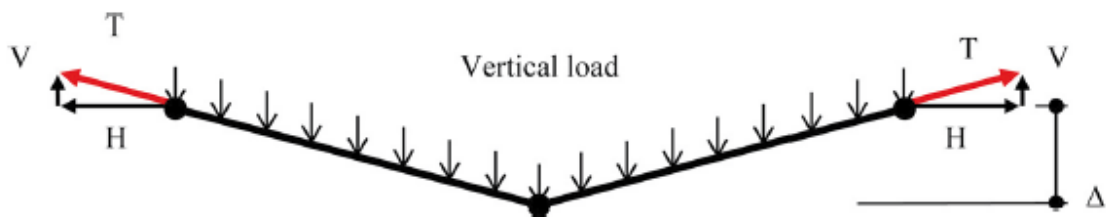
Sitkeän rakenteen saavuttamiseksi voidaan rakennejärjestelmän toiminta mitoitaa tilanteissa, jossa rakennuksesta poistetaan kantava rakenneosa. Tällaisessa tapauksessa tutkitaan kaikki toiminnaltaan erilaisten rakenneosien poistaminen erikseen kerroksittain. Rakenneosan poistamisella pyritään löytämään kuormille vaihtoehtoinen siirtymisreitti. Poistettava osa voi olla pilari tai seinä. Kuvassa 18 on esitetty pilarirunkoisen rakennuksen pohja, jossa on näytetty neljä eri pilaria, joiden poistamisen vaikutukset muihin rakenneosiin ja vaihtoehtoiset kuormien siirtymisreitit tulisi tarkistaa. [28]

Korvaava rakennesysteemi poikkeaa usein rakenteiden alkuperäisestä toimintatavasta siten, että rakenteet toimivat vetoa kestävinä köysi- ja kalvorakenteina. Tällöin rakenteelle voidaan sallia suuriakin muodonmuutoksia huolehtimalla kuitenkin jatkuvan sortuman estäminen. Rakenteisiin ja niiden välisiin liitoksiin saa syntyä plastisia niveliä, jotka ovat edellytyksenä uudelle kantavalle rakennesysteemille. Liitoksilta vaaditaan tarpeellista vetovoimakapasiteettia ja suurta muodonmuutoskykyä ja muodonmuutosenergiakapasiteettia, jolla voidaan vaimentaa putoavien kappaleiden liike-energia. [4] Rakenteiden liitosten sitkeydestä on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.4.



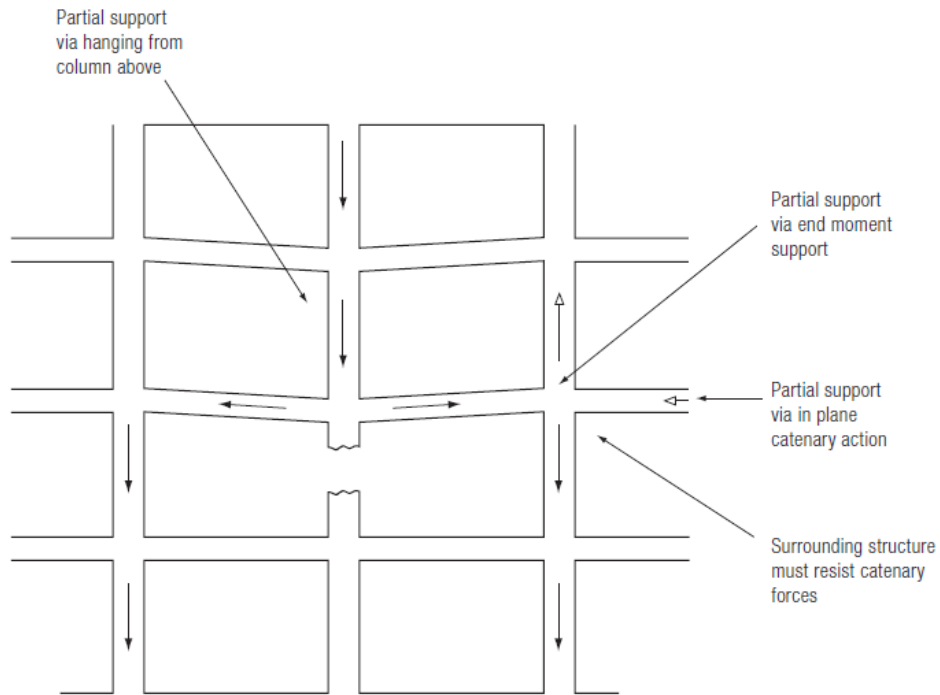
**Kuva 18.** Rakennuksen rungon sidejärjestelmä. [28]

Köysivaikutus on ilmiö, jossa vaakasuuntainen rakenne pystyy siirtämään pystykuormia sisäisten vetojännitysten avulla. Rakenne toimii ikään kuin riippumattoma, esitetty kuvissa 19 ja 20. Köysivaikutusta voidaan hyödyntää jatkuvan sortuman estämiseksi poistamalla vaakarakenteelta tuki tai olettamalla alapinnan terästen toimimattomuus. Kuvassa 19 on esitetty palkin toiminta ja siihen kohdistuvat voimat uudessa kantavassa rakennesysteemissä, jossa jännevälän keskelle ja päihin muodostuu plastiset nivelet. Nämä plastiset ja rajoitetun kiertymiskyvyn omaavat nivelet mahdollistavat kuormien uudelleen siirtymisen rakenteessa.



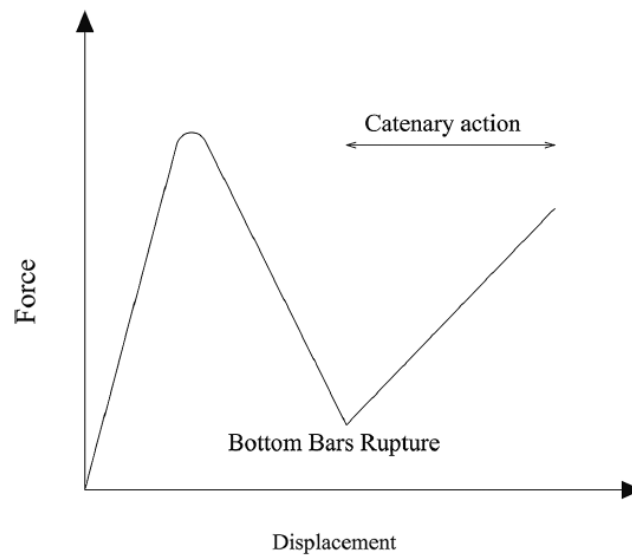
**Kuva 19.** Köysivaikutuksen muodostuminen palkissa. [24]

Kuvan 19 mukaisesti köysivaikutus on palkin suuntainen vetovoima  $T$ , joka voidaan muuttaa kuormakomponenteiksi  $V$  ja  $H$  taipuman  $\Delta$  avulla. Pystykomponentti vastustaa painovoiman aiheuttamia pystykuormia ja vaakakomponentti siirretään viereisille rakenteille.



**Kuva 20.** Välipohjan toiminta köysivaikutuksen avulla. [28]

Teräsbetonipalkin toimintaan pystykuormia vastaan vaikuttaa sen poikkileikkauksen muoto, raudituksen määrä ja sen sijainti sekä betonin ja betoniteräksen mekaaniset ominaisuudet, mutta yleisesti ottaen sen kuorma-taipuma-käyrä näyttää kuvan 21 mukaiselta.



**Kuva 21.** Tyypillinen teräsbetonipalkin kuorma-taipuma-käyrä. [24]

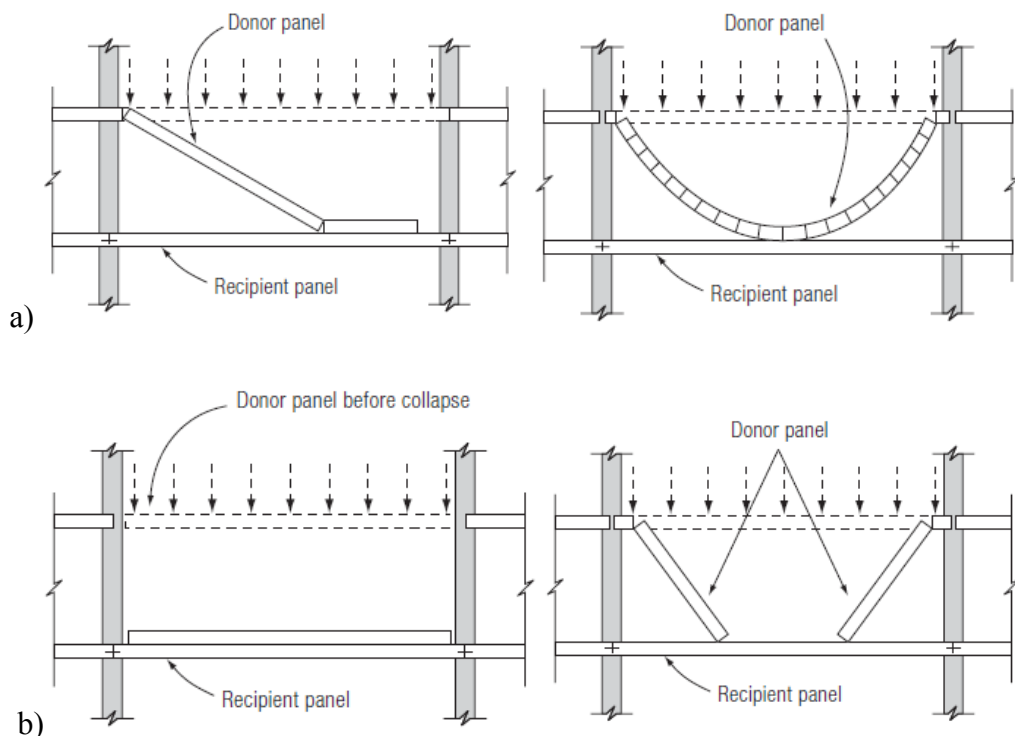
Kuorman kasvaessa, taipuma kasvaa lineaarisesti kantokyvyn maksimiin saakka. Sen ylittyttyä, alapinnan teräkset myötävät plastisten nivelten muodostuminen alkaa. Taipuma kasvaa sekä kuorman kantokyky heikkenee betonin lohkeillessa poikkileikkauksen puris-

tetulla osuudella. Tämän vaiheen jälkeen betonin lohkeilu loppuu ja lopulta vetojännityksen aiheuttamat halkeamat etenevät alapinnasta yläpintaan läpi alkuperäisen puristetun alueen. Tämä tarkoittaa sitä, että yläpinnan terästen jännitys on muuttunut puristuksesta vedoksi, joka osoittaa rakennesysteemin muutosta taivutetusta sauvasta vedetyksi sauvaksi. Koska betoni on halkeillut, palkin kuormankantokyky heikkenee siihen asti, kunnes alapinnan teräkset ovat murtuneet. Köysivaikutus aktivoituu tämän jälkeen yläpinnan terästen avulla ja palkin kantokyky paranee. [24]

### 3.5.4 Hyväksyttävä paikallinen vaurio

Mikäli vaakarakenteita ei saada kestäväksi kantavien rakenteiden kuvitteellista poistamisen jälkeen, sallitaan vaakarakenteille osittainen sortuma. Se on ennalta määritetty alue, jonka sortuminen onnettomuustilanteessa on sallittua.

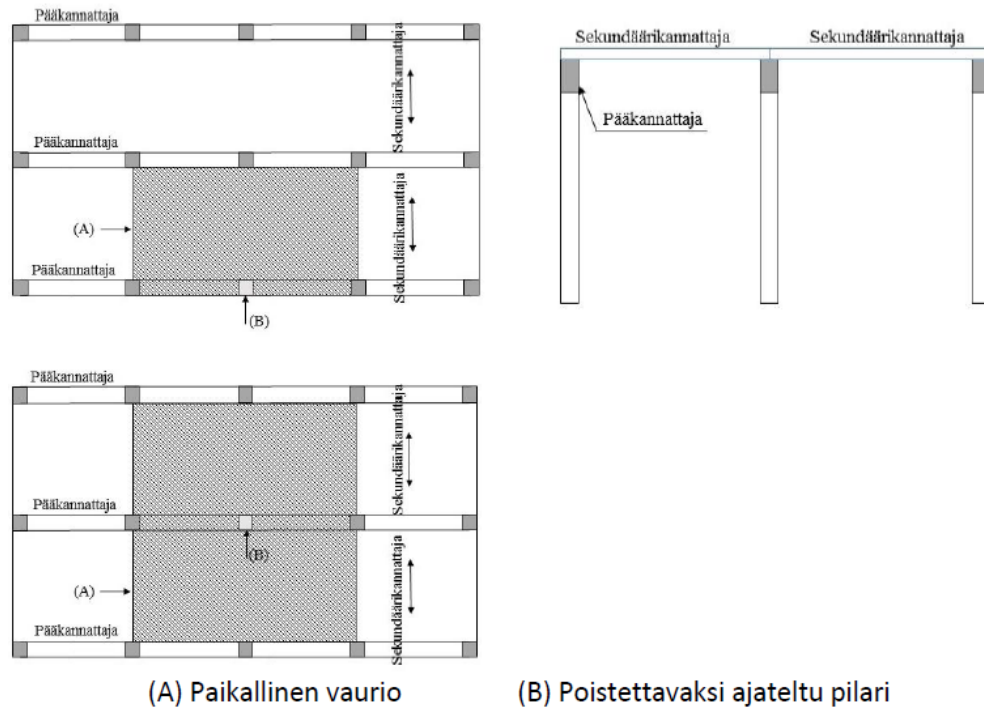
Sallitun sortuma-aleen rajoitus tarkoittaa sitä, että sortuman alapuoleisen lattian täytyy kestää varioituneista rakenteista aiheutuva sortumakuorma. Sortumakuorma voi olla suurimmillaan koko kahden välipohjan paino ja pienimmillään vain osittainen kuorma. Sortumakuorman määrittämisessä voidaan käyttää kuvan 22 mukaisia sortumamalleja. Sortumamallit ovat apuna sortumakuorman määrittämisessä, koska tarkkaa kuormitusilannetta on vaikea ennakoida. [28]



**Kuva 22.** Mahdolliset tasojen sortumamallit: a) yhden tuen menetyks b) molempien tukien menetyks. [28]

Mikäli hallimaisen rakennuksen pystyrunkona käytetään kantavia seiniä, paikallisen vaurion hyväksyttävä raja on seinän kannattamien vaakarakenteiden pituus kerrottuna kaksinkertaisella kantavan seinän korkeutena. [44]

Hyväksyttävän vaurion raja on riippuvainen rakennuksen runkojärjestelmästä ja laajuudesta. Monikerroksisten rakennusten onnettomuusrajatilamitoituksessa yhden kerroksen hyväksyttävä paikallisen vaurion raja on 15% kerroksen lattiapinta-alasta ja enintään 100m<sup>2</sup>. Hallimaisissa rakennuksissa paikallinen vaurio voi tapahtua vain yhdessä kerroksessa ja sen hyväksyttävä raja on pilarin vaurioituessa enintään pääkannattajien yhteenlaskettu pituus kertaa pääkannattajien väli kerrottuna kahdella. Pääkannattajien ollessa ulkoseinälinjalla hyväksyttävä laajuus on pilariin tukeutuvien pääkannattajien yhteenlaskettu pituus kertaa pääkannattajien väli. Hallimaisen rakennuksen paikallisen vaurion hyväksyttävä raja on esitetty kuvassa 23.



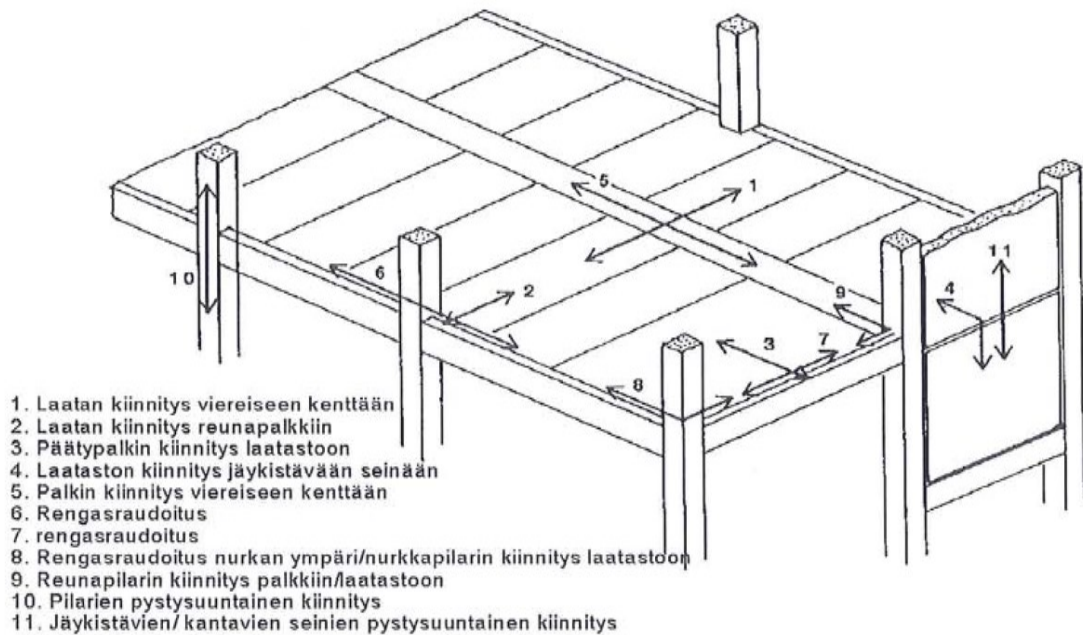
**Kuva 23.** Hallimaisen kaksilaivaisen rakennuksen paikallisen vaurion hyväksyttävä raja. [44]

Hallimaisten rakennusten vaurionsietokyky perustuu ensisijaisesti paikallisen vaurion rajaamiseen, koska rakenneosien jatkuvuus on usein vaikeasti saavutettavissa.



### 3.5.5 Sidejärjestelmät

Rakennuksen rakenneosat kiinnitetään toisiinsa kolmiulotteisella sidejärjestelmällä, joka parantaa rakenteen monoliittisyyttä. Sidejärjestelmän periaatteena on saavuttaa elementtien liitoksiin sitkeyttä saumoihin asennettavilla harjateräksillä. Se on erinomainen keino jatkuvan sortuman estämiseksi. Kuvassa 24 on havainnollistettu rakennuksen rungon sidejärjestelmästä.



*Kuva 24. Pilari-palkki-runkoisen rakennuksen sidejärjestelmä. [4]*

Jokaisen siteen mitoituksessa otetaan huomioon onnettomuustilanteen seuraamusluokan mukainen voima, jolla huomioidaan elementin tuelta putoamisen estäminen ja jatkuvan sortuman estäminen. [4]

### VAAKASITEET

Jokainen vaaka- ja yläpohja varustetaan sen ympäri kiertävillä rengassiteillä ja toisiaan vastaan kohtisuorilla sisäpuolisilla siteillä, jotka sijoitetaan mahdollisimman lähelle välipohjien reunoja, pilari- sekä seinälinjoja ja niiden on oltava jatkuvia.

Siteiltä edellytetään sellaista muodonmuutoskykyä, että ne voivat toimia korvaavana kuormansiirtorakenteena tai osana sitä. Onnettomuusrajatilassa jokaiselta jatkuvalta siteeltä ja sen päteankkurilta edellytetään kapasiteettia seuraavanlaisten voimien siirtämiseksi: [44]

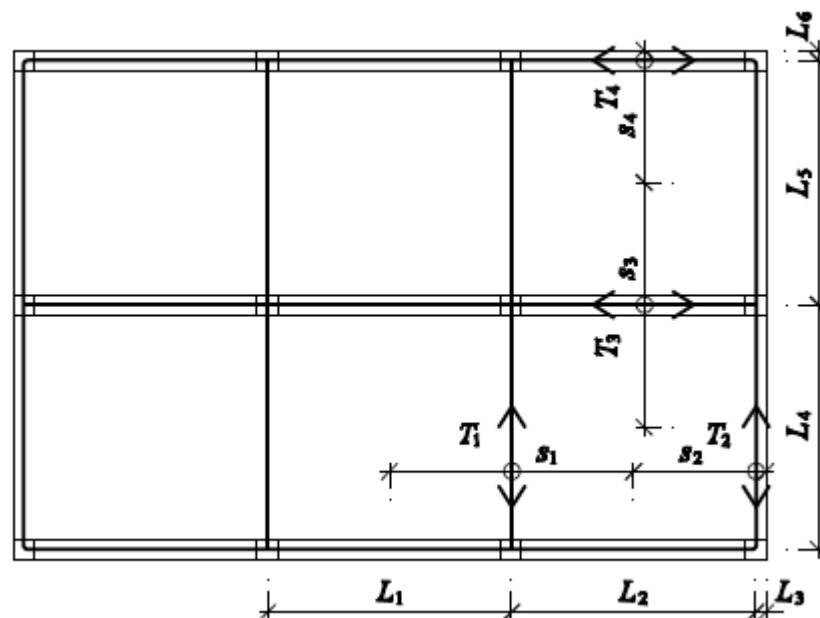
### Seuraamusluokat CC2a ja CC2b

$$T_i = \max \left\{ s * \frac{20 \text{ kN/m}}{70 \text{ kN}}, \text{ kun } g_k \geq 3,0 \text{ kN/m}^2, \right. \quad (3.7)$$

$$T_i = \max \left\{ s * \frac{3 \text{ kN/m}}{10 \text{ kN}}, \text{ kun } g_k \leq 2,0 \text{ kN/m}^2, \right. \quad (3.8)$$

jossa  $s$  on kuvan 25 mukaisesti sisäpuolisilla siteillä siteiden väli keskeltä keskelle ja rengassiteillä rengassiteen ja lähimmän sisäpuolisen siteen väli jaettuna kahdella lisättynä etäisyydellä rakenteen reunaan,  $g_k$  on vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo.

Vaakarakenteen pysyvän kuorma ominaisarvon  $g_k$  ollessa välillä 2,0-3,0 kN/m<sup>2</sup> sidevoiman arvot interpoloidaan.



**Kuva 25.** Sidevoiman kertymäleveyyden  $s$  määrittäminen vaakasiteiden voimien laskennassa. [44]

### Seuraamusluokat CC3a ja CC3b

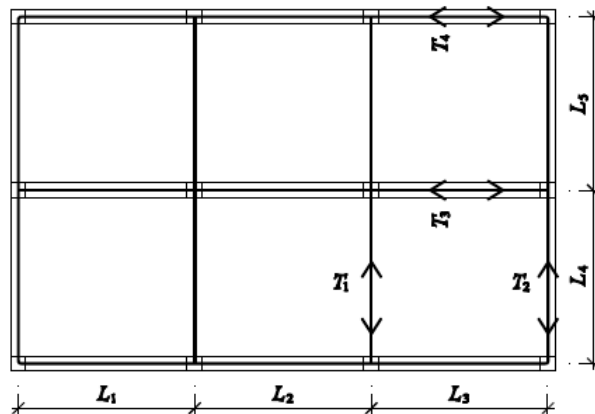
Seuraamusluokissa CC3a ja CC3b vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvon  $g_k$  on yleensä suurempi kuin 3,0 kN/m<sup>2</sup>, jolloin sidevoimat lasketaan kaavan 3.9 mukaisesti:

$$T_i = \max \left\{ \frac{F_t * 0,8 * (g_k + \sum \Psi_i q_k)}{6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} * \frac{z}{5m} * S, \right. \quad (3.9)$$

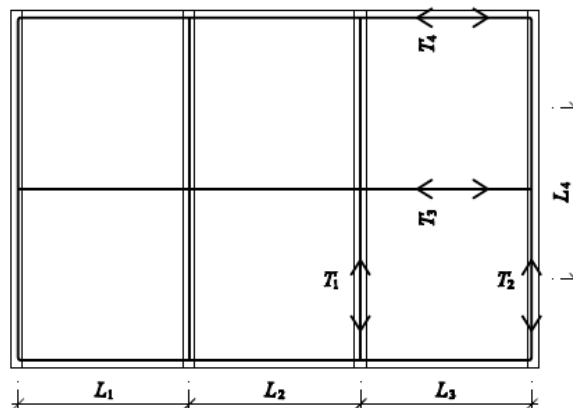
$$\left. F_t * s \right\}$$

jossa  $F_t$  on 48 kN/m tai  $(16 + 2,1 * n_s)$  kN/m, sen mukaan kumpi on pienempi,  $g_k$  on vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo,  $\psi_i$  on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

onnettomuusrajatilassa,  $q_k$  on vaakarakenteen muuttuvan kuorman ominaisarvo,  $s$  on kuvan 26 mukaisesti sisäpuolisilla siteillä siteiden väli keskeltä keskelle ja rengassiteillä rengassiteen ja lähimmän sisäpuolisen siteen väli jaettuna kahdella lisättynä etäisyydellä rakenteen reunaan,  $n_s$  on kerrosten lukumäärä koko rakennuksessa ja  $z$  on kuvan 26 mukainen pilareiden tai seinien keskiviivojen välinen etäisyys siteen suunnassa tai siteen ollessa kantavan seinän suunnassa kohdan 3.5.3 mukainen poistettavaksi ajatellun rakenteosan nimellispituus jaettuna kahdella, varmalle puolelle otaksuttu arvio korvaavan köysirakenteen jännevälän puolikkaasta. [44]



Sidevoimat pilari-palkki-rungossa:  $T_1$  ja  $T_2$ :  $z = \max(L_4, L_5)$   $T_3$  ja  $T_4$ :  $z = \max(L_1, L_2, L_3)$



Sidevoimat kantavat seinät-laatta-rungossa:

$T_1$  ja  $T_2$ :  $z = L_4/2$ , jossa  $L_4$  on kantavan seinänlohkon nimellispituus (ks. kohta 3);  
 $T_3$  ja  $T_4$ :  $z = \max(L_1, L_2, L_3)$

**Kuva 26.** Mitan  $z$  määrittäminen vaakasiteiden voimien laskennassa. [44]

Reunapilarit ja -seinät sidotaan jokaiseen väli- ja yläpohjatasoon mitoittamalla siteet kestämään onnettomuusrajatilassa seuraavat kuormat:

### Seuraamusluokat CC2a ja CC2b

$$F_{tie} = \min \left\{ s * 20 \text{ kN/m}, 150 \text{ kN} \right\}, \text{ kun } g_k \geq 3,0 \text{ kN/m}^2, \quad (3.10)$$

$$F_{tie} = \min \left\{ s * 3 \text{ kN/m}, 150 \text{ kN} \right\}, \text{ kun } g_k \leq 2,0 \text{ kN/m}^2, \quad (3.11)$$

jossa  $s$  on kuvan 27 mukainen sidevoiman kertymisleveys.

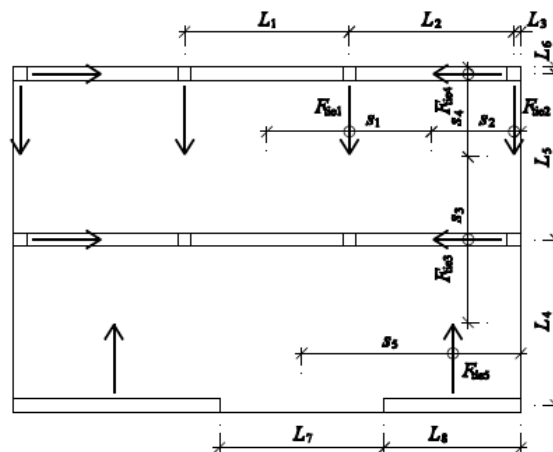
Vaakarakenteen pysyvän kuorma ominaisarvon  $g_k$  ollessa välillä 2,0-3,0 kN/m<sup>2</sup> sidevoiman arvot interpoloidaan.

### Seuraamusluokat CC3a ja CC3b

Vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvon  $g_k$  on yleensä suurempi kuin 3,0 kN/m<sup>2</sup>, jolloin sidevoimat lasketaan kaavan 3.12 mukaisesti:

$$F_{tie} = \min \left\{ F_t * \frac{h}{2,5m} * s, 2 * F_t * s \right\}, \text{ kun } g_k \geq 3,0 \text{ kN/m}^2, \quad (3.12)$$

jossa  $F_t$  on 48 kN/m tai  $(16 + 2,1 * n_s)$  kN/m, sen mukaan kumpi on pienempi,  $h$  on kerroskorkeus,  $s$  on kuvan 27 mukainen sidevoiman kertymisleveys ja  $n_s$  on kerrosten lukumäärä koko rakennuksessa.



Sidevoimat:

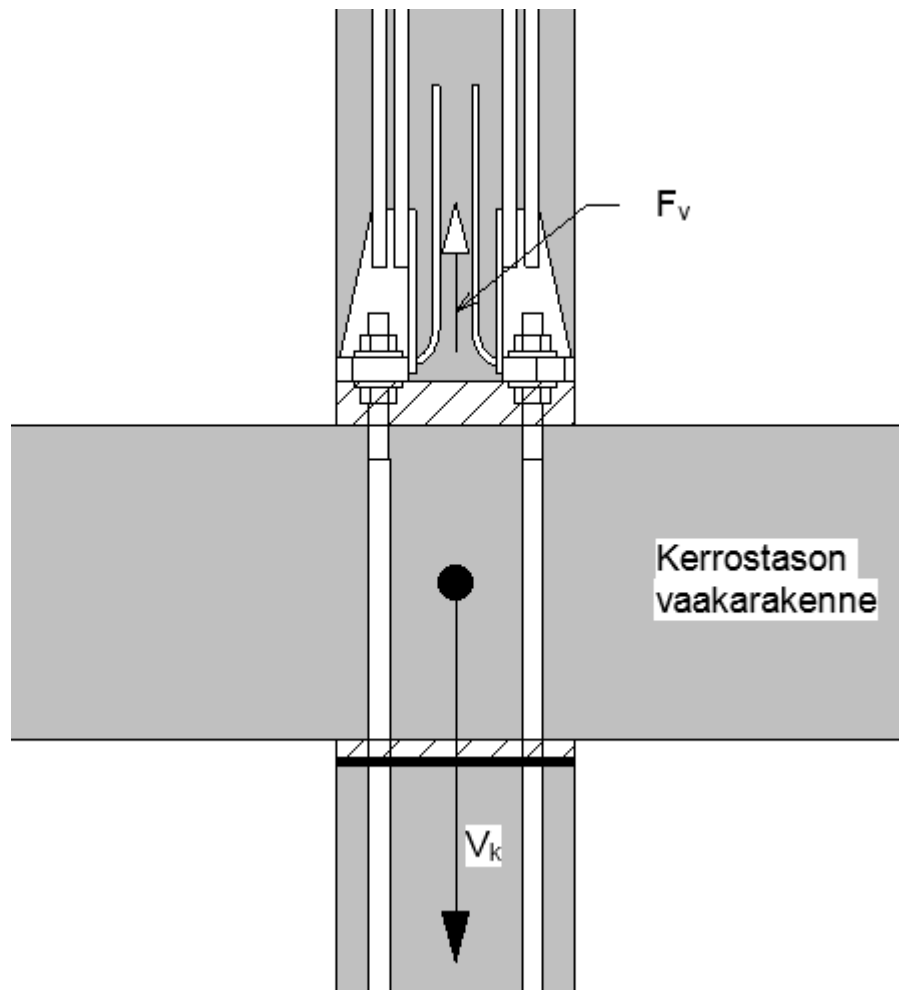
$$\begin{aligned} F_{tie1}: s_1 &= (L_1 + L_2)/2 & F_{tie2}: s_2 &= L_3 + L_2/2 & F_{tie3}: s_3 &= (L_4 + L_5)/2 \\ F_{tie4}: s_4 &= L_6 + L_5/2 & F_{tie5}: s_5 &= L_8 + L_7/2 \end{aligned}$$

**Kuva 27.** Sidevoiman kertymäleveyden  $s$  määrittäminen seinien ja pilarien sidontavoiman laskennassa. [44]

Nurkkapilarit on sidottava kummassakin suunnassa.

## PYSTYSITEET

Jokainen pilari ja seinä on sidottava pystysuunnassa perustuksista yläpohjan tasoon saakka jatkuvalla sidonnalla. Pystyrakenteiden on kestettävä onnettomuusrajatilassa esiintyvä vetovoima, jonka mitoitusarvo on suurin yhdestä kerroksesta pilarille tai seinälle kertyvä pystysuuntaisen pysyvän ja muuttuvien kuormien mitoitusarvon reaktio. Tämä vetovoima ankkuroidaan yläpuoliseen kerrokseen tai pystyrakenteeseen. Kuvassa 28 on esitetty ankkuroitava vetovoima.



**Kuva 28.** Pilarin pystysuuntainen sidonta yläpuoliseen rakenteeseen. [4]

Kantavan seinärakenteen pystysiteet voidaan sijoittaa elementtisaumoihin tai jakaa seinän koko pituudelle kuitenkin niin, että siteiden väli on enintään kuusi metriä. Reunimmaisten pystysiteiden tulee olla enintään kolmen metrin päässä seinän vapaasta reunasta.

Laskennallisesti saatavan tuettavan voiman suuruus voi olla niin suuri, että sen ripustaminen yläpuolisiin rakenteisiin voi olla käytännössä mahdotonta. Tällöin kannatta rakenne mitoittaa avainasemassa olevaksi rakenneosaksi, minkä teoria on esitetty seuraavassa kohdassa. [30]

### 3.5.6 Mitoitus avainasemassa

Avainasemassa oleva rakenneosa mitoitetaan kestäväksi kuvitteellinen onnettomuuskuorma, joka on kansallisesti ennakkoon määritelty. Tämä usein helpompi tapa suunnitella rakennusten rakenteita jatkuvaa sortumaa vastaan verrattuna rakenneosien kuvitteelliseen poistamiseen. Sallitun paikallisen vaurion ylittäessä hyväksyttävän rajan on pystyrakenteet mitoitettava avainasemassa. Samoin pystyrakenne on perusteltua mitoitaa avainasemassa olevana rakenneosana, mikäli sidevoimien ankkurointi rakenteeseen osoittautuu kohtuuttoman vaikeaksi. [30]

Rakenneosan ollessa erityisessä asemassa rakennuksen stabiliteetin tai toiminnan kannalta on se mitoitettava avainasemassa olevana rakenteena. Tällainen rakenne voi olla esimerkiksi siirtopalkki ja sitä tukevat pystyrakenteet, jotka kannattelevat huomattavaa osaa rakennuksen kokonaiskuormista. Siirtopalkin sortuma voi aiheuttaa vakavat seuraukset, kuten esimerkiksi kohdassa 4.2.2 esitetyssä Oklahoma Cityn tapauksessa. [28]

Suomessa onnettomuuskuorman suuruutena käytetään 50 kN pilareille ja seinille saman suuruinen kuorma kolmen metrin matkalle tasaisesti jakautuneena. Sen sijainti rakenneosille on kerroskorkeuden puolivälissä. Kuorma sijoitetaan onnettomuusrajatilan kuormitusyhdistelmään muiden kyseiseen tulevien kuormien kanssa asianmukaisin yhdistelyker-toimin ja seinän mitoitus tarkastetaan näillä kuormilla. [30]

### 3.5.7 Kuormitustapaukset, -yhdistelmät ja osavarmuuskertoimet

Onnettomuustilanteen mitoitukseen on Eurokoodin kansallisessa liitteessä määritelty kuormien mitoitusarvot käytettäessä niitä onnettomuuskuormien yhdistelmissä. Mitoitusarvot on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5.** Onnettomuuskuormien yhdistelmissä käytettävät kuormien mitoitusarvot. [29]

Mitoitustilanne	Pysyvät kuormat		Määrävä onnettomuuskuorma tai maanjäristyskuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)	
	Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut
Onnettomuus	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$A_d$	$\psi_{1,1}Q_{k1}$ (**)	$\psi_{2,i}Q_{k,i}$

$G_{kj,inf}$  on Gaussin tilastollisessa jakautumassa 0,05-fraktiili,  $G_{kj,sup}$  on 0,95-fraktiili.  
 (\*) Taulukon 5 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.  
 (\*\*) Pääasiallisen kuorman ollessa jokin muu kuin lumi- jää- tai tuulikuorma käytetään kuitenkin arvoa  $\psi_{2,1}$

Kuormitusyhdistelmissä yhdistetään kaikki rakennukseen tai rakenneosaan kohdistuvat kuormat niiden vaikutusten mukaisesti. Yhdistelmillä pyritään mitoittamaan rakenne kaikissa mahdollisissa olosuhteissa, jotta sille saavutetaan riittävä varmuus staattisen tasapainon menetystä, vaurioitumista, väsymistä vastaan. Taulukossa 6 on esitetty eri kuormien yhdistelykertoimet hyötykuorman luokan mukaisesti.

**Taulukko 6.** Yhdistelykertoimen  $\psi$  arvot rakennuksille. [29]

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30$ kN < ajoneuvon paino $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma, kun			
$s_k < 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

Onnettomuustilanteen mitoituksessa käytetään kaavojen 3.13 ja 3.14 mukaisia kuormitusyhdistelmiä.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (3.13)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (3.14)$$

jossa  $G_{k,j}$  on pysyvä kuorma,  $P$  on esijännitysvoima,  $A_d$  on onnettomuuskuorma,  $Q_{k,1}$  on pääasiallinen hyötykuorma ja  $Q_{k,i}$  on muu hyötykuorma.

## 4. RAKENTEELLINEN TURVALLISUUS ULKO-MAILLA

Rakennusten, siltojen, tunnelien ja patojen suunnitellun mukainen toiminta heikkenee rakenteiden ikääntyessä sekä sää- ja käyttöolosuhteiden muuttuessa, joten rakenteiden tarkastuksesta on tullut olennainen osa rakenteellista turvallisuutta. Rakenteiden suunnitteluun on yleiseurooppalaiset suunnittelustandardit Eurokoodit, mutta vanhojen rakennusten arviointiin on hyvin vähän ohjeita. Ulkomailta on paljon esimerkkejä suuren jännevälisen rakennusten sortumista. Suunnittelunormit, kuormitukset ja rakennusten käyttöolosuhteet ovat usean kohteen elinkaaren aikana muuttuneet, joten huoli rakennusten turvallisuudesta on ollut esillä myös ulkomailla. Rakenteiden katastrofaaliset sortumiset ovatkin nostaneet maailmanlaajuisesti esiin sen epäkohdan, joka ohjeiden puuttumiseen liittyy. [34] Lisäksi terrori-iskujen todennäköisyys on kasvanut kiristyneen maailmanpoliittisen tilanteen vuoksi, millä on merkittävä vaikutus suurten julkisten tilojen turvallisuuteen.

### 4.1 Tarkastustoiminta ulkomailla

#### POHJOIS-AMERIikka

Pohjois-Amerikkalainen rakennusinsinöörien ammattiyhdistys American Society of Civil Engineers (ASCE) oli ensimmäinen virallinen taho, joka tunnusti rakennusten sortumien rakenteellisen tutkinnan – Forensic Engineering – omaksi ammatilliseksi toimialaksi. Toiminnan tarkoituksena tutkia ja todeta rakennusten sortumiin johtaneita syitä, tunnistaa vastuullinen osapuoli sekä jakaa juridista asiantuntijuutta. [9]

Kanadassa että Yhdysvalloissa on osavaltiokohtaisia määräyksiä rakenteiden tarkastukselle. Esimerkiksi Kanadassa Ontarion osavaltiossa toimii yhdistys nimeltä Professional Engineers Ontario (PEO), joka on julkaissut käytännön ohjeen rakennusten turvallisuutta koskevaan tarkastukseen. Ohjeessa esitetään tarkastuksille kahta tarkkuustasoa, alustava sekä yksityiskohtainen tarkastus. Tarkastusmenetelmät voivat vaihdella visuaalisesta tarkastelusta tarkkoihin materiaalitestauksiin ja koekuormituksiin kohteen vaativuudesta ja kunnosta riippuen. [38]

Kohteen alustava tarkastus on luonteeltaan usein kvalitatiivinen ja mikäli se perustuu vain visuaaliseen tarkasteluun, on siinä kiinnitettävä erityistä huomiota kriittisten rakenteiden vaatimustenmukaisuuteen. Tarkastus sisältää seuraavat asiat: [38]

- a. suunnitteluun, rakentamiseen ja kunnossapitoon liittyvien dokumenttien tarkastus,
- b. kohdekohtainen silmäääräinen tarkastus,
- c. alustava laskennallinen analyysi tarpeen mukaan,



- d. raportointi,
- e. päätös välittömistä toimenpiteistä,
- f. yksityiskohtaisemman tarkastuksen tarpeen arviointi.

Yksityiskohtainen tarkastus suoritetaan, mikäli rakenteiden kunto on silminnähten heikentynyt, käyttöolosuhteet vaativat tai kokonaan muuttuneet tai vastaavat rakennejärjestelmät tunnetaan riskialttiista toiminnasta. Tarkastuksessa pyritään selvittämään kriittisten rakenteiden tarkoituksenmukaisuus, eli kestävätkö ne rakennuksen turvallisen toiminnan mukaisilta rasituksilta. Tarkastus sisältää seuraavat asiat: [38]

- a. suunnitteluun, rakentamiseen ja kunnossapitoon liittyvien dokumenttien tarkastus,
- b. rakennuksen ja rakenteiden arviointi,
- c. tarkastuslistat,
- d. materiaalitestaukset,
- e. rakenneanalyysi,
- f. raportointi,
- g. päätös välittömistä toimenpiteistä.

Tarkastuksesta on laadittu valmis raportointipohja, jonka avulla tulosten arviointi on selkeää ja vertailukelpoista.

## ISO-BRITANNIA

Iso-Britanniassa rakennusten ja infrastruktuurin turvallisuutta valvomaan on perustettu viranomaistoimisto Centre for the Protection of National Infrastructure (CPNI), jonka tarkoituksena on turvata kansallista turvallisuutta auttamalla vähentämään kansallisen rakennetun ympäristön haavoittuvuutta terrorismia ja muita uhkia vastaan. CPNI julkaisee ohjeita muun muassa rakennusten vaurionsietokyvyn arviointiin sekä rakenteellisen turvallisuuden tarkastukseen. [6]

Rakenteellisen turvallisuuden tarkkailuun ja raportointiin on perustettu Structural Safety -niminen organisaatio, joka sisältää kaksi komiteaa:

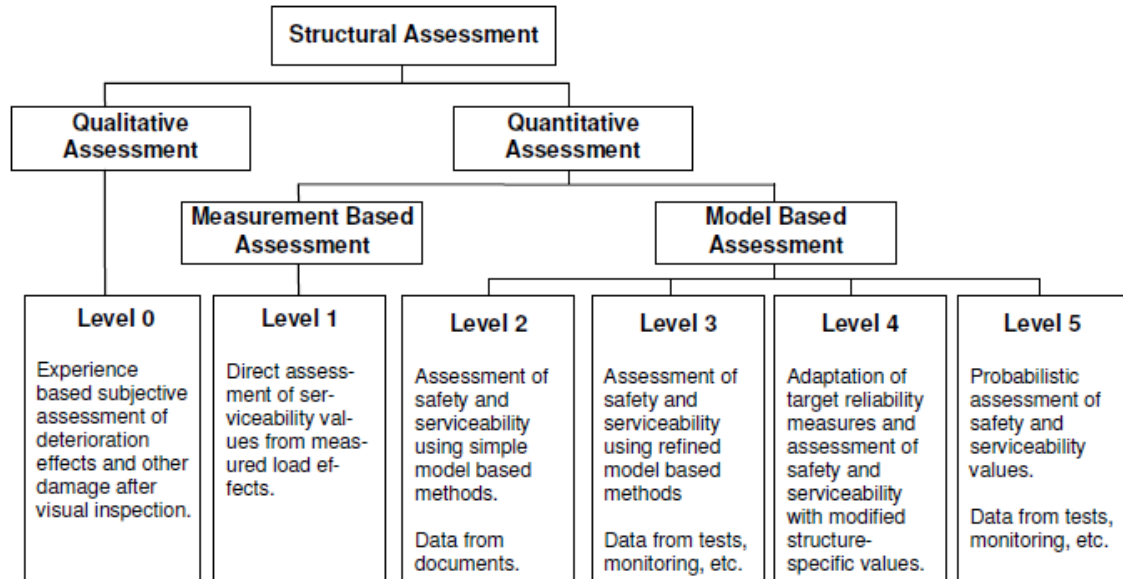
- *SCOSS*: Komitea, joka julkaisee julkisen aineiston avulla rakenteelliseen turvallisuuteen liittyviä varoituksia ja suosituksia.
- *CROSS*: Komitea, joka kerää luottamuksellista rakenteelliseen turvallisuuteen liittyvää tietoa rakennus- ja infrarakenteiden asiantuntijoilta.

Organisaatio ei varsinaisesti esitä ohjeita rakenteellisen turvallisuuden tarkastuksille, mutta se julkaisee tietoa rakenteiden pettämisestä seuranneista onnettomuuksista. Se on siis tietynlainen rakennusvirhepankki. [36]

## MUU EUROOPPA

Vuonna 2006 perustettiin eurooppalainen yhdistys *SAMCO*, jonka tavoitteena oli yhteinäistä ohjeillaan tarkastustoimintaa jäsentensä kesken. Kuvassa 29 on esitetty *SAMCO*:n

mukaiset rakenteiden turvallisuuden arvioinnin ja tarkastuksen tarkkuustasot. Tarkkuustasoissa edetään ylemmälle tasolle, mikäli joku alemman tason tarkastuksista epäonnistuu tai siinä huomataan poikkeavuuksia.



**Kuva 29.** Tarkastusten tarkkuustasot. [34]

Tarkastukset jaetaan kahteen eri pääkategoriaan, kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen tarkastukseen. Kvalitatiivinen eli laadullinen tarkastus tarkoittaa rakenteen silmä määräistä tarkasteluta, jossa käydään läpi rakenteet ja verrataan niiden toimintaa ja ulkoisia merkkejä kokemuseräiseen tietoon vastaavanlaisten rakenteiden toiminnasta. Kvalitatiivinen tarkastus on tarkkuustasolla 0.

Kvantitatiivinen, eli määrällinen tarkastus jaetaan viiteen eri tarkkuustasoon, jotka sisältävät seuraavat asiat:

- *1-taso*: Verrataan toteutuneita käyttötilanteen kuormia raja-arvoihin.
- *2-taso*: Kantokykykapasiteetin ja käyttöturvallisuuden arviointi yksinkertaisilla laskentamenetelmillä käyttäen hyväksi suunnitelmia ja rakentamisen sekä ylläpidon asiakirjoja.
- *3-taso*: Kantokykykapasiteetin ja käyttöturvallisuuden arviointi tarkemmilla laskentamenetelmillä ja rakenneanalyseillä huomioimalla osavarmuustekijät.
- *4-taso*: Kantokykykapasiteetin arviointi huomioiden tapauskohtaiset osavarmuustekijät, joita muokataan toteutuneiden kuormitustilanteiden ja onnettomuusuramusten mukaisesti
- *5-taso*: Huomioidaan kaikki perusmuuttujat ja niiden tilastolliset ominaisuudet. Käytetään rakenteellista luotettavuusanalyysia osavarmuustekijöiden sijasta ja epävarmuudet mallinnetaan todennäköisyyksien perusteella.

Viidennessä eli tarkimmassa tasossa tarkoituksena on saada tulokseksi laskennallinen todennäköisyys rakenteen tai rakenneosan sortumalle. Toisin kuin alemmissä osavarmuustekijä-teoriaan perustuvissa tarkastustasoissa, joissa suunnitteluparametrit ovat hyvin täsmällisiä ja epävarmuustekijät on otettu huomioon osavarmuustekijöissä, sortuman todennäköisyys on riippuvainen suoraan kuorma- ja kapasiteettiparametreista. [34]

## 4.2 Esimerkkejä sortuneista rakennuksista

Rakennuksen kokonainen tai osittainen sortuma aiheuttaa usein vaaran henkilöturvallisuudelle ja pahimmassa tapauksessa ihmishenkien menetyksen. Sortumaan johtaneet syyt voivat vaihdella suurtesti, eikä niitä kaikkia voida tarkkaan ennakoida. Maailmalla on tapahtunut useita kuolonuhreja vaativia rakennusten sortumia, joista pyritään hankkimaan kaikki se tieto, mikä auttaa ehkäisemään vastaavanlaisten tragedioiden tapahtuminen.

### 4.2.1 Hartford Civic Center, Yhdysvallat

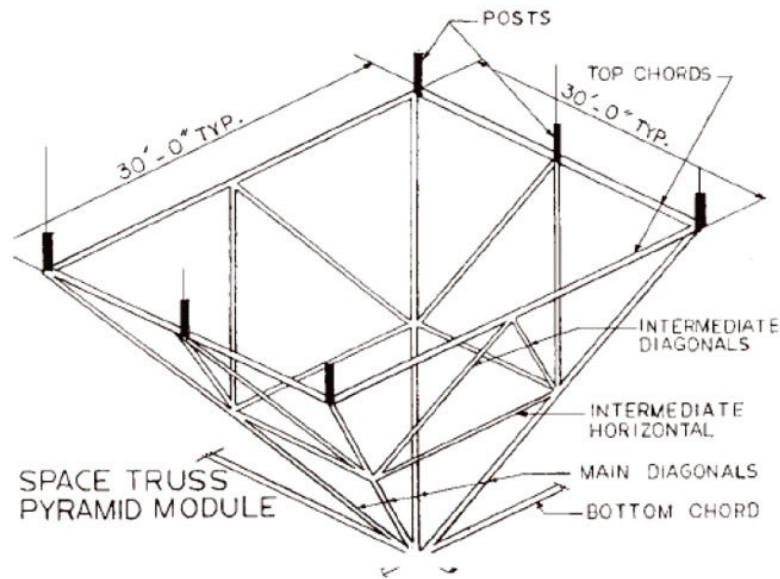
Aamuyöllä 18. päivä tammikuuta vuonna 1978 Hartfordissa yöllä sataneen lumen paino aiheutti nopeasti etenevän urheilu- ja tapahtumahallina toimineen rakennuksen kattorakenteiden sortuman, joka on esitetty kuvassa 30. Hallissa oli ollut tuhansia ihmisiä vain tunteja ennen sortumaa. Rakennuksen 5-vuotisen historian suurimman lumimyrskyn aikaansaama lumikuorma ylitti noin 91x110 neliömetrin kokoisen avaruusristikkorakenteisen katon muodonmuutoskyvyn aiheuttaen koko kattorakenteen romahtamisen. 1270 tonnin painoisen katon sortuessa lumikuorma oli vain puolet mitoituskuormasta. [12]



**Kuva 30.** *Hartford Civic Centerin katto sortui 18.1.1978. [13]*

Hartford Civic Centerin kattorakenne oli erittäin monimutkainen 2300-osainen avaruusristikko, joka muodostui leveydeltään ja pituudeltaan 9,14 metrin kokoisista ja 6,4 metriä

korkeista ristikko-moduuleista. Moduulin periaate esitetty kuvassa 31. Pyramidin muotoiset moduulit olivat ristikossa ylösalaisin ja pyramidien kärjet olivat sidottu sauvoilla toisiinsa kiinni. [13]

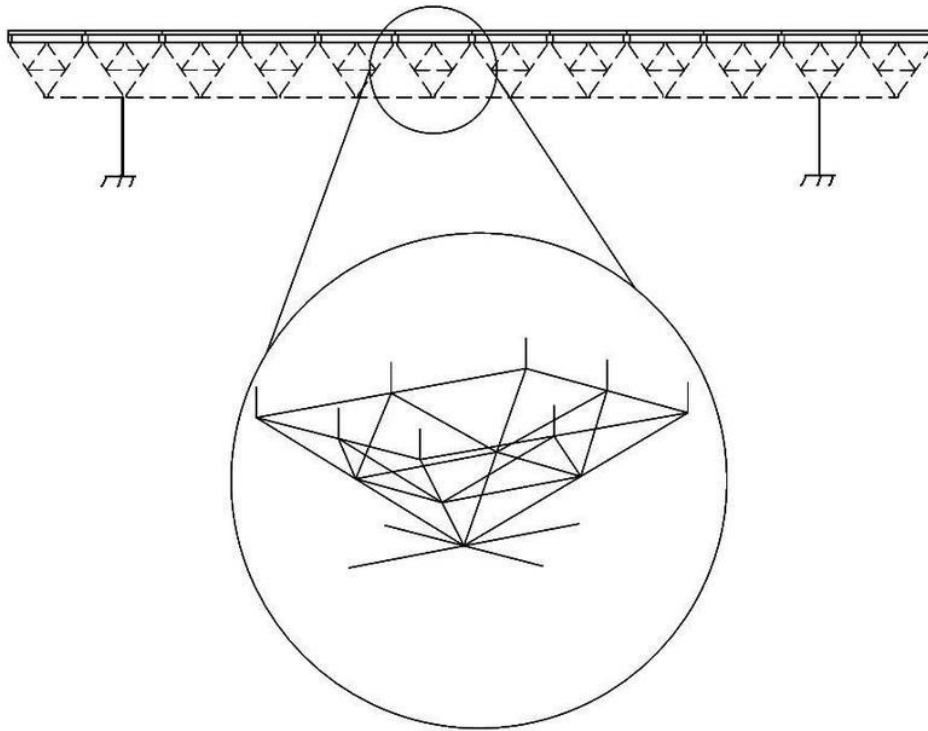


(1 ft. = 0.305 m)

**Kuva 31.** *Katon avaruusristikon moduuli. [13]*

Vesikattorakenteet olivat tuettu sauvojen solmukohdassa sijaitseviin eri pituisten tolppien varaan, joiden avulla saatiin luotua vesikatolle tarvittavat kaadot. Tolppien avulla saatiin myös minimoitua vesikattorakenteilta tulevat taivutusrasitukset sen sijaan, että vesikattorakenteet olisivat olleet kiinnitettyinä suoraan avaruusristikoihin. Ristikkomoduuliin suunniteltiin diagonaalisauvat antamaan vaakasuuntaista tukea ylimmälle vaakasauvalle puolittamalla sen nurjahduspituus. Tämä vaakasuuntainen tuki oli merkittävä senkin takia, että ylimmät vaakasauvat muodostuivat neljästä yhteen liitetystä kulmateräksestä muodostaen poikkileikkaukseltaan ristin. Ristin muotoinen poikkileikkaus on erittäin altis nurjahdukselle puristusjännitettynä. [12]

Katto tukeutui neljän pilarin varaan, jotka sijaitsivat katon reunan sisäpuolella, muodostaen reunalle 13,7 metriä leveän ulokkeen. Leikkaus koko kattorakenteesta esitetty kuvassa 32.



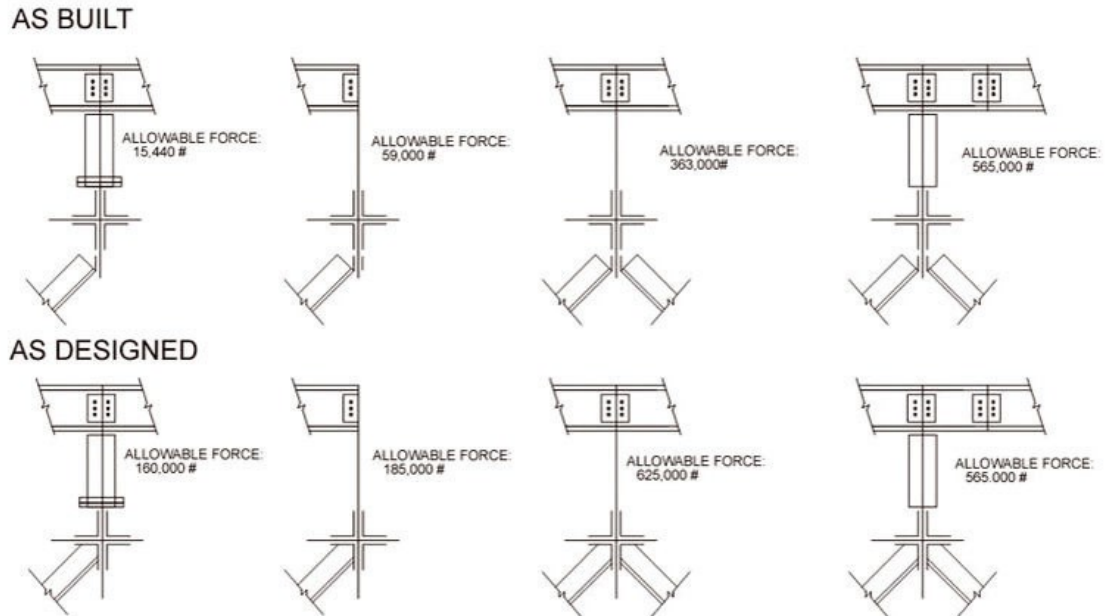
**Kuva 32.** *Vaakaleikkaus kattorakenteesta ja sen tuennasta. [12]*

Suunnittelua varten kohteen rakennesuunnittelija oli hankkinut markkinoiden parhaan tietokoneohjelmiston, jonka avulla monimutkaisen rakenteen sauvojen analysointi pystyttiin tekemään tietokoneavusteisesti. Tietokone avusteisen laskennan arveltiin säästävän kokonaiskustannuksia 500 000 dollaria käsin laskentaan verrattuna. [13]

Rakennustyön aikana urakoitsija ja valvoja olivat huomauttaneet rakennesuunnittelijaa huomattavan suurista taipumista, jotka olivat jopa kaksinkertaiset suunniteltuun verrattuna. Suunnittelija oli kuitenkin täysin vakuuttunut suunnitelmistaan eikä rakenteen toiminnan tarkastamiseen tehty enempää toimenpiteitä. Siitäkin huolimatta, että esivalmistettuja julkisivurakenteita jouduttiin hitsaamaan ja leikkaamaan, jotta ne saatiin kiinnitetyä suunniteltuihin tukipisteisiin. [13]

Onnettomuuden jälkeen alkoi katastrofiin johtaneiden syiden selvittäminen. Tutkinnassa huomattiin useita ristikon rakenteen suunnitteluun liittyviä puutteita ja selkeitä suunnitteluvirheitä, joista monen tulkinnan mukaan isoin oli oletus ylimpien vaakasauvojen nurjahduskapasiteetista. Suunnittelija ja laskentaohjelmisto käyttivät niiden nurjahduspituutena 4,57 metriä, joka oli tutkinnan mukaan kaukana todellisuudesta. Diagonaalisauvat olivat samassa kaltevassa tasossa vaakasauvojen kanssa sitomalla ne vain kyseisen tason suunnassa. Vaakasauvat olivat siis vapaita siirtymään kohtisuoraan tasoa vastaan. Myös vesikattorakenteita tukevat tolpat poistivat sen mahdollisen sivuttaistuennan, jonka kattopaneelit olisivat sauvoille niihin kiinnitettyinä antaneet. [13]

Suunnittelun olettaessa ylimpien vaakasauvojen nurjahduspituudeksi 4,57 metriä, olivat ne todellisuudessa tukemattomia koko 9,14 metrin pituudeltaan. Tilannetta pahensi asennettujen sauvojen liitosdetaljien eroavaisuus suunnitellusta. Kuten kuvassa 33 esitettyjen tutkimassa kuvattujen liitosdetaljien eroavaisuudet osoittavat, liitokset olivat merkittävästi epäkeskeisiä luoden sauvojen solmukohtiin epäjatkuvuuskohtia ja sisäisiä momenttivarsia. [12]



**Kuva 33.** Asennettujen diagonaali- ja vaakasauvojen liitosdetaljit erosivat merkittävästi suunnitelluista. [13]

Näiden esitettyjen virheiden johdosta ylimpiin vaakasauvoihin syntyi pahimmillaan yli 8-kertainen ylikuormitus kapasiteettiin nähden ja rakenteen jatkuva sortuminen eteni välittömästi sauvojen nurjahdettua.

Onnettomuustutkiminnan mukaan rakenteen suunnittelussa ja kokoonpanossa tehtiin suurimmat sortumiseen johtaneet virheet. Ensinnäkin rakenteen todellinen omapaino oli yli 20% suurempi kuin suunniteltu. Toisekseen tietokonemalli oletti kaikkien ylimpien vaakasauvojen olevan nurjahdustuettuja, niiden ollessa teoriassa vain yhteen suuntaan tuettuja. Tietokonemallin tulisi olla vain työkalu suunnittelijalle, jolta on edellytettävä riittävä osaamista tulosten analysointiin.

Kokoonpanossa sauvojen liitokset tehtiin poiketen suunnitelluista ja osa sauvoista olivat väärissä paikoissa sekä lujuudeltaan vääriä. Rakennusurakka oli jaettu useaan aliurakkaan, jolloin vastuunjako ja tarkastusvelvollisuudet eivät olleet selviä. [12]

Huolimaton rakenneanalyysin tulkinta saattaa joskus johtaa katastrofaaliseen lopputulokseen. Tässä tapauksessa suunnittelussa tehty virhe läpäisi myös tuotannon laadunvalvon-

nan, eikä virrehavaintoihin puututtu vaadittavalla vakavuudella. Suunnittelija ei voi sokeasti luottaa tietotekniikkaan, vaan hänellä on oltava kohteen vaativuuden mukainen osaaminen ja kokemus, jotta osaa havaita virheet analyysin tuloksista ja puuttua niihin. Suunnittelun ulkopuolisella tarkastuksella olisi virhe saatu mitä todennäköisemmin eliminointua. Lisäksi rakennusvaiheen valvonnalla olisi tullut olla riittävä tahto keskeyttää kokoonpano.

#### 4.2.2 Murrah Federal Office Building, Yhdysvallat

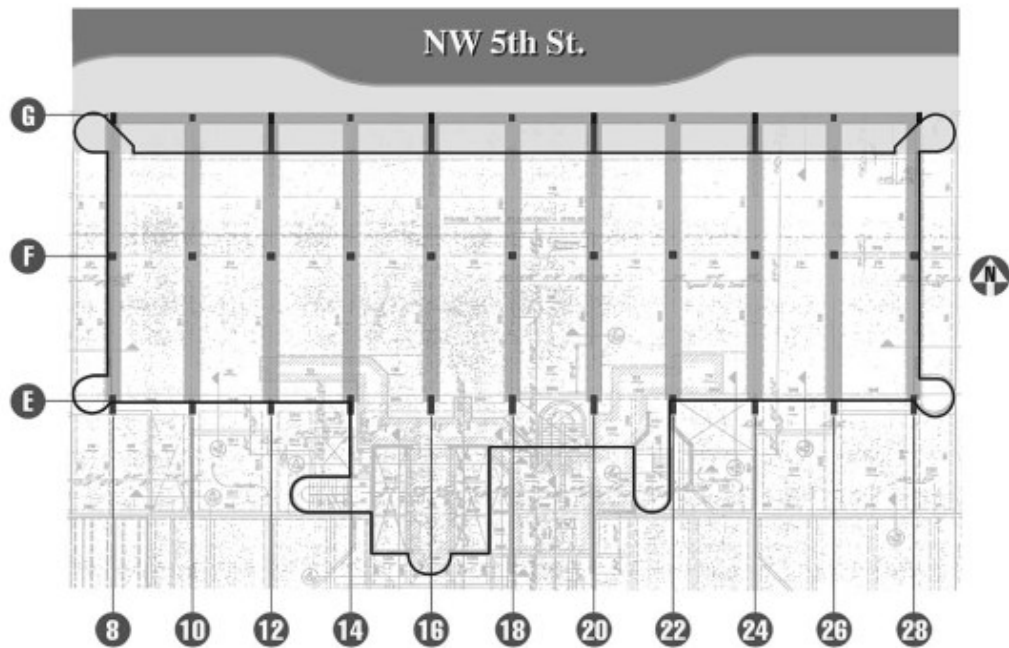
Huhtikuun 19. päivänä vuonna 1995 räjähteitä täyteen lastattu kuorma-auto räjäytettiin noin neljän metrin etäisyydellä liittovaltion virastotalon kantavaa pilaria Oklahoma Cityssä. Onnettomuus tapahtui aamulla, jolloin virastotalo oli täynnä työntekijöitä. Rakennus kärsi suuria vaurioita osittaisen sortuman vuoksi surmaten 167 ihmistä ja 782 ihmistä loukkaantui, kuva 34. [23]



*Kuva 34. Murrah Federal Office Building kärsi osittaisen sortuman. [14]*

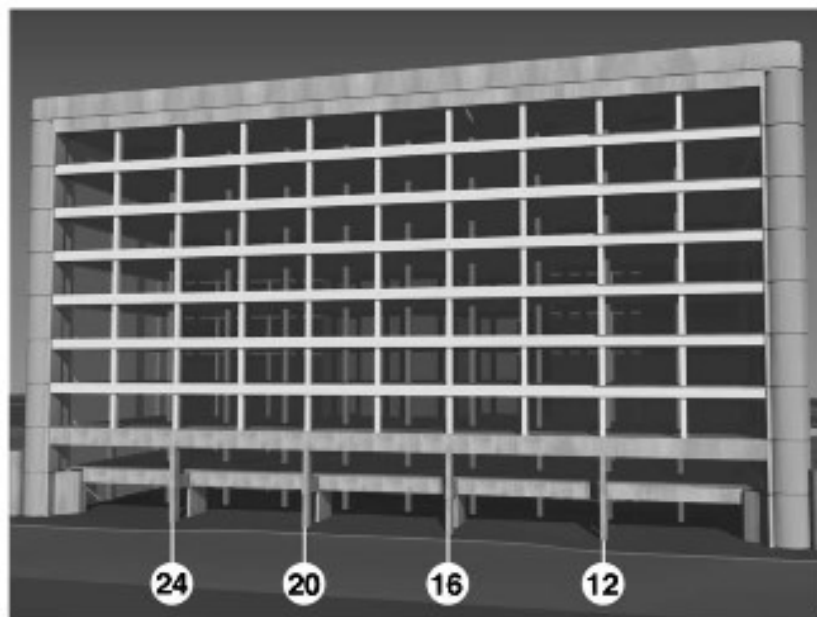
Vuonna 1976 valmistunut virastotalo koostui kolmesta osasta, joista pääosa oli 9-kerroksinen betonirakenteinen toimistorakennus, jonka kerroskorkeus oli noin neljä metriä plus lukien yhdeksäs kerros, jossa kerroskorkeus oli noin 4,3 metriä. Lisäksi rakennukseen kuului kaksi 1-kerroksista lisäsiipeä sekä monikerroksinen pysäköintihalli. Pääosan rakennejärjestelmänä oli tyypillinen betonirakenteinen momenttijäykkä kehä. Välipohjat olivat monoliittisiä palkkilaatastoja, Pääkannattajat olivat jänneväliään 10,7 metriä pitkät kaksiaukkoiset betonipalkit, joita oli 6,1 metrin välein yhteensä 11 kappaletta. Palkit

oli tuettu betonipilarein. Hissikuilu ja porrashuoneen seinät toimivat rakennuksen jäykistävänä rakenteena. Pohjakuva rakennuksesta on esitetty kuvassa 35. [27]



**Kuva 35.** *Murrah Federal Buildingin pohjakuva. [27]*

Poikkeuksena tähän tyyppilliseen runkorakenteeseen kaksi alinta kerrosta olivat sisäänvedettyjä kadun puoleisella julkisivulla aiheuttaen kolmannen kerroksen lattian tasolle joka toisen pilarin tukevan kuormaa siirtävän palkin, joka on esitetty kuvassa 36.

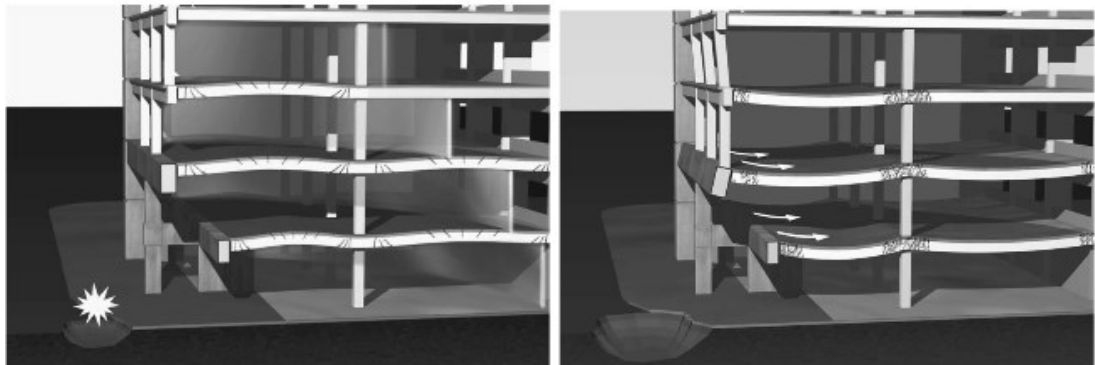


**Kuva 36.** *Kadun puoleisen julkisivun rakenne. [27]*



Onnettomuustutkinnassa todettiin hyvin nopeasti, että räjähdystä lähinnä olevan pilarin G20 betoni murskaantui välittömästi räjähdysen tapahduttua. Kyseiseen pilariin tuettujen kuormaa siirtävät palkit olivat kuitenkin osittain ehjiä, joka osoitti, että räjähdys ei suoraan vaikuttanut niiden toimintaan. Pilarin murskaantuminen sekä vaihtoehtoisten kuorman siirtymisreittien puute johtivat rungon sortumiseen koko rakennuksen korkeudelta moduulien 16 ja 24 väliltä. [27]

Räjähdyksestä aiheutuneen paineaallon edetessä, aiheutti se ylöspäin suuntautuvaa painetta välipohjalaatalle, jota ei ollut mitoitettu kestävään tämän tyyppistä rasiitusta. Laatta ja palkit olivat jäykästi kiinni toisissaan, mikä aiheutti ylöspäin suuntautuvan tukireaktion palkeille, joita ei myöskään ollut suunniteltu tämän tyyppisiä rasiituksia vastaan. Välittömästi paineaallon vaikutusten jälkeen painovoima aiheutti voimakkaan alaspäin suuntautuvan kuormituksen. Laatan liitoksen siirtopalkkiin ollessa jäykkä, aiheutui palkkiin voimakas vaakasuuntainen kuormitus kaataen siirtopalkin ja sen mukana yläpuolisten pilarien tuen. Alaspäin suuntautuva kuormitus oli sen verran suuri, että se rikkoi palkin ja pilarin hauraan liitoksen. Tapahtumaketju on esitetty kuvassa 37. [27]



**Kuva 37.** *Paineaallon vaikutus vasemmalla ja sen jälkeisen painovoiman vaikutus oikealla. [27]*

Vaihtoehtoisten kuormien siirtymisreittien puuttuessa rakenteita sortui koko rakennuksen korkeudelta moduulien 12 ja 28 väliltä. Lisäksi yksi keskialueen pilareista sortui, koska laatan sortuessa, hävisi pilarin vaakasuuntainen tuenta. Osa keskialueen pilareista menettivät myös vaakasuuntaisen tuen, mutta pysyivät pystyssä ja näin ollen rajasivat sortuman laajuutta. [27]

Onnettomuustutkinnan johtopäätöksissä isoin asia oli sortuman laajuuden rajoittaminen. Tulkintojen mukaan pommin räjähdys ei itsessään aiheuttanut rakennuksen sortumaa siinä laajuudessaan kuin se tapahtui, vaan ketjureaktio yksittäisen rakenneosan tuhoutuessa aikaansai jatkuvan sortuman. Jos runko olisi ollut kolmiulotteinen pilarien ja palkkien muodostama kehä, ilman että lattialaatat olisivat olleet jäykästi kiinni palkeissa, olisi vauriot mitä todennäköisemmin olleet merkittävästi pienemmät. Räjähdysen ja rakenteellisen toiminnan yhteisvaikutus johtivat jatkuvaan sortumaan. [27]

Tutkintaraportissa nostetaan neljä selvää päätelmää, joilla on selvät merkityksensä rakenteiden sitkeään toimintaan ulkopuolisia hyökkäyksiä ja muuttuvia kuormitusolosuhteita vastaan. Alla päätelmät listattuna tärkeysjärjestyksessään: [27]

- Kolmiulotteinen avaruuskehä on stabiili ja tarjoaa kuormille vaihtoehtoisia siirtymisreittejä. Kaikki kehän kuormia siirtävät rakenneosat pitää olla yhdistettynä toisiinsa.
- Kehä pitää suojata niin, että lattialaatat ja seinät voivat tuhoutua ilman runkoon syntyviä vakavia vaurioita.
- Kehän pitää olla sitkeä ja mukautuva kestäämään ylikuormitusta ja suuria muodonmuutoksia säilyttäen silti jatkuvuutensa.
- Ulkoreunalla pilarien alaosat on suunniteltava kestäämään räjähdysten aiheuttamia suoria vaikutuksia.

Rakennuksen osittaiseen sortumaan johtanutta alkuperäistä syytä, eli räjähdystä, ei olisi voitu estää rakennuksen tai sen suunnitelmien tarkastuksella. Räjähdysten sijainti ja voimakkuus ovat lähes mahdottomia ennakoita tarkasti. Sortuma kuitenkin laajeni jatkuvaksi ensimmäisen rakenneosan tuhouduttua räjähdysten voimasta ja aiheutti rakennuksen suhteettoman suuren osan romahduksen. Sortuman laajuus olisi ollut kuitenkin rajoitettavissa valitsemalla toisenlainen rakennejärjestelmä, eikä vaurioherkkää siirtopalkkia olisi rakennukseen suunniteltu. Tämä on kokeneen suunnittelijan ja suunnittelun ohjaajan vastuulla.

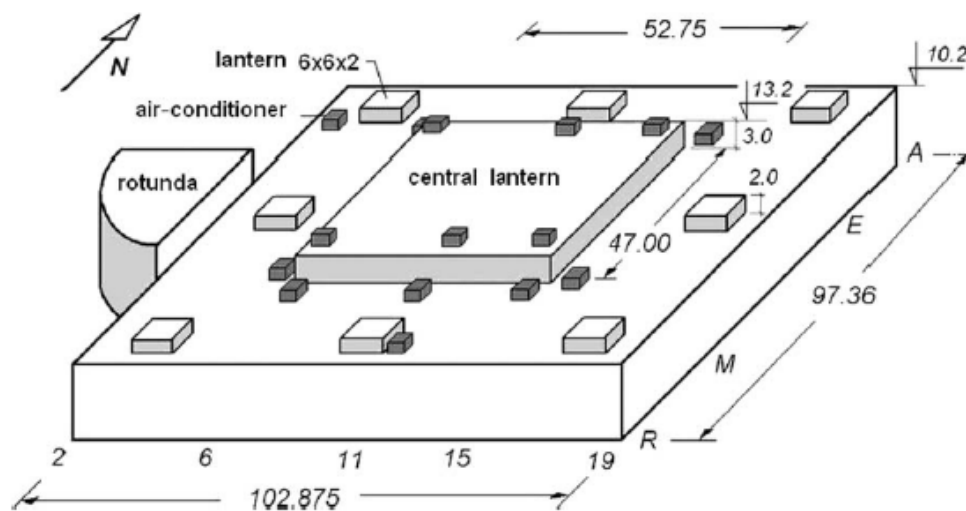
### 4.2.3 Katowicen messuhalli, Puola

Iltapäivällä 28. päivä tammikuuta vuonna 2006 messuhallin katto romahti Katowicessa Puolassa hallin ollessa täynnä ihmisiä. Onnettomuudessa kuoli 65 ihmistä ja yli 170 ihmistä loukkaantui. Katolla oleva lumi- ja jääkuorma oli onnettomuuspäivänä kaksinkertainen mitoitustasstandardeihin verrattuna. Ennen messutapahtumaa hallin katto oli osoittanut merkkejä epästabiilista käyttäytymisestä suuren lumikuorman vaikuttaessa, mutta kiinteistön omistajan välimpitämättömästä asioiden hoidosta johtuen, messujärjestäjät päättivät tapahtuman järjestää traagisin lopputuloksin. [15] Kuvassa 38 on esitetty messuhalli katastrofin jälkeen. Halli oli avattu käyttöön keväällä vuonna 2000 ja sen ensimmäinen kahdeksan kuukauden korjaustyöt vaatinut paikallinen sortuma tapahtui tammikuussa 2002. [5]



**Kuva 38.** Katowicen messuhalli katastrofin jälkeen. [5]

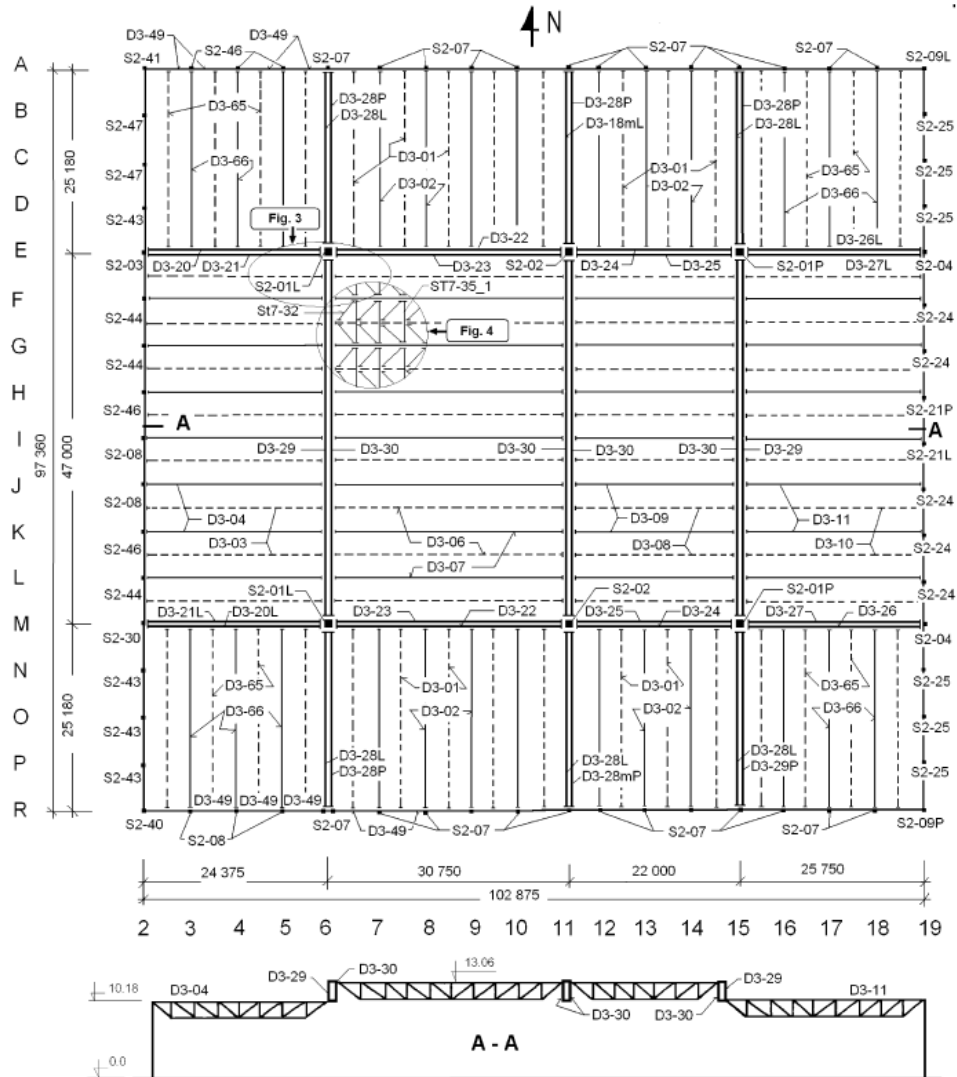
Messuhalli oli 97,4 metriä leveä ja 102,9 metriä pitkä teräsrakenteinen hallirakennus. Vesikatkon keskellä oli 47,0 metriä leveä, 52,8 metriä pitkä ja kolme metriä korkea kattolyhty. Lisäksi vesikatolla oli kahdeksan pienempää kattolyhtyä symmetrisesti keskimmäisen lyhdyn ympärillä. Kuvassa 39 on esitetty rakennuksen aksometria. Rakennesuunnitelmien mukaan hallissa oli kuusi 13 metristä alapäistään perustuksiin jäykästi kiinnitettyä pääpilaria, jotka sijaitsivat keskiosan korkeamman osan reunoilla. Ulkoseinälinjoilla sijaitsi kuuden metrin välein yhteensä 66 pilaria, jotka olivat nivelellisesti kiinnitetty sekä alapäistään perustuksiin, että yläpäistään vesikattorakenteisiin. [5]



**Kuva 39.** Aksometria Katowicen messuhallista. [5]

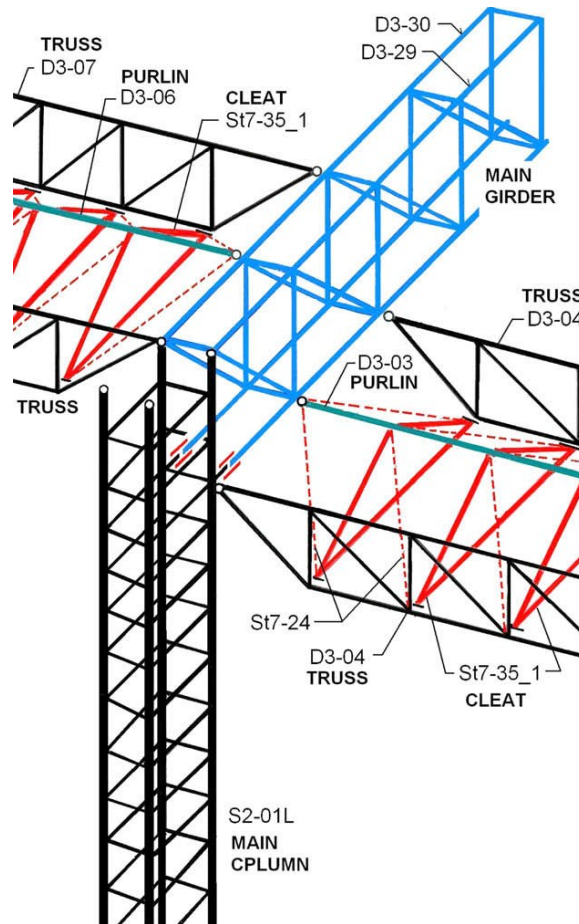
Pääpilarit koostuivat neljästä pyöreästä teräsputkesta, jotka oli hitsattu yhtenäiseksi pilarelementiksi vaakasauvojen avulla. Katon pääkannattajat olivat pilareihin tuetut poikki-

leikkaukseltaan nelionmuotoiset avaruusristikot, joihin oli tuettu vesikaton sekundääri-ristikot. Kyseisen avaruusristikon tyyppiä pidetään herkästi kiertyvänä, etenkin kun korkeamman osan ristikot oli tuettu pääristikon yläpinnan sauvoihin ja alemman katon ristikot pääkannattajien alapinnan sauvoihin. Kiertymäherkkyys yhdistettynä tuettavien kuormien epätasapainoon ja -keskisyyteen on rakenteellisesti erittäin riskialtis yhdistelmä, joka väärin suunniteltuna ja analysoituna voi johtaa rakenteen nopeaan stabiliteetin menetykseen. Rakenteen pohjakuva ja leikkaus on esitetty kuvassa 40, josta rakennuksen runko on helposti hahmotettavissa. [15]



**Kuva 40.** Messuhallin rakenteen pohjakuva ja leikkaus. [5]

Sekä ylemmän, että alemman vesikaton sekundääri-ristikot olivat rakenteellisesti samalaiset: molemmista päistään nivelellisesti tuetut N-ristikot, joiden välissä oli poikkileikkaukseltaan kolmionmuotoinen avaruusristikko. Kuvassa 41 on esitetty tämä monimutkainen vesikattorakenne solmukohtineen. Sekundääri-ristikot olivat kuuden metrin välein ja näin ollen pääkannattajien ala- ja yläsauvojen solmukohtat olivat kolmen metrin välein. [5]

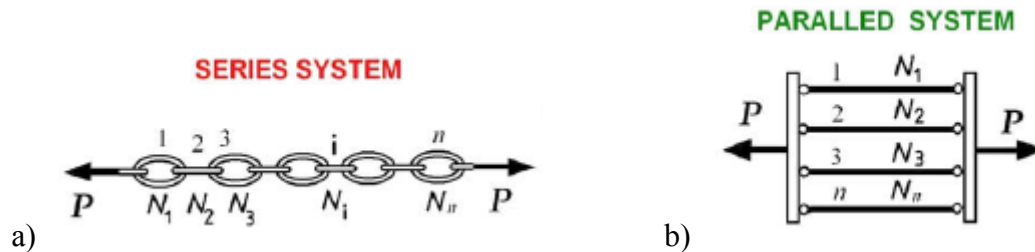


**Kuva 41.** Pilarin ja ristikoiden liitos. [5]

Rakennuksen keskialueen sortuma moduulilinjoilla E-M ja 6-15 alkoi pääkannattajien pudottua tueltaan. Vain 6- ja 11-linjan pääkannattajat pysyivät M-linjan pilarien päällä. Sortuma eteni rakennuksen matalammalle osalle pääristikoiden sorruttua, jolloin sekundääriristikoilta hävisi tuki keskialueelta. Ulkokehän pilarit pysyivät pystyssä, mutta ne kokivat merkittäviä muodonmuutoksia, koska romahtanut vesikatto veti niiden yläpäät mukanaan taivuttamalla pilarit sisäänpäin. Linjan 15 pääkannattaja välillä E-M jäi paikalleen, mutta suurten muodonmuutostensa takia epästabiiliksi. Se sortui lopulta kaksi viikkoa myöhemmin jättäen vain palkin päät paikalleen pilarien päälle. [5]

Onnettomuustutkinnassa todettiin, että rakennuksen suunnittelussa oli tehty merkittäviä rakenteellisia ja lujuuksiin liittyviä virheitä. Ensinnäkin messuhallin rakenteellinen turvallisuus perustui rakennejärjestelmään, joka koostui sarjaan kytketyistä elementeistä: yksiaukkoinen ristikko tuettuna yksiaukkoiseen pääkannattajaan, joka oli tuettu mastopilariin. Sarjaan kytketty järjestelmä on sortumaherkkä, koska koko systeemi sortuu yhden sen osan kuormansiirtokapasiteetin ylityttyä. Mitä isompi määrä elementtejä, kuten sauvoja ja solmuja, sitä suurempi todennäköisyys epäkelvosta rakenneosasta ja näin ollen

rakenteellisen turvallisuuden heikkenemisestä. Sarjaan kytkennän vastakohtana on rinnankytkentä, jossa rakennejärjestelmän turvallisuus ei ole yksittäisen elementin varassa, vaan systeemissä on useita rinnakkaisia kuormansiirtoreittejä yhden puuttuessa. Sarjaan ja rinnankytketyn systeemin ero on esitetty kuvassa 42. [5]



**Kuva 42.** Järjestelmän kytkennät a) sarjaan ja b) rinnan. [5]

Staattisen lujuusanalyysin jälkeen tutkimuksen mukaan toinen sortumaan johtanut pääsyy oli rakenteen riittämätön lujuus. Pääkannattajien epäkeskeinen pystysuuntainen kuormitus ja siitä johtuvat vaakasuuntaiset kuormitukset ylittivät sekundääristikoiden sekä pääkannattajien ja -pilarien kapasiteetin. Laskelmien mukaan vaakarakenteiden kapasiteetit ylittyivät yli kaksinkertaisesti. Lisäksi rakennuksen ensimmäisestä sortumasta aiheutuneet vesikaton profiilipeltien kiinnitysten löystyminen heikensi katon tasonsuuntaista jäykkyyttä. [5]

Kuten onnettomuustutkimuksen tuloksista selviää, oli sortumaan johtaneita syitä monia, eikä sortuma olisi välttämättä ollut estettävissä, vaikka yksi syistä olisi osattu eliminoida. Suunnittelun, valvonnan ja käytön aikaisen huollon ja tarkastusten virheet aiheuttivat katastrofaalisen lopputuloksen. Rakennuksen aikaisempi vauriohistoria oli selkeä indikaattori, että kaikki ei ole rakenteissa kunnossa eikä rakennus ole turvallinen. Tarkempi käytön aikainen tarkastustoiminta olisi todennäköisesti estänyt rakennuksen käytön ennen kriittisiä toimenpiteitä turvallisuuden takaamiseksi. Sortuman alkuperäinen syy on kuitenkin suunnittelussa tehdyt virheet. Vääränlainen rakennejärjestelmä ja väärin analysoidut rakenneosat olivat kapasiteetiltaan todellisuudessa huomattavasti heikommät kuin mitä suunnittelussa oletettiin. Tämä olisi ollut havaittavissa suunnitelmien ulkopuolisella tarkastuksella.

## 5. HALLIMAISTEN RAKENNUSTEN VAURIOT JA NIIDEN TORJUNTA

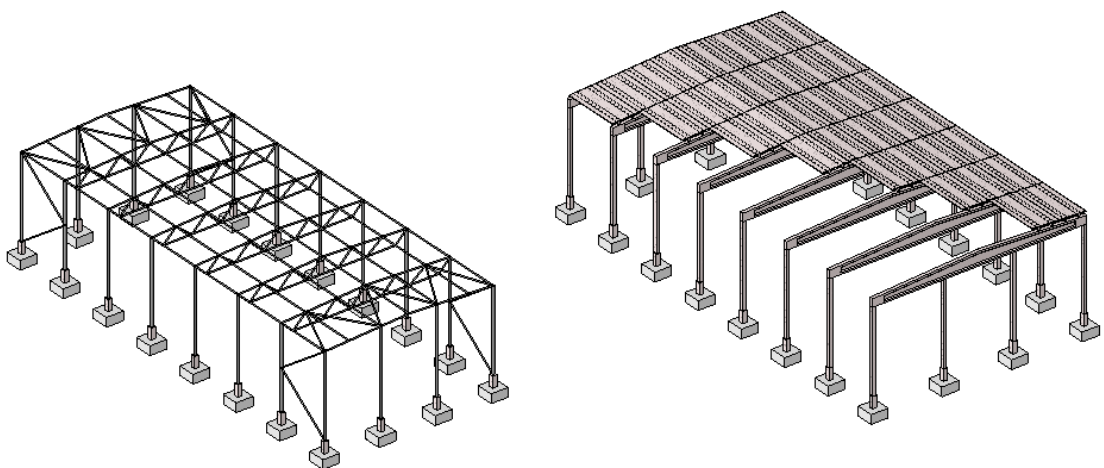
Tässä luvussa käsitellään laajarunkoisille betoni- ja teräsrakenteisille hallimaisille rakennuksille tyypillisten runkorakenteiden vaurioita sekä niitä aiheuttavia tekijöitä sekä niiden ennaltaehkäisyä. Ennaltaehkäisyllä tarkoitetaan tässä tapauksessa rakennuksen tai rakenteen vaurionsietokyvyn parantamista ja varmistamista.

### 5.1 Yleistä

Hallimaiset rakennukset ovat yleisesti kehärakenteisia rakennuksia, joiden jäykistys keuhien poikittaisessa suunnassa hoidetaan ensisijaisesti päätykehien mastopilarien avulla. Vaakavoimista aiheutuvilla taivutusmomentilla ja leikkausvoimalla on osuus pilarin mitoituksessa, pystykuormien lisäksi. Sivusiirtyvien hallimaisten rakennusten rakennetyypit voidaan jakaa seuraavalla tavalla:

- 1-kerroksiset mastopilareilla tehdyt teräs-, teräsbetoni- ja puurakenteiset rakenteet ja rakennukset.
- 1-kerroksiset, yleensä puu- tai teräsrunkoiset 2- tai 3-nivelkehät.
- Muut useampilavaiset 1-kerroksiset, yleensä teräsrunkoiset portaalikehät.
- Monikerroksiset pääosin pilarijäykisteiset, yleensä teräs- tai liittorunkoiset kehät.

Kuvassa 43 on esitetty tyypilliset yksikerroksisten teräs- ja betonirunkoisten hallien rungot.



**Kuva 43.** Tyypilliset teräs- ja betonirunkoisten hallien rakennejärjestelmät.

### 5.1.1 Riskitekijät

Suomessa on esiintynyt runsaasti suunnittelu- ja rakennusvirheitä hallimaisissa seuraamusluokiltaan CC1 ja CC2 rakennuksissa. Suuri osa virheistä keskittyy rakennusten stabiilisuuteen ja pääkannattajakehien puutteelliseen sivutuentaan. Seuraamusluokan ollessa matala, kyseisille rakennuskohteille määritellään varsin vähäiset tekniset vaatimukset, joita on edelleen alitettu toimijoiden osaamisen puutteista johtuen. [31]

Vaatimukset, kun hallirakenteissa käytetään tasokehärakennetta:

- a. Tasokehän rakenneosien ja liitosten kestävyyksien tulee olla riittäviä.
- b. Kehän osat tulee valita siten, että niiden paikallinen nurjahdus pois kehän tasosta ei olisi todennäköinen.
- c. Kehän osat tulee valita ja tukea riittävästi siten, että osat eivät voi kiepahda kehän tasosta.
- d. Kehä tulee tukea sivuttaissuunnassa riittävästi.
- e. Kehän tuennoissa tulee ottaa huomioon ulkopuoliset paine- ja imukuormat sekä epäsymmetriset luonnonkuormatilanteet.
- f. Kehän nurjahduskestävyys omassa tasossa on oltava riittävä.

Kehärakenteille käytettäviä mitoituskaavat ovat kelvollisia vain tilanteissa, joissa kaikilla mainitut kohdat on huolellisesti huomioitu. Monessa onnettomuustutkimustapauksissa on hallin suunnittelussa otettu huomioon vain vaatimus a. eikä stabiiliteettitarkastuksia b.-f. ole lainkaan tehty. [31]

### 5.1.2 Suositeltavat toimintaperiaatteet

Onnettomuustilanteessa vähimmäisvaatimuksena on, että vaurio pystytään rajaamaan mahdollisimman pieneen laajuuteen ja rajaus tulee tehdä rakenteellisin toimenpitein. Lisäksi CC3b-kohteessa tulee asetuksen mukaan aina tehdä järjestelmällinen riskiarviointi, jossa huomioidaan niin ennakoitavat kuin ennakoimattomissa olevat onnettomuustilanteet. [31]

Menettelytavat vaurionsietokyvyn varmistamiseksi riippuvat runkorakenteesta, vaaka-jäykistystavasta, materiaalista sekä onnettomuustilanteen seuraamusluokasta. Suositeltavat menettelytavat on esitetty taulukossa 7. Eurokoodin kansallinen liite esittää ohjettavalla, että paikallista vauriota voidaan rajata joillakin seuraavista toimenpiteistä: [44]

- suunnitteleamalla vaihtoehtoiset kuormansiirtymisreitit,
- lisäämällä rakenteen staattista määräämättömyyttä tai varmistamalla liitosten sitkeydestä,
- käyttämällä riittävää määrää jäykistäviä rakenteita sekä seinissä katossa,
- huolehtimalla, että pääkannattajien stabiilius säilyy myös paikallisen vaurion jälkeen,
- suunnitteleamalla sekundääriset rakenteet siten, että ne eivät aiheuta sortuma-alueen laajenemista.



**Taulukko 7. Menettelytavat hallimaisten rakennusten vaurionsietokyvyn varmistamiseksi. [31]**

Kohteen runkotyyppi	Seur. luokka	Rakenteet		Menettelyt		
		Pystyrakenne	Vaakarakenne	Pääasiallinen	Toissijainen/ täydentävä	Muut ehdot
Suorakaiteen muotoiset hallirakennukset	CC2b	Mastopilarit tai kehärungot (jäykistys pitkällä seinillä)	Orret ja pinnat (ohutlevy tms.)	Vaurion rajaaminen hyväksyttävään laajuuteen	Vaihtoehtoiset kuormansiirtoreitit	Keinoina riittävä staattinen määräämättömyys ja liitosten sitkeys
Suorakaiteen muotoiset hallirakennukset	CC2b	Mastopilarit tai kehärungot (jäykistys pitkällä seinillä)	Kattorakenne: 1- ja 2/3-aukkoiset kattoelementit	Vaurion rajaaminen hyväksyttävään laajuuteen	Taattava muun rakenteen stabiilius paikallisen vaurion jälkeen	Menettelytapana riittävä määrä pituusjäykisteitä
Hallirakennukset, muut pohjamuodot (katso mot, monitoimihallit)	CC3b (tai CC3a)	Mikä tahansa pystyrakennetyyppi ja materiaali	Mikä tahansa vaakarakennetyyppi ja materiaali	Riittävästi vaihtoehtoisia kuorman siirtoreittejä	Vaurion rajaaminen hyväksyttävään laajuuteen	Keinoina riittävä staattinen määräämättömyys ja liitosten sitkeys
Isot hallimaiset liikerakennukset	CC3a tai CC3b	1- tai useampikerroksinen pilari-palkkirakenne + jäykistävät rakenteet	Yleensä betonikatoelementit (ja välipohjat)	Riskinarviointi (CC3b-tapauksessa pakollinen ja CC3a:ssa suositellaan)	Runkojärjestelmän mukainen ratkaisu: - Sidejärjestelmä/vaihtoehtoiset kuormansiirtoreitit - Vaurion rajaaminen hyväksyttävään laajuuteen	

Mikäli paikallisen vaurion hyväksyttävä raja ylittyy ja koko rakennus menettää stabiiliutensa, eikä siitä johtuvaa jatkuvaa sortumaa pystytä estämään, on rakenneosat mitoitettava avainasemassa olevana rakenneosina.

Seuraamusluokkaan CC3b kuuluvalla rakennuksella on aina tehtävä rakenteellisen turvallisuuden riskiarvio. Riskiarviossa analysoidaan suunnittelun, toteutuksen ja käytön riskit sekä määritellään toimenpiteet havaittujen riskien hallitsemiseksi. Riskiarvio on osa hankkeen erityismenettelyä, joka on tyypillistä korkean seuraamusluokan rakennuksissa. Erityismenettelystä on tarkemmin kerrottu kohdassa 2.1.1.

Riskiarviossa analysoitavat asiat rakenteellisen turvallisuuden kannalta:

- kohteen päätiedot,
- organisaatio ja vastuhenkilöt,
- riskialttiiden rakenteiden kuvaus,
- suunnitteluun liittyvät riskit,
  - a. vastaava rakennesuunnittelu
  - b. tuoteosasuunnittelu
- rakentamiseen liittyvät riskit,
  - a. tuoteosavalmistus
  - b. kuljetus- ja asennusvaihe
  - c. työmaatoiminta
- käyttövaiheeseen liittyvät riskit,
  - a. käyttöönotto
  - b. käyttö
  - c. ylläpitotoimenpiteet
- yhteenveto hankkeen riskeistä (seuraamukset, todennäköisyydet) ja tarvittavista toimenpiteistä,
- esitys erityismenettelyn toimenpiteiksi ja laajuudeksi sekä tarkastuksen kohdentamiseksi.

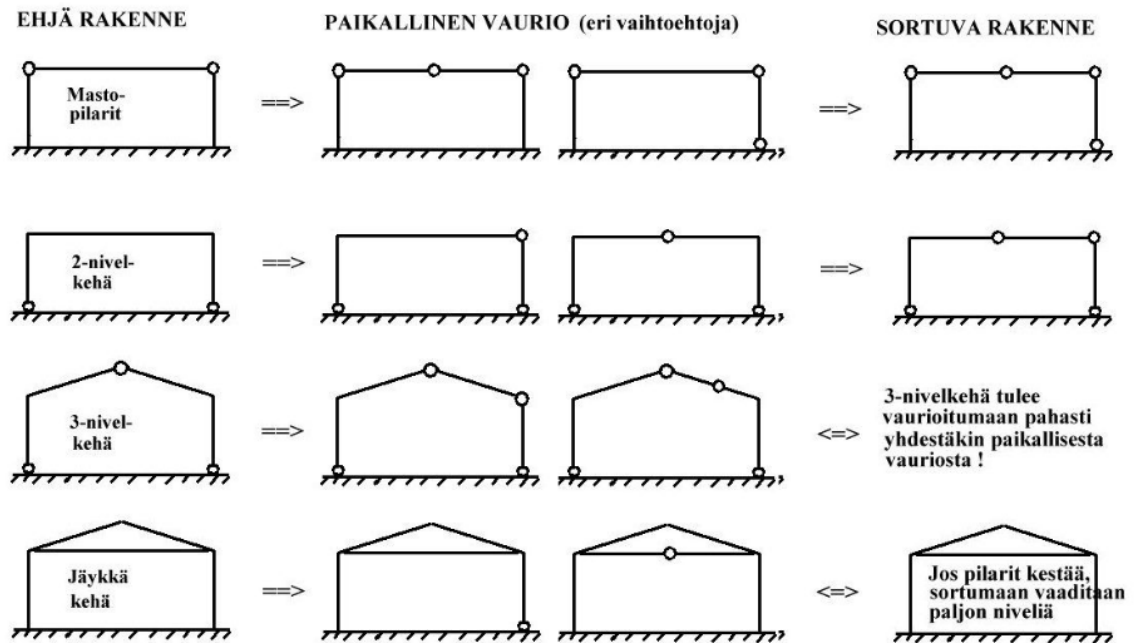
Eritymenettelyyn kuuluu suunnitelmien ulkopuolinen tarkastus, jonka lähtötiedoksi riskiarvio kuuluu. [32]

## 5.2 Teräsrunkoiset hallimaiset rakennukset

Teräsrunkoiset hallit ovat hyvin yleisiä Suomessa niiden nopean asentamisen ja kustannustehokkaan materiaalimenekin vuoksi. Teräsrakenteilla päästään pitkiin jänneväliin häiritsemättä hallissa tapahtuvaa toimintaa pilareilla. Teräsrakenteisen hallin kantava pystyrakenne on yleensä teräspilari tai -ristikkopilari ja vaakarakenteena toimii yleensä teräsristikko. Runko jäykistetään ulkoseinälinjoilla ja katon lappeen tasossa olevalla jäykistysristikolla.

### 5.2.1 Tyypilliset vauriomallit

Hallirakennuksen rakennetyypillä ja sortumaherkkyydellä on merkityksensä sen vaurioitumiseen ja lopulliseen sortumaan. Staattisesti määrätyt rakenteet ovat herkempiä sortumiselle, koska vähäinenkin vaurio muuttaa rakenteen helposti sortumiseen johtavaksi mekanismiksi. Kuvassa 44 on esitetty tyypillisten laajarunkoisten rakennusten mahdollisen paikallisen vaurion kehittyminen sortumaksi. Liitosten tai rakenneosien kapasiteetin alimittaisuus tai rakenteen stabiiliuteen vaikuttava virhe muodostaa rakenteeseen kuvan 44 mukaisen plastisen nivelen.

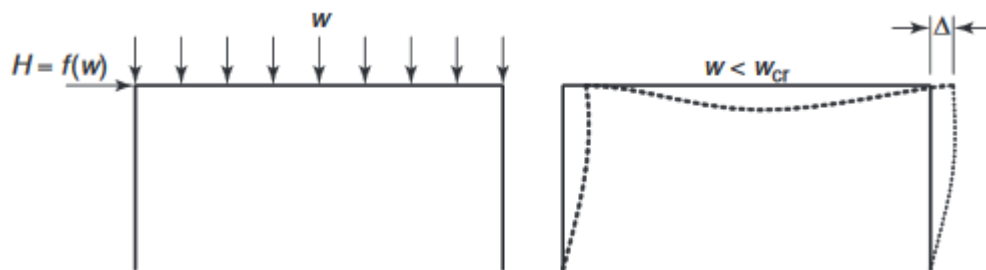


*Kuva 44. Erilaisten kehätyyppien vauriomuotoja ennen muuttumista mekanismiksi ja sortumaa. [32]*

Liitosten tai rakenneosien kapasiteetin alimittaisuus tai rakenteen stabiiliuteen vaikuttava virhe muodostaa rakenteeseen kuvan 44 mukaisen plastisen nivelen.

## 5.2.2 Sivusiirtyminen ja pilarirungon siirtymätilan huomiointi

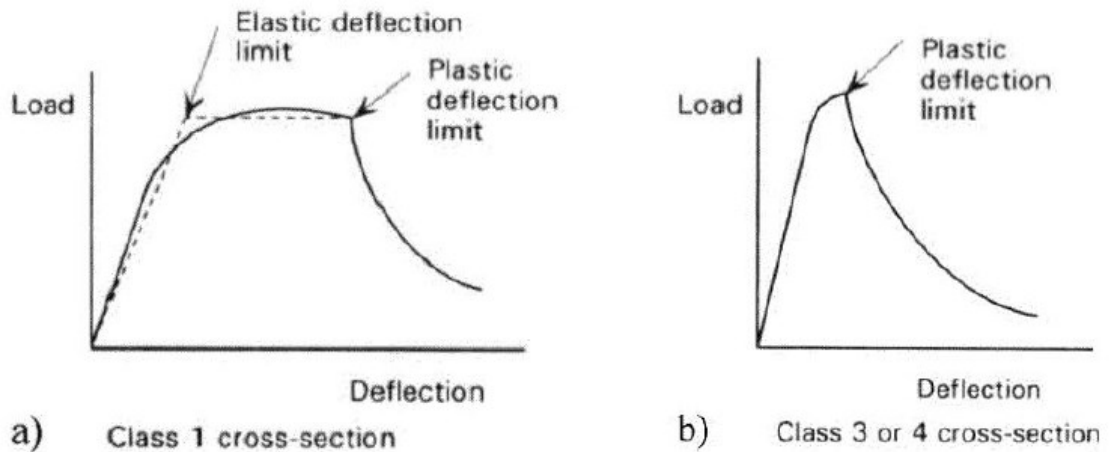
Teräsrakenteisen hallin stabiileettiin liittyvä suunnitteluvirhe on hyvin yleinen Suomessa paikallisiin vaurioihin tai sortumiin johtanut yksittäinen tekijä. Etenkin 2-nivelrunkoisten hallien onnettomuustutkinnassa on huomattu stabiileetin laskennassa vakavia puutteita. Pystyrakenteen kantokyky heikkenee merkittävästi kehän ollessa siirtynyt tason suunnassa, kuva 45.



*Kuva 45. Kehän sivusiirtyminen tason suunnassa vaaka- ja pystykuorman vaikutuksessa. [10]*

Sivusiirtyvissä rakennuksissa pilarin mitoituksessa on huomioitava niin sanottu toisen asteen teorian vaikutukset, joilla otetaan huomioon rakenteen sivusiirtymien vaikutukset voimasuureisiin. Käytännössä nämä vaikutukset ovat pystyrakenteiden vinoudesta tai

epäkeskisydestä tai molemmista aiheutuvia lisämomenteja mastopilarissa. Sivusiirtymän kasvaessa, taivutusmomentti saattaa lähetä omaa maksimiarvoaan nopeammin, kuin vastaavasti puhdas puristusvoima. Lopulta taivutusmomentti yhdessä puristusvoiman kanssa ylittävät rakenteen kantokyvyn, ja johtavat sen kapasiteetin äkilliseen menetykseen kuvassa 46 esitetyllä tavalla. [20]



**Kuva 46.** Rakenteen kuormitus-muodonmuutoskäyrä a) poikkileikkausluokassa 1 b) poikkileikkausluokassa 3 ja 4. [20]

Hallin poikittaisten kuormien ja siirtymien sekä rakenteen jäykkien liitosten takia rakenteen tasokehien stabiilius nurjahdukselle kehän tasossa on kriittinen, jonka vuoksi tasonorjahduskestävyys on aina selvitettävä. Rakenteen on pysyttävä omassa tasossaan jatkuvan sortuman estämiseksi. [31]

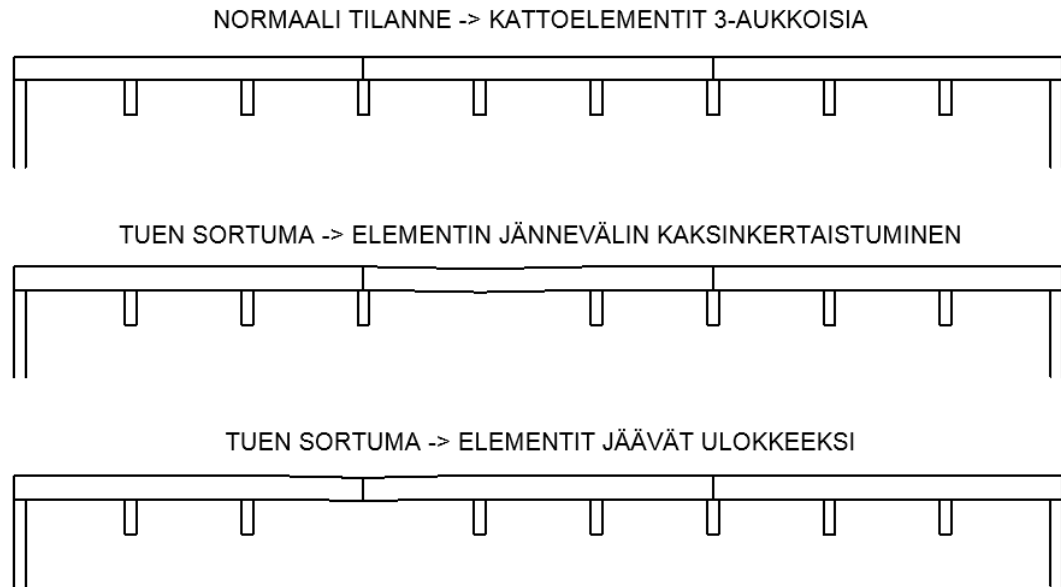
### 5.2.3 Kattojen orsirakenteet

Orsirakenteet hallirakennusten katoissa ja seinillä ovat kriittisiä rakenteita sen takia, että niillä voi olla kaksi päätehtävää:

- siirtää rakennuksen pintaan vaikuttavat luonnonkuormat kantaville rakenteille ja
- toimia rakennuksen pääkannattajakehiä stabiloivana sivutukina.

Lisäksi CC1-seuraamusluokan kohteissa, missä rakennuksen pituussuuntainen jäykistys on tehty yhdellä jäykistysristikolla katossa ja pitkällä seiinillä, orsirakenteille on välittynyt etenkin tuulesta johtuvia puristuskuormia, joita vastaan orsirakenteita ei ole suunniteltu.

Onnettomuustilanteen kannalta suositeltavaa olisi suunnitella orsirakenteet jatkuvina. Kuvassa 47 on esitetty 3-aukkoisen vesikattoelementin toiminta tuen menetyksen jälkeen. Vaikka yksi pääkannatin menettäisi kantokykynsä, toimii 3-aukkoinen vesikattoelementti ulokkeena ja näin ollen sortuma ei pääse jatkumaan.



**Kuva 47.** Moniaukkoisen vesikattoelementin toiminta pääkannattajan sortuman jälkeen. [31]

Orsirakenteen toiminta kaksinkertaisella jännevälillä tai ulokkeena on kuitenkin mitoittava murtorajatilasta poikkeaville rasituksille, jotta se toimii oletetusti eikä jatka sortumaa.

### 5.3 Betonielementtirunkoiset hallimaiset rakennukset

Betonihallien kantava rakenne on yleensä pilari-palkkirunko, joka koostuu elementeistä. Tyypillinen betonielementtirakenteinen laajarunkoinen halli on esitetty kuvassa 43. Runko on useimmiten sivusiirtävä, eli yhden kerroksen korkuisissa halleissa pilarit ovat niin sanottuja mastopilareita, jotka toimivat rungon jäykistävänä rakenteena. Vaakarakenteiden pitkien jännevälien vuoksi pilariverkko on usein hyvin harva ja ulkoseinäelementtien tuentaan tarvitaankin ulkoseinälinjoille usein tiheämpi pilarijako. [31] Mastopilarien sijasta rungon jäykistykseenä voidaan käyttää myös jäykistysristikoita tai seinämas-tojäykistystä, mikäli hallin runko sisältää kantavia seinärakenteita.

Betonihallin vaakarunko koostuu palkeista ja niihin tukeutuvista laatoista. Laajarunkoisissa betonielementtirunkoisissa halleissa palkit ovat lähes aina esijännitetyjä esimerkiksi I- tai HI-palkkeja pitkien jänneväliden takia. Hallin pituussuuntaiset vaakavoimat siirtyvät yläpohjatasossa elementtien kautta pystyrakenteille ja sitä kautta perustuksille. Yläpohjan palkit tuetaan pilarien päähän ja mahdolliset välitason palkit lisäpilarien päihin sekä yläpohjaa tukevien jatkuvien pilarien kylkeen liitoskonsolien avulla. [31]

### 5.3.1 Vaurioskenaariot ja menettelytavat

Tyypillisiä betonihallin kokonaisstabiliteettiin vaikuttavia vaurioskenaarioita ovat 1-, 2- tai 3-aukkoisen kattolaatan sortuminen tai osittainen sortuminen onnettomuuskuorman vaikutuksesta. Mastopilarijäykisteinen betonirakenteinen hallirakennus ei tarvitse erillisiä vakavuutta varmistavia vaaka- tai vinorakenteita, myös mahdolliset seinäelementit toimivat runkoa jäykistävinä rakenteina.

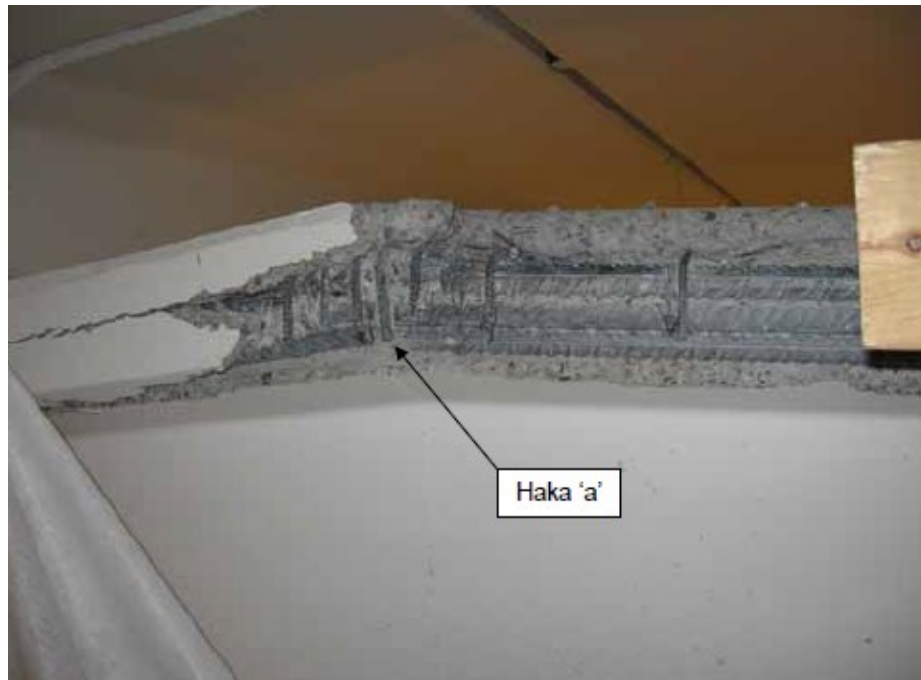
Betonihallin vaurionsietokyky perustuu yleensä sortuma-alueen rajoittamiseen hyväksytyyn rajaan, josta on tarkemmin kerrottu kohdassa 3.5.4. Yksiläiväisessä hallissa voidaan menettää kokonaisuudessaan kaksi kehäväliä eli yksi kehä mistä tahansa rakennusta. Sortuman jälkeen hallin vaakastabiliteetin hoitavat rakenteet tulee pystyä kantamaan vaurioitilanteessa syntyneet vaakakuormat.

Onnettomuustutkinnassa on havaittu erityisesti HI-palkkien harja-alueella suunnitteluvirheistä johtuvia vakavia sortumariskejä. Harja-alueella palkin yläpinnan puristetut harjateräksket ovat olleet joko kokonaan tai osittain tukematta hakarautoituksella. Kuvassa 48 on harja-alue jäänyt kokonaan ilman hakarautoja ja palkin taivutuksessa terästen puristusjännitys on aiheuttanut niiden nurjahduksen sivusuuntaan ja sitä kautta betonin lohkeamisen. [1]



*Kuva 48. Palkin nurjahnut raudoitus harjalla. [1]*

Kuvassa 49 olevassa tapauksessa on harja-alueella hakojen ankkurointi ollut puutteellista ja pääterästen ankkurointipituus jäänyt liian lyhyeksi. Näin ollen puuttuva puristusjännitys pyrkii siirtymään jatkettavien tankojen väliin jäävän puristetun betonin kautta tai jos tankojen päät ovat alun perin olleet kontaktissa tai lähes kiinni toisissaan, epäkeskeisesti tangon poikkileikkaukseen vaikuttavan jännitysresultantin avulla. [2]



*Kuva 49. Puristettujen pääterästen vajaa sidonta ja ankkurointi. Haka 'a' jää päätankojen päiden väliin. [2]*

### 5.3.2 Vaurionsietokyvyn parantaminen

Onnettomuuskuormista aiheutuvasta yhden pilarin sortumasta ja sen aikaansaamasta hyväksytystä paikallisesta vauriosta huolimatta rakennuksen on pysyttävä pystyssä. Rakenne pitää siis mitoittaa niin, ettei vaurio etene rakenteessa, jolloin rakenne voi olla riittävän turvallinen, vaikka se ei olekaan täysin kestävä. [31]

Jatkuvan sortuman estäminen tuleekin huomioida rakenneosien välisten liitosten suunnittelussa. Normaaleissa betonielementtirakennuksissa sortuma-alueen rajavaatimus toteutuu lähes automaattisesti, mikäli kattoelementtien liitokset eivät ota vastaan taivutusmomenttia ja liitoksen lujuus vaakakuormille on rajallinen. Vaakakuormia ja taivutusta aiheutuu liitokseen esimerkiksi kattoelementin toista päätä tukevan palkin sortumisesta. [31]

## 5.4 Rakenteiden liitosten vaurionsietokyky

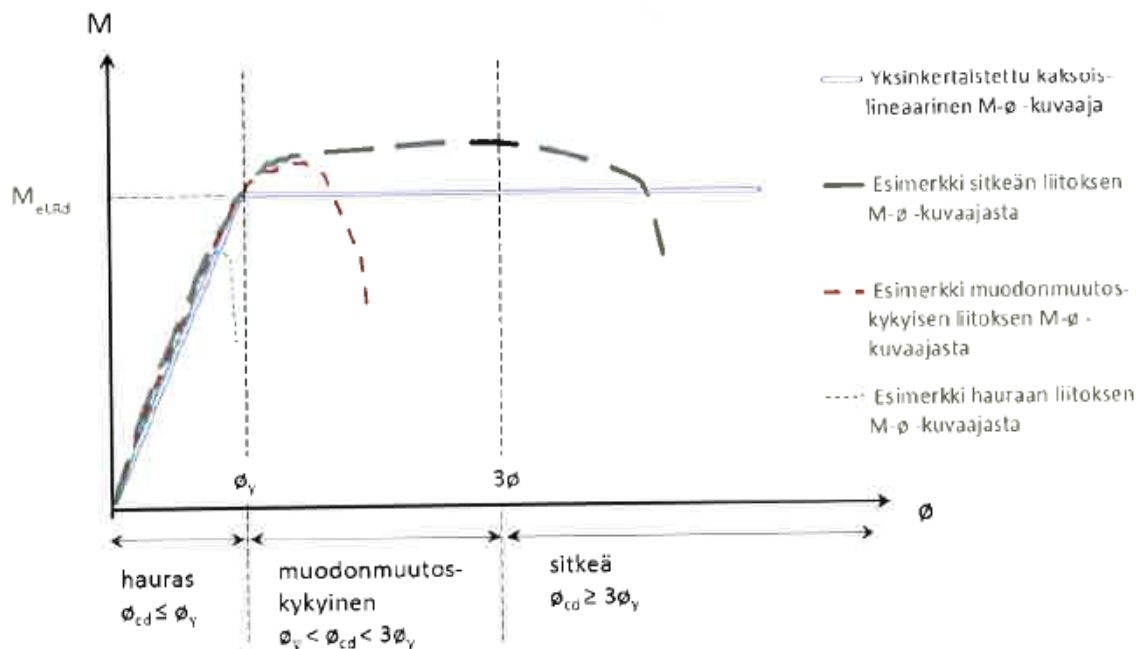
Rakenneosissa ja rakenteiden liitoksissa on yleensä monia komponentteja, jotka voivat yhden myötäessä vastaanottaa senkin jälkeen lisäkuormaa tai ainakin säilyttää kuormankantokykynsä. Liitoksen vaurionsietokyvyllä pyritään varmistamaan, että liitoksen komponentit toimivat turvallisesti vaikka, joku niistä vaurioituisikin. Rakenneanalyysissä liitosten käyttäytymistä käsitellään tavallisesti jollakin kolmesta yksinkertaistetusta toiminta- tai käyttäytymismallista: [20]

- nivelellinen malli, jossa liitoksen ei oleteta siirtävän taivutusmomenteja,

- jäykkä malli, jossa liitoksen käyttäytymisen ei oleteta vaikuttavan rakenneanalyysiin,
- osittain jäykkä malli, jossa liitoksen käyttäytyminen otetaan huomioon rakenneanalyysissä.

Luokittelu on kelvollinen riippumatta rakennuksen rungon materiaalista. Materiaali tai rakenneosien valinta vaikuttaa ainoastaan kohteessa käytettävistä liitostyyppistä, koska esimerkiksi täysin jäykkien liitosten käyttö on erittäin vähäistä betoni- ja puuelementtirakennuksissa.

Tavallisesti luonnonkuormien ja ennakoitujen onnettomuuskuormien kohdistuessa rakenneosiin ja niiden liitoksiin, on ne suunniteltava mahdollisimman sitkeinä, jotta mahdollisessa ylikuormitustapauksessa voivat ne venyä vaurioitumatta tai sortumatta. Kuvassa 50 on esitetty esimerkkejä hauraiden, muodonmuutoskykyisten ja sitkeiden, staattisesti käytökelpoisten liitosten likimääräisistä  $M - \phi$ -kuvaajista. Vaaka-akselilla on liitoksen kiertymä ja pystyakselilla liitoksen taivutusmomentti. Pystyviiva  $\phi_y$  merkitsee liitoksen myötörajaa, jonka ylittyttyä liitokseen jää pysyvä muodonmuutos, vaikka liitoksen ylikuormitus poistuisikin. [20]



**Kuva 50.** Suuntaa antava kuvaaja kolmen eri liitoksen kiertymiskyvystä.  $M_{el,Rd}$  on liitoksen myötömomentti tai murtorajatilaa vastaava kestävyys. [31]

Rakenteiden liitoksissa on usein monia komponentteja, jotka voivat välittää lisäkuormaa tai ainakin säilyttää kuormankantokykynsä, vaikka yksi komponentti myötäisi. Erityisesti rakenneosissa, joihin kohdistuu lähinnä tilastollisia luonnonkuormia, pitää rakennesuun-



nittelussa tavoitella mahdollisimman sitkeitä rakenteita. Tilastolliset arvot saattavat joskus ylittää mitoitusarvonsa, joten liitoksen tulee kestää ylikuormitustapauksissa murtumatta tai sortumatta venyä. [45]

Teräsrakenteisissa halleissa on liitosten mitoituksessa ja toteutuksessa havaittu merkittäviä puutteita ja useat sortumat ovat joko osittain tai kokonaan aiheutuneet nimenomaan liitoksiin liittyvästä ongelmasta. Useissa Suomessa tapahtuneissa teräksisten kattoristikoiden sortumisonnettomuuksissa kattoristikon paarteisiin hitsatut diagonaalit ovat leikkautuneet irti. Kuvassa 51 on esitetty sortuneen Järvenpään teräsrakenteisen liikuntahallin kattoristikon diagonaalin liitos paarteeseen. Kuvassa nähdään tyypillinen rakenneliitoksen sitkeyspuutokseen liittyvä vaurio, joka usein johtuu paarteen liian pienestä ai-nepaksuudesta. [31] Liitoksen murtotapa on nimeltään leikkauslävistyminen. OTK nostikin sortuman yhdeksi tärkeimmäksi syyksi ristikon sauvojen liitosten alimitoituksen [3].

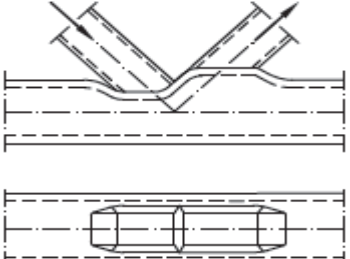
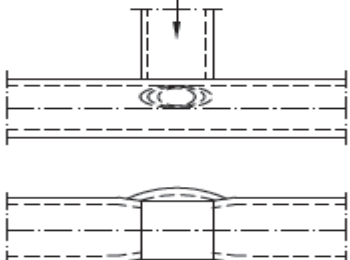
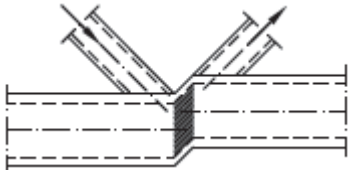
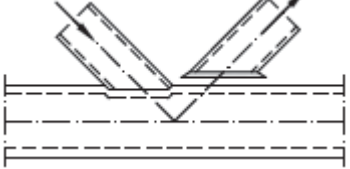
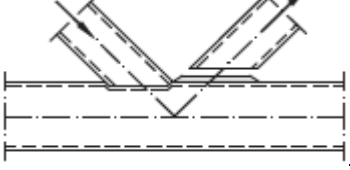
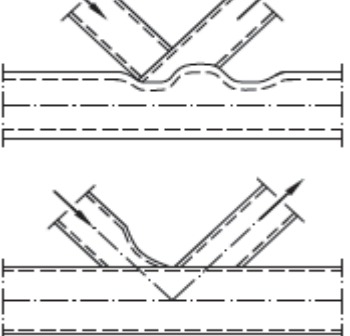
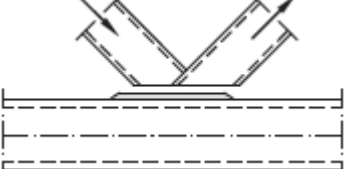


**Kuva 51.** *Paarteista repeytyi irti diagonaaleja siten, että pala paarretta leikkautui irti ja jäi kiinni diagonaalin päähän. [3]*

Leikkauslävistymismurtoa voidaan kutsua rakenneliitoksen hauraaksi käyttäytymiseksi. Diagonaalien irrotessa paarteesta, diagonaalissa vaikuttava vetovoima joutuu etsimään uuden kulkureitin. Jos sellaista ei löydy, eikä rakenteen kuormitus poistu, ristikkorakenne saattaa muuttua mekanismiksi ja sortua. Leikkauslävistymismurron ehkäisemiseksi on liitoksen geometria täytettävä suunnitteluohjeiden mukaiset vaatimukset. [31] Ristikon liitoksiin liittyy muitakin vaurioskenaarioita. Ruukin Rakenneputket-käsikirjan mukaiset ristikkorakenteiden vaurioitumismallit on esitetty taulukossa 8.

Runkomateriaalista riippumatta, liitoksissa voi molempien liittyvän rakenneosan puolella olla teräslevyjä, jäykistelevyjä, ruuveja, ankkurointiin tarkoitettuja raudotteita, hitsejä ja vaarnatappeja perusmateriaalien lisäksi. Näin ollen liitoksissa on lukuisa joukko eri rakenneosia, jolloin liitoksen murtotapoina voi esiintyä joko yksittäisten osien murtuminen tai useamman osan yhteismurto. Liitoksen mitoituksessa joudutaan yleensä laskemaan useita eri murtorajatilakestävyyskäyntejä. [31]

**Taulukko 8.** Ristikkorakenteiden liitosten vaurioitumismalleja. [26]

Murtotapa		Rakenne, jolla murtotapa mahdollinen
Paarteen pinnan plastinen murtuminen tai paarteen koko poikkileikkauksen murtuminen		Ohutseinäinen paarre ja pieni uumasauvan leveys verrattuna paarteen leveyteen
Paarteen uuman murtuminen myötämällä tai lommahtamalla uumasauvan puristuksesta johtuen		Korkea ohutseinäinen paarre sekä samanleuviset paarre ja uumasauva
Paarteen leikkausmurtuminen		Matala ja ohutseinäinen paarre
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		Ohutseinäinen ja leveä paarre, uumasauva hieman paarretta kapeampi
Uumasauvan tai hitsin murtuminen		Ohutseinäinen ja leveä paarre, uumasauva hieman paarretta kapeampi
Uumasauvan tai paaresauvan paikallinen lommahdus		Paarre: Ohutseinäinen ja leveä  Uumasauva: Ohutseinäinen ja suuri sivumitta
Uumasauvojen leikkautuminen paarteesta		Limitetty liitos, kun limityksen suuruus $\lambda_{ov} > \lambda_{ov,lim}$ tai kun uumasauvojen $h_1 < b_1$ tai $h_2 < b_2$

## 6. RAKENTEIDEN VAURIONSIIETOKYVYN ARVI- OINTI

Olemassa olevien rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastuksella pyritään varmistamaan rakennuksen käytön turvallisuus taloudellisten sekä ympäristö- ja henkilövahinkojen välttämiseksi. Tarkastusmenettely tulee kohdistaa erityisen korkean riskitason rakennuksiin, esimerkiksi

- laajarunkoisiin rakennuksiin, joissa on suuronnettomuuden mahdollisuus sekä
- rakennuksiin, joissa muista syistä arvioidaan sortuman riskitason olevan poikkeuksellisen korkea.

Tässä kappaleessa keskitytään rakenteiden vaurionsietokyvyn arviointiin olemassa olevissa rakennuksissa. Tarkoituksena on tuoda esiin rakennuksen vaurionsietokykyä parantavia tekijöitä ensin suunnitelmien perusteella ja sen jälkeen verrata niiden toteutumiseen paikan päällä tapahtuvassa tarkastuksessa. Esimerkkikohteet ovat lain piiriin kuuluvia laajarunkoisia myymälärakennuksia.

Betonirakenteiden sidejärjestelmiä ja mahdollisia avainasemassa olevia rakenteita on erittäin vaikeaa, ellei mahdotonta tarkastaa paikan päällä, koska siteet ja raudoitukset sijaitsevat betonirakenteen sisällä. Näin ollen kyseisten rakennusten vaurionsietokyvyn tarkastuksessa keskitytäänkin rakennesuunnitelmissa ilmenevien vaurionsietokyvyn parantamiseen.

### 6.1 Tarkastusprosessin kulku

Tarkastusprosessi on hyvä tehdä yhtenäistetyn työjärjestyksen mukaan, jotta tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Rakenteellisen turvallisuuden tarkastuksessa noudatetaan RIL 269-2015 mukaista ja kohdassa 2.3 esitettyä tarkastusohjetta. Rakennuksen vaurionsietokyvyn arviointiin on laadittu kirjallisuudesta havaittujen kriteerien perusteella vuokaavio, jonka avulla pyritään löytämään rakennuksesta sen vaurionsietokykyä parantavat tekijät seuraamusluokan mukaisesti.

Liitteessä A on kuvattu tarkastusprosessi vuokaaviona, jonka avulla pyritään varmistamaan rakennuksen vaurionsietokyky. Esimerkkikohteiden suunnitelmat ja rakenteet on käyty läpi vuokaaviota noudattaen.

## 6.2 Betonielementtirakenteinen myymälärakennus

Rakennuksessa on maanalainen pysäköintihalli osittain tai kokonaan myymälätilan alapuolella. Osa parkkihallista on pihakannen alapuolella. Pihakansi ja myymälätilaan rajoittuva välipohja on kuori- tai ontelolaattarakenteinen, jotka tukeutuvat jännebetonipalkkeihin. Jännebetonipalkit ovat tuettu betonipilareihin ja palkit ovat suorakaide- tai leuka-palkkeja. Yläpohjarakenteena on käytetty pääosin esijännitettyihin HI- tai I-palkkeihin tuettuja TT-laattoja. Rakennus on valmistunut vuonna 2010.

### SEURAAMUSLUOKKA

Rakennuksen seuraamusluokka on yleensä merkattu rakennesuunnitelmien pohjapiirustuksen yleisohjeisiin. Esimerkkikohte kuuluu onnettomuustilanteen seuraamusluokkaan CC3a, suuren jännevälän ja yleisömäärän vuoksi.

### RAKENNEJÄRJESTELMÄ

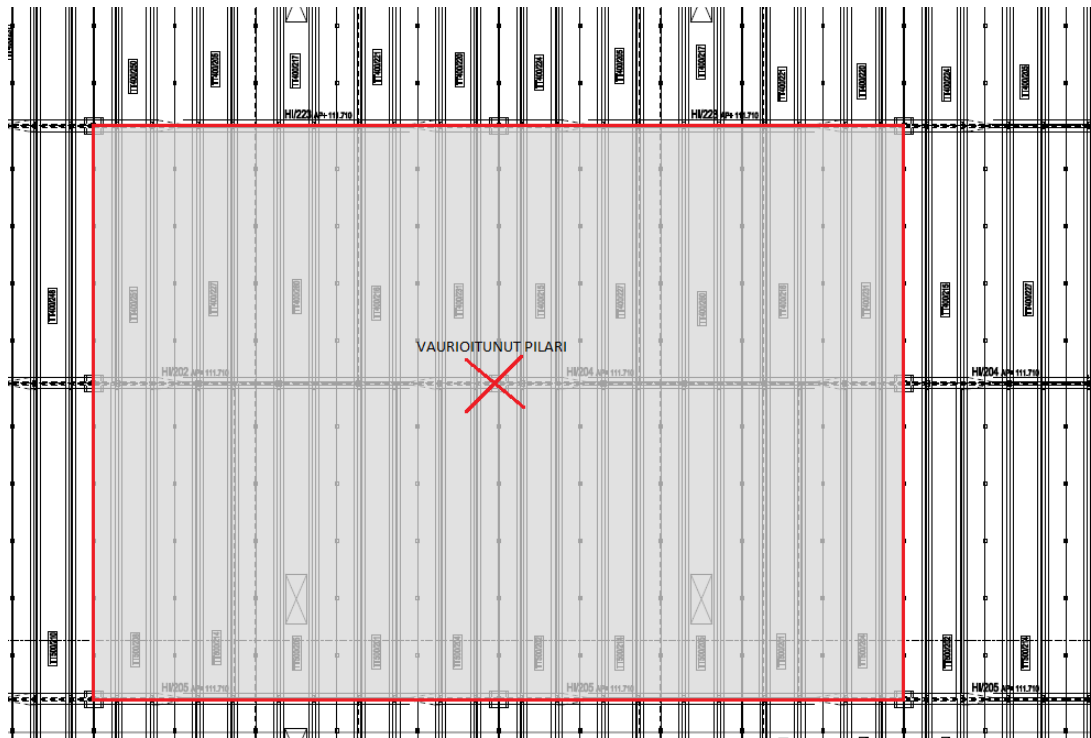
Rakennus on kaksikerroksinen pilari-palkkirakennus, jonka väli- ja yläpohjana on betonilaattaelementit. Rakennus on jaettu useampaan lohkoon liikuntasauomoin ja jokainen lohko on jäykistetty mastopilarein.

### RISKIARVIO

Rakennuksesta ei ole laadittu riskiarviota. Seuraamusluokan ollessa CC3a, ei niiltä sitä myöskään edellytetä.

### HYVÄKSYTTÄVÄ VAURIOALUE

Hallimaisen rakennuksen hyväksyttävä paikallisen vaurion raja on esitetty kohdassa 3.5.4. Pilarin vaurioituessa rakennuksesta saa sortua pilariin tukeutuvien pääkannattajien yhteenlaskettu pituus kertaan kaksinkertainen pääkannattajien väli. Yläpohjan paikallisen vaurion hyväksyttävä raja on esitetty kuvassa 52.



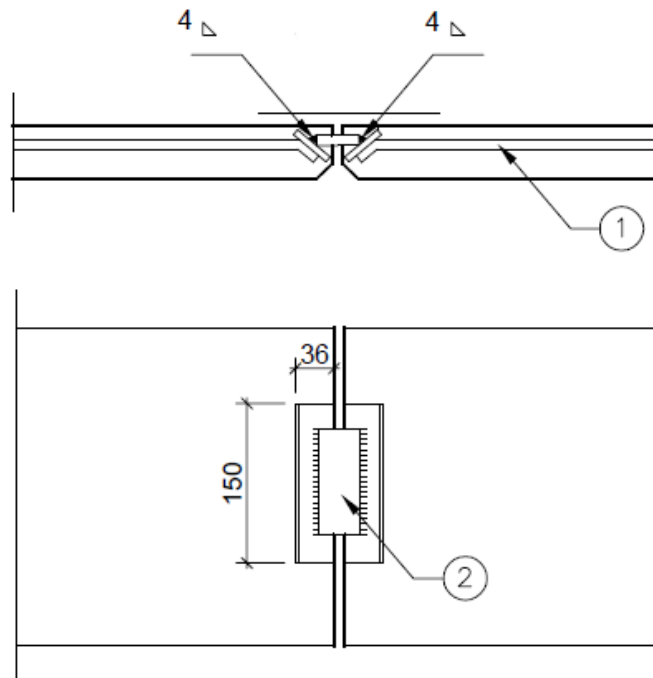
*Kuva 52. Yläpohjan paikallisen vaurion raja.*

## SIDEJÄRJESTELMÄ JA TASOJENSIDONTA

Paikan päällä ei sidontaa pystytä tarkastamaan, koska sidejärjestelmä on rakenteiden sisässä. Näin ollen sidejärjestelmän tarkastuksessa keskitytään rakennesuunnitelmista havaittuihin asioihin.

### TT-laataston sidejärjestelmä

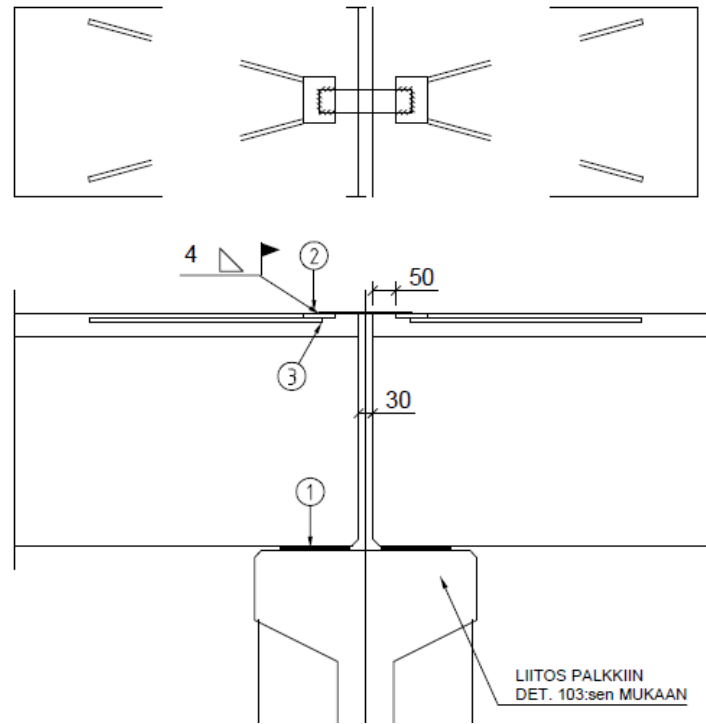
TT-laattojen pituussuuntaisessa reunassa sijaitseva reunatartunta toimii osana rengassidettä siirtäen sidevoimat laattaelementiltä toiselle. Kuvassa 53 on esitetty rakennesuunnitelmien mukainen TT-laattojen pituussuuntainen sidonta.



- 1 TT-LAATAN REUNATARTUNTA TR39 K3000 (B KPL / LAATTA)  
 2 LATTATERÄS 40x8, L=80, S235J2G3

**Kuva 53.** *TT-laattojen pituussuuntaisen sauman sidonta.*

Laataston pituussuuntaisena sisäisenä siteenä toimii laattaelementin päässä oleva sidevoimalle mitoitettu kuvan 54 mukainen reunatartunta.

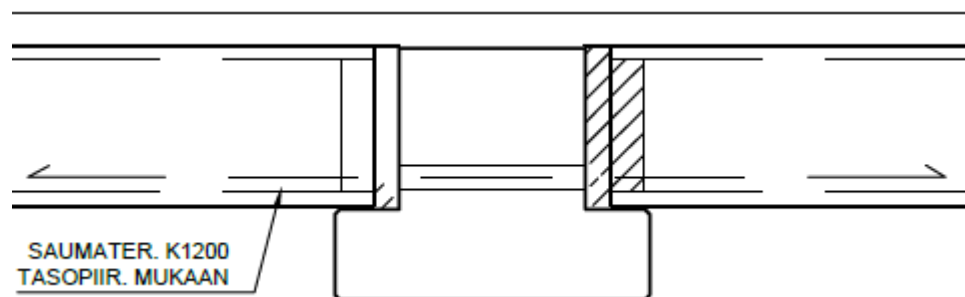


- 1 NEOPREENLAAKERI 90x150x10, KIINNITETÄÄN TEHTAALLA TT-LAATAN RIVAN POHJAAN
- 2 LATTATERÄS 50x6 L=200 ( ASENNUSOSA ), S235J2G3
- 3 KIINNITYSLEVY TR44 tai vast. ELEMENTISSÄ RIVAN KOHDALLA

**Kuva 54.** *TT-laattojen päätysaumojen sidonta.*

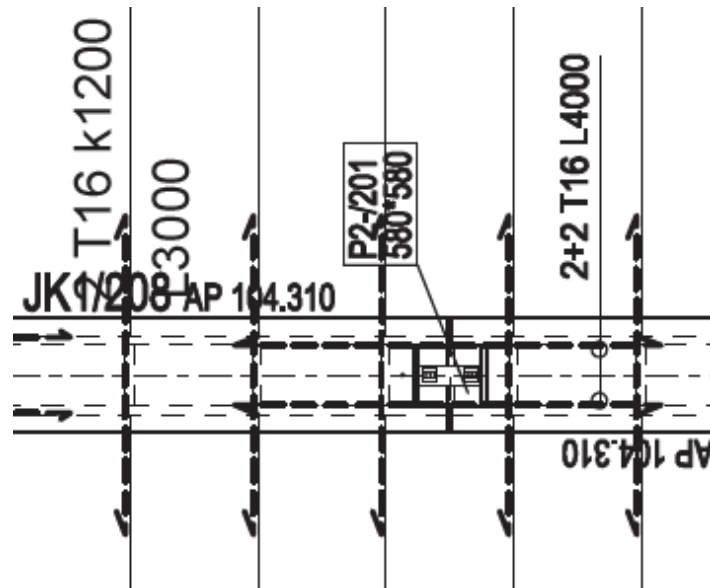
### Ontelolaataston sidejärjestelmä

Onnettomuustilanteessa laataston saumaraudoituksen tehtävänä on estää elementin putoaminen, mikäli laatan toisen pään tuki menettää kuormansiirtokykynsä. Saumaraudoituksen tehtävänä on aikaansaada rakenteesta vaurioalueen yli kantava kalvorakenne. Kuvassa 55 on esitetty rakennesuunnitelmien mukainen leikkauskuva ontelolaatan ja palkin liitoksesta.



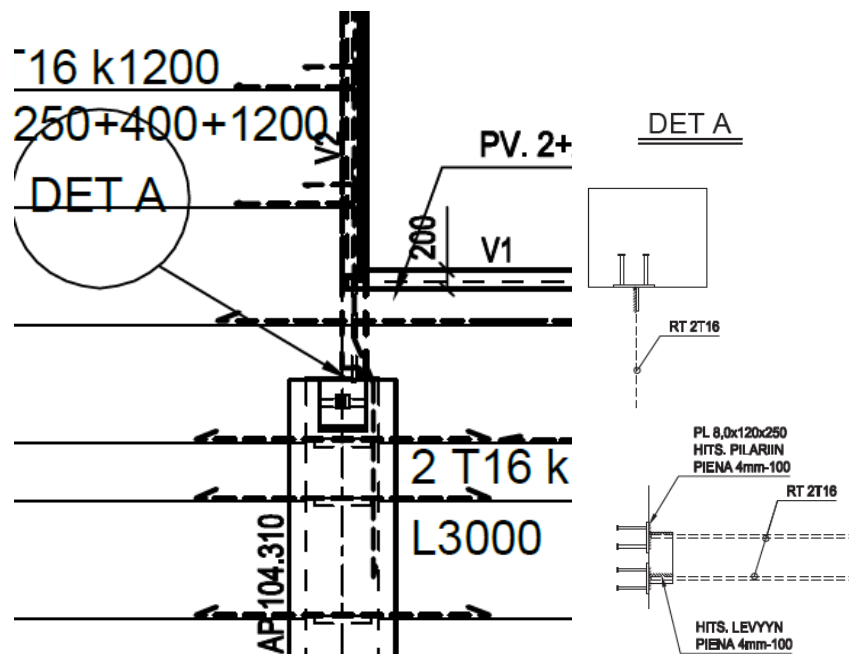
**Kuva 55.** *Ontelolaatan ja jännebetonileukapalkin välinen liitos.*

Kuvassa 56 on esitetty ontelolaattojen saumaan asennettavat saumateräksset.



**Kuva 56.** Vaakasiteet ontelolaattojen saumassa ja pilarikaistalla.

Laataston sisänurkassa pilarikaistan saumaterästen jatkuvuus on suunniteltu toteutettavan kuvan 57 mukaisella tavalla.



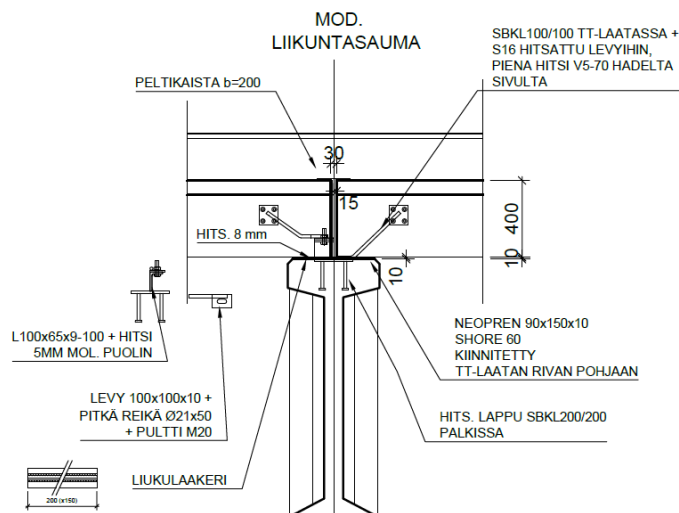
**Kuva 57.** Nurkkapilarin sidonta vaakarakenteeseen.

## RUNKOELEMENTTIEN LIITOKSET

### TT-laatan liitos HI-palkkiin

TT-laatat tulee sitoa päistään tukirakenteisiin niin, että niiden tuelta putoaminen on esitetty. Kuvassa 58 on vasemmalla esitetty suunnitelman mukainen liitostapa ja oikealla on toteutunut liitos.



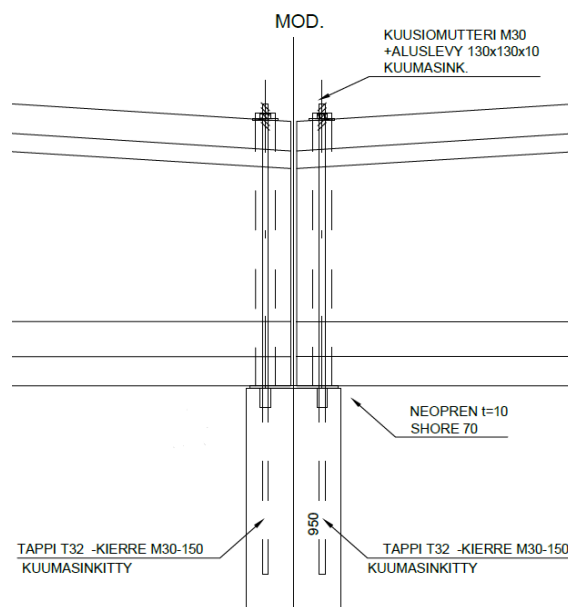


**Kuva 58.** TT-laatan sidonta HI-palkkiin sallii kiertymän, mutta tuelta putoaminen on estetty. Toisen puolen liitos TT-laatan rivan toisella puolella.

Harjalla HI-palkin yläpinnassa oli kolot TT-laattojen ripoja varten, jotta TT-laatan pituus-suuntaisiin saumoihin ei synny pykälää ja vesikattorakenteet saadaan saumattomasti yhtenäiseksi. Kolot näkyvät yllä olevassa kuvassa 58. Liitoksessa ei havaittu mitään suunnitelmista poikkeavaa, eikä rakenneosissa ollut vaurioita eikä halkeamia.

### HI-palkin liitos pilariin

Pääkannattajat tulee sitoa pilareihin niin, että tuelta putoaminen on estetty. Palkit ovat esijännitettyjä, jonka vuoksi ne toimivat yksiaukkoisina ja näin ollen rakenne ei ole jatkuva. Kuvassa 59 on esitetty suunniteltu ja toteutettu pilarin ja HI-palkin liitos.

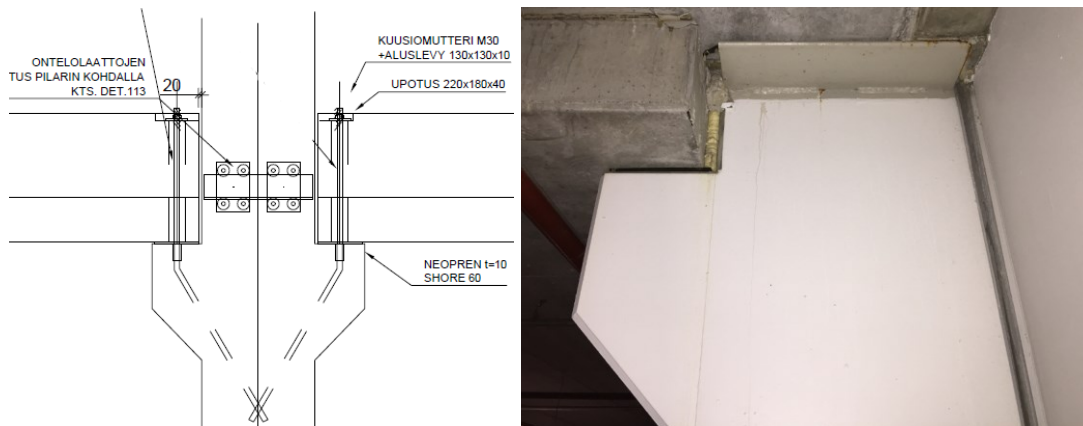


**Kuva 59.** Pääkannattajat sidottu pilareihin.

Palkin liitos pilariin oli toteutettu suunnitelman mukaisesti, eikä rakenteissa näkynyt vaurioita tai halkeamia. Pilarin tukipinnat olivat ehjät.

### Leukapalkin liitos pilariin

Leukapalkin liitoksia pilariin on kahdenlaisia. Pilariruudukossa joka toinen pilari jatkuu välipohjan läpi yläpohjaa tukemaan, jolloin leukapalkki tuetaan kuvan 60 mukaisesti pilarien kyljessä olevaan konsoliin



**Kuva 60.** Leukapalkin liitos yläpohjaan jatkuvaan pilariin. Valokuvassa liitos reunapilariin.

Välipohjaan päättyvän pilarin liitos on esitetty kuvassa 61. Pilarin yläpää on levitetty riittävän tukipinnan ja liitoksen komponenttien reunaetäisyysvaatimusten mukaisesti.



**Kuva 61.** Leukapalkin liitos välipohjaan päättyvään pilariin.

Molempien pilariliitoksien tyyppi noudattaa hyvää rakennustapaa ja paikan päällä tehdyn tarkastuksen perusteella liitos on tehty suunnitelmien mukaisesti. Liitokseen liittyvissä rakenneosissa ei havaittu merkittäviä halkeamia eikä muita vaurioita.

## VAURIOHISTORIAAN PERUSTUVAT TARKASTUKSET

HI-palkkien harja-alueen raudoituksissa on havaittu OTK:n mukaan ongelmia, kuten kohdassa 5.3.1 on kerrottu. Tarkastettavan kohteen HI-palkkien raudoituskuva ei ollut käytettävissä, mutta kuten kuva 62 osoittaa, ei paikan päällä tehdyssä tarkastuksessa havaittu halkeamia harja-alueella.



*Kuva 62. HI-palkin harja-alue on ehjä ja halkeilematon.*

### 6.3 Teräsrakenteinen myymälärakennus

Tarkastettava rakennus on vuonna 2013 valmistunut myymälärakennus, jonka kantavana runkona on teräspilarit ja -ristikot. Teräsristikoita on kahdenlaisia: pilarein tuettu primääriristikko ja niihin tukeutuvat sekundääriristikot. Yläpohjarakenteena on kertopuusta valmistetut vesikattoelementit.

#### SEURAAMUSLUOKKA

Rakennepiirustuksissa ei ole määritelty rakennuksen onnettomuustilanteen seuraamusluokkaa, mutta kohteen laajuus ja vaatimus huomioon ottaen se kuuluu luokkaan CC2b. Kohde on tavanomainen myymälärakennus, jonka sekundääriristikon jänneväli ylittää laissa määritetyn laajarunkoisen rakennuksen jännevälin.

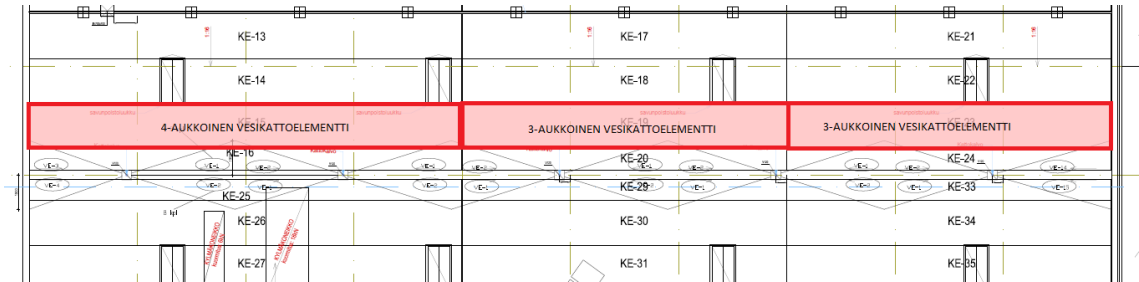
#### RAKENNEJÄRJESTELMÄ

Rakennus on yksikerroksinen pilari-ristikkorunkoinen rakennus, jonka yläpohjarakenteena on kolme- ja neliaukkoiset kertopuiset vesikattoelementit. Ristikot ovat toisesta päästä jäykästi kiinni pilarissa ja toinen pää on kiertymävapaasti kiinni joko pilarissa tai primääriristikon yläpaarteessa.

Rakennus on jäykistetty poikittaissuunnassa kaksiaukkoisen kehän avulla ja pituussuunnassa vaakakuormat on siirretty perustuksille päätykehien tuulipilarien ja vesikattotason tuuliristikon avulla. Orsirakenne muodostuu vesikattoelementtien kertonpuuripojen avulla.

## VAIHTOEHTOISET KUORMANSIIRTOREITIT

Seuraamusluokassa CC2a ensisijainen keino rakenteiden vaurionsietokyvyn parantamiseksi on huolehtia kuormille vaihtoehtoiset siirtymisreitit. Kattokannattajan vaurioituessa moniaukkoisten vesikattoelementtien toiminta muuttuu ja ne jakavat yläpohja kuormat uudelleen, kuten kohdassa 5.2.3 on kuvattu. Kuvassa 63 on näytetty suunnitelmien mukaiset vesikattoelementit, jotka ovat vähintään 3-aukkoiset.



**Kuva 63.** Vesikaton elementit ovat moniaukkoisia, jolloin kuormien uudelleen jakautuminen on mahdollista.

Jotta kattoelementit toimisivat vaakakuormia välittävinä orsirakenteina, on niiden kiinnityksen oltava riittävä. Rivan kiinnitykseen rakenteiden mukaan tarvitaan 6+6 kappaletta ruuveja, jotka on pääosin asennettu, mutta paikoin löytyi levyjä, joissa ei ollut ainuttakaan ruuvia kuten kuvasta 64.

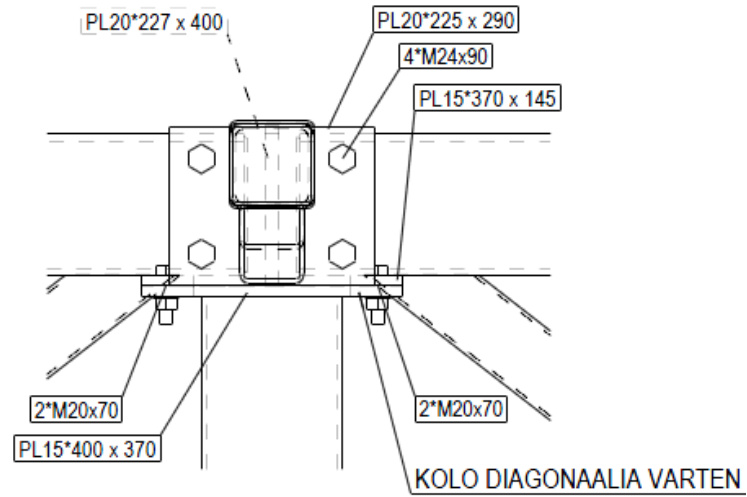


**Kuva 64.** Kattoelementtien kiinnityksessä puutteita.

## RUNKOELEMENTTIEN LIITOKSET

### Pilarin ja ristikoiden liitos

Rakennuksen keskilinjalla pilareihin tukeutuu sekä primääriristikko että sekundääriristikko. Sekundääriristikot ovat kiinnitetty kiertymän sallivalla nivel-liitoksella, kuten myös primääriristikon toinen pää. Liitos kuvattuna kuvassa 65.



**Kuva 65.** Keskialueen pilarin liitos primääri- ja sekundääriristikkoon.

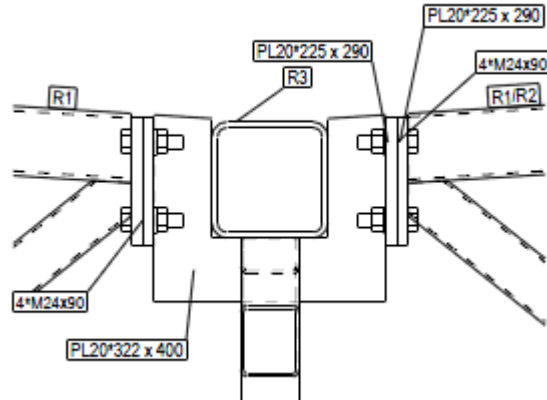
Primääriristikon toinen pää on jäykästi kiinni pilarissa niin, että ristikon alapaarre on kiinnitetty pulttiliitoksella pilarin kylkeen kuvan 66 mukaisesti.



**Kuva 66.** Primääriristikon alapaarteiden liitos pilariin.

### Sekundääriristikon liitos primääriristikoon

Sekundääriristikko on nivel-liitoksella kiinnitetty primääriristikon yläpaarteeseen. Toteutunut liitos vastaa suunnitelmaa, kuten kuvasta 67 nähdään.

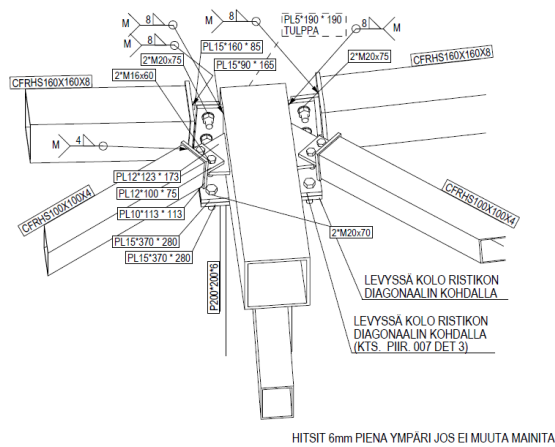


**Kuva 67.** Sekundääriristikon liitos primääriristikoon.

Liitoksessa ei havaittu vaurioita eikä halkeamia.

### Primääriristikon liitos päätykehän pilariin

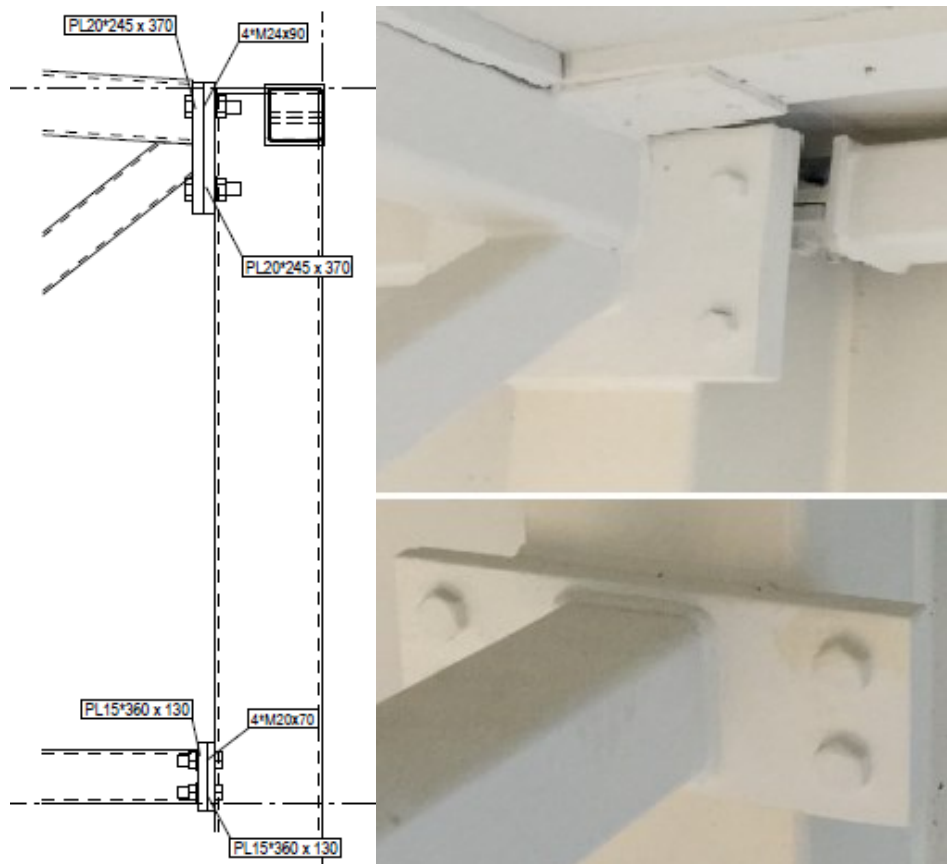
Primääriristikon ja päätykehän pilarin liitos on toteutettu kiertymän sallivalla nivel-liitoksella. Kuten kuvasta 68 nähdään, on liitos toteutettu suunnitelmien mukaisesti.



**Kuva 68.** Primääriristikko on kiinnitetty päätykehän pilariin suunnitelmien mukaisesti.

### Sekundääriristikon liitos reunapilariin

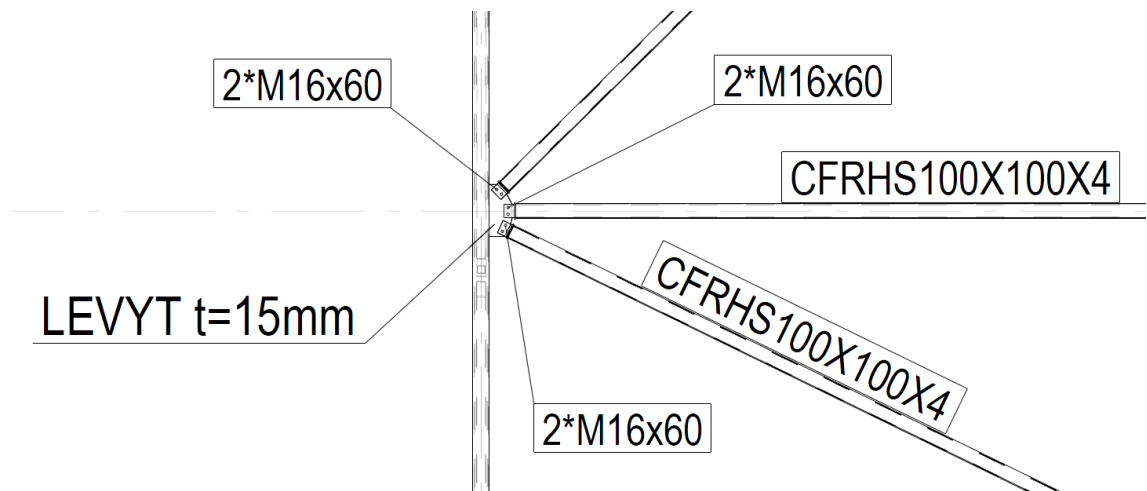
Sekundääriristikkojen liitos reunapilariin on kiertymän estävä jäykkä liitos, jolloin alaparre on kiinnitetty pilarin kylkeen pulttiliitoksella. Kuvassa 69 on esitetty suunnitelman mukaisesti toteutettu liitos.



**Kuva 69.** Sekundääriristikon liitoksessa reunapilariin ei havaittu vaurioita.

### Rungon jäykistävien rakenneosien liitokset

Rungon kokonaisjäykistykseen liittyvät rakenteet ovat ulkoseinälinjalla olevat vinosauvat ja vesikattotason suuntaiset ristikot. Kuvassa 70 on esitetty ristikon sauvojen liitos sekundääriristikoon.



**Kuva 70.** Reunimmaisen kehävälän vesikattotason suuntaisen ristikon suunnitelmien mukainen liitos sekundääriristikkiin.

Kuvassa 71 on esitetty tuuliristikon ja seinälinjan vinosauvojen toteutetut liitokset. Liitoksissa ei havaittu puutteita tai vaurioita.



**Kuva 71.** Seinälinjan ja vesikattotason vinosauvojen liitoksissa ei havaittu vaurioita.



## VAURIOHISTORIAAN PERUSTUVAT TARKASTUKSET

Teräsristikoiden hitsausaumoissa ja geometriassa on OTK:n raportin mukaan havaittu puutteita ja suunnitteluvirheitä, kuten kohdassa on esitetty 5.4. Tarkastetussa kohteessa ei havaittu merkkejä, että liitoksissa olisi tapahtunut taulukon 8 mukaisia vaurioitumismallien mukaisia muodonmuutoksia. Kuvassa 72 on esitetty tarkastetun kohteen liitosten kunto.



*Kuva 72. Hitsausliitosten kunto.*

## 7. YHTEENVETO

Rakennusta ei voida rakentaa tai suunnitella täysin riskittömäksi. Paikallisen vaurion tai sortuman uhka on aina olemassa, eikä kaikkiin mahdollisiin onnettomuusskenaarioihin pystytä täysin varautumaan. Rakennus kokee elinkaarensa aikana useita olosuhdemuutoksia niin käyttöön, kuin ympäristöönkin liittyen, joihin pyritään varautumaan suunnittelussa. Se osaltaan laskee rakenteen sortuman riskitasoa, jonka mukaisesti rakennuksen on säilytettävä tarvittava luotettavuustasonsa sekä säilyttää käyttökelpoisuutensa suunniteltuun tarkoitukseen. Niinpä rakennuksen kokonaistoiminnassa ja yksittäisessä rakennosan toiminnassa on oltava riittävästi kapasiteettia odottamattomista tilanteista selviämiseksi.

Luotettavuuden taso hallitaan muun muassa suunnittelustandardin määrittelemän seuraamusluokan avulla. Standardeissa on esitetty perusvaatimukset rakenteiden suunnittelulle ja toteutukselle siten, että rakenne kestää kaikki suunnitellut kuormat ja muut vaikutukset ja rasitukset, jotka esiintyvät rakennuksen suunnitellun käyttöikänsä ajan. Onnettomuusrajatilamitoituksen avulla rakennuksen turvallinen toiminta pyritään varmistamaan onnettomuustilanteissa, jotka aiheutuvat joko määriteltävissä olevista onnettomuuskuormista tai määrittelemättömistä syistä aiheutuviin onnettomuuskuormiin.

Rakennus on inhimillisen työn tulos, jolloin riski virheisiin on aina läsnä. Yksittäinen rakennuksen turvallisuuteen liittyvä virhe elinkaaren eri vaiheissa ei johda sortumaan, ellei se ole poikkeuksellisen vakava. Riskinhallinnalla määritellyn uhan on läpäistävä useampi niin sanottu puolustuksen taso, eli toisin sanoen virheen on toistuttava rakennuksen eri vaiheissa. Suunnittelussa tehty virhe etenee toteutumisen läpi lopputilanteeseen, jolloin uhkaan liittyvän seurauksen todennäköisyys kasvaa. Uhan pysäyttäminen on mahdollista esimerkiksi valvonnan ja tarkastusten avulla.

Laajarunkoisten rakennusten vaurionsietokyky perustuu ensisijaisesti paikallisen vaurion rajaamiseen hyväksytyyn rajaan, riippuen toki rakentamistavasta ja rakennejärjestelmästä. Etenkin esivalmistetuista rakenneosista rakennetuissa hallimaisissa rakennuksissa, se on kustannustehokkain keino saavuttaa rakenteellista turvallisuutta. Senpä vuoksi rakennuksen kokonaisstabiliteetin varmistaminen ja kuormien uudelleen jakautumisen mahdollistaminen osittaisen sortuman tapahtuessa on ensiarvoisen tärkeää. Paikallisen vaurion rajaaminen on osa määrittelemättömistä syistä johtuvan onnettomuuskuorman vaikutusten hallintaa.

Olemassa olevien laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arviointi vaurionsietokyvyn avulla osoittautui mielenkiintoiseksi, mutta erittäin laajaksi ja haastavaksi aiheeksi. Riittävän tarkalla rajauksella oli iso merkitys tarkastuksen ja toimintamal-

lin kehittämiseksi. Toimintamallin lähtökohdaksi valittiin rakennuksen onnettomuustilanteen seuraamusluokka, jonka perusteella kirjallisuudessa luokiteltuja keinoja pyritään löytämään rakennuksen suunnitelmista. Esimerkiksi sidejärjestelmien havainnointi betonirakenteissa ilman rakenteita rikkomattomia menetelmiä on käytännössä mahdotonta, joten toimintamalli on pätevä vain suunnitelmien tarkastamisessa. Paikan päällä tehtävä tarkastus on kohdennettava näkyvissä oleviin rakenteisiin.

Aiheen laajuuden vuoksi tässä diplomityössä ei tehty rakenteiden laskennallisia tarkasteluja, vaan ne on jätetty jatkotutkimustarpeeksi.

## LÄHTEET

- [1] B1/2005Y Kauppakeskuksen katon sortumisvaara Kuopiossa 18.3.2005, tutkintaselostus, Onnettomuustutkintakeskus, 2005, 21 s. Saatavilla: <http://www.turvallisuustutkinta.fi/fi/index/tutkintaselostukset/muutonnettomuudet/tutkintaselostuksetvuosittain/muutonnettomuudet2005/b12005ykauppakeskuksenkatonsortumisvaarakuopiossa18.3.2005.html>
- [2] B2/2006Y Kauppakeskuksen katon sortumisvaara Savonlinnassa 31.3.2006, tutkintaselostus, Onnettomuustutkintakeskus, 2016, 26 s. Saatavilla: <http://www.turvallisuustutkinta.fi/fi/index/tutkintaselostukset/muutonnettomuudet/tutkintaselostuksetvuosittain/muutonnettomuudet2006/b22006ykauppakeskuksenkatonsortumisvaarasavonlinnassa31.3.2006.html>
- [3] B1/2010Y Urheiluhallin katon romahtaminen Järvenpäässä 23.2.2010 ja muita rakennevaurioita keväällä 2010, tutkimusselostus, Onnettomuustutkintakeskus, 2010, 82 s. Saatavilla: [http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2010/b12010y\\_tutkintaselostus/b12010y\\_tutkintaselostus.pdf](http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2010/b12010y_tutkintaselostus/b12010y_tutkintaselostus.pdf)
- [4] Betoninormikortti 23EC, Suomen Betoniyhdistys ry, 2012, 59 s. Saatavilla: [http://www.betoniyhdistys.fi/media/normikortit/normikortti\\_23ec.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/normikortit/normikortti_23ec.pdf)
- [5] A. Biegus, K. Rykaluk, Engineering Failure Analysis vol.16/5, Collapse of Katowice Fair Building, European Structural Integrity Society, 2009, s. 1643-1654.
- [6] Department for Communities and Local Government, Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse, 2011, s. 198. Saatavilla: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/6328/2001594.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/6328/2001594.pdf)
- [7] B.R. Ellingwood, R.Smilowitz, D.O. Dusenberry, D.Duthinh, H.S. Lew, N.J. Carino, Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse on Buildings, NISTR 7396, Washington DC: NIST, 2006, 194 s.
- [8] E. Isomäki, T. Majjala, M. Sulkakoski, M. Torkkel, Patoturvallisuusopas, Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Grano Oy, 2012, s. 5-42.
- [9] Forensic Structural Engineering: Causes, investigations & prevention of failures. IABSE Working Group on Forensic Structural Engineering. Konferenssimateriaali, 20.9.2016, 77 s.

- [10] T. V. Galambos, A. E. Surovek, *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008, s. 203-235.
- [11] H. Gulvanessian, P. Formichi, J.-A. Calgaro, *Designers' Guide to Eurocode 1: Actions on Buildings, EN 1991-1-1 and -1-3 to -1-7*, Thomas Telford Ltd., Chippenham, 2009, s. 220-284.
- [12] Hartford Civic Center (Johnson), web-sivu: [https://failures.wikispaces.com/Hartford+Civic+Center+\(Johnson\)](https://failures.wikispaces.com/Hartford+Civic+Center+(Johnson)) [viitattu: 3.10.2017].
- [13] Hartford Stadium collapse: why software is just a tool and should be used wisely, *Engineers Journal*, web-sivu: <http://www.engineersjournal.ie/2016/04/19/hartford-stadium-collapse-software/> [viitattu: 3.10.2017].
- [14] How the Murrah Building Bombing Changed Federal Facilities Security, web-sivu: <https://knowledge-leader.colliers.com/kurt-stout/how-the-murrah-building-bombing-changed-federal-facilities-security/> [viitattu:16.1.2018].
- [15] Katowice, Poland - Trade Hall Roof Collapse, web-sivu: <https://failures.wikispaces.com/Katowice%2C+Poland+-+Trade+Hall+Roof+Collapse> [viitattu: 24.1.2018].
- [16] J. Keinänen, E. Niemistö, Rakenteellisen turvallisuuden parantaminen katsastusmenettelyn avulla, esiselvitys, RIL Sovittelu Oy, 2008, 49 s. Saatavilla: <http://docplayer.fi/4762750-Rakenteellisen-turvallisuuden-parantaminen-katsastusmenettelyn-avulla-esiselvitys.html>
- [17] F. Knoll, T. Vogel, *Design for Robustness*, IABSE, Zurich, 2009, 98 s.
- [18] Laki laajarunkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista. Finlex, 2015. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150300>
- [19] Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta, Finlex, 2014. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140041>
- [20] T. Leino, M. Korttesmaa, Laajarunkoisten teräs- tai puurakenteisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus ja kunnan tarkastus, projektiraportti, VTT, 2006, 70 s. Saatavilla: [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/Jul05\\_20-3-2006.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/Jul05_20-3-2006.pdf)
- [21] T. Leino, Potentiaalisten rakennevaurioiden analyysi PORA, VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, 2005, 16 s. Saatavilla: [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/PORA\\_3-10-2005.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/PORA_3-10-2005.pdf)

- [22] Maankäyttö- ja rakennuslaki, Finlex, 1999. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L17P120e>
- [23] Murrah Federal Building, web-sivu: <https://failures.wikispaces.com/Murrah+Federal+Building> [viitattu:16.1.2018].
- [24] A. Najj, Modelling the Catenary Effect in the Progressive Collapse Analysis of Concrete Structures, *Structural Concrete* 17, No. 2, 2016, s. 145-151.
- [25] P. Nykyri, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 1, Suomen Betoniyhdistys ry, Multiprint Oy, 2013, 251 s.
- [26] P. Ongelin, I. Valkonen, Rakenneputket, EN 1993-käsikirja, Rautaruukki Oyj, Otavan Kirjapaino Oy, 2012, 688 s.
- [27] J. D. Osteraas, Murrah Building Bombing Revisited: A Qualitative Assessment of Blast Damage and Collapse Patterns, *J. Perf. of Constr. Fac., ASCE*, 20(4), 2006, s. 330-335.
- [28] Practical Guide to Structural Robustness and Disproportionate Collapse in Buildings, Institution of Structural Engineers, 2010, s. 21-31.
- [29] RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Grano Oy, 2017, 201 s.
- [30] RIL 201-2-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Hansaprint Oy, 2011, 193 s.
- [31] RIL 201-4-2017 Rakenteiden vaurionsietokyvyn varmistaminen onnettomuustilanteessa, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Grano Oy, 2017, 166 s.
- [32] RIL 241-2007 Rakenteellisen turvallisuuden varmistaminen, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Valopaino Oy, 2007, 138 s.
- [33] RIL 269-2015 Rakennusten rakenteellisen turvallisuuden tarkastusohje, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2015, 94 s.
- [34] W. Rücker, F. Hille, R. Rohrman, F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures, SAMCO Final Report, 2006, 48 s. Saatavilla: [www.samco.org/network/download\\_area/ass\\_guide.pdf](http://www.samco.org/network/download_area/ass_guide.pdf)
- [35] S1/2006 Kevättalven 2006 rakennusonnettomuudet, Tutkintaselostus. Onnettomuustutkintakeskus, 2006, 74 s. Saatavilla: [http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2006/s12006y\\_tutkintaselostus/s12006y\\_tutkintaselostus.pdf](http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2006/s12006y_tutkintaselostus/s12006y_tutkintaselostus.pdf)

- [36] Structural safety, Incorporating CROSS and SCOSS, The Institution of Structural Engineers, web-sivu: <http://www.structural-safety.org/about-us/> [viitattu: 20.2.2018].
- [37] Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastusohje, Liikennevirasto, verkkojulkaisu, 2014, 49 s. Saatavilla: [https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf/lo\\_2014-30\\_taitorakenteiden\\_rakennussuunnitelmien\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf/lo_2014-30_taitorakenteiden_rakennussuunnitelmien_web.pdf)
- [38] Structural Conditions Assessments of Existing Buildings and Designated Structures Guideline, Professional Engineers Ontario, 2016, 23 s. Saatavilla: [http://www.peo.on.ca/index.php/ci\\_id/31399/la\\_id/1.htm](http://www.peo.on.ca/index.php/ci_id/31399/la_id/1.htm)
- [39] Suomen rakentamismääräyskokoelma, Eurokoodien SFS-EN 1991 Kansalliset Liitteet, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Rakenteiden kuormat, Ympäristöministeriö, 2016, 51 s.
- [40] Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS-EN 1990 + A1 + AC Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet, 2006, 184 s.
- [41] Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC Eurokoodi. Rakenteiden kuormat, Yleiset kuormat, Onnettomuuskuormat, 2014, 117 s.
- [42] Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi. Teräsrakenteiden suunnittelu, yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2005, 99 s.
- [43] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennukset ja kesämökkit [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-677X. 2015, Rakennuskanta 2015. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla: [http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke\\_2015\\_2016-05-26\\_kat\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke_2015_2016-05-26_kat_002_fi.html)
- [44] H. Säteri, M. Saarela, M. Välimäki, YM5/601/2015 Ympäristöministeriön ohje rakennustyön suorituksesta ja valvonnasta, 2015, 50 s. Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B2D950B5E-26B9-4BBC-B057-14CE-BEB5A5D7%7D/109137>
- [45] Teräsrunkorakenteiden kuntotarkastusohje, Perusteet ja tarkastuslistat, VTT, 2006, 33 s. Saatavilla: [https://www.laukaa.fi/sites/default/files/ohje\\_terasrunkorakenteidentarkastusohje.pdf](https://www.laukaa.fi/sites/default/files/ohje_terasrunkorakenteidentarkastusohje.pdf)
- [46] Y2013-01 Lapsen kuolemaan johtanut ratsastusmaneesin sortuminen Laukaassa 13.2.2013. Tutkintaselostus. Onnettomuustutkintakeskus, 2014, 48 s. Saatavilla: [http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/XR3OvQZwt/Y2013-01\\_Laukaa.pdf](http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/XR3OvQZwt/Y2013-01_Laukaa.pdf)

## **LIITTEET**

Liite A: Vaurionsietokyvyn tarkastuksen vuokaavio 1s.



