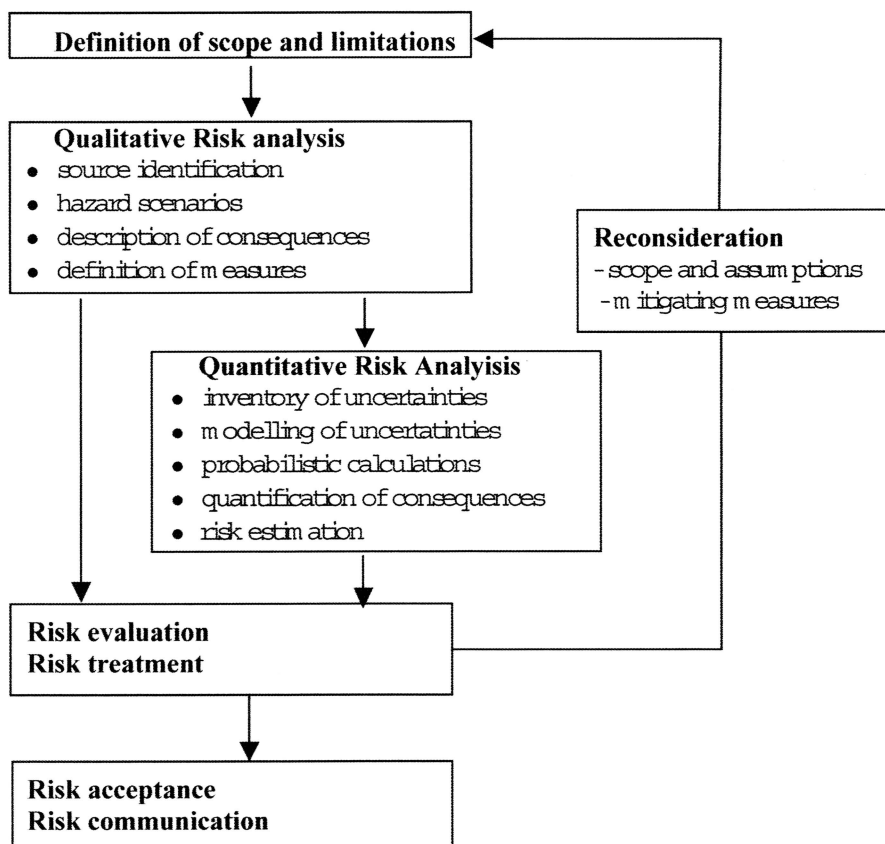


**Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus**

**HALTURVA**

**Projektiraportti**



Tapio Leino, Markku Korttesmaa, Hannu Koski

28.2.2004



## Sisällysluettelo

1. RAKENTEELLINEN TURVALLISUUS
  - 1.1 Turvallisuuden kehittäminen
    - 1.1.1 Tunnetut onnettomuuskuormitukset
    - 1.1.2 Tuntemattomat onnettomustilanteet ja -kuormat
  - 1.2 Turvallisuuden toteaminen
2. LAAJARUNKOINEN LIIKUNTAHALLI
  - 2.1 Tyypilliset rakennevaihtoehdot
  - 2.2 Hallien rakentamisprosessi ja organisaatio
3. RISKIANALYYSIN SUORITUS
  - 3.1 Riskianalyysin suoritustarve ja tavoite
  - 3.2 Kvalitatiivinen riskianalyysi
    - 3.2.1 Uhkatekijöiden tunnistaminen ja niiden lähteet, tekniset uhkaskenaariot ja seuraamukset
    - 3.2.2 Rakentamisprosessiin liittyvät uhkaskenaariot
    - 3.2.3 Seuraamusten käsittely ja kuvaukset
    - 3.2.4 Riskiä vähentävät toimet
  - 3.3 Kvantitatiivinen riskianalyysi

-----

## Lähdeteokset

1. Draft PrEN 1991-1-7:2004, Eurocode 1 - Actions on structures, Part 1-7: General Actions - Accidental actions.
2. Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset. Osa B1. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. 1998
3. SFS-ENV 1993-1-1:1992, Eurocode 3 - Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
4. Teräsrakenteet, ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B7, 1996 (sovellettavat standardit, 2005).
5. Puurakenteet, ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B10, 2001.
6. Betonirakenteet, ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B4, 2001 (uusitaan vuonna 2005).
7. SFS-ENV 199 , Eurocode 5 - Puurakenteiden suunnittelu.
8. Rautaruukin putkipalkkikäsikirja. 1997. MEF 1/98. 351 s.

9. RIL 144 - 2002. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 2002. 205 s.
10. ENV 1993: "Design of steel structures", Part 1-1: "General rules and rules for buildings", Revised Annex J: "Joints in building frames". Eurocode 3: Part 1-1. Draft.
11. James Reason. Managing the Risks of Organisational Accidents. Ashgate publishing Ltd. Aldershot. 252 s.
12. Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. ja Lappi E. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. VTT Tiedotteita 2123. Espoo 2002. 95 s. + liitt. 53 s.
13. Veli-Pekka Kallberg, Rautatieliikenteen onnettomuusriskit ja turvaamistoimenpiteet. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. RATA 2002, Hyvinkää. 25 s.
14. Riskianalyysit -web-sivu ( <http://riskianalyysit.vtt.fi/> ). Työsuojelurahasto & VTT Tuotteet ja tuotanto.
15. SFS-IEC 60300-3-9. Luotettavuusjohtaminen osa 3: Käyttöopas. Luku 9: Teknisten järjestelmien riskianalyysi.
16. SFS 2373. Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Suomen standardisointiliitto. 1980.
17. SFS-EN ISO 5817. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsit). Hitsiluokat. Suomen standardisointiliitto. 2004.
18. Mörönen, L., Möttönen, V., Pitkänen, P. ja Rantamäki, J. Riskianalyysi rakennusten virheiden analysoinnissa. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Sisäinen raportti.
19. Rakennuksen suunnittelijat ja suunnitelmat, määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa A2 (2002).

## **Liitteet:**

1. Potentiaalisten rakennevaurioiden analyysityökalu - PORA
2. Laajarunkoisten liikuntahallien laaduntarkastus - suunnittelun ja suunnitelmien tarkastus
3. Yhteenveto Suomessa tapahtuneista rakennusvaurioista ja sortumista - teräsrakenteet ja puurakenteet
4. Liikuntapaikkojen teräsrakenteiden kunnan tarkastus. Tarkastusohje.

# Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus

## HALTURVA

### 1. RAKENTEELLINEN TURVALLISUUS

#### 1.1 Turvallisuuden kehittäminen

Rakenteet suunnitellaan Suomessa joko Suomen rakentamismääräyskokoelman määräysten ja ohjeiden /2, 4-6 ja 9/ sekä niihin liittyvien sovellettavien standardien mukaisesti, tai vaihtoehtoisesti EUROCODE-ohjeiden /1, 3, 7 ja 10/ mukaisesti. Kyseisiin ohjeisiin liittyy tietyt varmuusvarat, jotka on piilotettu kuormien ja materiaaliominaisuuksien osavarmuuskertoimiin. Kaikessa normaalissa talonrakentamisessa ko. ohjeita noudattamalla päädytään suunnittelussa ja rakentamisessa riittävällä varmuudella "Rakennuksen olennaiset tekniset vaatimukset" (Maankäyttö- ja rakennusasetus, MRA 50§) täyttävään ratkaisuun. Normaaleissa rakennuskohteissa tämä "riskianalyysi" voidaan katsoa riittäväksi.

Edellä mainitusta peruslähtökohdasta johtuen rakenteiden suunnittelussa ei ole mahdollista luokitella rakenteita tai rakenneratkaisuja esim. "toiminnallisen suunnittelun" periaatteilla lähtien onnettomuuskuormien intensiteetistä tai onnettomuustapahtuman esiintymistaajuuksista, joilla on erilaiset todennäköisyydet /12-15, 18/. Rakennukset pitää yksikäsitteisesti suunnitella kestäviksi ja turvallisiksi ja osavarmuuskertoimista on käytössä vain murtorajatilaa ja käyttörajatilaa vastaavat kertoimet. Minkä tahansa rakennuksen pitää kestää kuormia (myös ylikuormia) täysin samoilla perusteilla kuin vieressä olevien muiden rakennusten.

Kun rakenteet ja niiden osat suunnitellaan, ja tuotteet valitaan täysin rakennuspaikkakohtaisesti, ja rakennuksen kaikissa kohdissa pyritään toteuttamaan ohje  $R \geq E$ , missä R on rakenteen kestävyys ja E on ko. rakenteen määräävä kuormitus, päädytään käytännössä lopputulokseen, missä rakennuksen kaikkien osien varmuus on lähes sama, ja niiden hyväksikäyttöaste =  $100 \cdot E / R$  [%] on lähes 100 %.

Jos jokaisen rakenteen ja sen osan hyväksikäyttöaste olisi 100 %, rakennuksen kaikkien kohtien kestävyys olisi suhteessa yhtä hyvä. Tällöin rakennuksen kaikilla rakenneosilla olisi yhtä suuri todennäköisyys vaurioitua ennakoimattoman onnettomuustilanteen johdosta, koska erilaisille ennakoimattomille tilanteille ei voi antaa erisuuria todennäköisyyksiä. Käytännössä hyväksikäyttöaste kuitenkin vaihtelee runsaasti riippuen siitä, mistä profiili- tai tuotevaihtoehtoista ehdon  $R \geq E$  täyttävä rakenne piti lopulta valita ja koostaa.

Lähtökohtaisesti siis mikä tahansa määräysten ja ohjeiden mukainen ratkaisu kelpaa, jos kestävyys ovat riittävät. Tosiasiallisesti, koska suunnitteluohjeet eivät koskaan ole täydellisiä, erityisesti uusissa rakenneratkaisuissa, mutta myös monissa muunlaisissa tapauksissa voidaan jopa ohjeita noudattaen ja/tai parasta olemassa olevaa tietoa hyväksikäyttäen päätyä ratkaisuun, joka ei täytä vaatimuksia tai johon sisältyy suuri vaurioriski ja kohonnut turvallisuusriski rakennuksen käyttäjille.

Toiminnallisesti parempien ratkaisujen tuottaminen ja parempi riskienhallinta voi perustua suunnittelijan omaan pätevyyteen ja ammattitaitoon sekä kokemukseen lähes vastaavista

muista kohteista. Se voi perustua myös uusiin ohjeisiin koskien rakenteiden suunnittelua ennakoimattomien onnettomuustilanteiden varalta ja tietouteen siitä minkälaisissa tilanteissa tai kohdissa syntyy helposti suunnitteluvirheitä.

Suunnitteluohjeita, ja niiden avulla tuotettuja ratkaisuja ja vaihtoehtoja voi ja pitääkin arvioida kriittisesti tapauksissa, joissa esimerkiksi kuormat saattavat ylittää mitoitusarvonsa, tai rakenteisiin voi kohdistua ennakoimattomia tai onnettomuuskuormia, tai kun rakennuksen käyttötapa tai -tarkoitus muuttuu, tai rakenteiden tai materiaalien ominaisuudet on valittu väärin tai materiaalien ominaisuudet muuttuvat ajan suhteen enemmän kuin on arvioitu. Kaikissa näissä huonosti ennakoitavissa tapauksissa rakenteiden kestävyys ja/tai turvallisuus voi olla vaadittua pienempi, vaikka rakenteet olisi suunniteltu määräysten ja ohjeiden mukaisesti ja jopa käyttäen parasta mahdollista tietoutta, mikäli uhkia ei ole otettu riittävästi huomioon ja vaarojen seurauksia ei ole harkittu riittävän perusteellisesti.

Kokemuksen hyödyntäminen on yleensä katsottu olevan riittävä edellytys ongelmien välttämiseksi, ja tätä painottaa myös nykyinen Maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL). Monien rakentamiseen liittyvien töiden suorittajat valitaan kuitenkin halvimman hinnan perusteella, jolloin kokemuksen tuomaa turvaverkkoa ei ehkä ole. Vauriotapausten ja sortumien ja niiden selvitysten perusteella tarvitaan ohjeita, joiden avulla viranomainen ja/tai rakennushankkeeseen ryhtynyt taho itse, tai esimerkiksi hänen palkkaamansa rakennuttajakonsultti voi varmistua valmiin rakennuksen vaatimuksenmukaisuudesta.

Tässä raportissa on käsitelty erityisesti teräs- ja puurakenteiden suunnittelua sellaisissa tilanteissa, missä rakenteen kestävydestä ja turvallisuudesta joudutaan varmistumaan joillakin erityistoimilla, joita normaalisuunnittelussa ei ehkä yleensä sovellettaisi. Laajarunkoisten liikuntahallien osalta on juuri kyse sellaisesta suunnittelukohteesta, koska draft-ohjeen PrEN 1991-1-7:2004, Eurocode 1 - Actions on structures, Part 1-7: General Actions - Accidental actions /1/ perusteella kyseiset rakennuskohteet on luokiteltava kaikkein vaativimpaan seuraamusluokkaan (vauriosta ja sortumasta aiheutuvat mahdolliset seuraamukset ihmisille ja/tai rakennuksille ja tavaroille ovat mittavat).

Tilanteita, joiden takia edellä mainittuja erityistoimia pitää soveltaa, ovat:

- tilanteet, missä onnettomuuskuormitus on kohtuudella tunnistettu tai arvioitavissa, kuten räjähdys (rakennuksen sisäpuolinen), törmäys, tulipalokuormitus tai seisminen kuormitus silloin kun rakenteelta jostakin toiminnallisesta syystä johtuen vaaditaan, ettei se saa sortua (kuormituksen huippuarvoilla sortumista ei voitane estää),
- tilanteet, missä rakenteet ovat vaativia ja vaurion seuraukset mahdollisesti suuria, ja missä onnettomuuskuormaa ei tiedetä, tai sitä ei ole voitu ennakoida, tai mitkä tahansa muut mahdolliset ennakoimattomat tilanteet.

### **1.1.1 Tunnetut onnettomuuskuormitukset**

Menettelytavat /12-15/, joita suositellaan käytettäväksi tapauksissa, missä onnettomuuskuormitukset on tunnistettavissa, ovat seuraavanlaisia /1/:

- a) estetään tai pienennetään onnettomuuskuormitusta tai sen vaikutuksia,

- b) suunnitellaan rakenne kestäväksi arvioitavissa oleva pienehkö onnettomuuskuormitus, joka tapahtuu tunnetusti suurimmassa osassa tapauksia, tai
- c) suunnitellaan rakenne edellistä suuremmalle onnettomuuskuormalle siten, että se vaurioituu, mutta ei sorru.

Näistä vaihtoehtoista ensimmäiseen liittyy runsaasti epävarmuutta, koska onnettomuuskuorman vaikutusten estäminen tai kuorman pienentäminen voi olla vaikeasti toteutettavissa siten, että se kattaisi kaikki kuorman esiintymistavat rakennuksen koko käyttöiän. Kuormitukseen voi vaikuttaa useita parametrejä, tai jokin parametreista voi olla sellainen, että sen pienikin muutos aiheuttaa ison muutoksen kuormituksessa. Esimerkiksi räjähdyspaine on verrannollinen etäisyyden kolmanteen potenssiin, jolloin mahdollisten räjähdyspaikkojen ja -suuntien tai etäisyyksien arviointi on oleellisen tärkeä vaihe onnettomuusskenaarioiden osalta. Mahdollisen räjähdyskuormituksen pienentämiseen ei liene keinoja, ellei esimerkiksi voida riskin havaitsemisen jälkeen vaihtaa prosessissa käytettyjä kemiallisia aineita tms.

Jos tarkastellaan törmäyskuormitusta, sen absoluuttinen suuruus, jos törmäyksessä on mukana ihmisiä, ei ole ehkä yhtä merkittävä tekijä kuin törmäysaika, esimerkiksi liikenteessä auton törmätessä esteeseen. Törmäysaika vaikuttaa oleellisesti kiihtyvyyksiin, jotka vaikuttavat ihmisiin, ja rakenteellisilla seikoilla voidaan vaikuttaa törmäysaikaa pidentävästi ilman, että esteen (tai kaiteen tms.) kestävyys merkittävästi heikkenee. Esimerkiksi Ruotsissa on jo pitkään hallittu tapaturmariskejä rakentamalla teihin kaiteet kallioleikkausten kohtiin, koska törmäys kaiteeseen tapahtuu yleensä pehmeämmin kuin törmäys kallioon. Ihmisen elimistö sietää paremmin törmäyksen vaikutuksia jos siitä aiheutuvat kiihtyvyydet ovat pieniä.

Kohdassa b) ollaan rakennesuunnittelun osalta normaalitilanteessa, missä rakenne pitää suunnitella ohjeiden mukaisesti kestäväksi tunnetut kuormitukset ja niiden yhdistelmät. Rakentamismääräysten osan B1 /2 tai 9/ perusteella rakennesuunnittelija on velvollinen selvittämään kuhunkin rakenteen osaan vaikuttava määräävä kuormitusyhdistelmä, ja siinä on otettava huomioon myös kohtuudella ennakoitavissa olevat ylikuormat ja onnettomuuskuormitukset.

Jos tällainen ennakoitavissa oleva kuormitus on niin suuri, että normaalein rakentamistavoin päädyttäisiin todella kalliisiin rakenneratkaisuihin kuitenkin ilman varmuutta kestävydestä, on joissakin tapauksissa mahdollista kuorman vaikutusten vaimentamiseen. Pienet ylikuormitukset ovat onnettomuuskuormia, joiden varalta suunnittelijan tulee huolehtia siitä, että rakenne käyttäytyy sitkeästi mutta ei sorru.

Suurempi ongelma esiintyy esimerkiksi maanjäristyksen tai räjähdysten voimakkuuden ennustamisessa. Jos kuorman suuruuden ennustaminen on liian hankalaa tai epävarmaa, lienee paras strategia pienentää rakenteen vastetta joillakin rakenteellisen passiivisen tai aktiivisen vaimennuksen keinoilla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pyritään vaikuttamaan rakenteen ominaisvärähdysaikaan siten, että siitä oleellisesti riippuva rakenteen dynaaminen kerroin jää mahdollisimman pieneksi. Parhaimmillaan se on jopa alle yhden.

Tunnettujen onnettomuuskuormien (tulipalo, seisminen kuorma, räjähdys yms.) suhteen on hyödynnettävissä matemaattiset todennäköisyydet, jotka perustuvat siihen, että huippukuormituksia esiintyy vain hyvin harvoin. Toisaalta huippuarvojen alapuolellakin ollaan helposti tilanteessa, että rakenne ei kestä kuormaa vaurioitumatta, jolloin laskenta voidaan tehdä kuormitusten tilastollisten suuruuksien mukaan siten, että pyritään kontrolloimaan rakenteen

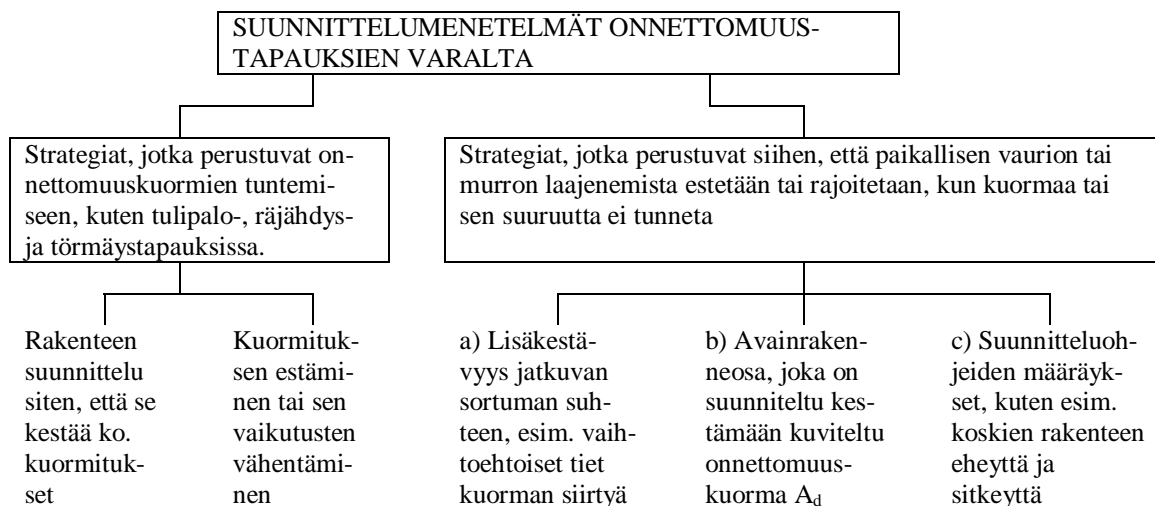
toimintaa ja vaurion suuruutta suhteessa kuormien suuruuteen. Riskianalyysin suorittaminen tunnettujen onnettomuuskuormitusten suhteen voidaan tehdä standardin SFS-IEC 60300-3-9 /15/ mukaisesti (kts. esimerkkejä /12-14 ja 18/).

### 1.1.2 Tuntemattomat onnettomuustilanteet ja -kuormat

Vaikeasti ennakoitavat tuntemattomat kuormitus- ja vauriotilanteet ovat yleensä yksittäisiä tapahtumia, joille ei voi löytää mitään jakautumaa tai hajontaa sen takia, että niiden osalta ei ole käytettävissä mitään tilastotietoa. Jos aiempi onnettomuustapahtuma on voitu analysoida ja jos sen seurauksiin on voitu löytää jokin syy mihin on mahdollista vaikuttaa, se yleensä johtaa suosituksiin ja suunnitteluohjeiden muutoksiin, jolloin jatkossa onnettomuudet vähenevät, mutta ovat toisaalta jatkossakin yhtä ennakoimattomia, koska olevaa rakennuskantaa ei yleensä aleta korjata.

Käytännössä kaikki kantavat rakenneosat mitoitetaan samoilla periaatteilla yhtä kestäviksi, jolloin ylikuorman tai useiden eri tekijöiden samanaikaista vaikuttamista ja rakennusvauriota tai sortumista ei voi ennakoida kohdekohtaisesti tilastollisilla menetelmillä. Siksi yli- ja onnettomuuskuormiin tulee suunnitteluohjeiden mukaan varautua rakenteen ominaisuuksilla.

Menettelytavat, joita suositellaan EUROCODE:ssa /1/ sovellettavaksi niissä tapauksissa, milloin kuormitusta tai sen suuruutta ei tunneta, tai jos tapahtuma on muutoin mahdoton ennakoita (esimerkiksi ulkopuoliset törmäykset ja räjähdykset, suunnittelu- ja rakennusvirheet, materiaalin tuhoutuminen, liian lyhyt käyttöikä, tms.) ovat sellaisia, joiden avulla joko rajoitetaan vaurion laajenemista, kohdistetaan tapahtuma johonkin tiettyyn vaihdettavaan rakennosaan, tai estetään jatkuva sortuminen. Menettelytapa/tavat voidaan valita seuraavista:



**Kuva 1.** – Suunnittelustrategiat, joita käytetään onnettomuustilanteissa.

a) lisätään rakenteen "staattista epämääräisyyttä", jolloin kuormituksilla on yleensä useita eri teitä siirtä rakenteessa perustuksille. Tällöin yhden siirtotien vaurioituminen aiheuttaa kuormituksien siirtymisen muualle (käytännössä, jos voimat pysyvät entisenlaisina, rakenteen jäykkyys tällöin myös hieman pienenee ja siirtymät kasvavat). Paikallisesta vaurioitumisesta ei tällöin aiheudu laajempia seuraamuksia,



- b) suunnitellaan ns. avainelementtejä, joilla on kapasiteettia kestävä kuvitelu onnettomuuskuormitus, jolloin onnettomuustilanteessa rakenteessa on käytettävissä ylimääräistä kestävyyttä, jonka avulla voidaan vaurion laajeneminen estää tai sen seurauksia rajoittaa,
- c) sovelletaan suunnitteluohjeiden määrittelemiä keinoja, joiden avulla parannetaan rakenteen eheyttä tai sitkeyttä. Tällaisia menettelytapoja on esitetty mm. ohjeissa EUROCODE 3 /3/ ja myös betonirakenteiden osalta Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeessa B4, kohdissa 2.6.1.2.2 ja 2.6.1.2.3 /6/.

Kohta a) on teräsrakentamisessa tyypillinen tekninen keino. Puu- ja betonirakenteilla staattisen epämääräisyyden aste on yleensä melko alhainen, eikä sen kohottaminen onnistu ilman merkittäviä kustannuksia. Mustasaaren kunnassa tapahtuneen monitoimihallin teräsrakenteen vaurio (kattosortuma) oli valitettava tapaus, mutta samalla erinomainen esimerkki tämän keinon tehosta. Siinä muutaman merkittävän voimaliitoksen hitsien vauriot aiheutti kahden kattoristikon ja katon ohutlevyjen ja katemateriaalien irtoamisen ja sortumisen. Muu hallirakenne pysyi kuitenkin pystyssä, ja pystyi kantamaan jäljelle jääneet kuormat ilman että koko rakennuksella oli vaaraa sortua.

Toisaalta, puurakenteissa pyritään materiaalisuhteesta alhaiseen staattisen epämääräisyyden asteeseen /5, 7/, mikä käytännössä merkitsee sitä että niille kohdat b) ja c) ovat tärkeimmät tekniset tavat lisätä rakenteen kestävyyttä ennakoimattomille tapahtumille.

Kohta b) on seismisessä suunnittelussa hyödynnetty tyypillinen keino, jonka mukaisia rakenteiden passiivisia vaimennusratkaisuja on kehitetty runsaasti vuonna 1994 tapahtuneen mittavan Northridgen maanjäristyksen (1994 Northridge earthquake, 4:31 AM, 17 Jan 1994) jälkeen. Kyseisessä tapauksessa rakenteiden käyttäytyminen seismisen kuorman yhteydessä oli keho, sortumia tapahtui runsaasti, ja syynä niihin oli, että aiemmin runsaasti käytetyt ns. "momenttijäykät" palkki-pilari-runkorakenteet käyttäytyivät vaihtelevasti, ja vauriot muodostuivat mm. liitosten hitseihin, joilla ei käytännössä ollut kapasiteettia muodostaa plastisia niveliä. Materiaalien sitkeys ei yksinään riittänyt rakenteen sitkeään toimintaan.

Northridgen onnettomuuden jälkeen tehtiin se merkittävä johtopäätös, että hitsien lisäaineen sitkeys ei yksinään riitä, kun pyritään maanjäristyksessä dissipatiivisesti käyttäytyviin (muodonmuutostenergiaa absorboiviin) sitkeisiin rakenneliitoksiin. Liitoksen käyttäytyminen riippuu pääasiassa sen muotoilusta, ja vain vähäisessä määrin hitsien sitkeydestä, jos liitoksen hitsausliitokset on mitoitettu ja tehty oikein /16, 17/, ja hitseihin ei kohdistu muita kuin suunnitellut rasitukset.

Kohtaa b) soveltamalla olisi mm. voitu välttää Kuopion Rauhalahden kylpylän alakaton sortuminen ja ihmisten loukkaantuminen, mikäli kahteen suuntaan tasavälein kattoon teräslangoilla ripustetun yhtenäisen alakaton kiinnityslangat olisi valittu esimerkiksi siten, että joka toinen lanka olisi ollut paksumpi, ns. "avainelementti". Yhden normaalin langan korrosio ja yllättävä katkeaminen olisi aiheuttanut sen, että katto olisi joltakin osaltaan pudonnut viereisen vahvemman langan varaan, joka tilanne todennäköisesti olisi havaittu ajoissa.

Kohdassa c) mainitut ohjeet EUROCODE:ssa ovat ns. yleisiä periaatteita, joiden soveltamista ei ole ohjeistettu samalle tasolle kuin muut rakenteiden mitoittamiseen liittyvät kohdat. Ongelmia syntyy, mikäli vaativaan (A- tai AA-kohde) rakennushankkeeseen ryhtyvä taho ei tie-

dosta riskejä. Siksi suunnittelijoiden, viranomaisten ja rakennuttajien yhteistyön kehittäminen olisi ensiarvoisen tärkeää.

Käytännössä ainoa tapa identifioida rakenteiden vaurioherkkiä tai sortumisriskialttiita kohtia rakennuskohdekohtaisesti on selvittää rakenteiden hyväksikäyttöasteet ja tarkastaa mahdollisten suunnitteluvirheille alttiiden kohtien laskelmat. Mikäli suunnitteluvirheitä ei ole, rakenteiden hyväksikäyttöasteiden tarkistus on selvä indikaatio heikoimmista kohdista, jotka ylikuormatilanteissa saattavat sortua ensimmäisenä aiheuttaen siihen liittyviä seuraamuksia. Vaikka vaurio tapahtuisikin ensin muualla rakenteessa, hyväksikäyttöasteeltaan lähellä 100 % olevat rakenteet tai liitokset eivät kykene ottamaan enempää kuormaa. Tällöin ne saattavat edistää rakenteen jatkuvaa sortumaa.

## 1.2 Turvallisuuden toteaminen

Rakennusten turvallisuuden sekä suunnittelun ja valmistettujen rakenteiden vaatimuksenmukaisuuden toteaminen tapahtuu Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL) sekä siihen liittyvän asetuksen (MRA) mukaisesti siten, että:

- a) pääsuunnittelija vastaa siitä, että eri alojen suunnitelmat yhdessä muodostavat laadukkaan ja toimivan kokonaisuuden (MRL 120 §), ja
- b) päärakennesuunnittelija vastaa siitä, että kyseisen erityisalan (rakennesuunnittelu) suunnitelmat yhdessä muodostavat toimivan kokonaisuuden, ja
- c) rakennesuunnittelijat vastaavat kukin omalta osaltaan siitä, että rakentamista koskeva suunnitelma on laadittu siten, että se täyttää lain ja sen nojalla annettujen määräysten, ohjeiden, ja sovellettavien standardien sekä hyvän rakentamistavan vaatimukset.

Edelläoleva jako merkitsee sitä, että suunnittelijat ottavat suunnittelussa huomioon eri rakennustuotteista annetut koetuloksiin perustuvat ohjeet ja käyttösuositukset, sekä parhaan tiedon kussakin kohteessa käytettävien rakennustuotteiden soveltuvuudesta kyseiseen kohteeseen. Eo. rakennelman kriittisimmät kohdat sisältyvät termiin "toimiva kokonaisuus", sekä siihen kuinka pääsuunnittelija, tai rakenteiden suunnittelun erityisalalla toimiva päärakennesuunnittelija vastaa ja koordinoi sitä, että valmistuvat suunnitelmat muodostavat toimivan kokonaisuuden, mikäli hankkeeseen ryhtyvä taho ei palkkaa ketään hoitamaan ko. tehtäviä.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee kuitenkin huolehtia siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan rakentamista koskevien säännösten ja määräysten sekä myönnetyn luvan mukaisesti (MRL 119 §). Hänellä tulee olla hankkeen vaativuus huomioon ottaen riittävät edellytykset sen toteuttamiseen. Tältä osin valvontaa suorittaa rakennustarkastusviranomaisen joko aloituskokouksessa tai muulla tavoin. Viranomaisen voi tällöin vaatia selvityksen siitä, että edellä mainitut koordinoititehtävät on annettu ja että niihin on varattu oma budjettinsa.

Rakennustarkastaja ei normaalisti tarkasta rakennesuunnitelmia, vaikka ne esimerkiksi rakennusluvan perusteella pitäisi toimittaa viranomaiselle. Kunnan rakennusvalvontaviranomaisen tehtävänä on yleisen edun kannalta valvoa rakennustoimintaa sekä osaltaan huolehtia siitä, että rakentamisessa noudatetaan, mitä laissa tai sen nojalla säädetään tai määrätään (MRL 124 §).

Vaativilla suunnitelmat ja laskelmat varmistetaan periaatteessa siitä, että ne on tehty määräysten ja ohjeiden mukaisesti. Pieni ongelma voi käytännössä muodostua siitä, että "toimitettavien suunnitelmien" luettelot on yleensä listattu suunnitteluohjeisiin, jotka eivät ole velvoittavia, ja siksi esimerkiksi rakennelaskelmat ovat tyypillisesti kovin puutteellisia.

Suunnitelmien ja rakentamisen laatu ja vaatimuksenmukaisuus kuuluu siis hankkeeseen ryhtyvän tahon itsensä huolehtimisvelvollisuuden piiriin. Rakennusvalvontaviranomainen voi sallia, että rakennussuunnitelman tai selvityksen laatija taikka muu rakennushankkeeseen ryhtyvän palveluksessa oleva riittävän ammattitaitoinen henkilö tarkastaa rakennustyön suunnitelmanmukaisuuden (asiantuntijatarkastus, MRL 151 §). Suoritettu tarkastus on varmennettava asiakirjoihin tehtävällä merkinnällä.

Lupahakemusta käsiteltäessä tai rakennustyön aikana rakennusvalvontaviranomainen voi, jos se on tarpeen rakennushankkeen arvioimiseksi, vaatia hakijan esittämään asiantuntijalausannon siitä, täyttääkö suunniteltu ratkaisu tai rakentaminen sille tämän lain nojalla asetetut vaatimukset (ulkopuolinen tarkastus, MRL 151 §). Rakennushankkeeseen ryhtyvä vastaa tästä aiheutuvista kustannuksista.

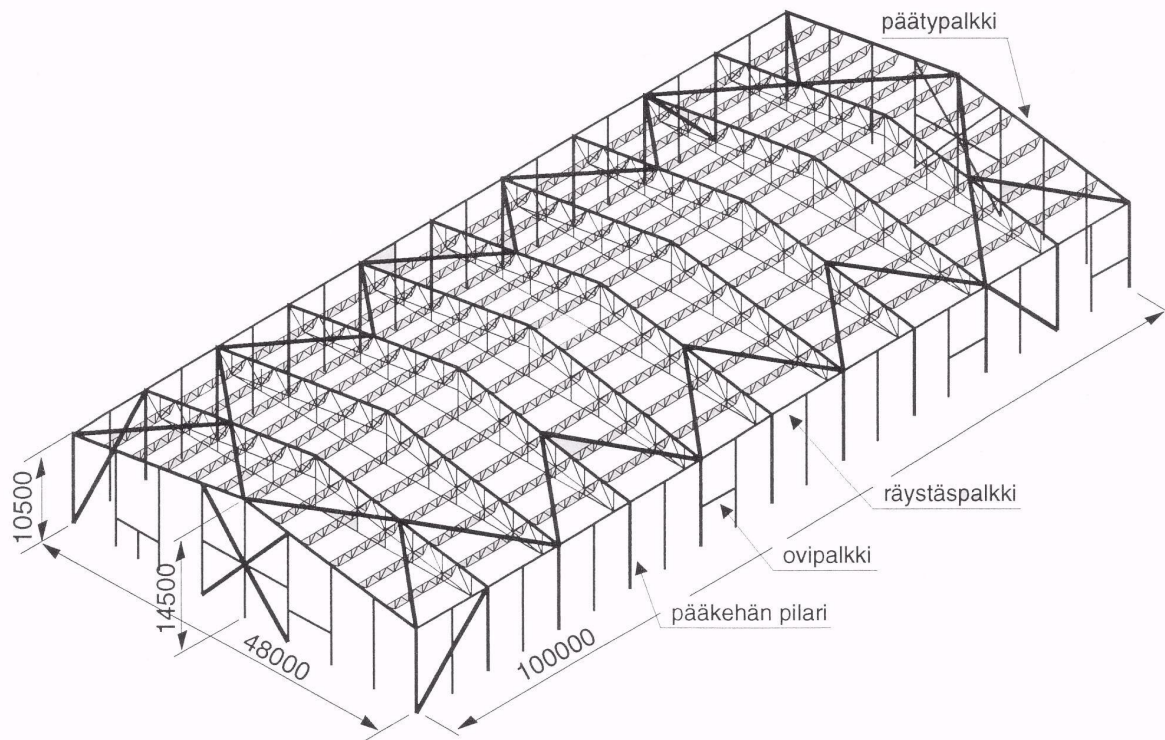
Vaativien rakenteiden osalta rakenteiden turvallisuus ja rakennuksen olennaiset tekniset vaatimukset (MRA 50 §) ovat vaatimuksia, joiden osalta rakennusten toimivuudesta pitää osoittaa enemmän kuin vain sen rakennettavuus. Rakennettavuus käy yleensä ilmi piirustuksista, mutta rakenteiden kestävyyttä ei voi todeta piirustuksista. Onnettomuus- tai ylikuormilla sallitaan, että jokin rakenteen osa saaavuttaa myötörajan tai kapasiteettinsa. Tällöin vaatimuksena voi olla esimerkiksi se, että rakennuksen tulee voida jakaa kuormat uudelleen, tai että rakenne voi kestää sortumatta tietyn ajan tms.

Tutkimuksen tavoitteena on identifioida onnettomuustilanteet, ja niihin liittyvät erityisvaatimukset sekä määrittellä ja kehittää testausmenetelmiä ja tapoja joilla voidaan todeta, onko rakenteella kyky plastisoitua kontrolloidusti siten, että kuormituksen pysyessä tai kasvaessa ko. rakenteen osa kykenee kantamaan kuormasta tietyn osan tietyn aikaa. Tällöin esimerkiksi ihmiset ehditään evakuoida sortuman alta pois.

## **2. LAAJARUNKOINEN LIIKUNTAHALLI**

### **2.1 Tyypilliset rakennevaihtoehdot**

Liikuntahallien rakenneratkaisut sanelee liikuntatilalta vaadittu muoto, joka riippuu tilan pääasiallisesta käyttötarkoituksesta (jääkiekko, jalkapallo, sähly, tennis, tms.). Kaikissa tapauksissa hallin rakenne perustuu lyhyemmän sivun suuntaisiin (seinäpilarit + kattoristikot) kattokannattajiin, joiden pituus kuvassa 2 /8/ on 48 metriä, ja joihinkin hallin pitkittäisiin rakenteisiin (kuvassa ns. orsiristikoita). Poikittaiset pääkannattajat sidotaan ja tuetaan niillä toisiinsa, ja pystysuorat kattokuormat (omapaino ja lumi) siirretään niiden kautta pääkannattajille.



**Kuva 2.** Tyypillinen laajarunkoinen liikuntahalli /5/.

Tuulikuorma vaikuttaa seiniin ja kattoon. Seiniltä tuulikuorma kertyy seinäorsien ja kuorien kautta pääkannattajien pilareille, ja pilareita pitkin rakennuksen perustuksille. Päätyihin vaikuttava tuulikuormitus siirtyy päätypilarien perustuksille ja osittain myös pilarien yläpäiden kautta kattotasoon ja sieltä seinälinjoilla sijaitseville diagonaalijäykisteille, ja sitä kautta perustuksille (kts. kuva 1). Kattotasossa tarvitaan siis päätyjä lähellä olevissa kehäväleissä vaakaristikot, joilla tukireaktiot päätypilarien yläpäistä siirretään hallin pitkille sivuille ja siellä oleville jäykistysristikoille.

Kuvassa 2 näkyviä hallin katossa olevia pituussuuntaisia jäykistysristikoita ei liikuntahalleissa yleensä käytetä, paitsi jos rakennuksen kuoria käytetään jäykistävinä rakenneosina. Tällöin niitä saatetaan tarvita kuormitusten jakamiseksi tasaisesti koko katon alueelle.

Normaalitapauksissa mitoituskuormat ovat siis:

- omapaino, ja lisävaakavoimat, jotka aiheutuvat rakennuksen omasta painosta, ja erilaisista alkusiirtymistä, vinouksista ja epäkeskeisyyksistä,
- lumikuorma, mistä eri rakenneosien määrävien kuormitusyhdistelmien löytämiseksi tarvitsee muokata useita toisensa pois sulkevia tapauksia. Osa lumesta on luokiteltu liikkuvaksi, ja se voi kinostua joko lappeittain tai joissakin tapauksissa esimerkiksi kehäväleittäin. Tutkittavien tapausten lukumäärä riippuu oleellisesti katon muodosta ja kaltevuudesta, ja mahdollisista katon lisärakenteista,

- tuulikuorma. Tuuli voi vaikuttaa eri suunnista, ja se aiheuttaa siis joko painetta tai imua. Normaaleissa suunnittelutapauksissa suunnittelijan on käsiteltävä tuulikuormasta useita eri skenaarioita, jotka ovat siis kuormitusyhdistelmissä toisensa pois sulkevia vaihtoehtoisia kuormitustapauksia. Niitä yhdistellään rakennuksen oman painon ja lumen vaihtoehtoisten kuormitustapausten kanssa määrävän rasituksen löytämiseksi kullekin erilliselle rakenneosalle ja liitokselle.

Tuulikuorman osalta suunnittelijan on tarkastettava myös tuulen dynaamiset vaikutukset eli käyttörajatila. Tunnetaan tapauksia, missä liikuntahallin katto on alkanut värähdellä voimakkaan tuulen vaikutuksesta, kun katon värähtelyn ominaistaajuus on osunut tuulen puuskien taajuuden kanssa samalle alueelle (vrt. savupiippujen tuulikuormat).

Kuormitustapausten määrittely ja niiden yhdistely tapahtuu Suomessa RakMK:n määräysten B1 /2/, tai RIL:n laatiman ohjeen RIL 144 /9/ mukaisesti. Suunnittelijan tulee kuitenkin käytännössä ottaa aina huomioon useampia toisensa pois sulkevia tuuli- tai lumikuormia. Vaihtoehtoisesti on mahdollisuus käyttää kuormien määrittämiseen ja rakenteiden mitoittamiseen EUROCODE:a yhdessä kansallisten soveltamisasiakirjojen (National Annex) kanssa.

Kuormien käsittelyyn tai rakenteiden suunnitteluun ja mitoittamiseen ei ole normaalisti kuulunut ennakoimattomien onnettomuuksien tai muiden tilanteiden käsittelyä perustuen mihinkään suunnitteluohjeisiin. Esimerkiksi rakenteiden jatkuvaa sortumaa koskevat ohjeet ovat Suomessa hyvin uusia ja asia on toistaiseksi mainittu vain betonirakenteiden suunnitteluohjeissa B4 /6/. Suunnitteluohjeet ovat materiaalikohtaisia, mutta ohje välttää jatkuvan sortuman vaaraa, ja keinot sen välttämiseksi ovat yleisemmällä tasolla. Kyseinen osaaminen on ollut suunnittelijoiden erityisosaamisen ja kokemuksen varassa, ja siis yksi rakennesuunnittelijoiden keskinäinen kilpailukeino.

Erikoiskuormituksia ja tilanteita, joissa liikuntahallien rakenteiden kestävyys joudutaan selvittämään erikseen, ovat tulipalo ja mahdollisesti ajoneuvojen törmäykset kulkuaukon pieliin, jos hallissa on isoja ovia, esimerkiksi jääkonetta varten. Lisäksi saatetaan joutua ottamaan huomioon isoja paikallisia ripustuskuormia. Kevytrakenteisten seinien takia on mahdolliset ulkopuolelta uhkaavat törmäykset helpointa ottaa huomioon esimerkiksi pysäköintipaikan kulkusuuntien tms. suunnittelussa.

Liikuntapaikkojen rakenteiden toimiessa pääasiassa tilojen ja laitteiden kattona, ja niitä sekä tilojen käyttäjiä ulkopuolisilta olosuhteilta suojaavina rakenteina, niille ei anneta mitään normaalia poikkeavia käyttörajatilavaatimuksia. Niiltä vaaditaan samat Maankäyttö- ja rakennusasetuksen pykälässä 50 luettelemat olennaiset tekniset vaatimukset kuin muiltakin rakennusluvan alaisilta rakennuksilta.

Kuvan 2 mukaisten liikuntahallien rakentamisessa on runsaasti erilaisia variaatioita riippuen sekä valitusta runkomateriaalista että monista muista seikoista ja arkkitehtuurista. Yleisimmät rakennevariaatiot on lueteltu ao. taulukossa 1. Hallin ulkopinnat on yleensä tehty joko ohutlevyprofiileista, sandwich-elementeistä, kaseteista tai muunlaisista kevyistä rakennelementeistä.

**Taulukko 1.** Laajarunkoisen liikuntahallin perusratkaisun variaatioita.

	Pääkannattajan pilarit	Pääkannattajan vaakarak.	Kattomuoto	Kattorakenne pituussuuntaan	Huom!
Perusratk.	Teräspilari	Teräsristikko	Harjakatto	Orsiristikot	Staattisesti epämääräinen
1	- ” -	- ” -	Kaarikatto	Orsiristikot	- ” -
2	- ” -	- ” -	Harja tai kaari	Katto-orret	Perinteinen
3	- ” -	- ” -	- ” -	Kattoelementit	Nopea asenn.
4	Betonipilari	Teräsristikko	Harja tai kaari	Katto-orret	
5	- ” -		Kts. 1-3		
6	Puupilari	Puuristikko	Harjakatto	Orret	Täysi puurak.
7	- ” -	Liimapuu	- ” -	tai	
8	- ” -	- ” -	Kaarikatto	elementit	
9	Betonipilari	Puuristikko	Harjakatto	Orret	
10	- ” -	Liimapuu	- ” -	tai	
11	- ” -	- ” -	Kaarikatto	elementit	
12	1-nivelkehä	Teräsristikko	Harjakatto	Orret	
13	3-nivelkehä	Teräs- tai puuristikko	Harjakatto	tai elementit	
14	Betonipilari	Betonipalkki	Harjakatto	Orret	(ei käytänn.)

Liikuntahallien rakenteiden rakenteellisten uhkatekijöiden osalta on laadittu skenaarioita seuraavassa kohdassa 3. Skenaarioissa on käsitelty sekä konepajassa ja rakennetehtaassa valmistettuja osia ja niiden vaurioitumista, että myös rakenteiden kokoonpanoa.

## 2.2 Hallien rakentamisprosessi ja organisaatio

### 2.2.1 Projektitoiminta ja siitä aiheutuvat ongelmat

Lähinnä ainutkertaisuutensa vuoksi liikuntahallirakennushankkeet toteutetaan tyypillisesti projekteina. Kertaluonteisuuden lisäksi projekteille on ominaista

- tavoitteellisuus (esim. urheiluhallin tekeminen)
- ajallinen rajausta (yksiselitteisesti määritellyt alkamis- ja päättymispäivät)
- resurssirajausta (projektin suorittamiseksi varataan tietty määrä ihmisiä, materiaaleja, rahaa jne.)
- oma organisaatio (projektia varten muodostetaan projektiorganisaatio, jonka henkilöiden vastuu- ja valtasuhteet perustuvat osin aiempiin käytäntöihin, osin projektikohtaisiin määrittäksiin)

Kertaluonteensa takia projektien määrittämisessä, suunnittelussa ja toteutuksessa esiintyy usein monenlaisia ongelmia. Projektin tavoitteet on saatettu määritellä virheellisesti ja niitä voidaan joutua muuttamaan projektin aikana. Projektin ajallinen rajausta voi olla tarpeettoman kireä, jonka seurauksena esim. kaikkia suunnittelun osatehtäviä ei kyetä suorittamaan riittävän huolellisesti. Myös projektin resurssirajausta esim. kustannusten säästämiseksi voi vaikeuttaa projektin hallittua läpivientiä. Projektiorganisaatio muodostaa oman ongelma-alueensa:

kunkin henkilön asiantuntemus ei välttämättä riitä tehtävien suorittamiseen, eikä henkilöiden välinen tiedonkulku toimi kunnolla. Kitkaa, tehottomuutta ja tiedonkulkuongelmia esiintyy erityisesti niiden tehtävien rajapinnoissa, joita tekevät eri ihmiset ja eri yritykset.

Tehdasteollisuuden tavoin myös rakennusalalla on projektitoiminnan ongelmien ratkaisuksi nähty prosessiajattelun käyttöönotto.

### **2.2.2 Prosessit rakentamisessa**

Prosessiajattelun keskeisenä näkökulmana on nähdä tehtävät organisaatorajoja leikkaavina toimintoina. Perimmäisenä tarkoituksena on ollut vähentää osatehtävien välistä kitkaa, lyhentää prosessin läpimenoaikaa ja lisätä asiakkaan saamaa lisäarvoa. Edellisten lisäksi hyvin suunnitellut prosessit parantavat mm. toiminnan laaduntuottokykyä ja työturvallisuutta.

Rakennusala on viime vuosina lähtenyt voimakkaasti muuttamaan toimintaansa prosessilähtöiseksi. Ensimmäisenä tehtävänä on tällöin tunnistaa ja rajata tarkasteltavat prosessit. Seuraavassa vaiheessa selvitetään prosessien ongelmat ja kehittämistarpeet, asetetaan prosesseille mitattavat tavoitteet ja käynnistetään kehitystyö. Tämän jälkeen prosessit pyritään vakiinnuttamaan. Viimeisenä päävaiheena prosessitoimintaan siirryttäessä on yrityksen organisointi prosessiorganisaatioksi.

Suurimpien rakennusurakoitsijoiden prosessitoiminnan tilanne lienee se, että keskeiset prosessit on tunnistettu ja kuvattu, mutta niiden kehittäminen organisaatio- ja yritysrajat leikkaaviksi toiminnoiksi on vasta alullaan. Tilanne tulee paranemaan vähitellen yritysverkostojen ja monenkeskisen kumppanuustoiminnan kehittymisen myötä.

Rakennustoiminnan prosessien määrittämiseen ja valitsemiseen ei ole olemassa yhtä ainoata mallia. Kehittämistavoitteesta riippuen voidaan tarkastella tarjousprosessia, suunnitteluprosessia, hankintaprosessia ja esim. toteutusprosessia. Toteutusprosessi voidaan puolestaan jakaa esim. runkorakentamisprosessiin, palosuojausprosessin ja luovutusprosessiin.

### **2.2.3 Hankkeen osapuolet**

Hallin rakentamisprosessiin osallistuu runsaasti osapuolia, joiden ammattitaidolla ja yhteistoiminnalla on keskeinen merkitys laadukkaan ja määräykset täyttävän lopputuloksen syntymiseen. Prosessin keskeisiä toimijoita ovat

- pääsuunnittelija
- rakennesuunnittelija
- muut suunnittelijat
- työpäällikkö (ja/tai projektipäällikkö)
- vastaava työnjohtaja
- työmaainsinööri
- muu työnjohto
- hankintahenkilöstö
- erikoisurakoitsijat
- rakennuttajakonsultti
- valvojat
- viranomaiset

## 2.2.4 Hallirakentamisprosessin kuvaus ja riskit

Hallien rakentamisprosessi vaihtelee jonkin verran tilaajasta ja urakoitsijasta riippuen. Prosessin kehittämiseksi se olisi kuvattava ja analysoitava tarkemmin ja mm. määritettävä kriittiset tarkastuskohdat vaativiin kohtiin. Kuvaus voi olla hyvin yleisluontoinen jos siinä esitetään lähinnä suunnitelmien tuottamiseen ja käsittelyyn liittyviä tehtäviä. Koko rakentamisprosessin kuvaaminen rajoittunee tapauksiin, missä se kehitetään palvelemaan suurempaa määrää lähes samanlaisina toistuvia toimituksia.

Prosessin riskejä on käsitelty kappaleessa 3.2.2 Rakentamisprosessiin liittyvät uhkaskenariot. Seuraavassa on lisäksi lueteltu eräitä ongelmia, jotka ovat tulleet esille rakentamisprosessien mallintamisen yhteydessä:

- tilaaja on antanut liian kireän aikataulun
- projektaikataulu on laadittu väärin
- tilaaja ei tiedä omia vaatimuksiaan hankkeelle tai ei osaa kuvata niitä selkeästi
- suunnittelun lähtötiedot ovat puutteelliset
- suunnittelun ohjaus on heikkoa
- suunnitteluun ei panosteta tarpeeksi
- suunnittelusopimus on virheellinen
- suunnitteluajataulu on virheellinen
- suunnittelijan valvontavastuut on määritelty huonosti
- suunnittelija on kokematon
- suunnitelmat johtavat vaikeisiin tai jopa mahdottomiin työmenetelmiin
- suunnittelijoiden välinen tiedonkulku ei toimi
- suunnitelmat ovat ristiriidassa keskenään
- hankintasuunnitelma on virheellinen
- laatusuunnitelmat ovat heikkotasoisia
- tarkastusasiakirja ei ole kunnollinen
- työpiirustukset ovat puutteellisia tai puuttuvat
- käytetään virheellisiä työmenetelmiä tai tuotteita
- työnaikaisia tarkastuksia ei tehdä
- valvojien ammattitaidottomuus
- itselle luovutuksia (ja oman työn tarkastuksia) ei tehdä

Hankeeseen ryhtyvä taho voi vähentää tai poistaa rakentamisorganisaatioon liittyviä riskitekijöitä voi poistaa paneutumalla toimijoiden väliseen tiedonkulkuun ja rajapintoihin. Sen helpottamiseksi on Suomen rakentamismääräyskokoelman määräyksissä ja ohjeissa sekä RT-korteissa jo nyt erilaisia keinoja ja työkaluja, kuten esimerkiksi:

- suunnittelijalta edellytetään rakenteiden valmistusta ja asennusta varten ohjeita (työselitys), joilla varmistetaan että suunnittelussa tehdyt oletukset ovat voimassa,
- hitsausstandardi SFS 2373 vaatii, että suunnittelija ja valmistaja toimivat hyvässä yhteisymmärryksessä,
- em. hitsausstandardin mukaan kaikista sellaisista voimaa siirtävistä hitsausliitoksista, joiden hyväksikäyttöaste on yli 50 %, tulee laatia erillinen luettelo,
- jos rakennesuunnittelu jakautuu useammalle tekijälle tai yritykselle, MRL:n velvoittaa nimeämään yhden rakennesuunnittelijoista vastuulliseksi siitä, että suunnitelmat yhdessä muodostavat toimivan kokonaisuuden.



### 3. RISKIANALYYSIN SUORITUS

Seuraavissa kohdissa mainitut seikat on tuotu esille yleisesti. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ole tehty riskianalyysejä millekään todelliselle kohteelle. Todellisessa tapauksessa osa tässä esille tuoduista seikoista eivät rakenneratkaisusta riippuen ole tarpeellisia. Allakuvat riskiskenaariot ovat yleisellä tasolla samoja riippumatta rakennemateriaalista, jos kyse on pääasiassa kuvan 2 mukaisesta hallista. Muihin rakennetyyppeihin liittyy muunlaisia riskejä sekä johtuen rakenneteknisistä syistä että tilojen käyttäjistä.

#### 3.1 Riskianalyysin suoritustarve ja tavoite

Riskianalyysi on systemaattinen menettely riskin kuvaamiseksi ja/tai laskemiseksi. Se käsittelee epätoivottujen tapahtumien ja niiden syiden tunnistamisen sekä niiden todennäköisyyksien ja seuraamusten määrittämisen. Riskin arviointi on riskianalyysin tulosten vertaamista riskin hyväksymiskriteereihin ja muihin päätöskriteereihin.

Kunkin riskin suuruus on määritelty tulona jonkin määritellyn uhkan todennäköisyydestä tai tapahtumataajuudesta ja tapahtumasta aiheutuvien seuraamusten määrästä. Yhtä uhkaavaa tapahtumaa koskeva kokonaisriski (oikeastaan vertailuluku) voitaisiin laskea seuraavalla kaavalla, jos kaikille vahingoille olisi mahdollista sopia yhteinen yksikkö:

$$R = T \cdot (H + M + K),$$

missä T on kyseisen tapahtuman todennäköisyys, ja muuttujat H, M ja K ovat henkilövahinkojen, materiaalivahinkojen ja toiminnan keskeytysvahinkojen määrät.

Käytännössä henkilö- ja materiaalivahingot lasketaan mielellään eri riskeinä, tai vertailu suoritetaan muulla tavalla. Tapahtumien todennäköisyyksien arviointi voi perustua joko tilastoihin tai asiantuntijoiden arvioihin, mutta riskin todennäköisyyden, tai sen suuruuden vertailuluvun määrittäminen eo. tavalla on hyvin subjektiivista, jos käytettävissä ei ole laajoja tilastoja sattuneista onnettomuuksista ja niiden vahingoista. Käytännössä hyvin pieniin tapahtumamääriin perustuvaan arviointiin on pakko sisällyttää suuri hajonta, mikä saattaa tehdä mahdottomaksi asettaa riskit kvantitatiivisesti järjestykseen niiden torjumiseksi.

On kuitenkin vaikea kuvitella sellaista tilannetta, että yksityinen tai julkinen rakentaja teettäisi riskianalyysin, missä kohdekohtaisesti arvioitaisiin kyseisen kohteen rakentamiseen tai käyttöön, eli rakenteiden kestävyys- ja turvallisuuteen liittyviä henkilöriskejä. Henkilöriskien laskeminen pitää kohdistaa sen selvittämiseen, mitä varmistus- ja suojaustoimia pitää eri kohteissa käyttää missäkin tilanteessa, ja pohjimmiltaan se on analyysi, jonka tuloksena voi arvioida tai vertailla erilaisten suojauskeinojen ja toimenpiteiden tehokkuutta toisiinsa.

Rakentamisessa riskit voivat olla joko organisatorisia tai teknisiä. Rakenteisiin kohdistuu useampia erilaisia uhkia, jotka voivat suoraan tai välillisesti vaurioittaa rakennetta ja saattaa sen erilaisiin vauriotiloihin, joilla kullakin on tietyt seuraamukset. Tällöin riskit analysoidaan tai arvioidaan kolmen askeleen menetelmällä, missä:

- 1) arvioidaan erilaisten uhkien tapahtumisen todennäköisyydet ja intensiteetit,
- 2) arvioidaan erilaisten vauriotilojen/tasojen ja vastaavien seuraamusten todennäköisyydet (esimerkiksi tapahtumapuu-menetelmällä) eo. askeleessa 1 arvioiduille uhkille, ja
- 3) arvioidaan vaurioituneen rakenteen toimivuuden puitteissa todennäköisyydet yhdessä vastaavien seuraamusten kanssa.

Edellä kuvattu menettelytapa soveltuu käytettäväksi onnettomuuskuormille, joiden aiheuttamat tapahtumat ja niiden vaihtelut/tilat tunnetaan kohtuullisen hyvin, jolloin eri skenaarioita, eli tapahtumaketjuja tai -sarjoja vastaavat todennäköisyydet on myös mahdollista arvioida.

Taulukossa 5 kuvatut riskianalyysimenetelmät soveltuvat hyvin erilaisten prosessien ja toiminto- tai tapahtumaketjujen analyysiin. Sama koskee onnettomuuksien mallintamismenetelmiä niissä tapauksissa, kun onnettomuustilanne ja sen eri variaatiot ja niiden todennäköisyydet ovat ennakoitavissa. Kokonaisriskin arvioimiseen liittyy kuitenkin ongelmia.

Rakennetekniikassa riskianalyysimenetelmien ongelmana on yleensä, että:

- a) yleisellä tasolla ei ole tunnistettavissa jotain yhtä rakentamisprosessia, jonka mukaan aina toimittaisiin, vaan kussakin projektissa toimintaympäristö vaihtelee, ja kilpailevista yrityksistä valitaan ne, joiden tarjous on ollut halvin, tai jotka ovat muuten parhaiten vastanneet ostajan tarpeita,
- b) rakentamisprojektin eri osatehtävät etenevät usein rinnakkaisina ja osatehtävien sisällöt vaihtelevat monista eri syistä riippuen. Tästä syystä esimerkiksi tarkistuslistojenkin käyttäminen kohdekohtaisesti riskianalyysin välineinä voi onnistua vain jos samalla tai lähes samalla toimintaympäristöllä rakennetaan useita samanlaisia rakennuksia,
- c) ennakoimattomien onnettomuuskuormien osalta ei ole tiedossa riskianalyysissä tarvittavia todennäköisyyksiä, koska tapaukset ovat lähes yksittäisiä, jolloin kaikkien tapahtumien todennäköisyys on yhtä suuri (= pieni). Kvantitatiivisen riskianalyysin mahdollisuudet ovat varsin vähäiset,
- d) rakennetekniikassa hyväksyty riskitaso on rakennettu suunnitteluohjeisiin, jotka eivät kuitenkaan ole velvoittavia ja muullakin tavalla saa tehdä. Riskianalyysien yhtenä tavoitteena on pystyä identifioimaan sellaiset rakenteen kohdat, missä on riski, että suunnitteluohjeista poikkeavasta menettelystä aiheutuu riski kestävyydelle ja turvallisuudelle.

Projektikohtaisesti riskianalyysi on mahdollista suorittaa esimerkiksi osana rakennuksen suunnitelmien ulkopuolista tarkastusta, tai sitä valmistelevana prosessina.

Kvantitatiivinen riskianalyysit voidaan tehdä rakennustyyppikohtaisesti, jos kyseisiä rakennuksia toimitetaan enemmän kuin yksi. Tällöin riskianalyysiä on mahdollista käyttää toimintojen ohjaukseen ja toimintoketjujen optimoimiseen.

### 3.2 Kvalitatiivinen riskianalyysi

Riskianalyysin työvaiheet ohjeen EUROCODE 1 - Actions on structures, Part 1-7: General actions - Accidental actions /1/ mukaan ovat seuraavat:

- uhkatekijöiden tunnistaminen ja niiden lähteet (source identification),
- tekniset ja muut uhkaskenaariot (hazard scenarios),
- mahdollisten seuraamusten kuvaaminen (description of consequences),
- uhkien pienentämiseen tähtäävät toimet (definition of measures).

#### 3.2.1 Uhkatekijöiden tunnistaminen ja niiden lähteet, tekniset uhkaskenaariot ja seuraamukset

Liikuntapaikkojen rakenteisiin liittyvien uhkatekijöiden osalta tässä keskitytään pelkästään kuvan 2 mukaisiin avariin tiloihin. Niissä pääkannattajien jännevälit ovat merkittävän suuria, ja tiloissa saattaa eri syistä johtuen olla kokoontuneena jopa yli tuhat ihmistä. Tässä yhteydessä ei käsitellä ko. tiloihin liittyvien matalien myymälä- ja sosiaalitulojen rakenteita tms. uhkatekijöitä.

#### Taulukko 2. Laajarunkoisten liikuntahallien tyypillisiä vaurioitumistapoja.

1	<p>Kaikissa taulukon 1 tapauksissa pahin onnettomuustilanne syntyy silloin, kun useampi pääkannattaja sortuu lähes samanaikaisesti ja hallissa on tapahtuma, johon osallistuu paljon ihmisiä. Tällaisissa tapahtumissa ihmisten optimaalisin pakenemissuunta ei ehkä ole kaikissa tapauksissa selvä, jolloin myös uhka jäädä sortuman alle on suhteellisen suuri, vaikkei koko rakenne sortuisikaan.</p> <p>Tällaisiin sortumiin saattaa johtaa joko jokin ennakoitava onnettomuuskuorma, kuten tulipalo tai seismisillä alueilla maanjäristys, tai jokin onnettomuustilanne, jota ei voi ennakoita. Ennakoimattomille kuormille ei voi antaa todennäköisyyksiä tai niiden hajonta on liian suuri, että erilaisten riskien paneminen järjestykseen niiden suuruuksia arvioimalla olisi luotettavaa. Siksi onnettomuuksien välttämiseksi ovat rakenteelliset ominaisuudet, ja erityisesti myös suunnittelijan pätevyys ensiarvoisen tärkeässä asemassa.</p>
2	<p>Katon paikallinen sortuma. Ohje prEN 1991-1-7:2004 määrittelee rajat paikallisten sortumien suhteen. Tällöin on kyse vain osasta kattoa, tai joissakin tapauksissa vain yhden pääkannattajakehän vaurioitumisesta ja osittaisesta sortumasta, missä kuitenkin suurin osa hallista säilyy ehjänä. Vaaratilanne koskee tällöin rajallista aluetta ja henkilövahinkojen määrä on myös rajallinen, koska suurin osa pakosuunnista on koko ajan käytettävissä.</p>
3	<p>Kuorirakenteiden vauriot. Kattorakenteen osan vaurioituminen voi johtua katerakenteen pettämisestä, jolloin hallin koko kantava runkorakenne voi säilyä kuitenkin ehjänä. Tällaiset tapahtumat ovat yleensä rajallisia ja mahdolliset henkilövahingotkin yleensä yksittäisiä. Suomessa on kuitenkin tapahtunut joitakin kattosortumia, joissa katteena on käytetty joko kasetteja tai sandwich-elementtejä, joiden kestävyys ei ole ollut riittävä.</p> <p>Jälkiselvityksissä on havaittu, että sortumat ovat usein johtuneet useammasta kuin yhdestä syytä, jotka ovat: a) kuorien kiinnitys runkorakenteisiin on pettänyt, b) kuorielementtien tuet ovat siirtyneet tai pettäneet, c) kuorirakenteet 2-aukkoisia, ja alkavat samalta kehältä, jolloin keskituella kertyy 25 % enemmän kuormaa, mitä ei ole otettu suunnittelussa huomioon, d) katolla on ollut ylisuuri lumikuorma, e) katolle on kertynyt muuta kuormitusta.</p>

4	<p>Pääkannattajan vaurioituminen voi aiheutua kattoristikon (tai palkin) vaurioitumisesta tai materiaalin heikkenemisestä. Tällaisissa tapauksissa, jos on kyse teräsrakenteesta, on harvoin kyse äkillisestä sortumasta, koska jos kuormat eivät poistu, ne yleensä voivat ainakin rajallisen ajan siirtyä muuta kautta, jolloin ihmisillä on aikaa poistua tiloista.</p> <p>Teräsrakenteisten tehdasvalmisteisten elementtien kantavuuksiin liittyvistä uhkatekijöistä suurin koskee rakenteen omia tai sen varusteluosien hitsiliitoksia, jotka voivat olla liian heikkoja, esimerkiksi jos on käytetty pienahitsausta, jonka valmistuksen laatua ei ole varmistettu. Pianahitsejä ei kaikissa tapauksissa voida tarkastaa jälkikäteen.</p> <p>Puurakenteisten elementtien staattisen määräämättömyyden aste on pienempi kuin teräsrakenteisilla elementeillä, jolloin elementtien sisäisten liitosten vauriot saattavat helposti johtaa rakenteen äkilliseen sortumiseen. Rakenteellisesti tätä uhkaa voidaan pienentää suunnitteleamalla teräsosilla kootut liitokset sitkeiksi. Tällöin liitoksiin syntyy ennen murtumista isoja muodonmuutoksia, jotka voidaan havaita ja korjata. Sitkeät liitokset toteutetaan siten, että liittimet ovat ohuita tai liittimet ovat riittävän harvassa. Edellisessä tapauksessa liittimet myötäävät ennen lopullista murtoa ja jälkimmäisessä puu puristuu kasaan liittimen alla ja liittimen reikä venyy. Tätä uhkaa voidaan vähentää myös tehokkaalla puurakenteisten elementtien valmistuksen laadun valvonnalla.</p>
5	<p>Kattoristikot ja palkit voivat nurjautaa tai kiepahtaa pois tasostaan tai kaatua. Syynä voi olla se, että asennusohjeet ja asennuksen valvonta ovat puutteelliset. Käytännössä tällainen tilanne voi aiheutua helposti, jos asentamisen ja tuentojen suunnittelija on joku muu kuin rakenne-elementtien suunnittelija. Pystyttäjät voivat myös olla liian ammattitaidottomia tai pystytystä ei valvota riittävästi, jolloin suunnitelmissa olevat tuentarakenteet saatetaan sivuuttaa tarpeettomina. Tällaisia vauriotapauksia on esiintynyt erityisesti puurakenteilla. Turvallisuusriskit ovat samat kuin kohdissa 1-2.</p>
6	<p>Kattoristikoiden eri valmisosien (puoliskot tms.) väliset työmalla tehtävät liitokset voivat pettää. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet ovat puutteellisia koskien esimerkiksi sellaisia ruuviliitoksia, missä kuorma vaikuttaa ruuvien akselien suunnissa. Vedettyjen pulttiliitosten osalta ei ruuviliitosten lukitsemiseksi ole hyväksyttävää käyttää kierteiden rikkomista, koska se ei estä ruuvien kireyden muutosta ja liitoksen löystymistä. Uhka syntyy yhdenkin ruuvien löystytyä ja saattaa johtaa kyseisen esim. kattoristikon sortumiseen.</p>
7	<p>Seinäpilari saattaa nurjautaa tai muulla tavoin menettää kantavuutensa, esimerkiksi jos sillä ei ole riittävää nurjahdustuenta. Valmistumassa olevassa EUROCODE -ohjeessa draft prEN 1991-1-7 on esitetty välipohjien rakenteiden sitomista toisiinsa, ja kannattele-viin pilareihin. Tällöin pilarien tuenta ja mitoitusperusteet selkiytyvät. Aiemmissa suomalaisissa ohjeissa ei ole vastaavia kohtia, joskin esimerkiksi välipohjalaatastoissa käytetään betoninormien B4 kohtien 2.6.1.2.2-3 mukaisesti yleisesti sidoksia pilareiden ympärillä. Uhkat ihmisille ovat riippuen vaurion laajuudesta samaa luokkaa kuin aiemmissa kohdissa.</p>
8	<p>Kattoristikoiden ja pilarien väliset kokoonpanoliitokset. Pääkannattajien pysty- ja vaakarakenteiden (pilari/palkki) väliset kokoonpanoliitokset ovat vaativa suunnittelukohteiksi, että niissä a) leikkausvoimat saavat suurimmat arvonsa, ja b) joissakin tapauksissa koko pääkannattajan suurin taivutusmomentti muodostuu ko. liitoksen alueelle.</p>
8-a	<p>Jos liitoksen mitoittaa pääasiassa pelkkä leikkausvoima, on kyseessä yleensä poikkeustapaus, missä kaikki vaakasuorat voimat on johdettu perustuksille muuta tietä. Tällöin suurin rakenteellinen uhka aiheutuu rakenteosien välisistä pienistä epäkeskeisyyksistä, joista saattaa liitoskomponentteihin ja -hitseihin aiheutua merkittäviä taivutusmomenttirasituksia, joiden suhteellista suuruutta on erittäin vaikea arvioida.</p>
8-b	<p>Jos kattoristikon ja pilarin välisen liitoksen on välitettävä taivutusmomenttia (jäykät kehät, 2-nivelkehät, 3-nivelkehät), aiheutuu liitoskohtiin sekä pystysuoria että vaakasuoria voimakomponentteja, ja liitoskohdat on mitoitettava leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutukselle. Liitoksen eri komponenttien, kuten jäykisteiden, ruuvien ja hitsien mitoitukset tehdään määrävän kuormitusyhdistelmän mukaan. Puute aiheuttaa paikallisen sortuman uhan.</p>
8-c	<p>Taivutusmomentin rasittamien pääkannattakehien ongelmana on usein rakenteosien sivuttaistuenan riittämättömyys. Tukien on toimittava myös palotilanteissa. Lämpöpitenemisestä aiheutuvat puristusvoimat jäävät helposti huomioonottamatta. Kattoristikoiden alapaarteiden tai ristikkorakenteiden pilarien sisäpaarteiden puristettujen osien sivuttaistuenta pitää tehdä asianmukaisesti siten että estetään useiden peräkkäisten kannattajien nurjautaminen yhdessä. Ainakin puuristikkorakenteisia kattoja on sortunut edellä kuvatusta syystä.</p>
9	<p>Pilarien perustukset voivat antaa periksi ja liikkua. Perustuksien äkkinäiset liikkeet ovat kohtuullisen helposti ennustettavissa, ja ne liittyvät yleensä veden vaikutuksiin tulvien yhteydessä. Pohjaveden tai tulvien aiheuttamat vähittäiset muutokset ovat ehkä huomaamattomia, ja niistä voi aiheutua</p>

	rakenteisiin ennalta-arvaamattomia rasiustiloja, mutta yleensä myös muodonmuutoksia, jotka huomataan mikäli rakenteille tehdään kausitarkastuksia. Uhkat henkilöturvallisuudelle ovat pienet.
10	Tulipalo. Normaalitylanteessa liikuntahallien palokuorma (palavan materiaalin määrä) on pieni, koska pinnoitteissa käytetään yleensä huonosti palavia tai palamattomia materiaaleja. Jos hallia käytetään messutilana, kirpputorina tai vastaavana, palokuorma voi tulla isoksi normaaliin käyttöön verrattuna. Yleensä ko. tilaisuuksien järjestäminen vaatii poikkeusluvan, jonka ehtoihin pitää kirjata ylimääräinen palontorjuntavalmius ja vartiointi. Tällöin tulipalon uhka jää pieneksi.

Edellämäinittu tyypilliset vaurioitumistavat ja skenaariot ovat kohtaa 10) lukuunottamatta kaikki sellaisia, joita ei voi ennakoita toistensa suhteen. Jos niillä olisi kaikilla yhtä suuri todennäköisyys, niiden erona olisi pelkästään se, että seuraukset ovat hyvin erilaiset.

Riskianalyysissä edellä kuvatut skenaariot pitää saada järjestykseen siten, että tapahtuman todennäköisyys jollakin perustellulla tavalla korreloi rakennuksen rakenneosan tai liitoksen tai yksityiskohdan kestävyys tai vaurioherkkyyden kanssa. Tämä vaatimus johtuu siitä, että:

- ylikuormitustilanteessa virheettömästä rakenteesta vaurioituu ensin sen suhteellisesti eniten kuormitettu osa, eli osa jonka hyväksikäyttöaste on lähimpänä 100:aa %, ja
- mikäli on kyse jonkin muun osan vaurioitumisesta ensin (esim. johtuen suunnitteluvirheestä tms.), kyseisen rakenneosan tai kohdan rasitukset pyrkivät jakautumaan muualle, jolloin on myös kyse edellisen kohdan tilanteesta, ja rakenteen alunperin suhteellisesti eniten kuormitettu rakenneosa saattaa murtua ja jatkaa sortumista.

Vaurio voi käytännössä alkaa mistä tahansa heikosta rakenneosasta, mutta sortumaksi se voi muuttua vain jos ne rakenneosat, jotka joutuvat kantamaan vaurioituneen osan rasitukset, eivät kykene siihen, tai menettävät kokonaan kykynsä kantaa kuormituksia (nurjahtavat tms.).

**Huom!** Vaurion jatkamiseen tai sen mahdollisuuteen liittyy oleellisesti sellainen poikkeus, että poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 kuuluvat palkit tai pilarit, jotka kykenevät määrävällä kuormituksella muodostamaan plastisen nivelen, eli toimimaan sitkeästi, eivät edistä sortumista. Sama koskee vakioituja liitoksia, joihin voi todistettavasti muodostua plastinen nivel, jos niiden valmistus on valvottua.

Edellä mainittujen skenaarioiden osalta on merkillepantavaa se, että lähes kaikissa Suomessa tapahtuneissa tunnetuissa teräshallien sortumissa katon suurin osa tai koko katto sortui. Sama koskee myös sorteineita puurakenteita. Kummankin materiaalin osalta puutteita on löytynyt pääasiassa rakenne-elementtien sitomisessa toisiinsa. Betonirakenteissa raudoitusvirheet ovat olleet yleisin ongelma.

Kattoristikoiden ja palkkien vaurioihin löytyy useita mahdollisia syitä, joista merkittävä osa liittyy tuotannon laadunvalvontaan tai sen puutteisiin, tai tuotteiden asentamiseen työmaalla, eli rakentamisprosessiin liittyviin laatu puutteisiin.

Vauriotapausten perusteella erilaisten työmaalla tehtävien kokoonpanoliitosten suunnittelu- tai työvirheet ovat kuitenkin olleet merkittävin sortumiin johtava syy. Verrattuna muihin liitoksiin, kokoonpanoliitoksilla on se ongelma, että niissä kuormalla ei ole yleensä käytettä-

vissä vaihtoehtoista tietä, mikä oli yksi EUROCODE:ssa /1/ mainituista suunnittelun perussäännöistä.

Kokoonpanoliitosten suunnittelussa ennakoimattomien onnettomuustapausten varalta on ohjeessa prEN 1991-1-7:2004 /1/ mainituista menettelytavoista käytettävissä vain "avainkomponenttien" mahdollisuus. Käytännössä se merkitsee, että kyseisen korkeimpaan seuraamusluokkaan luokitellun rakennuksen (kuva 2) kokoonpanoliitokset suositellaan suunniteltavaksi huolellisesti ehkä hieman normaalia kestävämmäksi siten, että suunnittelija täysin tuntee liitoksen käyttäytymisen ylikuormitustilanteissa ja on mitoittanut liitoksen eri komponentit siten, että pienimmällä kuormalla vaurioituva komponentti käyttäytyy poikkileikkausluokkaa 1 vastaten sitkeästi ja kykenee muodostamaan liitoksen alueelle plastisen nivelen.

Kokoonpanoliitosten tärkeän aseman takia niiden riskitekijöitä ja vaurioitumistapoja on tutkittu runsaasti koskien eri rakennusmateriaaleista rakennettuja rakennuksia. Eräiden ECSC-projektien pohjalta on laadittu tarkempia ohjeita tyyppiliitosten käytöstä, ja samalla laadittiin myös CoP-niminen tietokoneohjelma, jolla voi laskea kyseisten lähinnä kokoonpanoliitosten komponenttien hyväksikäyttöasteet, selvittää liitosten murtumismuodot ja päätellä niiden sitkeysominaisuudet.

Kokoonpanoliitosten riskitekijät ovat rakennemateriaalista riippumatta luokiteltavissa samantyyppisistä tekijöistä johtuviksi. Kokoonpanoliitoksilta vaaditaan pääasiassa seuraavat kolme ominaisuutta, joista kuhunkin liittyy erilaisia riskimahdollisuuksia:

- 1) Rakennettavuus,
- 2) Säädettyvyys, ja
- 3) Kuormitusten siirtokyky.

Lisäksi liitoksilta vaaditaan yleensä vähintään samaa palokestävyyttä kuin liittyviltä rakennosilta. Rakenteiden liitosten kunnan tarkastusmenettely voi perustua oheisiin ominaisuuksiin liittyvien tarkastuslistojen soveltamiseen.

### **3.2.2 Rakentamisprosessiin liittyvät uhkaskenaariot**

Rakentamisprosessi muuttuu projektista toiseen. Se on lähes aina erilainen siksi, että prosessin toimijat yleensä kilpailutus- ja muista syistä vaihtuvat eikä aiempaa kokemusta voida välttämättä käyttää täysin hyväksi. Edellä mainittu alalla tunnettu ongelma johtuu pääasiassa siitä, että projektit eivät seuraa toisiaan jatkuvana virtana, vaan projektien välillä kuluu aikaa ja edellisen kohteen kokeneet tekijät ehtivät muihin tehtäviin.

Toisaalta, edellisissä samankaltaisissa projekteissa saadut hyvät ja huonot kokemukset pyritään aktiivisesti ottamaan huomioon muodostettaessa uutta rakentamiskonsortiota, eli prosessi on erityisesti projektinjohtotasolla oppiva, ja juuri siitä syystä suurin osa rakentajien omasta kehityspanostuksesta kohdistuu tuotannon kehittämiseen.

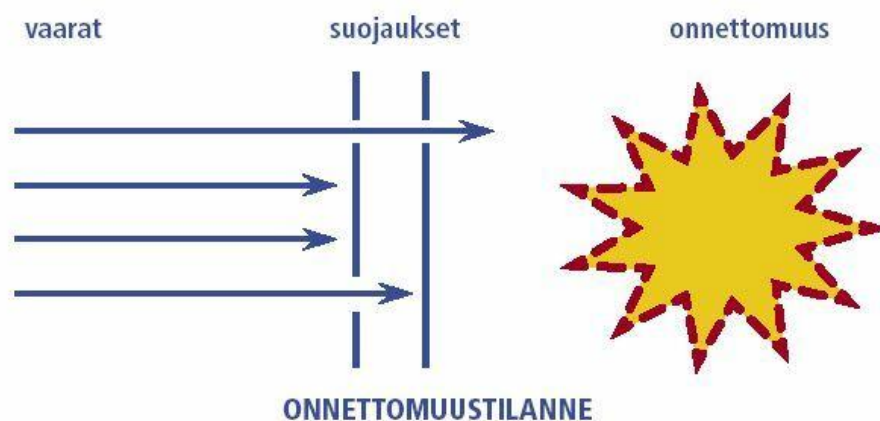
Kun toimitetuissa kohteissa on havaittu käytännön ongelmia, tai vajaata laatua tms. tilanne on pyritty heti korjaamaan, ja puutteellisen laadun tai muutosten hallintaan onkin kehitetty omat

suunnitteluohjeensa ja käytännön toimintaohjeet. Niillä pyritään varmistamaan, että valmiiden rakenteiden laatu vastaa rakennuttajan ja yhteiskunnan asettamia vaatimuksia.

Tietoisuus siitä, että ongelmia saattaa rakentamisessa tulla, on vaikuttanut siihen, että Maankäyttö- ja rakennuslaissa samoin kuin Suomen rakentamismääräyskokoelman määräyksissä ja ohjeissa on esitetty runsaasti eritasoisia menettelyjä rakentamisorganisaatiosta aiheutuvien vaarojen ja uhkien käsittelemiseksi ja riskien pienentämiseksi jo ennakkoon.

Organisaatioiden yhteistoimintaan liittyy erilaisia inhimillisestä toiminnasta aiheutuvia riskitekijöitä, joille on äärimmäisen vaikea määritellä mitään todennäköisyyksiä. Riskien suuruuksia ei voida helposti kvantifioida tai vertailla toisiinsa. Vaurioita ja onnettomuuksia selvittäessä on kuitenkin havaittu, että ne yleensä johtuvat useammasta kuin yhdestä tekijästä, jotka ovat vaikuttaneet samanaikaisesti.

Siksi on päätelty, että tukemalla organisaation toimintaa erilaisilla suojuuksilla, voidaan ajoissa havaita ja korjata ainakin osa vaaraa aiheuttavista tekijöistä, jolloin minkä tahansa onnettomuuden todennäköisyys pienenee oleellisesti. Aihetta on tutkittu mm. James Reason:n kirjoittamassa teoksessa "Managing the Risks of Organisational Accidents" /11/ (kuva 3).



**Kuva 3.** Organisaation toimijoiden yhteistoimintaan liittyvien vaarojen käsittely /11/.

Kuvassa 3 on esitetty rakentamisessakin sovellettu riskienhallintamenettely. Mihin tahansa onnettomuuteen johtavia vaaratekijöitä pyritään vähentämään käyttämällä puskurina erilaisia ja eritasoisia suojausmenettelyjä. Suojausmenetelmät eivät ole täydellisiä.

Kokonaisriskin hallintamenetelmän lähtökohdaksi on valittu se, että jos suojausmenetelmien puutteet eli "reiät" sijaitsevat eri kohdissa, minkään vaaran ei pitäisi löytää tietään suojausten lävitse ja aiheuttaa onnettomuutta.

Tällaisen menettelyn suurimmat puutteet liittyvät siihen, että organisaatiossa voi mahdollisesti olla nimellisesti runsaastikin suojausmenetelmiä, mutta kunkin suojausmenetelmän kohdalla "reiät" ovat niin suuria, että jotkin vaarat pääsevät niistä lävitse pelkästään sen takia, että reiät menevät limitin ja johonkin kohtaan jää vapaa väylä (kts. kuva 3).

Rakentamisessa tällaisia rakennuttajaa tai rakennuksen käyttäjää suojaavia rakennusvaiheen menettelyjä (lueteltu mm. Maankäyttö- ja rakennuslaissa sekä RakMK:n määräyksissä ja ohjeissa, ottamatta kantaa niiden tärkeysjärjestykseen) ovat esimerkiksi seuraavat:

- ammattitaitoinen arkkitehti tuntee rakentamismääräykset, ja rakennussuunnittelu tehdään Maankäyttö- ja rakentamislain (MRL) ja sen mukaisten määräysten mukaisesti,
- rakennusprojektiin nimetään kokenut riittävän pätevä pääsuunnittelija, joka vastaa siitä, että eri erityisalojen suunnitelmat yhdessä muodostavat toimivan kokonaisuuden,
- rakennusluvan myöntävä viranomainen tarkastaa rakennussuunnitelman ja rakennuksen vaatimuksenmukaisuuden siltä osin, ja vertaa suunnitelmia paikallisiin lupaehtoihin,
- rakennuttajan etua ja itse rakentamista valvomaan käytetään mielellään rakennusvalvontaan perehtyneitä ammattilaisia, joiden osaaminen perustuu pitkäaikaiseen kokemukseen samankaltaisista projekteista, ja jotka pystyvät valvomaan työn edistymistä, aikatauluja ja hankintoja yms.
- rakentamiseen käytetään mielellään vastaavanlaisia kohteita aiemmin rakentanutta urakoitsijaa, jolla on käytettävissään riittävän pätevä henkilöstö liittyen itse rakentamistapahtumaan ja rakenteiden asennukseen,
- rakennuksen rakenne- ja LVISA-suunnitteluun palkataan mieluiten vastaavanlaisista kohteista kokemusta ja riittävät muodolliset pätevyyydet omaavat suunnittelijat,
- rakennustarkastusviranomainen suorittaa tarkastuksia rakentamisen eri vaiheissa, yms.

Tutkittaessa kuvan 3 mukaisia suojauksia suunnittelu- tai asennusvirheiden, väärin materiaalien valinnan tai materiaalien ominaisuuksien huononemisen tai muiden ns. ennakoimattomien onnettomuustilanteiden suhteen (kts. kohta 1.1.2), suurin osa edellä olevan listan suojauksista on nimellisiä, joilla ei käytännössä ole roolia selvitetessä jonkin rakenteen kelpoisuutta, eli mm. kestävyyskäsitteitä tai turvallisuutta käyttäjilleen.

Yllä olevassa listassa ainoastaan rakennesuunnittelija edustaa merkittävää suojausvaikutusta sen takia, että hän on sopimusvastuussa rakennuttajalle tai jollekin muulle, että rakennesuunnittelu on tehty määräysten ja ohjeiden mukaisesti, ja suunnitelmissa esitetyillä rakenteilla on MRA:n 50§:n mukainen vaatimuksenmukaisuus. Riittävän pätevä (kts. Suomen RakMK A2 /19/) rakennesuunnittelija on melko hyvä suojaus yhdessä jonkin muun suojausmenettelyn kanssa, mutta 100 % suojaukseen ei muodollinen pätevyys yksin riitä.

Maankäyttö- ja rakennusasetuksen (MRA) pykälän 50 mukaiset olennaiset tekniset vaatimukset, kuten kestävyys ja turvallisuus voidaan todeta vain rakennelaskelmista. Rakennusvalvontaa suorittava viranomainen ei tarkasta suunnitelmia ja laskelmia kuin poikkeus-tapauksissa. Myöskään pääsuunnittelija-arkkitehdilla, ulkopuolisella valvojalla tai rakennuttajalla itsellään ei oleensä ole ammattitaitoa suorittaa rakennesuunnitelmien tarkastuksia.

Normaalin rakentamisorganisaation kyky havaita kohdassa 3.2.1 mainittuja vaurioitumiseen tai sortumaan johtavia vaaratekijöitä on hyvin vähäinen. Lain ja määräyksien mukaisena lähtökohtana on kuitenkin se, että kohteen rakennesuunnittelijalla on riittävä pätevyys tehtä-



vän vaatimuksenmukaisuus huomioon ottaen. Tietyn erityissuunnittelun (esimerkiksi rakennesuunnittelu) ollessa jaettu useille eri tekijöille tai firmoille, pätevyysvaatimus ilmeisesti hämärtyy. Siksi Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan on yksi rakennesuunnittelijoista nimettävä vastaamaan siitä, että kyseisen erityisalan suunnitelmat yhdessä muodostavat toimivan kokonaisuuden.

Vuonna 2003 tapahtuneissa vaurioissa ja onnettomuuksissa oli lähes kaikissa tapauksissa se yhteinen ongelma, että rakennesuunnittelu oli jakautunut moneen eri paikkaan ja useammalle kuin yhdelle firmalle, eikä suunnittelun koordinoinnista vastaavaa suunnittelijaa oltu nimetty.

Toinen yleinen ainakin osittain vaurioihin myötävaikuttanut ongelma oli se, että rakennesuunnittelija ei ollut rakennushankkeeseen ryhtyneen tahon itsensä palkkaama, vaan suunnittelijan palkkasi joko KVR-urakoitsija tai monissa tapauksissa suunnittelijat olivat eri tuotesatoimittajien palkkaamia alihankkijoita, jolloin houkutus vääränlaiseen säästämiseen oli ilmeisesti liian suuri eikä kaikkia ohjeissa mainittuja suunnitteludokumentteja tehty eikä toimitettu.

Merkittäväksi ongelmaksi koettiin se, että rakennusosapuolten väliset sopimusmallit eivät ilmeisesti kykene riittävässä määrin siirtämään alihankkijoille tietoa ja ymmärtämystä siitä, että hankkeeseen ryhtyvän tahon huolehtimisvelvollisuuteen liittyy yhdessä vastuullisten hankkijoidensa kanssa todeta rakennuksen, rakenteiden ja rakennustuotteiden vaatimuksenmukaisuudesta.

Organisaation suojauksia rakennevaurioiden ja sortumien havaitsemisen suhteen voi parantaa seuraavilla menettelyillä, joista kohteen vaativuus ja käyttäjät, tai mahdollisen sortuman seuraukset huomioon ottaen voi käyttää yhtä tai useampaa:

- valitaan pätevistä suunnittelijoista sellainen, jolla on ennestään kokemusta vastaavanlaisista rakenteista ja rakennuskohteista, ja materiaaleista,
- huolehditaan sopimusteknisesti siitä, että kyseinen riittävän pätevyyden omaava suunnittelija osallistuu henkilökohtaisesti suunnitteluun tai vähintään nimikirjoituksellaan varmentaa suunnitelmien laadun,
- valitaan suunnittelijat, joilla on omat laatujärjestelmät, ja tarkastetaan niiden käyttötapa,
- huolehditaan siitä, että päärakennesuunnittelijan koordinoititehtävän sisällöstä on selkeä kuvaus, ja että koordinoitivastuussa olevalla suunnittelijalla on riittävät resurssit ja valta hoitaa koordinoititehtävää, ja valvoa alihankkijoiden työn laatua,
- huolehditaan, että päärakennesuunnittelija vastaa kaikista muutossuunnitelmista tai osien tai materiaalien vaihdoista verrattuna suunnitteludokumenteissa esitettyihin,
- huolehditaan sopimusteknisesti siitä, että olipa suunnittelijat kenen tahansa palkkaamia, piirustusten lisäksi toimitetaan suunnitteluohjeiden mukaiset täydelliset rakennelaskelmat,
- teetetään riskianalyysi kyseisen vaativan rakennuskohteen erityispiirteistä ja identifioidaan kohdat, joiden rakenteiden mitoituslaskelmat on tarkastettava erikseen,

- annetaan rakennesuunnitelmat ulkopuolisen tarkastettavaksi,
- huolehditaan sopimusteknisesti siitä, että rakennesuunnittelija on läsnä tai suorittaa itse ainakin osan rakennuspaikalla tehtävistä rakennustarkastuksista,
- huolehditaan siitä että työmaalla ei ole oikeutta korjata, vaihtaa tai jättää pois mitään kantavan rakenteen osaa ilman ko. suunnittelijan hyväksyntää,
- huolehditaan siitä että tehdasvalmisteiset rakenteet tarkastetaan ja mahdollisesti korjataan ennen niiden asentamista paikalleen,
- huolehditaan siitä että suunnitelmista poikkeamiset raportoidaan säännöllisesti ja tarvittaessa tiedotetaan myös rakennustarkastusviranomaiselle.

### 3.3.3 Seuraamusten määrittely ja kuvaukset

Kuvan 2 mukainen rakennuksen pinta-ala on 4800 m<sup>2</sup>, eli > 1000 m<sup>2</sup>, mitä pidetään rajana luokiteltaessa yleisölle tarkoitettuja rakennuksia seuraamusluokkiin /1/. Tilaa käytetään tyyppillisesti liikuntaan ja eri urheilulajien harjoittamiseen ja harjoitteluun. Se voidaan jakaa kangasseinillä osiin, jolloin normaalitilanteessa siellä saattaa olla 100-200 henkeä sisällä joko harrastamassa lajiaan tai valmistatun oman vuoronsa alkua. Eurocode-ohjeen /1/ mukaan kyseiset tilat pitää luokitella korkeimpaan 3 seuraamusluokkaan. Eräissä tapauksissa tiloja saatetaan käyttää poikkeusluvalla esim. markkinoihin tai kokouksiin, jolloin suurin määrä ihmisiä saattaa olla jopa yli tuhat.

Seuraamukset onnettomuustilanteista, jotka on tässä luokiteltu kolmeen eri luokkaan, on osittain kuvattu jo skenaarioissa kohdassa 3.3.1. :

- vähäiset - pienet rakenteelliset vauriot / korjauskustannuksia, lyhyt käytön keskeytyminen
- haitalliset - rajalliset kattosortumat (enintään ohjeen prEN 1991-1-7 /1/ rajoitusten mukaiset) / korjauskustannukset, käytön keskeytyminen, mahdollisesti henkilövahinkoja
- vakavat - kattosortumat / korjaus- tai uusimiskustannukset, käytön keskeytyminen, mahdollisesti sortuman aiheuttamia henkilövahinkoja, mahdollinen paniikki ja seurannaisvaikutuksia.

Oheista luokittelua käytetään arvioitaessa riskiä taulukoiden 3 tai 4 mukaan!

### 3.3.4 Riskiä vähentävät toimet

Suomen Rakentamismääräyskokoelman mukaisten määräysten ja ohjeiden mukaisesti suunnittelijan ja rakentajan on jo rakennusvaiheessa ryhdyttävä toimiin, joilla vähennetään riskejä.

Käytännössä se merkitsee, että kaikki erikseen tunnistetut kohdekohtaiset riskitekijät, jotka havaitaan esimerkiksi suunnitelmien ulkopuolisen tarkastuksen yhteydessä, tulee käsitellä käytännössä kokonaan pois siten, että rakennuksen kaikilla rakenneosilla ja niiden liitoksilla on suunnitteluohjeiden mukainen varmuus kaikkien kuormitusten suhteen.

Hyväksyttävä rakenteellinen riskitaso on yhteiskunnan ja lainsäätäjän toimesta rakennettu sisään suunnitteluohjeisiin ja määräyksiin. Tästä syystä, käytännössä, riskialttiita vaikkakin mahdollisesti ohjeiden mukaisia ratkaisuja voi syntyä, jos suunnittelijan tai asennustyönjohtajan pätevyys tai kokemus on riittämätön ko. kohteen vaatimustasoon nähden.

Mikäli rakennushankkeeseen ryhtyvä taho haluaa saavuttaa tavanomaisesta suunnitteluohjeiden varmuustasosta korkeamman toimivuustason (esimerkiksi jos halutaan parempi varmuus käytön keskeytymisen suhteen), siitä pitää erikseen sopia ja valita sopimuskumppanit ko. vaatimuksen mukaisesti.

Uhat, seuraamukset riskitodennäköisyydet ja riskiä vähentävät toimet voidaan koota taulukoksi esim. Hazscanin riskianalyysimenetelmässä /14/ esitetyllä tavalla. Taulukossa 6 uhat on luokiteltu niiden seurausten vakavuuden perusteella esim. edellä olevan jaottelun mukaan. Koska riskianalyysi suoritetaan yhdelle tietylle rakennuskohteelle, taulukkoon kuuluu kaksi saraketta, joista toisessa määritellään nykyinen varautuminen (jos on varauduttu) sekä toimenpide-ehdotukset riskien vähentämiseksi, jotka siis oleellisesti riippuvat havaitusta nykytilanteesta:

Esimerkiksi ennakoimattomien rasitusten ja tilanteiden osalta, kun riskitodennäköisyyksien määrittäminen on mahdotonta tai hajonnat ovat käytännössä niin suuria, että riskejä ei voi saada suuruusjärjestykseen, uhat voidaan luokitella karkeasti esimerkiksi oheisen taulukon 3 esittämällä menetelmällä viiteen erisuuruiseen tasoon:

### Taulukko 3. Karkea riskin määrittely luokkiin /14/.

Riskin arviointiin voidaan käyttää seuraavaa karkea luokittelua, joka useimmiten antaa riittävän tarkkuuden ja on helpompi tehdä.

Tapahtuman todennäköisyys	Seuraukset		
	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	<b>1</b> (merkityksetön riski)	<b>2</b> (vähäinen riski)	<b>3</b> (kohtalainen riski)
Mahdollinen	<b>2</b> (vähäinen riski)	<b>3</b> (kohtalainen riski)	<b>4</b> (merkittävä riski)
Todennäköinen	<b>3</b> (kohtalainen riski)	<b>4</b> (merkittävä riski)	<b>5</b> (sietämätön riski)

Oheinen karkea menetelmä voi perustua yhden tai useamman asiantuntijan harkintaan, ja sillä voidaan esimerkiksi suorittaa kohdekohtainen riskianalyysi osana rakennesuunnitelmien ulkopuolista tarkastusta. Taulukossa 5 on esitelty erilaisia riskianalyysimenetelmiä ja niiden soveltuvuutta erilaisiin tapauksiin sekä analyysin tyypilliset tulokset. Myös standardissa SFS-IEC 60300-3-9 on esitelty tarkemmin sekä menetelmiä että riskiluokittelua.

Parempi riskiluokittelumenetelmä on kuvattu PORA-menetelmän (POtentialisten Rakennusvaurioiden Analysointi -työkalu) ohjeessa, missä vaarojen todennäköisyyksien (pystysarake) luokitteluun (lineaarinen) on taulukon 4 mukaisesti käytetty rakenteiden kestävyyskysymysten hyväksikäyttöastetta. Onnettomuuksien seuraamusten luokittelu taas eksponentiaalinen (taulukossa 3 lineaarinen), koska AA-luokan rakennusten suuronnettomuuksista (ainakin liikuntahallien ollessa kyseessä) on pahimmillaan seurauksena henkilövahinkoja. Riskien luokitte-

lussa on haluttu saada korostetusti esille ne rakenteet, joiden vahingoittuminen voisi johtaa henkilövahinkoihin.

**Taulukko 4.** Riskien luokittelu PORA-menetelmässä.

Tapahtuman todennäköisyys	Seuraukset		
	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	<b>1</b> (merkityksetön riski)	<b>2</b> (vähäinen riski)	<b>4</b> (kohtalainen riski)
Mahdollinen	<b>2</b> (vähäinen riski)	<b>4</b> (kohtalainen riski)	<b>8</b> (merkittävä riski)
Todennäköinen	<b>3</b> (kohtalainen riski)	<b>6</b> (merkittävä riski)	<b>12</b> (sietämätön riski)

Suositus todennäköisyysluokitteluksi:

- **”Epätodennäköinen”** kaikki sellaiset vauriotyypit, ja vaurioitumiskohdat, joissa kestävyuden hyväksikäyttöaste on alle 60 %,
- **”Mahdollinen”** kaikki sellaiset vaurioitumiskohdat, joissa hyväksikäyttöaste on välillä 60 ... 95 %, ja
- **”Todennäköinen”** kaikki sellaiset vauriotyypit ja vaurioitumiskohdat, joissa hyväksikäyttöaste suurempi kuin 95 %.

**Taulukko 5.** Riskianalyysimenetelmät, niiden soveltuvuus ja tulokset /14/.

<b>Menetelmän nimi Vaarojentunnistamis- menetelmät</b>	<b>Mihin soveltuu</b>	<b>Mihin ei sovellu hyvin</b>	<b>Tulokset</b>
- Poikkeamatarkastelu (HAZOP)	Kemialliset prosessit. Materiaalivirtojen tarkastelu.	Standardoidut järjestelmät.	Prosessihäiriöistä aiheutuvien vaarojen järjestelmällinen tutkimus.
- Potentiaalisten ongelmien analyysi (POA)	Koko laitos ja kaikki sen toiminnot.	Laitoksen osajärjestelmien yksityiskohtien järjestelmällinen tutkiminen.	Luettelo tunnistetuista kohteen vaaroista ja keskeisimpiin vaaroihin liittyvät onnettomuustekijät.
- Reaktiomatriisi	Erilaisia kemikaaleja sisältävät kohteet.	Vaarakohtien ja onnettomuustekijöiden etsiminen.	Kohteeseen liittyvien aineiden mahdolliset keskinäiset reaktiot.
- Riskien arviointi työpaikalla -työkirja	Työpaikkojen omatoiminen riskien arviointi. Tarkistuslistat toimialariippumattomia.	Muuttuva työympäristö.	Listaus työssä esiintyvistä vaara- ja kuormitustekijöistä, riskien suuruudet, toimenpideehdotukset riskien pienentämiseksi.
- Satunnaispäästöriski-analyysi (SARA)	Kaikenlaiset laitokset, koko laitos ja kaikki sen toiminnot.	Laitoksen osajärjestelmien yksityiskohtien järjestelmällinen tutkiminen vaatii osajärjestelmästä yksi-tyiskohtaista aktiviteetti- ja prosessimallinnusta. Ympäristöhaittaa aiheuttavia seurauksia tarkastellaan vain karkealla tasolla.	Luettelo tunnistetuista ympäristöhaittaa aiheuttavista kohteen vaaroista ja keskeisimpiin vaaroihin liittyvät onnettomuustekijät, niiden syyt ja seuraukset sekä varautuminen.
- Toimintovirheanalyysi (TVA)	Rajattujen ja selvän toimintosarjan muodostavien työtehtävien järjestelmällinen tutkiminen.	Muuttuva työympäristö ja jäsentymättömät työtehtävät.	Luettelo vaaroja aiheutuvista ihmisen toimintovirheistä ja ehdotuksia vaaroista aiheutuvan riskin pienentämiseksi.
- Työn turvallisuusanalyysi (TTA)	Rajatut ja toistuvat työtehtävät. Yksittäisen koneen käyttötehtävät.	Muuttuva työympäristö. Ohjaus ja valvontatehtävät. Jäsentymättömät työtehtävät.	Yksittäisen työtehtävään tai koneeseen liittyvät välittömät tapaturmavaarat.
- Työtapojen analyysi			
- Vaarallisten skenaarioiden analyysi (HAZSCAN)	Koko laitos ja kaikki sen toiminnot.	Laitoksen osajärjestelmien yksityiskohtien järjestelmällinen tutkiminen vaatii osajärjestelmästä yksi-tyiskohtaista aktiviteetti- ja prosessimallinnusta.	Luettelo tunnistetuista kohteen vaaroista ja keskeisimpiin vaaroihin liittyvät onnettomuustekijät, niiden syyt ja seuraukset sekä varautuminen. Löydetään turvallisuuden kannalta keskeiset järjestelmän osat.
- Vika- ja vaikutusanalyysi (VVA)	Rajatut tekniset järjestelmät. Laajoihin kohteisiin vain karkealla tasolla.	Koko laitoksen tutkiminen. Vikakombinaatioiden tutkiminen.	Komponenttien voittumistavat. Komponenttivikojen vaikutus itse järjestelmän toimintaan.

Taulukko 5 jatk. Riskianalyysimenetelmät, niiden soveltuvuus ja tulokset.

<b>Menetelmän nimi</b> <b>Vaihtoehtoiset menetelmät</b>	<b>Soveltuu</b>	<b>Ei sovellu hyvin</b>	<b>Tulokset</b>
- Tarkistuslistat	- yksinkertainen, soveltuu kaikkeen, yhden henkilön työväline	- riskien suuruutta ei ilmoiteta kohdekohtaisesti, monien tarkempien menetelmien lähtökohta	- Tapauskohtainen arvio toimenpiteiden kohdistamiseksi
- Suunnittelukatselmus	- monitorointi, kriittisten tekijöiden huomioon ottaminen varmennetaan	- tarkempi riskianalyysi, seurausten suuruuksien arviointi	- Tapauskohtainen tilanteen arvio. Jatkotoimet koordinoitu.
- Tilamalli	- hälytys- ja valmiustilat ohjelmoiden toiminnan käynnistämiseksi, yms.	- jatkuva prosessi- tai projektitoiminta.	- Päätös tilan säilyttämisestä tai sen muuttamisesta, ja toiminnan käynnistämisestä.
<b>Onnettomuuksien Mallintamismenetelmät</b>			
- Syy-seuraus-kaavio (SSK)	Kriittisen alkutapahtuman seurausten tutkiminen. Monimutkaisten syy-seuraus-suhteiden tutkiminen.	Järjestelmän ongelma-alueiden etsiminen.	Vaihtoehtoiset tilanteet, joihin kriittinen alkutapahtuma saattaa johtaa. Järjestelmän kriittiset tilat.
- Tapahtumapuuanalyysi (TPA)	Ajallisesti etenevien tapahtumaketjujen tutkiminen. Vaihtoehtoratkaisujen kvantitatiivinen vertailu.	Vaarojen syiden tunnistaminen. Monimutkaisten syy-seuraus-suhteiden kuvaaminen.	Valittua alkutapahtumaa seuraavat mahdolliset onnettomuusketjut. Ehdotuksia kriittiseen alkutapahtumaan liittyvien seurausten pienentämiseksi.
- Vikapuuanalyysi	Vakavien onnettomuusmahdollisuuksien yksityiskohtainen tutkiminen. Vaihtoehtoratkaisujen kvantitatiivinen vertailu.	Huipputapahtuman seurausten analysoiminen.	Osoittaa vaaran kannalta tärkeät vikakombinaatiot. Pienimmät vikakombinaatiot ja yhteisviat, jotka aiheuttavat vaaran.

Taulukossa 5 mainitut "Potentiaalisten ongelmien analyysi" ja "Vaarallisten skenaarioiden analyysi" (Hazscan) voidaan tehdä karkeasti taulukossa 6 esitetyllä kaavakkeella, missä työryhmässä laaditaan kohdekohtaisesti käsitys mahdollisista uhkatilanteista ja niiden toteutuksessa aiheutuvista seurauksista. Uhkat ja riskit on helppo luokitella taulukon 4 mukaisesti esim. niiden seurausten perusteella, vaikka niitä ei kvantifioisikaan rahaksi asti. Samalla voi tehdä ja kirjata päätökset kuinka uhkaa pienennetään tai mitä toimenpiteitä siinä käytetään.

Rakennetekniikassa ei riskianalyysin tulosten käsittelyn jälkeen saa jäädä jäljelle ylimääräisiä käsittelemättömiä riskejä. Hyväksyttävä riskitaso sisältyy suunnitteluohjeiden mukaiseen suunnitteluun. Periaatteessa riskianalyysillä tunnistetaan ne kohdat rakenteesta, joiden laskelmat ja suunnitelmat tulee tarkastaa erityisen huolellisesti, tai missä rakennuksen lopullinen laatu riippuu useammasta kuin yhdestä suorittajasta. Riskianalyysi alustaa asiantuntevasti suoritettua rakennesuunnitelmien ulkopuolista tarkastusta.

### 3.3 Kvantitatiivinen riskianalyysi

Kvantitatiivinen riskianalyysi on kuvattu Eurocode-ohjeessa /1/ kohdassa "Soveltaminen talonrakennukseen ja muihin insinöörirakenteisiin". Se on kuvattu myös standardissa SFS-IEC 60300-3-9. Kvantitatiivinen riskianalyysi soveltuu periaatteessa kaikkiin sellaisiin tapauksiin, missä analyysitulosten soveltamiseen liittyy valinta siitä, minkä suuruinen riski on hyväksyttävä ko. tapauksessa. Rakentajien näkökulmasta katsoen se soveltuu käytännössä kaikkien samojen rasiusten ja kuormitusten tutkimiseen kuin mitä käsitellään toiminnallisen suunnittelun periaatteilla.

Rakennusten ja muiden insinöörirakenteiden, joihin saattaa vaikuttaa äärimmäisiä tapahtumia, ko. tapahtumiin liittyvien riskien vähentämiseksi pitää harkita käytettäväksi yhtä tai useampaa alla mainituista toimista:

- Rakenteelliset toimenpiteet, jolloin suunnitellaan vahvoja rakenteellisia elementtejä tai suunnitellaan rakenne siten, että kuorma pystyy kulkemaan vaihtoehtoista reittiä pitkin siinä tapauksessa, että tapahtuu paikallinen vaurioituminen.
- Muut kuin rakenteelliset toimenpiteet, eli pienentämällä tapahtuman todennäköisyyttä tai tapahtumasta aiheutuvan kuormituksen intensiteettiä tai seurauksia.

Kaikkien onnettomuuksien ja muiden äärimmäisten rasiusten (tuli, maanjäristys, törmäys, räjähdys, äärimmäinen ilmastollinen rasius) todennäköisyyksiä ja vaikutuksia tulee pitää selvittää tietyllä sopivasti harkitulle joukolle mahdollisia tapahtumaskenaarioita. Sen jälkeen tapahtumien seuraukset pitää arvioida kuolemantapausten lukumäärinä ja taloudellisina menetyksinä. Riskianalyysin tuloksena määritetään suunnittelurajatilat ko. tapahtuman osalta.

Käytännön esimerkki tulipaloriskien analysoimisesta löytyy lähdeoteesta /9/ "Yksikerroksisen pienteollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen". Siinä on kehitetty malli tulipalojen aiheuttamien vahinkojen riskien suuruuden laskennalliseen arvioimiseen. Mallia on sovellettu sen selvittämiseen, miten yksikerroksisen teollisuushallin henkilö- omaisuusvahinkoriskit riippuvat rakenteiden palonkestävyydestä. Eri tekijöiden vertailemiseksi tutkittiin myös sitä, miten kohderakennuksen paloturvallisuusvarusteiden eri muunnelmat vaikuttavat paloturvallisuuteen.

Vastaavalla tavalla voidaan mallintaa myös muut tunnetut onnettomuuskuormat, yhdistämällä ko. rasituksen aikana tapahtuvien erilaisten prosessien kehittymisen mallit kuvaukseksi koko tapahtuman kehityksestä. Esimerkiksi seismisen kuorman, räjähdysten ja törmäyksen osalta suunnitteluohjeista on kunkin osalta löydettävissä aikariippuvat mallit siitä kuinka rakenteet vastaavat kuormitukseen. Mallin toiminta voi perustua esimerkiksi systeemin tapahtumapuu-kuvaukseen, jonka perusteella tapahtuman aikakehitys saadaan laskettua käsittelemällä yksittäisten hyvin tunnettujen erillisten tapahtumien järjestelmää Markovin prosessina, missä yhdestä tilasta voidaan siirtyä useampaan uuteen tilaan, ja kullekin siirtymiselle on onnettu jokin todennäköisyys  $p_{jk}$ . Erilaisten jälkitilojen yhteinen todennäköisyys on summa eri

jälkitilojen todennäköisyyksistä  $\sum_{k=1}^{\infty} p_{jk} = 1.0$ . Riskien suuruus saadaan määritettyä, kun

tapahtuman ajallisen kehittymisen kuvaukseen liitetään tapahtumasta mahdollisesti aiheutuvien seuraamusten kvantitatiivinen arviointi.

Yksi esimerkki muunlaisista tunnetuista onnettomuustapahtumista ja kuormituksista, joiden analyysissä on käytettävissä edellä kuvattua menettelyä, löytyy netistä /10/. Se käsittelee rautatieliikenteen onnettomuusriskejä ja liikenteen turvaamistoimenpiteitä.

Edellä mainittu lähestymistapa, voi olla epäsoviva sellaisten uhkien osalta, joita ei pystytä enustamaan (suunnittelu tai rakentamisvirheet, odottamaton heikkeneminen, jne.). Siitä johtuen on kehitetty yleispätevämpiä vauriosietoisia suunnittelumenetelmiä, esimerkiksi klassiset vaatimukset koskien rakenteiden riittävää sitkeyttä, ja rakenteiden sitomista yhteen. Yksi erityinen lähestymistapa, tässä suhteessa, on sen tilanteen tarkastelu, missä jokin rakenteellinen elementti (palkki, pilari) on vaurioitunut, mistä tahansa tapahtumasta johtuen, niin paljon, että sen normaali kuormankantokyky on kadonnut lähes kokonaan. Tällöin jäljelle jäävältä rakenteelta vaaditaan, että rakenne jonkin suhteellisen lyhyen ajan (korjausaika) pystyy kestäämään ”normaalit” kuormansa jollakin ennaltamäärätyllä todennäköisyydellä:

$$P(R < S \text{ ajan } T \mid \text{ yksi elementti poissa}) < p_{\text{tavoite}}$$

Tavoitetodennäköisyys  $p_{\text{tavoite}}$  riippuu rakennuksen normaalista turvallisuustavoitteesta, tarkasteltavasta ajanjaksosta (tuntia, päiviä tai kuukausia) ja sen todennäköisyydestä, että tarkasteltava elementti poistuu (muista syistä kuin on aiemmin otettu huomioon suunnittelussa).

Tavanomaisilla rakennuksilla pitää kaikki olennaiset sortumismekanismit ottaa suunnittelussa huomioon. Murtumissytyt, joilla on vain mitättömän pieni tapahtumatodennäköisyys, voidaan jättää ottamatta huomioon, jos harkinnassa siihen päädytään, ja päätöksen syyt esitetään dokumenteissa.

Kvantitatiiviseen riskianalyysiin liittyy joukko osatehtäviä, joita ei tässä käsitellä tarkemmin syystä, että kvantitatiivinen riskianalyysi ei sellaisenaan sovellu kohdekohtaiseen normaalien rakennusten ja rakenteiden kestävyys- ja turvallisuuteen liittyvien vaikeasti ennakoitavien vaurioiden ja onnettomuuksien riskien tutkimiseen kohdekohtaisesti.

Kvantitatiivisessa riskianalyysissä on tarkoitus määrittää tai tehdä seuraavat osatehtävät:

- Kohteen raja- ja kuvaus,



- riskilähteiden kuvaus, ja välittömät toimenpiteet,
- riskimallien määrittely, joka koostuu syiden ja seurausten analysoimisesta,
- onnettomuuksien todennäköisyyksien ja seurausten arviointi,
- riskien arviointi, ja välittömät toimenpiteet,
- riskien alentamistoimenpiteiden tunnistaminen, ja niiden kustannukset,
- kustannushyötyanalyysi, ja päätös toteutettavista toimenpiteistä,
- dokumentointi.

