

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma / Rakennetekniikka

Juho Eskelinen

JATKUVA SORTUMA JA RAKENNUSTEN SISÄPUOLINEN RÄJÄHDYS

Opinnäytetyö 2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka

ESKELINEN, JUHO

Kirjallisuuskatsaus jatkuviin sortumiin ja rakennusten sisäpuolisiin räjähdyksiin

Opinnäytetyö

36 sivua

Työn ohjaaja

lehtori Juha Karvonen

Toimeksiantaja

Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky

Kesäkuu 2014

Avainsanat

onnettomuuskuormat, jatkuva sortuma, rakennusten sisäpuoliset räjähdykset, eurokoodit

Tämän opinnäytetyön aiheena ovat jatkuvat sortumat, joita käsitellään onnettomuuskuormien näkökulmasta. Sen lisäksi opinnäytetyössä esitellään rakennusten sisäpuolisia räjähdyksiä. Työn tavoitteena oli luoda kokonaiskuva ja kattava kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Opinnäytetyössä on käytetty lähteinä alan kotimaisia ja ulkomaisia artikkeleita ja kirjallisuutta sekä erilaisia verkkolähteitä. Opinnäytetyössä käytetään sovelusesimerkkinä Kotkan Sunilaan rakennettavaa rakennusta, jonka sisällä on turpeen käsittelyn takia räjähdysriski.

Onnettomuuskuormat ovat yllättäviä, usein dynaamisia kuormia rakenteisiin. Tällaisia ovat esimerkiksi räjähdys ja törmäys. Jatkuvasta sortumasta on olemassa erilaisia sortumatyyppejä, joita ovat muun muassa pannukakku- ja dominosortuma. Tarkasteluilla käydään läpi esimerkkejä näistä sortumatyypeistä. Rakennusten sisäpuoliset räjähdykset tulee ottaa huomioon suunniteltaessa rakennuksia, joissa ollaan tekemisissä räjähtävän materiaalin kanssa.

Tästä opinnäytetyöstä nousi esille useita suunnittelutyöhön liittyviä havaintoja ja johdopäätöksiä. Onnettomuuskuormat ovat lähes aina yhteydessä jatkuvien sortumien syntyyn. Lisäksi paineen purkaminen ja lisäräjähdysten estäminen ovat suunnittelutyössä tärkeimpiä vaiheita, kun halutaan minimoida jo tapahtuneen räjähdysten vahinkoja. Rakentamiseen varattavat taloudelliset resurssit tulee aina arvioida suunnitteluvaiheessa niin, että jatkuvan sortuman riski on otettu huomioon tarkoituksenmukaisella tasolla. Toisin sanoen rakenteiden sortumariskin vuoksi rakenteita ei pidä kuitenkaan ylittää. Suurimpia sortumien ketjureaktioita voidaan ehkäistä parhaiten välttämällä jatkuvia rakenteita. Toisaalta ilman jatkuvia rakenteita paikallisten vaurioiden riski voi kasvaa.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Construction Engineering

ESKELINEN, JUHO

Literature Review about Progressive Collapses and Explosions Inside Buildings

Bachelor's Thesis

36 pages

Supervisor

Juha Karvonen, Senior Lecturer

Commissioned by

Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky

June 2014

Keywords

Accidental actions, progressive collapse, explosions inside buildings, eurocode

The main topics of this bachelor's thesis are progressive collapses, explosions inside buildings and accidental actions such as crashes, earthquakes and explosions. Progressive collapses are processed from accidental actions' point of view. The objective of this bachelor's thesis was to create a thorough literature review about the topics mentioned. The main sources of information used in this thesis were various domestic and foreign articles, literature, and web-sources. The presented theoretic background will be applied to a building-in-progress, which is located in Kotka. The building has a risk of an explosion due the chemicals used inside it. Required venting-area for dust explosions is also calculated at the end of this example. The venting-area means the required area (for instance a part of a wall or roof) that opens up when an explosion occurs inside the building.

Explosions inside buildings must be taken into account when designing buildings where explosive material is being handled and in buildings that hold explosive material etc. Accidental actions are sudden, usually dynamic forces that affect the structures. Crashes and explosions are considered as such sudden forces. There are many different types of collapses such as domino-type collapses and pancake-type collapses. Examples of these different collapse-types are also presented and discussed in this thesis.

Many conclusions arose from this thesis. The most important ones addressed in this thesis were that accidental actions are usually always at least a partly reason of progressive collapse. In addition, releasing the pressure and preventing a chain of additional explosions are the most important aspects when minimizing the damage of an explosion. Most of the larger collapse chains can be avoided by avoiding continuous structures, although the risk of local damage rises if the structures are not continuous enough. The financial resources should always be estimated in the pre-design phase when considering about the allowed risk level of progressive collapses and undefined accidental actions.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 5 |
| 2 | ONNETTOMUUSKUORMISTA | 5 |
| | 2.1 Perusteet ja seuraamusluokat | 5 |
| | 2.2 Räjähdykset | 7 |
| | 2.3 Törmäykset | 8 |
| | 2.4 Tulipalot | 8 |
| | 2.5 Maanjäristykset | 8 |
| 3 | JATKUVA SORTUMA | 9 |
| | 3.1 Perusteet | 9 |
| | 3.2 Onnettomuuskuormiin liittyvät toimintaperiaatteet jatkuvan sortuman estämiseksi | 11 |
| 4 | YLEISIMMÄT SORTUMATYYPIT JA ESIMERKIT MAAILMALTA | 14 |
| | 4.1 Pannukakkusortuma | 14 |
| | 4.2 Dominosortuma | 16 |
| | 4.3 Vetoketjusortuma | 18 |
| | 4.4 Yhdistelmäsortuma | 19 |
| 5 | RAKENNUKSEN SISÄPUOLINEN RÄJÄHDYS | 19 |
| | 5.1 Paineenpurkausluukut ja-seinät | 21 |
| | 5.2 Sovellusesimerkki | 24 |
| | 5.3 Paineenpuhalluspinta-alan laskenta | 28 |
| 6 | YHTEENVETO | 31 |
| 7 | POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 33 |
| | LÄHTEET | 35 |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön on tilannut Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky. Yrityksen päätoimialat ovat rakennesuunnittelu ja rakennuttajapalvelut. Yritys on perustettu vuonna 1975, ja sen toimipiste sijaitsee Kotkassa. Opinnäytetyön ohjaajana ja yhteishenkilönä yrityksestä toimii Risto Nuotio.

Rakennesuunnittelussa tulee tarvittaessa ottaa huomioon onnettomuuskuormia. Näistä kuormista ei ole kirjallisuudessa tai muualla materiaalia, jossa aihetta käsiteltäisiin kokonaisvaltaisesti. Työn tilaaja halusi lisätietoa rakennusten sisäpuolisista räjähdyksistä, sillä heidän tulevassa suunnittelukohteessaan on räjähdysvaara. Tavoitteena on siis tehdä kirjallisuuskatsaus jatkuvasta sortumasta ja onnettomuuskuormista, sekä rakennusten sisäpuolisista räjähdyksistä.

Opinnäytetyössä on käytetty tiedonkeruussa lähteinä alan kirjallisuutta ja verkkolähteitä. Työssä tarkastellaan muutamia esimerkkikohteita, joissa on tapahtunut jatkuva sortuma. Lisäksi myöhemmin syvennyttään esimerkkikohteeseen, jossa käsitellään rakennuksen sisäpuolista räjähdystä.

2 ONNETTOMUUSKUORMISTA

Tässä kappaleessa käsitellään aluksi onnettomuuskuormien perusteita ja seuraamusluokkia. Seuraavaksi käydään läpi erilaisia onnettomuuskuormia, kuten räjähdyskuormia, törmäyksiä ja maanjäristyksiä.

2.1 Perusteet ja seuraamusluokat

Onnettomuuskuormat ovat yleensä dynaamisia kuormia, jotka syntyvät yllättäen rakennelmiin. Näitä yllättäviä tapahtumia voivat olla esimerkiksi räjähdykset ja törmäykset. Ominaisista niille on se, että ne esiintyvät harvoin ja niillä on yleensä vakavat seuraukset rakenteisiin. Eurokoodien mukaan rakennuksen tulee olla toimintakykyinen onnettomuuden jälkeen vähintään niin kauan, että ihmiset pääsevät poistumaan rakennuksesta ja sen välittömästä läheisyydestä. Aika on pidempi rakennuksissa, joissa käsitellään esimerkiksi vaarallisia aineita tai turvataan oleellisen tärkeitä palveluita. (SFS-EN 1991-1-7, 52.) Tällaisia rakennuksia ovat esimerkiksi erilaiset kemikaalitehtaat tai suuret ostoskeskukset.

Kun onnettomuuskuormia lasketaan, niitä tulee käsitellä yhdessä pysyvien ja muuttuvien kuormien kanssa. Rakenteiden varmuus tulee ottaa välittömästi huomioon onnettomuuskuormien esiintymisen jälkeen. (SFS-EN 1991-1-7, 52.)

Rakennuskohteet luokitellaan seuraamusluokkiin niiden käyttötarkoitusten ja vaurion tai vian seuraamuksen vakavuuden suhteen. Suunnittelutyö toteutetaan näiden luokkien tuomien vaatimusten mukaisesti. Toisin sanoen suunniteltavaa rakennusta arvioidaan onnettomuuskuormien esiintymistodennäköisyyden ja seuraamusten perusteella ennen suunnittelua. Tämän tuoman riskitason mukaan sille määritellään seuraamusluokka. Seuraamuksia voivat olla mm. taloudelliset vahingot, turvallisuustoimenpiteiden kustannukset ja ihmisvahingot. (SFS-EN 1991-1-7, 52 – 54.)

Käytännön suunnittelussa tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi suuria ostoskeskuksia suunniteltaessa suunnittelija saa paljon tiukemmat määräykset huomioon otettavaksi verrattuna vaikkapa kesämökin rakentamiseen. Ostoskeskuksissa on enemmän ihmisiä ja omaisuutta, jonka takia vaurioitumisen seuraamukset voivat olla huomattavia.

Seuraamusluokat jaetaan kolmeen eri pääluokkaan, CC1, CC2 ja CC3. Taulukko 1 selventää seuraamusluokkien jaotteluperusteita. (SFS-EN 1991-1-7, 28.)

Seuraamusluokat määritellään seuraavasti:

- CC1: Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
- CC2: Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
- CC3: Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 136.)

Taulukko 1. Onnettomuustilanteiden seuraamusluokista (SFS-EN 1991-1-7, 54.)

Taulukko A.1 Seuraamusluokkiin jaottelu

| Seuraamusluokka | Rakennuksen tyypin ja käyttötarkoituksen mukainen luokitus |
|---------------------------------|--|
| 1 | Rivitalon tyyppiset rinnakkaisia huoneistoja käsittävät enintään nelikerroksiset talot Maatalousrakennukset Rakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä ja jos mikään rakennuksen osa ei ole muuta rakennusta tai ihmisten käyttämää tilaa rakennuksen puolitoistakertaista korkeutta lähempänä. |
| 2a Melko pienen riskin ryhmä | Rivitalon tyyppiset rinnakkaisia huoneistoja käsittävät 5-kerroksiset talot Enintään 4-kerroksiset hotellit Enintään 4-kerroksiset asuintalot Enintään 4-kerroksiset toimistot Enintään 3-kerroksiset teollisuusrakennukset Enintään 3-kerroksiset vähittäismyymälät, joiden jokaisen kerroksen lattiapinta-ala on alle 1 000 m ² . Yksikerroksiset oppilaitosrakennukset Kaikki enintään kaksi kerrosta käsittävät julkiset rakennukset, joiden lattiapinta-ala kerrosta kohti on enintään 2 000 m ² . |
| 2b Melko suuren riskin ryhmä | Yli 4-kerroksiset, mutta enintään 15-kerroksiset hotellit ja asuinrakennukset Yli yksikerroksiset, mutta enintään 15-kerroksiset oppilaitosrakennukset Yli kolmikerroksiset, mutta enintään 15-kerroksiset vähittäismyymälät Enintään 3-kerroksiset sairaalat Yli nelikerroksiset, mutta enintään 15-kerroksiset toimistot Kaikki julkiset rakennukset, joiden lattiapinta-ala kerrosta kohti on yli 2 000 m ² , mutta enintään 5 000 m ² . Enintään 6 kerrosta käsittävät pysäköintilaitokset. |
| 3 | Kaikki edellä melko pienen tai melko suuren riskin seuraamusluokkaan 2 määritellyt rakennukset, jotka ylittävät kerrosten pinta-alaa tai lukumäärää koskevat rajat Kaikki rakennukset, joihin kokoontuu suuria yleisömääriä Stadionit, joille mahtuu yli 5 000 katsojaa Rakennukset, jotka sisältävät vaarallisia aineita tai joissa käytetään vaarallisia prosesseja. |

HUOM. 1 Moneen erityyppiseen tarkoitukseen käytettävän rakennuksen "seuraamusluokka" valitaan suurimman riskin ryhmään kuuluvan osan mukaan.

HUOM. 2 Kerrosten lukumäärää laskettaessa pohjakerroksia ei tarvitse laskea mukaan, mikäli pohjakerrokset täyttävät "seuraamusluokan 2b melko suuren riskin ryhmän" vaatimukset.

HUOM. 3 Taulukko A.1 ei ole kattava ja sitä voidaan muuttaa.

2.2 Räjähdykset

Räjähdykset voi johtua esimerkiksi pölyn tai kaasun nopeasta kemiallisesta reaktiosta, joka aiheuttaa paineaallon ja lämpötilan äkillisen nousun. Räjähdykset tulee ottaa huomioon jokaisessa kohteessa, missä kaasua poltetaan tai sitä ohjataan ja kohteissa, joissa varastoidaan tai kuljetetaan räjähtävää materiaalia. (SFS- EN 1991-1-7, 48.)

Rakennuksen sisäpuolisia räjähdyksiä käydään tarkemmin läpi opinnäytetyön luvussa 5.

2.3 Törmäys

Törmäyskuormien aiheuttajia rakennukseen, rakenteeseen tai rakennelmaan voivat olla esimerkiksi auton törmäys seinään parkkihallissa, laivan törmäys laituriin tai jopa helikopterin törmäys katolle kovan laskeutumisvauhdin takia. Törmäyskuormia käsitellään liikkuvina kuormina rakennesuunnittelussa. Rakennuksissa törmäyskuormat tulee ottaa huomioon pysäköintitiloissa, rakennuksissa, joissa autot tai haarukkatrukit kulkevat, ja rakennuksissa jotka sijaitsevat joko tie- tai rautatieliikenteen välittömässä läheisyydessä. (SFS-EN 1991-1-7, 30.)

2.4 Tulipalo

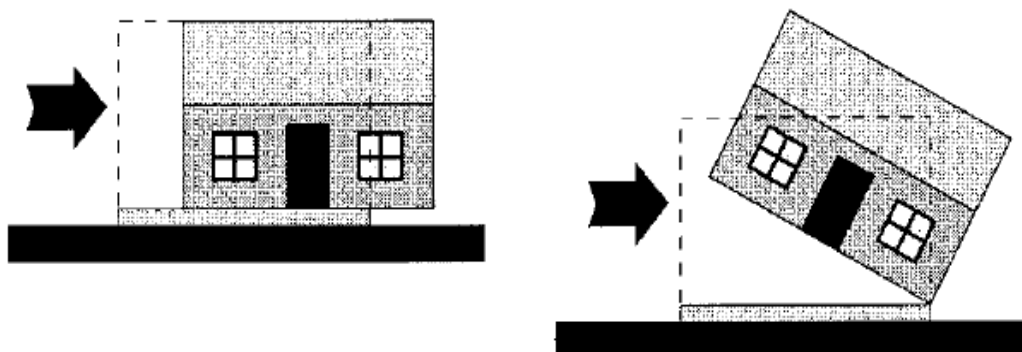
Tulipaloja, jotka aiheuttavat vaurioita rakennukseen, pidetään onnettomuustilanteina. Palosta aiheutuvat lämpötilan muutokset aiheuttavat materiaalien lujuuden heikkene- mistä sekä erilaisia muodonmuutoksia, jotka aiheuttavat voimia ja momenteja raken- teisiin. (Salminen 2009, 19.)

Palotilannetta mitoitettaessa ei yleensä tarvitse ottaa muita onnettomuuskuormia huo- mioon, elleivät muut onnettomuuskuormat erityisesti aiheuta palovaarallisia tilanteita. (Salminen 2009, 19.)

2.5 Maanjäristys

Maanjäristykset ovat mannerlaattojen liikkeistä johtuvaa peruskallion värähtelyä. Maanjäristysten aiheuttamat seismiset kuormat ovat syklisiä eli ne muuttavat äkillises- ti suuntaansa sekä vaaka- että pystysuunnassa. Tämän takia rakenteet olisi hyvä suun- nitella maanjäristysalueella sitkeiksi. Seismisillä alueilla rakennusten ankkurointi pe- rustuksiin on myös hyvin tärkeää, jotta rakennus ei lähde liikkumaan (kuten kuvassa 1 on esitetty). Korkeammat rakennukset voivat jopa kaatua maanjäristyksen iskiessä. (Toratti 2001, 8, 22, 38.)

Kuva 1. Ankkuroinnin merkityksestä (Toratti, 2001, 39.)



u

Suomessa maanjäristykset ovat harvinaisia ja voimakkuudeltaan pieniä, eikä niitä tarvitse ottaa suunnittelussa huomioon. Tästä syystä Suomessa ei ole erillisiä ohjeita eurokoodien lisäksi maanjäristysten aiheuttamien kuormien huomioon ottamiseksi.

3 JATKUVA SORTUMA

Tässä luvussa käsitellään jatkuvaa sortumaa käymällä erilaisia sortumatyyppejä läpi. Ohessa kerrotaan esimerkkejä sortumatyypeistä erilaisten lähistoriassa tapahtuneiden sortumatapausten kautta. Tämän lisäksi esitellään suunnittelutyössä huomioon otettavia toimintaperiaatteita eurokoodien pohjalta määrätyille ja määrittelemättömille onnettomuuskuormille.

3.1 Perusteet

Jatkuvalla sortumalla tarkoitetaan tilannetta, kun rakennuksen tai rakennelman paikallisesta vauriosta seuraa ketjureaktiona tapahtuva sortuma. Silloin rakennus, tai merkittävä osa siitä, sortuu kokonaan. Paikallisella vauriolla tarkoitetaan tilannetta, jossa rakenteen yksi osa vaurioituu, myötää tai menettää stabiliteettinsa. Esimerkiksi yhden pilarin pettäminen luokitellaan paikalliseksi vaurioksi. Paikallinen vaurio voi syntyä, kun rakennuksen yksittäiseen rakenneosaan tai useisiin rakenneseisiin kohdistuu onnettomuuskuorma. Onnettomuuskuormat lisäävät aina henkilövahinkojen riskejä. Onnettomuuskuorma voi olla esimerkiksi tulipalo, törmäys, räjähdys tai niiden yhdistelmä. (Rakennusteollisuus Oy 2006, 12 – 15.)

Rakenteiden jatkuvuus antaa otolliset mahdollisuudet jatkuvan sortuman syntyyn. Kun tehdään jatkuvia rakenteita vaikkapa paremman lujustechnisen käyttöasteen takia, riski jatkuville sortumille kasvaa. Tämä voi olla ongelmana etenkin teräsrakentamisessa, kun rakenteet ovat usein jatkuvia. Toisaalta jos rakenteissa ei ole jatkuvuutta, rakenneosien materiaaliviat ja valmistusviat korostuvat. Tämä voi lisätä paikallisten vaurioiden ja sortumien vaaraa. (Rakennusteollisuus Oy 2006, 12 – 15.)

Paikallinen vaurio voi myös tapahtua rakentamisen aikana. Näin voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun rakennusta rakennettaessa työnaikaiseen stabiliteettiin ei kiinnitetä riittävästi huomiota. Tämä on riskinä esimerkiksi silloin, kun väliaikaiset tuennat poistetaan liian aikaisin. Tällöin rakenteet eivät ole välttämättä tarpeeksi jäykkiä kestämään edes omaa painoaan tukemattomina. (Rakennusteollisuus Oy 2006, 12 – 15.)

Eurokoodien mukaan rakennesuunnittelussa pitäisi pyrkiä siihen, että paikallinen vaurio ei koskaan aiheuttaisi jatkuvaa sortumaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi monikerroksisen talon pitää pysyä pystyssä, vaikka yksi pilari menettäisi kantavuutensa tulipalon tai törmäyksen takia. Tällöin rakennus on suunniteltu oikein ja paikallisen vaurion eteneminen on estetty. (Rakennusteollisuus Oy 2006, 12 – 15.)

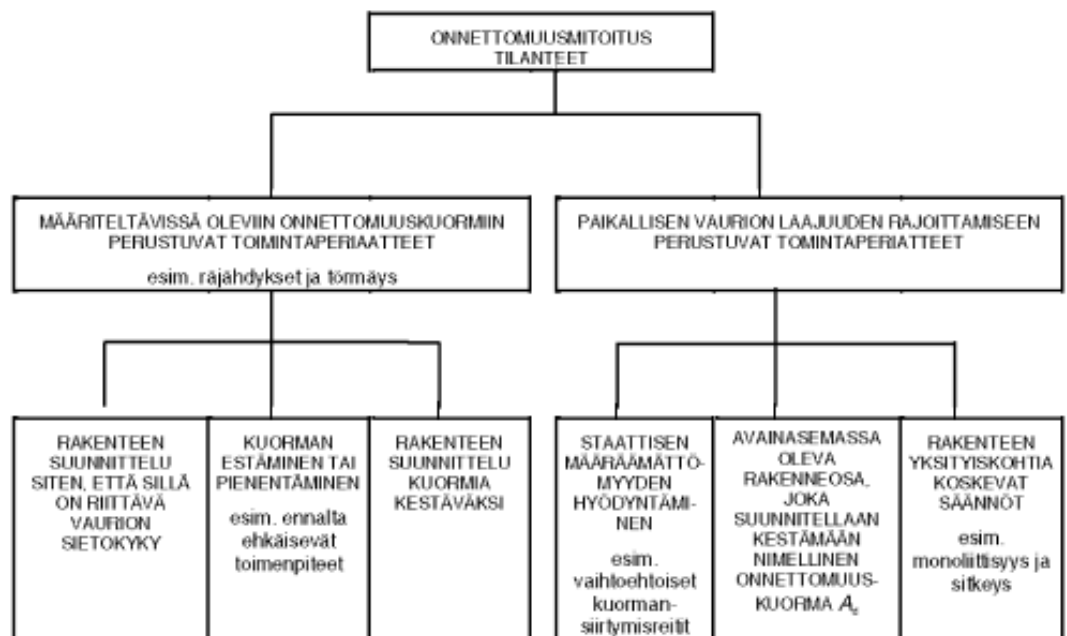
Jatkuva sortuma voidaan rakennesuunnittelussa ottaa kuitenkin huomioon pääasiallisesti kahdella tavalla. Paikallisen vaurion synty voidaan estää joko mitoittamalla rakenteet onnettomuuskuormille tai rajoittamalla paikallisen vaurion leviäminen. (SFS-EN 1991-1-7, 24.)

Jatkuva sortuma voi tapahtua myös ns. ennakoimattomien onnettomuustapauksien takia, eikä siihen liity varsinaista onnettomuuskuormaa. Näistä tapauksista ei ole olemassa tilastotietoja ja ne voivat tapahtua ilman mitään ulkoista syytä. Kun tällainen onnettomuus tapahtuu äkillisesti, taustalla on lähes aina osasyynä suunnitteluvirhe. Lisäksi tämänlaisissa tilanteissa on myös lähes aina muitakin taustatekijöitä. Näitä voivat olla suunnitteluvirheen lisäksi esimerkiksi asennus-, valmistus-, tai käyttövirhe. Rakennusmateriaalien ominaisuudet voivat myös muuttua rakennuksen käytön aikana enemmän kuin on alunperin arvioitu. Nämä ovat kuitenkin useimmiten yksittäisiä tapauksia, joiden estäminen on yleisesti hyvin hankalaa. (Rakennusteollisuus Oy 2006, 12 – 15.)

3.2 Onnettomuuskuormiin liittyvät toimintaperiaatteet jatkuvan sortuman estämiseksi

Eurokoodien mukaan onnettomuuskuormien aiheuttamaa vauriota voidaan pitää hyväksyttävänä, jos se ei vaaranna koko rakenteen stabiiliutta, rakenteet kokonaisuutena säilyttävät kestävyytensä ja välttämättömät pelastustoimenpiteet voidaan suorittaa. Onnettomuuskuormat voidaan jakaa kahteen osaan. Ensimmäinen näistä on määriteltävät onnettomuuskuormat, kuten tavanomaiset törmäyskuormat, räjähdyskuormat tiloissa missä käsitellään räjähdysherkkää materiaalia, tai tulipalon tuoma kuormitus rakennukselle. Tämän lisäksi vaativan seuraamusluokan rakennuksia, kuten suuria stadioneita tai ostoskeskuksia suunniteltaessa pitää ottaa huomioon kuormia, jotka ovat määrittelemättömiä, joita käsitellään tämän luvun loppuosassa. (SFS-EN 1991-1-7, 24.)

Kuva 2. Onnettomuustilanteiden käsittelyn toimintaperiaatteet rakenteiden suunnittelussa. (SFS-EN 1991-1-7, 24.)



Onnettomuuskuormien tuomista seurauksista sovitaan aina hankekohtaisesti tilaajan ja asianomaisen viranomaisen kanssa. Määriteltävissä olevien onnettomuuskuormien huomioon ottaminen riippuu seuraavista asioista (SFS-EN 1991-1-7, 24.):

- Onnettomuuskuormasta johtuvien vaurioiden seuraamuksista, eli mitä seuraa jonkun tietyn rakenneosan vaurioitumisesta.
- Toimenpiteistä joihin on jo ryhdytty onnettomuuskuorman estämiseksi tai sen vaikutuksen pienentämiseksi.
- Onnettomuuskuorman esiintymistodennäköisyydestä, ja yleisestä suhtautumisesta vaurioitumiseen.
- Hyväksyttävästä riskitasosta, eli mihin seuraamusluokkaan kohde kuuluu.
 - o Tämä tarkoittaa periaatteessa taloudellisten resurssien mitoittamista riskitasoa pienentäessä kun minimoidaan onnettomuuskuormien vaikutuksia.
 - o Kaikissa kohteissa ei tarvitse minimoida onnettomuuskuormien riskejä niin paljoa. Näitä kohteita voivat olla sellaiset, joissa ihmishenkien menetyksvaaraa ei ole, sekä taloudelliset, yhteiskunnalliset ja ympäristölliset seuraamukset ovat merkityksettömiä. (SFS-EN 1991-1-7, 24.)

Pääperiaatteina suunnittelussa määrättyjä onnettomuuskuormia vastaan, kuten räjähdystä ja törmäystä voidaan käyttää(SFS-EN 1991-1-7, 26):

- Suunnitellaan rakenne siten, että sillä on riittävä vaurionsietokyky.
 - o Suunnitellaan kantavat rakenneosat ja materiaalit siten, että niillä on riittävä sitkeys, jotta ne pystyvät sitomaan muodonmuutos energiaa murtumatta.
 - o Suunnitellaan rakenteet siten, että kuormilla on muitakin etenemisreittejä onnettomuuden jälkeen.
 - o Suunnitellaan rakenteet siten, että koko rakenteen stabiilius riippuu useammasta, kuin yhdestä kantavasta ja jäykistävästä rakenne-osasta. Tällöin rakenteen ehjänä säilymisen todennäköisyys onnettomuustilanteessa kasvaa. (SFS-EN 1991-1-7, 26.)
- Estetään kuorman syntyminen tai pienennetään sitä.
 - o Varataan teillä siltojen rakenteiden ja teiden väliin tarpeeksi tilaa.
 - o Räjähdysvaarallisissa tehtaissa käytetään paineenpurkausseiniä.
 - o Pienennetään auton törmäyksen vaikutusta suojakaiteilla. (SFS-EN 1991-1-7, 26.)

- Suunnitellaan rakenteet kuormia kestäviksi.
 - o Tavanomaisten suunnitteluohjeiden mukaan suunnitellaan, jolloin onnettomuuden tuomat maksimikuormat otetaan huomioon. (SFS-EN 1991-1-7, 26.)
- Rakenteet segmentoidaan.
 - o Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteet tehdään epäjatkuviksi esimerkiksi katkaisemalla jatkuvia palkkeja ja välttämällä pitkiä rakenteita. Toisin sanoen lisätään siis liitoksia rakenteisiin niin, että paikallisen vaurion sattuessa sortuminen ei etene pidemmälle. (Jensen 2010, 7.)

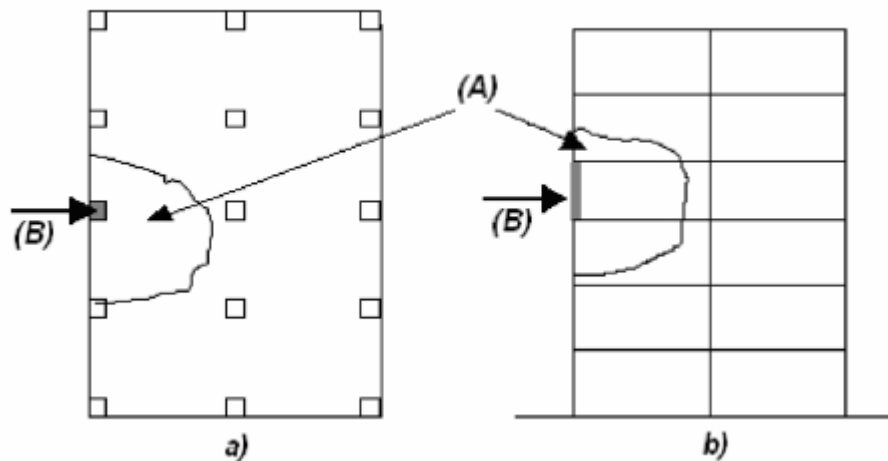
Rakennuksille ei kuitenkaan koskaan voida taata täydellistä sortumakestävyyttä, koska onnettomuus kuormat voivat olla yllättäviä ja odottamattomia. Hankkeen taloudellisia riskejä tulisi aina arvioida etukäteen, koska rakenteiden mitoittaminen erittäin sortumakestäviksi on kallista ja aikaa vievää.

On olemassa myös ns. määrittelemättömiä onnettomuuskuormia, jotka mainittiin jo aikaisemmin. Näiden huomioon ottaminen käsitellään usein paikallisen vaurion laajuuden rajoittavilla menetelmillä. Kun suunnittelijan tulee rajoittaa määrittelemättömän onnettomuuskuorman aiheuttamaa rakenteiden vaurioitumista, on olemassa muutama vaihtoehtoja. Määrittelemättömien kuormien suunnitteluohjeissa hyväksytään rakenteiden osittainen hajoaminen tai romahtaminen. Ne pitäisi kuitenkin ottaa niin huomioon niin, että rakennuksessa ei tapahtuisi valtavaa jatkuvan sortuman ketjua rakennuksen paikallisesti vaurioituessa. Suunnittelustandardien kansallisissa liitteissä kerrotaan tarkemmin eri rakenteisiin soveltuvia menettelytapoja. Eurokoodit ovat antaneet muutaman toimintamallin suunnittelijoille. Näitä ovat seuraavat (SFS-EN 1991-1-7, 24 – 28.):

- Rakenteen stabiiliuteen vaikuttavat kantavat rakenneosat, josta koko muun rakenteen stabiilius riippuu. Ne tulisi suunnitella siten, että ne kestävät ns. ylimääräisen onnettomuuskuorman A_d vaikutukset. (SFS-EN 1991-1-7, 26 – 28.)
 - o Kuorma A_d on selitetty tarkemmin eurokoodien ohjeissa.

- Suunnitellaan rakennus niin, että paikallisen vaurion iskiessä rakennuksen merkittävän osan stabiilius ei vaarannu kokonaisuutena.
 - o Paikallisen vaurion hyväksyttävä raja määritellään kansallisissa liitteissä. Suomessa tämä raja on monikerroksisissa rakennuksissa enintään 15% lattiapinta-alasta, kuitenkin enintään 100 m² / kerros. Paikallinen vaurio saa tapahtua päällekkäisissä kerroksissa. (SFS-EN 1991-1-7, 26 – 28.) Tällöin tulisi esimerkiksi kiinnittää huomiota pilarijakoon, jotta kyseinen pinta-ala jää pieneksi.

Kuva 3. Paikallisen vaurion hyväksyttävästä rajasta (SFS-EN 1991-1-7, 56.)



4 YLEISIMMÄT SORTUMATYYPIT JA ESIMERKIT MAAILMALTA

Tässä kappaleessa käydään läpi muutamia jatkuvan sortuman sortumatyyppisiä esimerkkeineen jatkuvan sortuman havainnoillistamiseksi.

4.1 Pannukakkusortuma

Pannukakkusortumalla (engl. pancake-type collapse) tarkoitetaan sellaista sortumaa, jossa rakennus sortuu suoraan ylhäältä alaspäin. Näin voi tapahtua useasta syystä, esimerkiksi maanjäristyksen tai törmäyksen takia. Pannukakkusortuma on yleisempi korkeissa rakennuksissa. (Starossek 2007, 1-2; Jensen 2010, 8.)

Tunnetuimpia esimerkkejä pannukakkusortumasta on New Yorkissa tapahtunut kaksoistornien eli World Trade Centerin romahtaminen 11. syyskuuta 2001. Jatkuvan sor-

tuman aiheuttivat kahden lentokoneen törmäykset molempien pilvenpiirtäjän yläosiin. (Eagar ja Musso 2001.) Tornien romahtamisesta on olemassa useita teorioita. Useiden lähteiden mukaan tornien alaosissa tapahtui myös räjähdyksiä koneiden iskujen jälkeen ja ennen iskuja. Varmuutta tapahtuneesta ei kuitenkaan ole saatu. Tässä työssä käydään kuitenkin läpi vain todennäköisemmin oikeana pidetty teoria aiheesta.

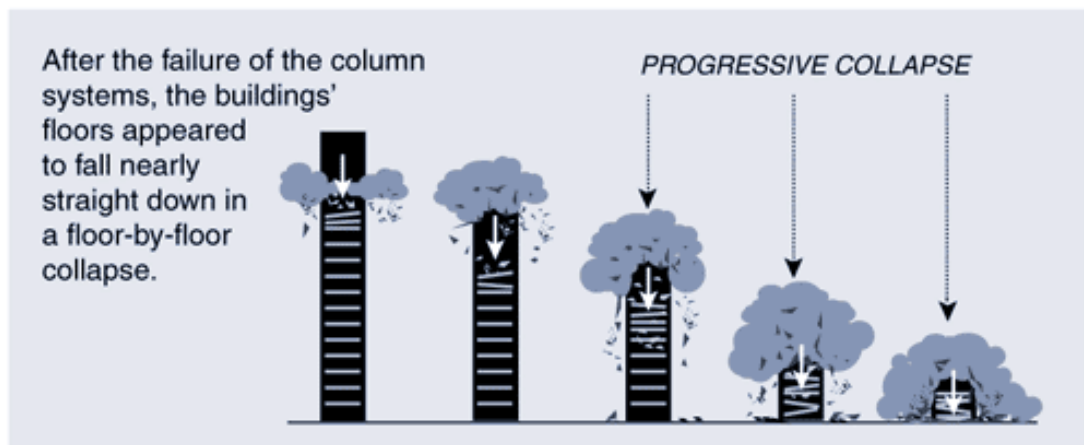
WTC:n kaksoistornien rakenteet olivat pääosin teräsrakenteita. Tornien rakenteellinen kestävyys perustui vertikaalikuormien suhteen niiden kehälle asennettuihin teräspilareihin. Välipohjien kannattajina toimivat teräsristikot, jotka kannattelivat betonilaattoja. Tornit olivat 110 kerroksisia ja niiden korkeudet olivat 417m ja 415m. Rakennusten omat painot olivat noin 5000 MN, eli 500 000 tonnia. (Eagar ja Musso 2001.)

Kuva 4. Kaksoistornit 11.9.2001 ennen sortumista (Eagar ja Musso 2001.)



Torneihin törmänneet lentokoneet olivat lähteneet ilmaan vain hieman ennen törmäystä, joten niiden tankit olivat täynnä polttoainetta. Lentokoneet räjähtivät rakennusten sisällä, ja niiden polttoaine syttyi palamaan. Tämä aiheutti suuren tulipalon. Lentokoneiden törmäys aiheutti suuren dynaamisen kuorman ja tämä vahingoitti useita teräspilareita. Lentokoneen polttoaineen syttyessä palamaan lämpötila nousi ja teräsrakennos osat menettivät yhä enemmän lujuuttaan. Noin tunti tulipalon alkamisen jälkeen yhden kerroksen pilarit pettivät kokonaan sorruttaen ylhäällä olevat kerrokset tornin päälle. Tornit romahtivat ylempien kerrosten kantavien rakenteiden menettäessään lujuutensa, eikä mikään alla oleva kerros pystynyt kestävään ylhäältä tulevaa suurta dynaamista kuormaa. (Eagar ja Musso 2001; Jensen 2010, 12 – 13.)

Kuva 5. Havainnollistava kuva kaksoistornien romahduksesta. (911 review 2005.)

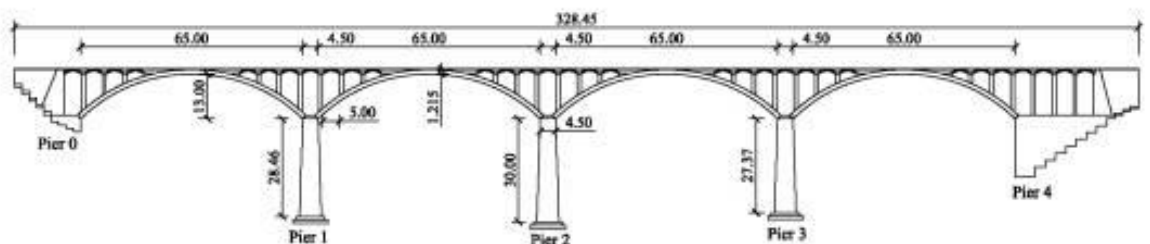


4.2 Dominosortuma

Dominosortumalla (engl. domino-type collapse) tarkoitetaan tilannetta, jossa yhden rakennelman sortuminen työntää mukaansa muita siihen kytköksissä olevia rakenteita. Sortumatyyppi on yleinen väliaikaisissa rakenteissa, kuten rakennustelineissä. (Starossek 2007, 3; Jensen 2010, 9.)

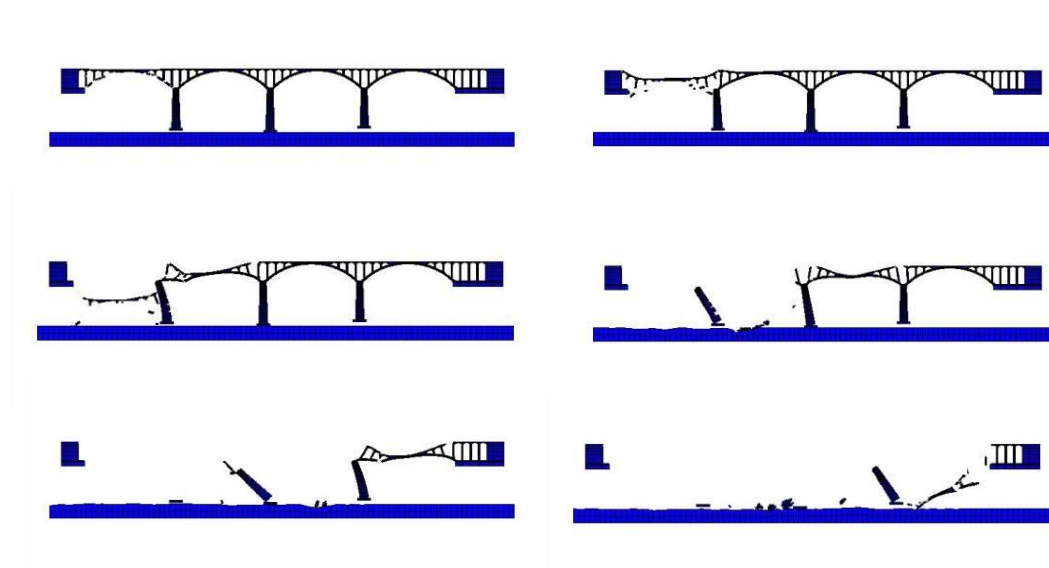
Yhtenä esimerkkinä paikallisen vaurion aiheuttamasta dominosortumasta on Kiinan Tsinghuan yliopiston tutkimat kivikaarisiltojen romahtamiset. Tässä tarkastellaan viiden tukipilarin (kuvassa pier 0 – pier 4) kattavaa keskisuurta siltaa, joka on esitetty kuvassa 5. Silta romahti elokuussa 2007 rakennusvaiheen aikana, juuri ennen sillan valmistumishetkeä. Romahtamiseen meni aikaa noin 10 sekuntia. Alla kuva sillan rakenteesta. (Z. Xu, X. Lu, H. Guan, X. Lu, Ren 2013.)

Kuva 6. Kivikaarisillan rakenne. (Xu, Lu, Guan, Lu, Ren 2013.)



Sillan suunnitelmat oli tehty niin, että maatukien ja pilareiden väliset neljä kaarta oli kiinnitetty samanaikaisesti pilareiden yläpäihin. Syynä sillan romahtamiseen oli, se että sillan pilarit 1-3 (kuvassa pier 1- pier 3) oli suunniteltu siten, että ne eivät kanna epätasaisia vaakakuormia, joita voi tulla kaarilta. Romahduksen syynä oli tuen häviäminen vasemmanpuoleisesta kaaresta pilari 0:n kohdalla. Tällöin pilareiden yläpäihin tuli erisuuria vaakavoimia, kun kaaret kuormittivat pilareiden yläpäitä vain toisesta suunnasta. Voimat eivät enää kumonneet toisiaan, rakenteesta muodostui mekanismi ja kantavat pilarit kaatuivat sillan alta (Xu, Lu, Guan, Lu, Ren 2013.). Silta sortui dominopalikkamaisesti, jättäen taloudelliset vahingot hankkeessa mukana olleille. Onneksi puutteellisesti suunniteltua siltaa ei ehditty avata liikenteelle.

Kuva 7. Kuvasarja sillan romahtamisesta (Xu, Lu, Guan, Lu, Ren 2013.)



Vaihe 1. Sillan ensimmäinen kaari menettää stabiliteettinsa tuen pettäessä vasemmassa reunassa.

Vaihe 2. Kaari romahtaa täysin, ja toisen puolen kaaren kuorma aiheuttaa valtavan momentin pilariin ja se alkaa menettää kantavuuttansa.

Vaihe 3. Kaari menettää stabiliteettinsa ja sortuu, pilarin pettäessä.

Vaihe 4. Ketjureaktio alkaa. Toinen pilarikaan ei kestä momenttia.

Vaihe 5. Ketjureaktio jatkuu.

Vaihe 6. Silta on romahtanut täysin

Kuva 8. Valokuva kivikaarisillasta sortumisen jälkeen. (Xu, Lu, Guan, Lu, A. Ren 2013)



4.3 Vetoketjusortuma

Vetoketjusortumalla (engl. zipper-type collapse) tarkoitetaan tilannetta, jossa kytköksissä olevat rakenteet vetävät muut rakenteet mukaan ketjureaktioon. Tämä sortumatyypin on yleinen mm. riippusilloissa, jotka voivat sortua esimerkiksi sillan kaapelien katkeamisen takia. (Starossek 2007, 2; Jensen 2010, 8 - 9)

Tällainen sortuma tapahtui Washingtonin osavaltiossa sijaitsevalla Tacoma Narrowsin riippusillalla. Silta valmistui heinäkuussa 1940, mutta vain neljä kuukautta myöhemmin silta romahti tuulen huojuttaessa sitä holtittomasti. Sillan jänneväli oli 853m ja se oli valmistuessaan maailman kolmanneksi pisin silta. Suhteessa jänneväliin silta oli rakenteiltaan hoikka. Sillan huojuminen johtui lujista kannatinpalkeista, jotka pitivät sillan kannen vain 20m/s puhaltavalla tuulella vertikaalivoimien suhteen kantavana, mutta ei kokonaisuutena riittävän jäykkänä. Vuonna 1940 tuulen suunnan ollessa rakenteelle epäedullinen, silta kävikin heilumaan tuulessa resonoiden, eikä heiluminen loppunut ja lopulta yksi secondäärikaapeli katkesi. Tällöin sillan kansi kävi sortumaan toisesta päästään vetoketjun omaisesti muidenkin secondäärikaapeleiden katketessa. (Long 2003; Baker 2005)

Kuva 9. Tacoma Narrowsin romahdus vuonna 1940. (Long 2003)



4.4 Yhdistelmäsortuma

Yhdistelmäsortumalla (engl. mixed-type collapse) tarkoitetaan tilannetta, jossa useampi sortumatyyppi on syynä jatkuvaan sortumaan. (Jensen 2010, 10 - 11) Tällaisessa sortumatilanteessa voi esiintyä aiemmin käsiteltyjä sortumatyyppejä samanaikaisesti.

5 RAKENNUKSEN SISÄPUOLINEN RÄJÄHDYS

Räjähdyksen voimakkuus riippuu useasta asiasta, joita ovat mm. rakennuksen muoto, mahdollinen huoneiden yhtenäisyys tai räjähtävän aineen kuten pölyn leviäminen ja sen jääminen pinnoille, kuten ilmanvaihtokanavien päälle jne. Pölyn leviämisen estäminen on erityisen tärkeää estettäessä räjähdysten syntyä tälle alttiissa rakennuksessa. Jos rakennukseen esimerkiksi kertyy yhden millimetrin paksuinen kerros räjähtävää pölyä jonkun tason pinnalle, tämä pöly voi helposti aiheuttaa jopa kolmemetrinen pölypilven, joka tekee suuria vahinkoja räjähdystilanteessa. On myös mahdollista että tehtaassa toimivassa koneessa, jossa räjähtävää pölyä valmistuu, tapahtuu toimintahäiriö ja se päästääkin pölyn koneesta valloilleen tehtaan sisälle. (Barton 2002, 122 - 124)

Räjähdyksestä aiheutuva paine vaikuttaa samanaikaisesti kaikkiin tilaa rajaavia rakenteisiin, tällöin yhteisvaikutus rakenteisiin on siis otettava huomioon suunnittelussa. Räjähdyksestä aiheutuvan ylipaineen jälkeen seuraa aina alipaineen vaihe, joka on

myös otettava huomioon. On myös huomioitava ei-kantavien rakenteiden aiheuttamat tukivoimat kantaviin rakenteisiin räjähdystilanteita analysoidessa. (RIL 201-2-2011-1-7, 127)

Olisi suositeltavaa, että tehtaiden räjähdysalttiisiin koneisiin asennettaisiin ns. räjähdysten tukahduttamisjärjestelmät (eng. explosion suppression system). (Barton 2002, 111)

Sisäpuolisesta räjähdyksestä syntyvä paineen suuruus riippuu aiheuttavan aineen tyy-
pistä ja sen homogeenisuudesta, räjähdysalttiin aineen pitoisuudesta ilmassa, räjähd-
dyksen syttymislähteestä, tarkasteltavassa tilassa olevista esteistä sekä kohteena ole-
van tilan koosta, muodosta ja lujuudesta. (SFS-EN 1991-1-7, 48.)

Räjähdysten suhteellinen voimakkuus riippuu myös rakennuksen tai tilan koosta, sekä siitä missä räjähtävää materiaalia säilytetään, verrattuna varsinaiseen räjähtävän mate-
riaalin määrään. Toisin sanoen suhteellisella voimakkuudella tarkoitetaan sitä, kuinka
paljon tilassa prosentuaalisesti on räjähtävää materiaalia. Esimerkkinä tilassa, joka on
sullottu täyteen räjähtävää materiaalia aiheuttaa suhteessa paljon suuremman paineaal-
lon verrattuna tilaan, jossa on yhtä paljon samaa räjähtävää materiaalia, mutta tämä ti-
la olisikin kaksi kertaa suurempi. (Barton 2002, 122)

On myös otettava huomioon mahdolliset ilmanvaihdon tuomat vaikutukset niin, että
onnettomuuden sattuessa ilmanvaihtoputkistojen kautta aiheutuisi mahdollisimman
pieni riskin ulkona liikkuville ihmisille. On myös tarkistettava, voiko räjähdys levitä
muille räjähdysalttiille alueille ilmanvaihdon kautta eli mahdollinen ketjureaktio on
estettävä. (Barton 2002, 122)

Seuraamusluokkaan CC1 kuuluville rakenteille ei tarvitse tehdä erillistä räjähdys-
kuormatarkastusta, kun noudatetaan eurokoodien antamia määräyksiä liitoksille ja ra-
kenneseosten väliselle yhteistoiminnalle (RIL 201-2-2011-1-7, 127)

Luokkiin CC2 ja CC3 kuuluviin kohteisiin rakenteet suunnitellaan kestämään euro-
koodien mukaiset staattiset kuormitusmallit tai käyttämällä yksinkertaista mitoitusta.
Lisäksi luokan CC3 rakenteissa tulisi käyttää staattista analyysiä, tai dynaamista ana-
lyysiä. (RIL201-2-2011-1-7, 127) En kuitenkaan käy näitä sen tarkemmin läpi tekstis-
säni.

Räjähdyksistä johtuvia seuraamuksia voidaan rajoittaa:

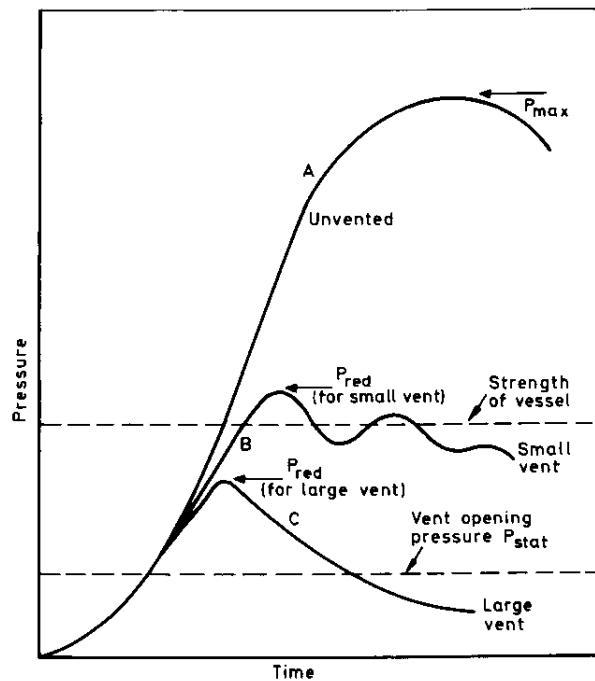
- Suunnittelemalla rakenteet kestämään mahdollisen räjähdysaiheuttaman maksimipaineen.
- Purkaa mahdollinen räjähdyspaine hallitusti esimerkiksi käyttämällä paineenpurkausluukkuja tai -seiniä.
- Erottamalla alueet toisistaan, joissa sijaitsee räjähdysherkkiä materiaaleja ketjureaktioiden estämiseksi.
- Rajaamalla räjähdysalttiiden rakenteiden pinta-alaa.
- Käyttämällä muita ennaltaehkäiseviä menetelmiä, joilla rajoitetaan paineen leviämistä räjähdysriskille alttiiden vierekkäisten rakenteiden välillä. (RIL 201-2-2011, 128)

5.1 Paineenpurkausluukut ja-seinät

Paineen purkaminen onnettomuustilanteissa sellaisista rakennuksista, jossa on räjähtävää materiaalia, on tärkeää. Paine rakennuksen sisällä ei saa nousta liian korkeaksi, jotta rakenteita ei vaurioituisi.

Rakennuksen paineenpurkausluukuilla tarkoitetaan seiniä, kattoja, ikkunoita tai muita rakennuksen osia, jotka räjähdysaiheuttamassa aukeavat hallitusti päästäten paineen rakennuksesta pois, jotta koko rakennus ei tuhoutuisi ja paikallisen vaurion laajeneminen esteytyy. Paine nousee sitä suuremmaksi, mitä pienempi on paineenpurkausluukujen pinta-ala. (Barton 2002, 122-125) Alla kuvassa 10 on esitetty havainnollistava kuvaaja aiheesta.

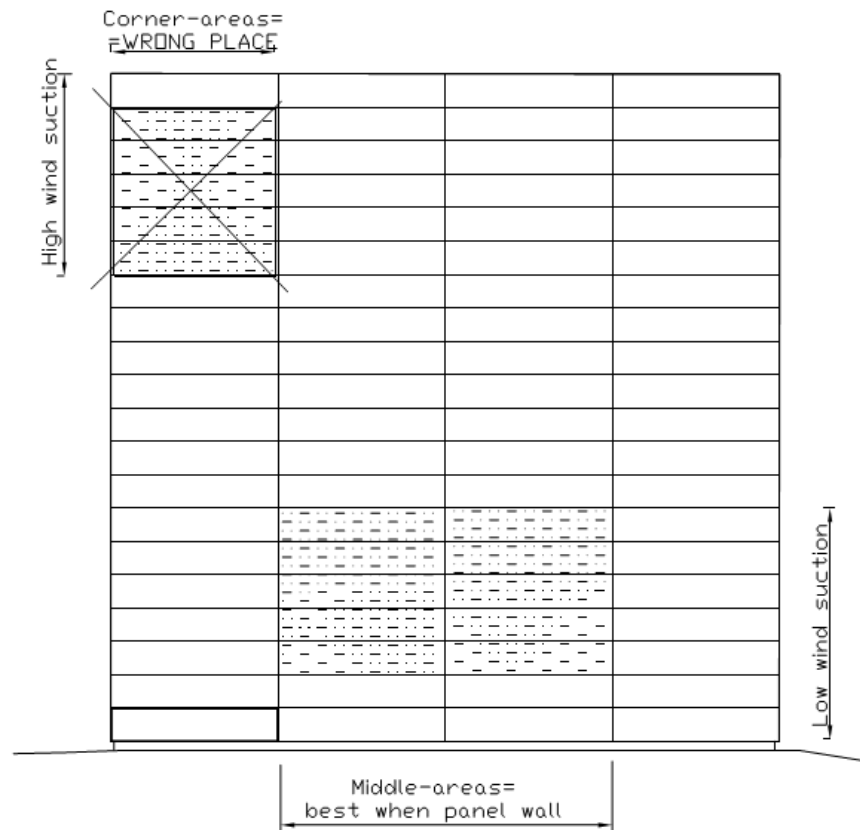
Kuva 10. Räjähdyksen paineen noususta suhteessa paineenpurkausluukkujen pinta-alaan. (Barton 2002, 117)



Paineenpurkausluukut ovat siis lähtökohtaisesti kevytrakenteisia. Paineenpurkausluukut eivät koskaan saisi olla siis haurasta materiaalia, jotka voivat pirstoutua tai murskaantua. Myös ikkunat voivat toimia paineenpurkausluukkuina, mutta lasinsirpaleet ovat vaarallisia sinkoutuessaan eri suuntiin. Tämän takia ikkunoiden tulisi olla muovista tehtyjä tai turvalasia, jotta lasi ei sirpaloituisi niin voimakkaasti. Paineenpurkausluukut voivat kattaa jopa koko kattopinta-alan, jos katto tehdään kevyistä rakenteista. Paineenpurkausluukkujen käyttö on yleistä eteenkin tehtaissa, joiden sisäpuolelle syntyy esimerkiksi räjähdysaltista pölyä sivutuotteena. (Barton 2002, 122 - 125)

Paineenpurkausseiniä suunniteltaessa niiden sijainti on oleellisessa asemassa. Niitä ei tulisi sijoittaa rakennuksen nurkka-alueille eikä liian matalalle, koska tuulen imu ja paine ovat laskennallisesti pienempiä näillä alueilla. Seinän on tarkoitus aueta milloin vain mahdollisen räjähdysaltista pölyä sivutuotteena. (Blow-out parts in a Paroc panel wall, 21)

Kuva 11. Paroc-paineenpurkausseiniä sijoittelusta. (Blow-out parts in a Paroc panel wall, 5)



On myös tärkeää, että paineenpurkausseiniä ei rakenneta vilkkaiden kulkuteiden tai katujen varsille, jotta säästytään mahdollisilta henkilövahingoilta. Paineenpurkausseiniä pitäisi myös sijoittaa mahdollisimman lähelle räjähdyskeskipistettä, jotta paine pääsee rakennuksesta ulos nopeasti, eikä paine ehdi vahingoittaa muita rakenteita sen edetessä rakennuksen sisällä. Paineenpurkausseiniissä tulisi myös olla varmistuksena teräsvaijerit kiinnitettynä rakennuksen runkoon, jolloin seinän palaset eivät lentäisi hallitsemattomasti pois rakennuksesta räjähdys-takia, vaan ne jäisivät roikkumaan seinälle. Seinät eivät siis saisi irrota kokonaan rakennuksesta henkilövahinkojen välttämiseksi. Näin usein kuitenkin käy, jos räjähdys on oletettua suurempi. (Blow-out parts in a Paroc panel wall, 19 - 21)

Kuva 12. Elementtirakenteinen Paroc-paineenpurkauseinä räjähdysten jälkeen.(Blow-out parts in a Paroc panel wall, 10)



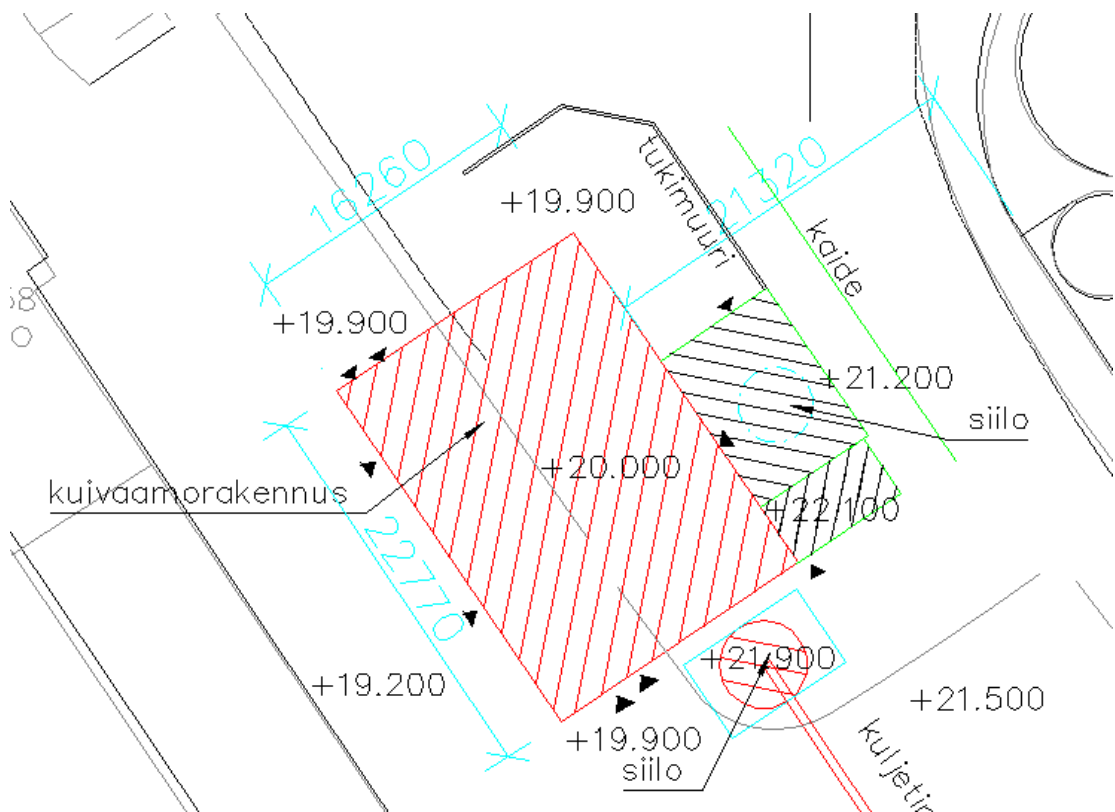
5.2 Sovellusesimerkki

Tässä luvussa käsitellään Kotkan Sunilaan rakennettavaa uutta kuivaamorakennusta. Kohteessa on kaksi konetta, joissa käsitellään turvetta. Koneista syntyy sivutuotteena räjähdysaltista ligniinipölyä. Koneet on suunniteltu sijoittamaan päällekkäin ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa. Rakennus on kaksikerroksinen. Rakennuksessa on kevytrakenteinen teräsrunko ja paroc-elementeistä tehdyt kevyet ulkoseinät.

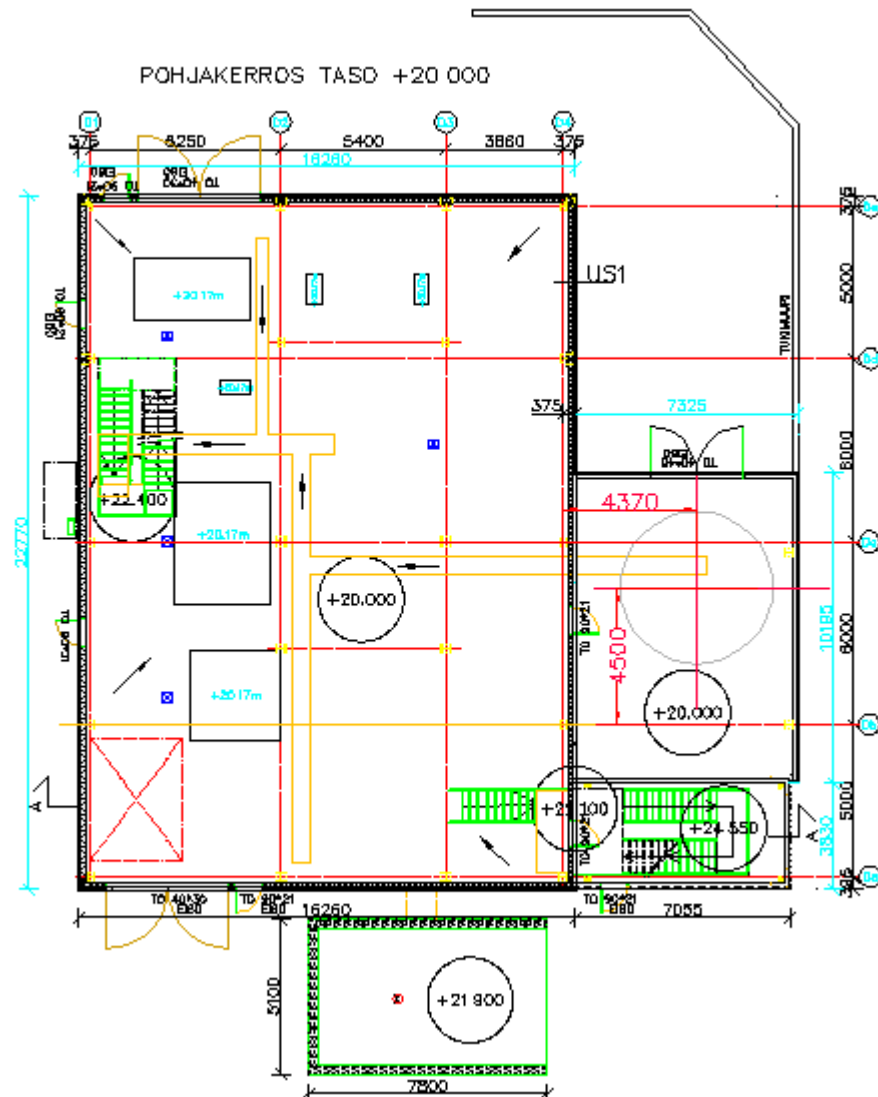
Koneiden paikat on määrätty rakennuksen päätyyn suunnilleen keskelle luoteen puoleista seinää alla olevasta kuvasta. Paineenpurkauseinien sijoitus olisi siis hyvä olla kyseisellä seinällä. Rakennuksen kummallakin pitkän sivun puolella sijaitsee räjähdysaltista ainetta, joten paineenpurkausluukkuja ei pitäisi sijoittaa näille alueille lisäräjähdysten vaaran takia. Kerroskorkeus on noin seitsemän metriä alakerrassa, ja kahdeksan toisessa kerroksessa. Rakennuksessa ei ole ikkunoita, joten niiden hyödyntäminen ei ole mahdollista.

Lähtökohtana paineenpurkausseinién sijoittelulle on, että suunnittelija laskee kuinka suuren ulospuhalluspinta-alan koneiden aiheuttama pöly vaatii räjähtäessään. Tuloksen antama määrä Paroc-elementtejä tarvitaan kohteeseen paineenpurkausseiniinä. Tämän jälkeen tulisi miettiä räjähdys-seinién sijoittelua ja asentamista. Sijoittelun lisäksi valmistaja on antanut ohjeeksi, että elementeissä tulee olla varmistuksena teräs-vaijerit, jotka päästävät elementit sinkoutumaan ohjeellisesti noin puolen metrin päähän rakennuksesta henkilövahinkojen välttämisen takia.

Kuva 13. Ote kohteen asemapiirroksesta. Pohjoinen ylhäällä. (Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky)

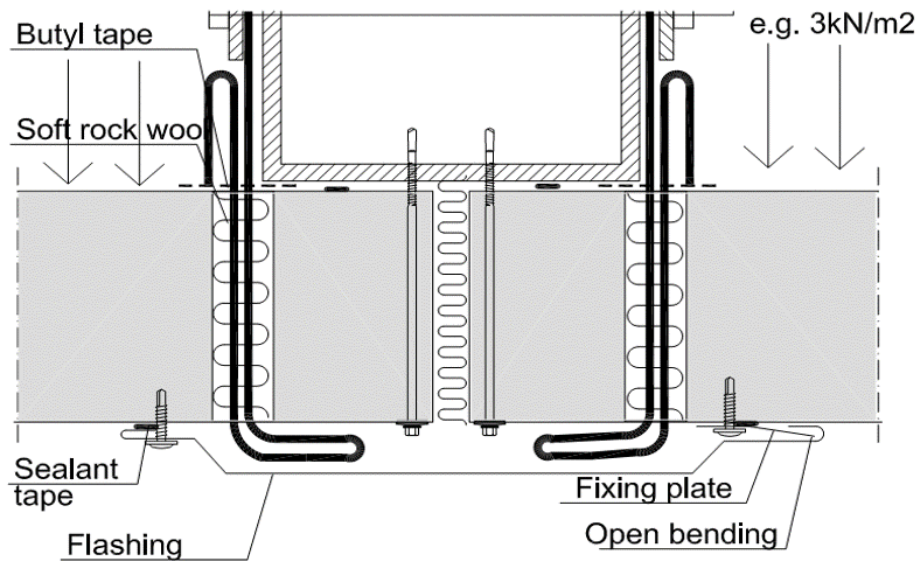


Kuva 14. Ote kohteen ensimmäisen kerroksen pohjapiirroksesta. (Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky)



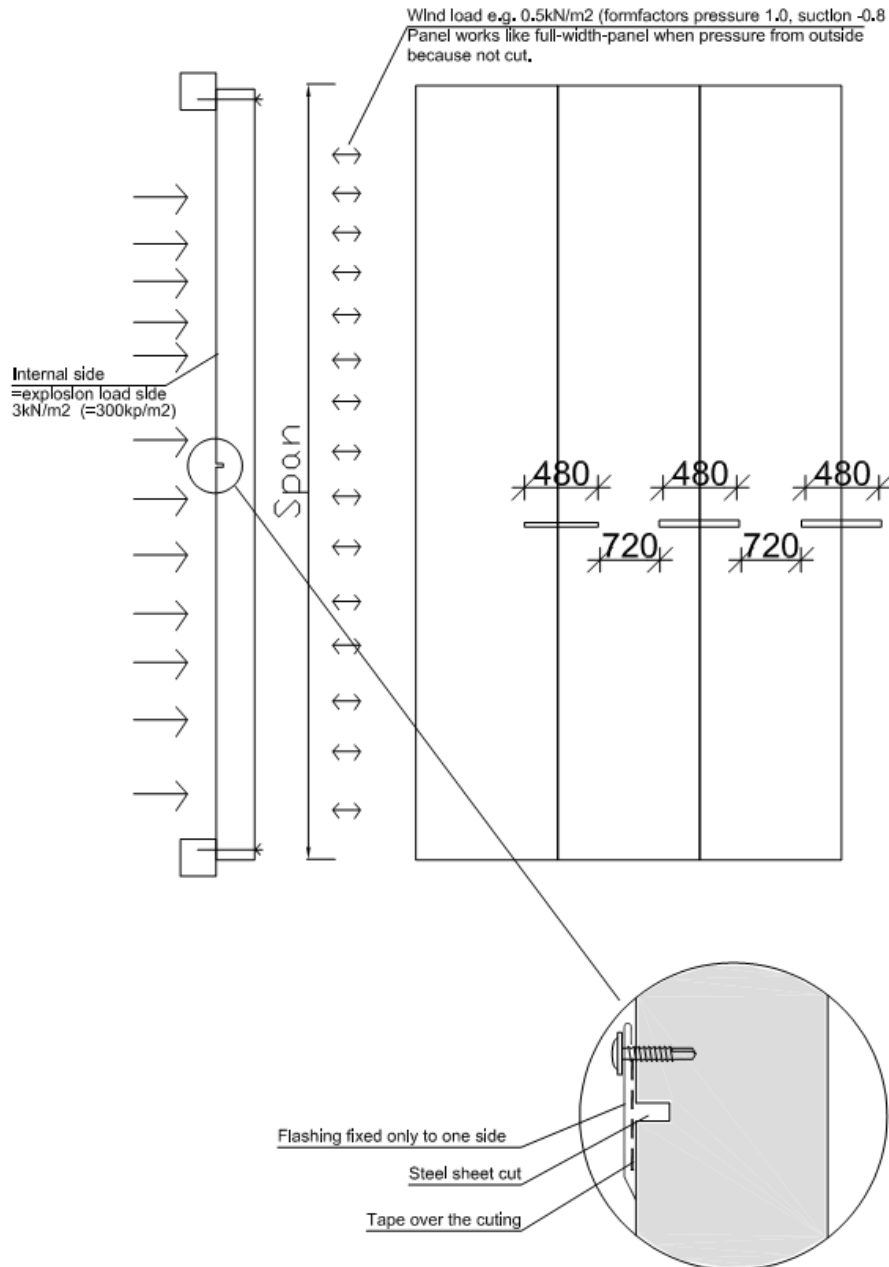
Kyseiisiin seiniin tulee mitoittaa heikommatsuhteessa muihin seiniin, jotta ne putoavat pois päin rakennuksesta räjähdyskatsuessa. Tässä työssä ei kuitenkaan käydä liittinten mitoittusta sen tarkemmin läpi. Pääperiaatteena kuitenkin on, että sisäpuolisen räjähdyspaineen sallittu yläraja määritetään ensin, johon liittimien mitoitus perustuu. Tärkeää on tuulen imun arvon määrittäminen etenkin rakennuksen nurkka-alueilla. Määritetään siis kumpi on mitoittava tekijä, räjähdys vai tuulen imu. Mikään muu elementti ei saisi irrota seinästä räjähdyskatsuessa, kun paine purkauselementit, jotta kiinnikkeet saadaan toimimaan oikein. Esimerkkikohteen nurkka-alueiden tuulenimu (2kN/m^2) ei kuitenkaan ylitä onnettomuus tilanteessa sisäpuolen räjähdystä vastaavaa painerajaa (5kN/m^2), joten se ei ole rajoittavana tekijänä paine purkauseinien sijoittelussa. Kuvassa 15 detajli parocin paine purkauselementtien liittoksesta pilariin.

Kuva 15. Esimerkki Paroc-paineenpurkauseinien liitoksesta. (Blow-out parts in a Paroc panel wall, 16)



Paroc-paineenpurkuelementtejä voi tarvittaessa myös heikentää rakenteellisesti. Tämän voi tehdä esimerkiksi tekemällä viillot keskelle elementtejä. Tällöin ne päästävät painetta paremmin vääntyessään hiukan ulospäin räjähdysten sattuessa. Alla on kuva menetelmästä.

Kuva 16. Paroc-paineenpurkuelementin heikentäminen.(Blow-out parts in a Paroc panel wall, 14)



5.3 Paineenpuhalluspinta-alan laskenta

Tässä kappaleessa tarkastellaan paineenpuhalluspinta-alaa kohteen alakerrasta John Bartonin kirjaan *Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide* (2002, 121 - 125) perustuvalla menetelmällä.

John Bartonin kirjassa on kaava paineenpuhalluspinta-alan laskemiseksi:

$$A_v = \frac{C_1 \cdot A_s}{(P_{red})^{0.5}}$$

jossa

A_v = Paineenpuhalluspinta-ala

C_1 = Riippuvainen pölyn ilmaseoksen räjähdysindeksin arvosta K_{St} . Eli kuinka vaarallista räjähtävä aine on.

$K_{St} < 200$ bar m/s : $C_1 = 0.026$ (Heikko räjähtävyys)

$200 < K_{St} \leq 300$ bar m/s : $C_1 = 0.03$ (Tavanomainen räjähtävyys)

$300 < K_{St} \leq 200$ bar m/s : $C_1 = 0.051$ (Erittäin voimakas räjähtävyys)

A_s = Räjähtävän materiaalin ympärillä olevan rakennuksen pintojen pinta-alat yhteensä. Se kattaa siis seinät, lattiat ja katon pinta-alat.

P_{red} = Suunnittelupuhalluspaine eli suunniteltu painepiikki, jolloin paineenpurkauselementit irtoavat seinästä päästäen paineen ulos. (katso kuva 10.)

P_{red} :n rajoituksena kuitenkin se, että arvon pitää olla pienempi kuin 0,1 bar, eli 10kN/m^2 käyttäessä kyseistä kaavaa.

Tässä tapauksessa parametrin K_{St} :n ollessa 151 (ligniten arvo alhaalla taulukossa 2) C_1 arvoksi saadaan parametri 0,026.

Ensimmäisen kerroksen huonekorkeus on 7m, ja rakennus on suorakaiteen muotoinen pinta-alaltaan noin 16m x 22,5m. A_s parametriksi saadaan siis:

$$16\text{m} \times 22,5\text{m} \times 2(\text{lattia} + \text{katto}) + 16\text{m} \times 7\text{m} \times 2(\text{Lyhyet seinät}) + 22,5\text{m} \times 7\text{m} \times 2(\text{pitkät seinät}) \Rightarrow A_s = 1259\text{m}^2$$

P_{red} on tässä tapauksessa määritelty $0,05\text{bar}$ (eli 5kN/m^2) suuruiseksi.

Taulukko 2. Pölyräjähdysten arvoista.(Barton 2002, 9)

Table 2.1 Explosibility parameters for a number of dusts*

| Type of dust | Min cloud ignition energy mJ | Cloud ignition temp. C | Layer ignition temp. C | Max. explosion pressure bar a | K _{St} ** ms ⁻¹ | Minimum explosible conc. g m ⁻³ | Limiting O ₂ conc. volume % |
|------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Anthraquinone | 3 | 550 | Sublimes | 9.1 | 298 | 30 | – |
| Pea flour | 40 | 560 | 260 | – | – | – | 15 |
| Lignite | 30 | 390 | 180 | 11.0 | 151 | 60 | 12 |
| Aluminium | 15 | 550 | 740 | 13.0 | 750 | 60 | 5 |
| Coal | 60 | 610 | 170 | 9.8 | 114 | 15 | 14 |
| Cellulose | 80 | 480 | 270 | 11.0 | 125 | 30 | 9 |
| Cornflour | 40 | 380 | 330 | 10.3 | 125 | 60 | 9 |
| Wood | 40 | 470 | 260 | 10.2 | 142 | 60 | 10 |
| Wheat flour | 50 | 380 | 360 | 9.8 | 70 | 125 | 11 |
| Charcoal | 20 | 530 | 180 | 10.0 | 10 | 60 | – |
| Cotton linter | 1920 | 560 | 350 | 8.2 | 24 | 100 | – |
| Skimmed milk | 50 | 490 | 200 | 9.8 | 125 | 60 | – |
| Sugar | 30 | 370 | 400 | 9.5 | 138 | 60 | – |
| Sulphur | 5 | 280 | 113 | 6.8 | 151 | 30 | – |
| Magnesium | 80 | 450 | 240 | 18.5 | 508 | 30 | – |
| Zinc | 9600 | 690 | 540 | 7.8 | 93 | 250 | – |
| Paraformaldehyde | – | 460 | >480 | 10.9 | 178 | 60 | 6 |

*Examples of recorded values. For illustrative purposes only: not to be used in the calculations for explosion precaution methods.

**1 m³ vessel

Ensimmäisen kerroksen vaadittava paineenpurkausseiniä pinta-ala on:

$$A_v = C_1 A_g / (P_{red})^{0.5} = 0,26 \times 1259 \text{ m}^2 / 0,05^{0.5} = 146 \text{ m}^2$$

Pinta-ala tulee liian suureksi alakerran lyhyelle päätyseinälle (pohjoisen puolella), sillä kyseisessä seinässä on vain 112 m² tilaa (pohjoisen puolella). Myös ovi lasketaan mukaan, koska se voidaan suunnitella niin että se aukeaa räjähdysten sattuessa. Suunnittelutyön kannalta on hyvä, että nurkka-alueiden tuulesta johtuva imu ei ylitä räjähdysten paineen rajaa. Tämä tarkoittaa sitä, että ensimmäiseen pilariväliin (noin viiden metrin matkalle) elementit voidaan asentaa paineenpurkauselementteinä, jotta pinta-ala saadaan tarpeeksi suureksi.

$$5 \text{ m} \times 7 \text{ m} + 112 \text{ m}^2 = 147 \text{ m}^2 > 146 \text{ m}^2 \Rightarrow \text{OK}$$

Rakennuksen päädyssä oleva siilo rakennuksen itä puolella jää kuitenkin vielä neljän metrin päähän. Siinä on kuitenkin yksi kevytrakenteinen seinä pihan ja siilon välissä estämässä lisäräjähdyksien syntyä.

6 YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa käytiin läpi onnettomuuskuormia ja seuraamusluokkia sekä syvennyttiin jatkuvan sortuman käsitteeseen ja rakennusten sisäpuolisiin räjähdysiin. Jatkuva sortuma käsitteenä on Suomessa vielä melko harvoin käytössä. Aiheesta löytyi vain vähän kirjallisuutta, joten ulkomaisten lähteiden käyttö oli tarkoituksenmukaista. Samaan ongelmaan törmättiin tutkiessani rakennusten sisäpuolisia räjähdyksiä, eikä tästäkään aiheesta löytynyt eurokoodien lisäksi muuta kuin englanninkielisiä lähteitä.

Onnettomuuskuormat ovat äkkinäisiä kuormituspiikkejä, jotka kohdistuvat rakennuksiin yllättäen. Molempia yhdistävä tekijä on se, että niiden seuraukset ovat vakavat. On myös aina muistettava, että rakennuksen tulee olla toimintakykyinen onnettomuuden jälkeen niin kauan, että ihmiset pääsevät poistumaan rakennuksesta ja sen läheisyydestä.

Jatkuva sortuma tarkoittaa sitä, että rakennus vaurioituu paikallisesti, ja se käynnistää usean sortuman ketjun, jonka vuoksi rakennus sortuu osittain tai kokonaan. Jatkuvat sortumat ovat olennaisesti yhteydessä onnettomuuskuormiin, koska onnettomuuskuormat ovat melkein aina jatkuvan sortuman osasyitä. On olemassa erilaisia jatkuvan sortuman tyyppisiä, joita ovat muun muassa pannukakku- ja dominosortuma. Kun jatkuvan sortuman erilaisia muotoja esiintyy useampia samanaikaisesti yhdessä kohteessa, puhutaan yhdistelmäsortumasta.

On olemassa määrättyjä ja määräämättömiä onnettomuuskuormia. Määrätyt onnettomuuskuormat voidaan ottaa huomioon monella tapaa, esimerkiksi estämällä kuorman synty tai pienentämällä sitä, suunnittelemalla rakenteet kuormia kestäviksi, segmentoimalla kuormitusalueet välttämällä jatkuvia rakenteita ja vaurionsietokyvyn varmistamisella. Määräämättömät onnettomuuskuormat otetaan pääasiassa huomioon rajoittamalla paikallisen vaurion laajuutta, esimerkiksi riittävän vaurionsietokyvyn varmistamiselle. Tämä toteutuu esimerkiksi silloin, kun rakennus pysyy teoriassa pystyssä, jos sieltä poistetaan mikä tahansa kantava pilari. Toisena vaihtoehtona on laskea lisä-

kuorman A_d vaikutukset eurokoodien antamien ohjeiden avulla. Näitä kaikkia menetelmiä voi siis käyttää samanaikaisesti, mikä on myös suositeltavaa.

Rakennusten sisäpuoliset räjähdykset tulisi ottaa huomioon kaikissa kohteissa, missä ollaan tekemisissä räjähtävän materiaalin kanssa. Räjähtävän pölyn siivoaminen ajoittain olisi suositeltavaa kohteissa, joissa pölyä esiintyy. Varmistetaan siis että suurempia räjähdysalttiita pölypilviä ei pääse syntymään aiheuttamaan räjähdysvaaraa. Räjähdysten voimakkuuteen vaikuttaa moni asia. Näitä ovat esimerkiksi aineen ominaisuudet, kuten aineen tyyppi ja homogeenisuus, sekä ympäröivän tilan koko suhteessa räjähtävän aineen määrään. Paine pääsee nousemaan pienissä tiloissa korkeammalle kuin suurissa, jos paineenpurkua ei ole toteutettu lainkaan. Suunniteltaessa räjähdysherkkiä tiloja olisi aina mietittävä alueiden rajaamista ja räjähdysten leviämisen estämistä. Lisäräjähdysten vaara tulisi aina minimoida. On myös aina mietittävä tarkkaan räjähdyspaineen reittejä ulos rakennuksesta. Paine rakennuksen sisällä ei saa päästä nousemaan liian korkeaksi. On myös hyvä muistaa, että räjähdysten ylipainetta seuraa aina alipaineen vaihe.

Paine puretaan usein erilaisilla paineenpurkausluukuilla, joita voivat olla esimerkiksi seinät, ikkunat tai katot. Paineenpurkausluukkujen materiaali pitäisi aina olla sellaista, mikä ei rapaudu tai sirpaloidu räjähdysten sattuessa. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi paineenpurkausikkunoita käytettäessä ikkunan tulisi olla muovia tai turvalasia, joka ei sirpaloidu. Sijainti on oleellisessa asemassa paineenpurkausluukkujen paikkaa miettiessä, koska näiden luukkujen ja seinien tulisi aina toimia rakenteellisesti oikein sekä räjähdysten sattuessa että esimerkiksi tuulisimpina päivinä. Eteenkin paineenpurkausseinissä seinien sitominen rakennuksen runkoon on tärkeää, jotta säästyttäisiin henkilövahingoilta myös rakennuksen ulkopuolella.

7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Onnettomuuskuormat ovat usein taloudellisesti vakavia ja niissä piilee aina henkilövahinkojen vaara, minkä takia niihin pitäisi aina suhtautua vakavasti. Taloudellinen näkökulma ja kohteelle hyväksyty riskitaso tulisi aina ottaa huomioon suunnitteluvaiheen alkupuolella, jotta varatut resurssit olisivat riittäviä ja kohteesta saadaan riittävän turvallinen. Seuraamusluokat ja niiden määrittäminen ovat erinomaisia työkaluja pohdittaessa tätä kysymystä. On myös aina mietittävä kohteen historiallista taustaa. Esimerkiksi poliittisesti merkittävät rakennukset voivat joutua usein ilkvallan kohteiksi, koska ihmiset voivat heijastaa niihin ideologioitansa ja poliittisia mielipiteitensä.

Erilaiset sortumatapaukset ja -onnettomuudet maailmalla ovat antaneet traagisuudeltaan ja taloudellisista vahingoistaan huolimatta arvokasta tietoa jatkuviin sortumiin liittyvistä tekijöistä. Nykysuunnittelussa on hyvä huomioida jatkuvan sortuman mahdollisuutta jo esisuunnitteluvaiheessa, esimerkiksi miettiessä runkoratkaisuja ja materiaalivalintoja, jotta ikäviltä tapahtumilta vältyttäisiin. Tulisi myös kiinnittää huomiota rakenteiden jatkuvuuteen. Kun rakenteita katkaistaan, jatkuvaa sortumaa voidaan osastoida, jolloin rakennuksella on pienempi mahdollisuus romahtaa kokonaisuudessaan. Toisaalta tämä lisää paikallisten vaurioiden riskiä, koska jatkumattomissa rakenteissa on enemmän rakenneosia. Tästä syystä asennusvirheet ja materiaaliominaisuuksien poikkeavuudet ovat todennäköisempiä.

Rakennusten sisäpuoliset räjähdykset tulee aina ottaa huomioon rakennuksissa, joissa on räjähdysaltista materiaalia. Räjähdyspaine kasvaa sitä korkeammaksi, mitä umpinaisempi rakennus on ja mitä huonommin rakennuksen sisältä paineen purku hoidetaan. Räjähdysalueet tulisi aina rajata kunnolla, jotta räjähdys ei pääsisi leviämään. Tällainen hypoteettinen tilanne voisi olla esimerkiksi tehtaassa, jonka sisällä sijaitsee sekä toimisto että varasto. Tällöin nämä alueet tulisi rajata kestäväällä ovella ja jyrkeillä seinillä. Oven tulisi avautua toimistosta varastoon päin, jotta se ei avautuisi helposti räjähdysten sattuessa.

Sovellusesimerkkinä käytettiin Kotkan Sunilaan rakennettavaa uutta kuivaamorakennusta. Tässä kohteessa olisi ollut mahdollista hyödyntää kattopinta-alaa ylemmässä kerroksessa, jolloin yläkerrassa olisi auennut räjähdysten sattuessa vain päätyseinä ja pieni osa kattoa tai kattoluukkuja. Kohteessa on myös tärkeää kahden tilan erottaminen toisistaan ketjureaktioiden välttämiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että etenkin seinien

ja välipohjan on oltava tiiviitä, jotta mahdollisen räjähdysten kipinät eivät pääse syttämään uusia räjähdyksiä. On myös pidettävä huoli, että räjähdysten liekit eivät pääse mahdollisten ilmanvaihtoritilöiden tai -laitteiden läpi aiheuttamaan muita jatkoräjähdyksiä, esimerkiksi talon toisella sivulla sijaitsevan siilon varastohuoneeseen. Kiinnitin huomioni myös rakennuksen pohjakuvassa näkyvään (kts kuva 17) kuivaamon ja siilovaraston välisen oven aukeamissuuntaan. Toisaalta varaston sisällä voi myös räjähtää ja tätä kautta synnyttää ketjuräjähdysten tehtaan sisällä.

Johtopäätöksenä voisikin sanoa, että tämä jatkuvista sortumista ja rakennusten sisäpuolisista räjähdyksistä tehty kirjallisuuskatsaus antoi kattavan kuvan aiheista. Ai-neesta tehty tutkimus ja tapausesimerkit osoittivat, että onnettomuuskuormat ovat oleellisessa asemassa jatkuvien sortumien aiheuttajana. Onnettomuuskuormien tarkka arviointi voi parhaimmillaan olennaisesti ehkäistä henkilövahinkojen syntymistä. On myös tärkeää miettiä määräämättömiä onnettomuuskuormia suunniteltaessa korkeamman seuraamusluokan rakennuksia. Lopuksi voisin vielä korostaa, että lisäräjähdysten syntymisen estäminen on tärkeää, sillä räjähdysten ketjureaktiot ovat aina hallitsemattomia ja niiden seuraukset voivat olla hyvinkin suuria.

LÄHTEET

- 911 review 2005. Total progressive collapse, nettiartikkeli. saatavissa: <http://911review.com/coverup/fantasy/progressive.html>. Viitattu: [13.5.2014].
- Baker, C. 2005. Tacoma Narrows bridge, Washington State Department of Transportation. saatavissa: <http://www.wsdot.wa.gov/tnbhistory/>. Viitattu: [13.5.2014].
- Barton, J. 2002. Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide. Julkaisija: Gulf Professional Publishing.
- Blow-out parts in a Paroc panel wall 2014. Paroc. Saatavissa Parocilta Power Point muodossa. Viitattu : [13.5.2014].
- Eagar, T. ja Musso, C. 2001. Why did the World Trade Center collapse? Science, Engineering, and speculation, The minerals, metals & materials society. Saatavissa: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0112/eagar/eagar-0112.html>. Viitattu: [13.5.2014].
- Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky 2014. Stora Enso OYJ:lle rakennettavan Sunilan tehtaan asemapiirros kuivaamorakennuksesta. Viitattu: [22.1.2014]
- Insinööritoimisto Reijo Strandman Ky 2014. Stora Enso OYJ:lle rakennettavan Sunilan tehtaan pohjapiirros kuivaamorakennuksesta. Viitattu: [22.1.2014]
- Jensen, M. 2010. Jatkuva sortuma käsitteenä ja sen merkitys rakennesuunnittelussa. Kandidaattityö. Aalto-yliopisto. Saatavissa Aalto-yliopiston kirjastosta.
- Long, P. 2003. Tacoma Narrows Bridge collapses on November 7. 1940, history.org sivuston nettiessee numero 5048. Saatavissa: http://www.historylink.org/index.cfm?DisplayPage=output.cfm&file_id=5048. Viitattu: [13.5.2014].
- Rakennusteollisuus Oy 2006. Rakennusrungon vakavuustarkastelut. saatavissa: <http://www.rakennusteollisuus.fi/default.aspx?intObjectID=9554>. viitattu: [13.5.2014].

RIL-201-2-2011. Sunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Hansaprint Oy.

Salminen, A. 2009. Ontelolaattatason sidejärjestelmät ja sideraudoitukset mitoitus, Insinööriyö. Metropolia. Saatavissa:

<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2589/Loppuraportti.pdf?sequence=1>.

Viitattu: [13.5.2014].

SFS-EN 1990 + A1 + AC. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat, onnettomuuskuormat, Suomen standardisointiliitto.

SFS-EN 1991-1-7 + AC5. Eurokoodi 1. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen standardisointiliitto.

Starossek, U. 2007. Progressive Collapse of Structures. Saatavissa:

<http://www.tuhh.de/sdb/starossek/Veroeffentlichungen/Dateien/Typology%20of%20progressive%20collapse.pdf>. Viitattu: [13.5.2014].

Toratti, T. 2001. Puurakenteiden seisminen suunnittelu, Puuinfo. saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puurakenteiden-seisminen-suunnittelu/seisminen-suunnittelu.pdf>. Viitattu: [13.5.2014].

Xu, Z. Lu, X. Guan, H. Lu, X. Ren, A. 2013. Progressive-collapse Simulation and Critical Region Identification of Stone Arch, Tsinghuan yliopiston tutkimus. Saatavissa:

http://www.luxinzheng.net/publication5/Progressive_collapse_Bridge_JPCF_2013.htm. Viitattu: [13.5.2014].