

Ville Herva

**RÄJÄHDYSVAARALLISEN TILAN RAKENNESUUNNITTELUN  
PERIAATTEET**

# **RÄJÄHDYSVAARALLISEN TILAN RAKENNESUUNNITTELUN PERIAATTEET**

Ville Herva  
Opinnäytetyö  
Syksy 2019  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Rakennetekniikka

---

Tekijä: Ville Herva  
Opinnäytetyön nimi: Räjähdyksenvaarallisen tilan rakennesuunnittelun periaatteet  
Työn ohjaaja: Kai Kuula  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2019  
Sivumäärä: 79 + 25 liitesivua

---

Teollisuuden rakennukset tai rakennusten tilat ovat joskus räjähdysvaarallisia tiloja. Räjähdyksenvaarallisten tilojen rakenteet on suunniteltava kestämään mahdollisen räjähdysten aiheuttamat seuraukset. Opinnäytetyön tarkoitus oli esittää periaatteet, joiden mukaan räjähdysvaarallisten tilojen rakenteet tulisi suunnitella. Aiheesta ei ollut aikaisemmin tehty tutkimuksia.

Opinnäytetyössä selvitettiin, mitä lainsäädäntö sanoo räjähdysvaarallisista tiloista. Lisäksi käsiteltiin räjähdyspaineen teoriaa, räjähdyksiä teollisuudessa ja räjähdyskuormia. Oleellinen osa tätä työtä oli kertoa, miten räjähdyspainetta saadaan purettua rakennuksesta.

Työssä laadittiin laskentaesimerkki räjähdysvaaralliselle esimerkkikohteelle. Ensin laskettiin metaanin räjähdysvakio ja sen jälkeen saatiin laskettua vaadittu paineenkevennyspinta-ala. Esimerkissä kuvattiin, miten räjähdysten paineenpurku toteutetaan paineenpurun ja tilan rakenteiden yhteissuunnittelulla. Räjähdyksestä aiheutuvat kuormat esitettiin ja havainnollistettiin. Laskentaesimerkkiin sisältyvät kuorirakenteet, runko ja perustukset.

Opinnäytetyötä voidaan käyttää tulevaisuudessa pohjana räjähdysvaarallisten tilojen rakennesuunnittelussa.

---

Avainsanat: ATEX, räjähdysvaarallinen tila, räjähdys, paineenkevennys, rakennesuunnittelu, teollisuus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil engineering, Structural engineering

---

Author: Ville Herva  
Title of thesis:  
Principles of structural design for potentially explosive atmospheres

Supervisor: Kai Kuula  
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2019  
Pages: 79 + 25

---

Industrial buildings are sometimes potentially explosive atmospheres. Structures of potentially explosive atmospheres must be designed to withstand the consequences of a potential explosion. The purpose of this thesis is to present the principles according to which the structures of hazardous areas should be designed. There have been no previous studies on the subject.

The thesis investigated what the legislation says about explosive atmospheres. In addition, explosion pressure, industrial explosions and explosive loads were discussed. An essential part of this work was to explain how to release the explosion pressure from a building.

In the thesis there was made a calculation example of a potentially explosive building. First there was calculated an explosion constant for methane gas and after that was possible to calculate the required pressure relieving area. In the example was told how pressure relief can be executed by co-design of pressure relief and structural designing of the building. Loads of the explosion was introduced and visualized. In this example was included shell structures, frame and foundations.

The thesis can be used as a basis for the structural design of potentially explosive atmospheres in the future.

---

Keywords: ATEX, explosive atmosphere, explosion, pressure relief, structural design, industry

## **ALKUSANAT**

Insinöörityöni on tehty Oulussa kevään 2019 aikana. Työ on Sweco Rakennetekniikka Oy:n rahoittama.

Haluan kiittää henkilöitä, jotka ovat tukeneet ja ohjanneet tämän opinnäytetyön tekemisessä. Etenkin Swecolta haluan kiittää Aki Kerästä ja Tuomo Tourulaa työn ohjauksesta.

Oulussa 28.5.2019

Ville Herva

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	9
2 ATEX-LAINSÄÄDÄNTÖ	10
2.1 Räjähdyksvaaralliset tilat	10
2.2 Ex-laitteet	11
2.3 Räjähdyksen ennaltaehkäisy	13
2.4 Räjähdyksen rajoittaminen	14
2.5 Räjähdyssuojausasiakirja	16
3 RÄJÄHDYSPAINE	18
3.1 Detonaatio	18
3.2 Humahdus/Deflagraatio	19
3.3 Ilmaseoksen palamisominaisuudet	20
3.4 Räjähdyksen käyttäytyminen	21
3.5 Palavat aineet ilmaseoksessa	22
3.6 Palavan ilmaseoksen syttyminen	23
3.7 Syttymislähteet	24
3.8 Räjähdyksen mahdolliset seuraukset	26
4 RÄJÄHDYKSET TEOLLISUUDESSA	27
4.1 Räjähdyksen aiheuttajia	27
4.2 Räjähdysonnettomuuksia	27
5 RÄJÄHDYSKUORMAT	29
5.1 Mitoittava räjähdys	29
5.2 Suurin räjähdyspaine $P_{max}$	30
5.3 Suurin räjähdyspaineen nousunopeus $(dP/dt)_{max}$	31
5.4 Räjähdyksvakio $K_G$	32
6 PAINEENPURUN JA RAKENTEIDEN SUUNNITTELU	33
6.1 Paineenpurku	33
6.1.1 Kevennysaukon koon laskenta	33

6.1.2	Rekyylivoima	35
6.1.3	Räjähdyspaineaallon vaikutukset kevennysaukon ulkopuolella	36
6.1.4	Liekkien vaikutukset	36
6.2	Rakenteet	37
7	LASKENTAESIMERKKI	38
7.1	Rakennejärjestelmä	39
7.2	Kuormat	40
7.2.1	Tuulikuormat	42
7.2.2	Lumikuormat	45
7.2.3	Räjähdyskuormat	45
7.3	Paineenpurun toteutus	47
7.4	Sandwich-paneelien mitoitus	48
7.4.1	Rekyylin vastaanottava seinä (vahvistettu seinä)	51
7.4.2	Paineenkevennysseinä (heikennetty seinä)	51
7.5	Katto	53
7.6	Runko	54
7.6.1	Kehäpilarit	55
7.6.2	Nurkkapilarit	58
7.6.3	Keskilinjan päätypilarit	61
7.6.4	Rakenneputkiristikko	63
7.6.5	Päädyn kattopalkki	65
7.6.6	Jäykistys	67
7.6.7	Liitokset	68
7.7	Perustukset	69
7.7.1	Kehäpilarianturat	69
7.7.2	Nurkkapilarianturat	71
7.7.3	Päätypilarianturat	73
7.7.4	Sokkelit	74
8	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET	77
	LIITTEET	80

## LYHENTEET JA SYMBOLIT

A	pinta-ala
ATEX	Lainsäädännön ja standardisoinnin alue, joka käsittelee räjähdysvaarallisia tiloja ja laitteita
B	leveys
Ex-tila	Räjähdysvaarallinen tila
F	voima
G	pysyvä kuorma
H	vaakakuorma
K <sub>G</sub>	kaasun räjähdysvakio
K <sub>st</sub>	pölyn räjähdysvakio
L	pituus
LEL	alempi räjähdysraja
LOC	rajahappipitoisuus
N	pystykuorma
P	paine
Q	muuttuva kuorma
R	säde, etäisyys, resultantti
T	lämpötila
t	aika
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UEL	ylempi räjähdysraja
V	tilavuus, pystykuorma
$\psi$	yhdistelykerroin muuttuville kuormille
$\theta$	kerroin rakenteen vinoudesta



# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on kuvata, miten räjähdysvaarallisten tilojen rakennesuunnittelu poikkeaa perinteisestä rakennesuunnittelusta. Oleellista on perehtyä räjähdyskuormiin. Räjähdyspaineenpurun ja rakennuksen rakenteiden yhteissuunnittelu on tärkeä osa räjähdysvaarallisten tilojen rakennesuunnittelua.

Opinnäytetyössä käydään ensin läpi lainsäädännön näkökulmaa räjähdysvaarallisista tiloista ja niissä käytettävistä laitteista. Sen jälkeen käsitellään räjähdyspainetta, teollisuuden räjähdyksiä ja räjähdyskuormia. Työssä käy myös ilmi, millainen on mitoittava räjähdys rakennesuunnittelun näkökulmasta ja miten räjähdyspainetta saadaan purettua ulos rakennuksesta niin, ettei se vahingoita tilan kantavia rakenteita. Työn soveltavassa osassa laaditaan laskentaesimerkki tyypilliselle räjähdysvaaralliselle teollisuushallille.

Laskentaesimerkissä ei ole oleellista mitoittaa kaikkia rakenneosia vaan esittää, millaisia kuormia räjähdyksestä aiheutuu eri rakenteille. Seinäpaneelit mitoiteetaan, koska panelointi on osa paineenpurun toteutusta. Lisäksi paneelien kestävyys on epävarmaa silloin, kun on kyse suurista paineista. Räjähävänä kaasuna ilman kanssa toimii metaani.

Työn tilaaja on Sweco Rakennetekniikka Oy.

## **2 ATEX-LAINSÄÄDÄNTÖ**

ATEX-lainsäädäntö käsittelee räjähdysvaarallisia tiloja ja niissä käytettävien laitteiden lainsäädäntöä ja standardisointia. Räjähdysvaarallisten tilojen lainsäädäntö perustuu valtioneuvoston lakiasetuksiin, jotka käsittelevät räjähdysvaarallisiin ilmaseoksiin tarkoitettuja laitteita ja suojausjärjestelmiä sekä räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjuntaa. Lainsäädäntöä on myös käsitelty ATEX-koulutusmateriaaleissa. Luvuissa 2.1-2.5 käydään läpi räjähdysvaarallisten tilojen ja räjähdysvaarallisten tilojen laitteiden lainsäädäntöä sekä räjähdysten ennaltaehkäisyyn, rajoittamiseen ja räjähdys-suojausasiakirjaan liittyvää lainsäädäntöä.

### **2.1 Räjähdysvaaralliset tilat**

Räjähdysvaarallisella tilalla tarkoitetaan tilaa, jossa voi esiintyä räjähdyskelpoista ilmaseosta siinä määrin, että työntekijöiden terveyden ja turvallisuuden takaamiseksi erityiset suojelutoimenpiteet ovat tarpeen. Ilmaseosta pidetään räjähdyskelpoisena, jos se yhdessä palavan aineen (kaasu/sumu/pöly) ja normaalipaineisen ilman kanssa voi muuttua syttyväksi seokseksi. (L 18.6.2003/576.)

Räjähdysvaaralliset tilat luokitellaan kuuteen eri tilaluokkaan räjähdyskelpoisten ilmaseosten esiintymistaajuuden ja kestoajan perusteella. Luokissa 0, 1 ja 2 tilaan on mahdollista päästä esiintymään ilman ja kaasun/sumun/höyryn muodostama räjähdysvaarallinen ilmaseos. Luokissa 20, 21 ja 22 reagoivana aineena ilman kanssa toimii pöly. Vaadittavat suojaustoimenpiteet räjähdysvaaralliselle tilalle määräytyvät tilaluokitusten perusteella. Tilaluokka 0 vaatii eniten toimenpiteitä ja tilaluokka 2 vähiten. Taulukossa 1 on esitetty räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokat ja niiden määritelmät. (L 18.6.2003/576.)

## TAULUKKO 1. Räjähdyksvaarallisten tilojen tilaluokitukset (L 18.6.2003/576)

Tilaluokka	Määritelmä
0	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.</b>
1	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>normaalitoiminnassa satunnaisesti.</b>
2	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen <b>normaalioloissa on epätodennäköistä ja silloinkin se kestää vain lyhyen ajan.</b>
20	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.</b>
21	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>normaalitoiminnassa satunnaisesti.</b>
22	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen <b>normaalioloissa on epätodennäköistä ja silloinkin se kestää vain lyhyen ajan</b>

Räjähdyksvaaralliset tilat on merkittävä kuvan 1 mukaisella keltaisella kolmion muotoisella merkillä (L 18.6.2003/576).



KUVA 1. Räjähdyksvaarallisen tilan merkintä (L 18.6.2003/576)

### 2.2 Ex-laitteet

Ex-laitteilla tarkoitetaan räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäviä laitteita tai suojausjärjestelmiä. Ex-Laitteiden tulee täyttää säädöksissä määritellyt terveys- ja turvallisuusvaatimukset. (Räjähdyksvaarallisten tilojen turvallisuus. 2015, 7.)

ATEX-laitedirektiivin ja siihen liittyvien standardien mukaan laitteet jaetaan kahteen räjähdysryhmään sen mukaan, käytetäänkö niitä kaivoksissa vai muissa räjähdysvaarallisissa tiloissa. Ryhmään I kuuluvat laitteet, jotka ovat maanalaisissa kaivoksissa tai kaivosten maanpäällisissä osissa, joissa räjähdysvaara johtuu

kaivoksista pääsevistä kaasuista ja/tai pölyistä. Ryhmän I laitteet jaetaan luokkiin M1 ja M2, jotka perustuvat haluttuun/vaadittuun turvallisuustasoon. Ryhmään II kuuluvat laitteet, jotka on tarkoitettu käytettäväksi muissa kuin ryhmään I kuuluvissa paikoissa. Ryhmän II laitteet jaetaan luokkiin 1, 2 ja 3 turvallisuustason mukaan. Taulukossa 2 on esitetty laiteluokkien jaottelu. (EU 26.2.2014/34.)

*TAULUKKO 2. Laiteluokkien jaottelu (EU 26.2.2014/34)*

Laiteryhmä	Laiteluokka	Turvallisuustaso
I	M1	Erittäin korkea
I	M2	Korkea
II	1	Erittäin korkea
II	2	Korkea
II	3	Normaali

Tilaluokat määrittävät minkä laiteluokan laitteita kyseisessä tilassa saa käyttää. Taulukossa 3 on esitetty eri tilaluokissa sallitut laiteluokat. (L 18.6.2003/576.)

*TAULUKKO 3. Eri tilaluokkiin hyväksyttävät laiteluokat (L 18.6.2003/576)*

Tilaluokka	Laiteluokka
0	II 1 G
1	II 1 G, II 2 G
2	II 1 G, II 2 G, II 3 G
20	II 1 D
21	II 1 D, II 2 D
22	II 1 D, II 2 D, II 3 D

Palavat kaasut ja nesteet jaetaan kuuteen eri syttymisryhmään itsesyttymislämpötilan perusteella. Sähkölaitteiden suurimmat sallitut pintalämpötilat määritetään niiden mukaan. Taulukossa 4 on esitetty syttymisryhmät. (ATEX starttipaketti. 2006, 14.)

TAULUKKO 4. Syttymisryhmät (ATEX starttipaketti. 2006, 14)

Syttymisryhmä	Kaasun (höyryn) itsesyttymislämpötila (°C)	Sähkölaitteen suurin sallittu pintalämpötila (°C)
T1	> 450	450
T2	300...450	300
T3	200...300	200
T4	135...200	135
T5	100...135	100
T6	85...100	85

Kuvassa 2 on esitetty esimerkki räjähdysvaarallisessa tilassa käytettävän laitteen merkinnästä. (ATEX starttipaketti. 2006, 19)



KUVA 2. Esimerkki Ex-laitteen merkinnästä (ATEX starttipaketti. 2006, 19)

### 2.3 Räjähdyksen ennaltaehkäisy

Lainsäädännön mukaan on pyrittävä siihen, ettei räjähdysvaarallisia tiloja ole. Siihen ei aina päästä, koska joissain teollisuuden prosesseissa vapautuu räjähdysvaarallisia kaasuja. Kaasuja voi päästä myös vuotamaan vahingossa ympäröivään tilaan esim. putkien liitoksista. Tällöin räjähdyskelpoisten ilmaseosten syttyminen on estettävä. Jos syttymistä ei voida estää, on räjähdysten seuraukset minimoitava. (ATEX starttipaketti. 2006, 24.)

Ensisijainen keino räjähdysten estämiseksi on räjähdyskelpoisten ilmaseoksien välttäminen tai muokkaamalla niiden pitoisuuksia räjähdysrajojen (3.3) ulkopuolelle tai ilman happipitoisuutta hapen rajapitoisuuden alapuolelle, jolloin räjähdystä ei pääse syntymään. Jos mahdollista, palavat aineet on korvattava palamattomilla aineilla tai sellaisilla, jotka eivät voi muodostaa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Räjähdysvaaralliset ilmaseokset voidaan myös ohjata paikkaan, missä ne eivät ole vaaraksi. Vaarallisten kaasujen esiintymistä voidaan valvoa esimerkiksi kaasuilmaisimien avulla. (SFS 1127-1. 2011, 30.)

Räjähdysvaaralliset ilmaseokset vaativat ulkopuolisen syttymistähteen syttyäkseen palamaan ja räjähtämään. Estämällä kaasuseoksen pääsemisen kontaktiin mahdollisten syttymislähteiden (luku 3.7) kanssa on tehokas keino estää räjähdykset. Räjähdysherkät ilmaseokset voivat myös syttyä palamaan itsestään, jos lämpötila kasvaa tarvittavan suureksi. Valvomalla tilan ja tilassa olevien laitteiden liiallista kuumumista tämä voidaan estää. (SFS-EN 1127-1. 2011, 30.)

## **2.4 Räjähdysten rajoittaminen**

Jos räjähdystä ei voida estää, sen tuhoisia vaikutuksia voidaan rajoittaa pysäyttämällä räjähdys, keventämällä räjähdyspainetta kevennysluukkujen avulla tai rajoittamalla sen vaikutusalueita riittävästi esimerkiksi eristämällä, tuulettamalla, tukahduttamalla ja suojarakenteilla. (SFS-EN 1127-1. 2011, 52.)

Laitteet ja laitteistojen osat (säiliöt, kojeet, putket) jotka sisältävät räjähdysvaarallisia seoksia, on koteloitava suojarakentein niin, että räjähdys rajoittuu suojarakenteiden sisäpuolelle eikä rakenne repeä sisäpuolisen räjähdyspaineen vaikutuksesta. Näin voidaan rajoittaa räjähdysten vaikutusalueita mahdollisimman pieneksi ja välttää räjähdysvaikutusten ulottuminen kotelon ulkopuolelle. (SFS-EN 14994. 2007, 12.)

Laitteiden sisäistä räjähdyspainetta voidaan alentaa asentamalla laitteiden suojarakenteisiin paineenkevennysluukut, jotka aukeavat riittävän kovan paineen vaikutuksesta. Laitteiden suojarakenteisiin voidaan myös rakentaa tarkoituksella

heikommat kohdat, joiden rikkoutuminen ohjaa räjähdyspaineen ja liekit vaarattomaan suuntaan. (SFS-EN 14994. 2007, 12.)

Rakennus on suunniteltava kestämään mahdolliset räjähdykset rakenteiden ja paineenpoistoluukkujen yhteissuunnittelulla. Paineenpoistoluukkuja käytetään siis alentamaan myös räjähdysvaarallisen tilan tai rakennuksen räjähdyspainetta. Kevennysaukon tehtävä on purkaa räjähdyksestä aiheutuvaa ylipainetta ja liekkejä ulos suojattavasta tilasta. (Tourula 2019.)

Kevennysaukot/-luukut tulee suunnata työntekijöiltä ja laitteilta vaarattomaan suuntaan. Paineenpurkuaukon läheiseen ympäristöön ei tulisi sijoittaa mitään sytytysläheteiksi kelpaavaa, koska aukon läpi saattaa päästä virtaamaan tilassa olutta reagoimatonta ilmaseosta, joka voi syttyä palamaan sytytysläheteen kohdassa ja aiheuttaa uuden räjähdyskseen. Jotta paine saadaan suunnattua turvalliseen suuntaan, voidaan sen ohjaamiseksi käyttää suuntauslevyjä, jotka ohjaavat sen etenemistä luukuista purkautumisen jälkeen. (SFS-EN 14994. 2007, 36.)

Kuten laitteiden suojarakenteissa, räjähdysvaarallisiin tiloihin voidaan rakentaa jokin seinä heikommaksi, joka rikkoutuu paineen vaikutuksesta ohjaten paineen ja purkuliekit vaarattomaan suuntaan. Purkuliekkejä voidaan myös tukahduttaa siihen sopivalla laitteistolla. Paineenpurusta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.

Räjähdysvaarallisen tilan rakenteiden ja paineenpoistoluukkujen yhteissuunnittelussa tulee huomioida rekyylivoima (luku 5), joka aiheutuu räjähdyspaineen purkautumisesta paineenpoistoluukusta. Luukun läpi purkautuvalla kaasulla on liikemäärä, joka aiheuttaa saman suuruisen, mutta vastakkaisen suuntaisen voiman paineenpoistoluukun vastakkaiselle seinälle. Jos tilassa käytetään useampaa paineenpoistoluukkuja, on järkevää sijoittaa ne toisistaan vastakkaisille seinille, jotta saadaan pienennettyä tilan rakenteiden rasituksia. (SFS-EN 14994. 2007, 38.)

Muita mahdollisen räjähdysvaaran rajoittavia keinoja on pitää tila tarvittavan siistinä. Räjähdysvaarallisissa tiloissa ei saa säilyttää esimerkiksi tyhjiä palavien nesteiden astioita, koska ne toimivat pommien tavoin ilmaseoksen syttyessä. Tilat on pidettävä mahdollisimman puhtaina romuista ja muista esineistä, jotka voivat sinkoilla ympäriinsä räjähdys tapahtuessa. Hyvällä ilmanvaihdolla ja pölynpoistolaitteilla voidaan vähentää tilassa olevaa pölyä, mikä voi toimia palavana aineena ilman kanssa. (Maistiaisista ATEX-koulutuksesta. 2017.)

## 2.5 Räjähdysvaarasuojasasiakirja

Räjähdysvaarasuojasasiakirjan tarkoitus on arvioida räjähdysvaaran riskejä sekä käsitellä vaadittavia suojaustoimenpiteitä. Suomen lain mukaan (2005/390, §44) räjähdysvaarasuojasasiakirja on laadittava kaikille työpaikoille, joilla käsitellään palavia kaasuja, nesteitä, sumuja tai pölyä siinä määrin, että niiden käsittelyyn liittyy mahdollisuus räjähdyskelpoisen ilmaseoksen muodostumiseen.

Räjähdysvaarasuojasasiakirjassa on esitettävä erityisesti seuraavat asiat:

- räjähdysvaaran arviointi
- tilojen ja niissä käytettävien laitteiden luokittelu
- laiteluettelo sähkö- ja mekaanisille laitteille
- luokiteltujen tilojen asianmukaiset merkinnät
- tilojen toiminnasta vastuussa olevien henkilöiden nimet
- tiloissa työskentelevien työntekijöiden määrä
- luettelo mahdollisista syttymislähteistä
- työvälineiden turvallinen käyttö ja sen valvonta
- asianmukaiset suojaustoimenpiteet.

(ATEX starttipaketti. 2006, 4.)

Oleellista on selvittää, mitkä nesteet, kaasut, sumut ja pölyt voivat aiheuttaa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Riskien arvioimiseksi on kuvattava tilanteet, joissa räjähdyskelpoiset aineet voivat esiintyä, ja arvioitava mahdollisten räjähdysten vaikutusten laajuus. Toimenpiteet mahdollisen räjähdysvaaran estämiseksi tai ra-



joittamiseksi on kuvattava. Räjähdyksvaaralliset tilat on luokiteltava pohjapiirustukseen (josta selviävät poistumistiet) ja tiloissa olevat syttymislähteet on tunnistettava. Räjähdyksvaarallisissa tiloissa käytettävät laitteet on luetteloitava ja arvioidava niiden vaatimuksenmukaisuus ja niiden aiheuttamat mahdolliset vaarat. Oleellista räjähdysuojasiasiakirjassa on myös selvittää ja toteuttaa asianmukaiset tekniset ja organisatoriset suojaustoimenpiteet. (ATEX starttipaketti. 2006, 5.)

Työnantajan on huolehdittava, että räjähdysuojasiasiakirja laaditaan ennen laitoksen käyttöönottoa ja että se pidetään ajan tasalla. Räjähdyssuojasiasiakirja on päivitettävä, jos tiloja, välineitä tai järjestelyjä muutetaan oleellisesti. (L 18.6.2003/576.)

Palavat aineet ja niiden ominaisuudet voidaan kirjata räjähdysuojasiasiakirjaan taulukon 5 esittämällä tavalla.

**TAULUKKO 5. Palavat aineet ja niiden ominaisuudet**  
(ATEX starttipaketti. 2006, 9)

1.1 RÄJÄHDYSKELPOISIA ILMASEOKSIA AIHEUTTAVAT PALAVAT NESTEET								
NIMITYS	KÄYTTÖ-TARKOITUS	LUOKITUS	LEIMAHDUS LÄMPÖTILA	ITSESYTTYMISLÄMPÖTILA	SYTTYMISRAJAT	HÖYRYN TIHEYS	SYTTYMISRYHMÄ	RÄJÄHDYSRYHMÄ
1.2 RÄJÄHDYSKELPOISIA ILMASEOKSIA AIHEUTTAVAT PALAVAT KAASUT								
NIMITYS	KÄYTTÖ-TARKOITUS	LUOKITUS	ITSESYTTYMISLÄMPÖTILA	SYTTYMISRAJAT	KAASUN TIHEYS	SYTTYMISRYHMÄ	RÄJÄHDYSRYHMÄ	
1.3 RÄJÄHDYSKELPOISIA ILMASEOKSIA AIHEUTTAVAT PALAVAT PÖLYT								
NIMITYS	PÖLYN HIUKKASKOKO		ALIN RÄJÄHDYSKELPOINEN PÖLYPITOISUUS	MINIMISYTTYMISENERGIA	PÖLYPILVEN SYTTYMISLÄMPÖTILA			

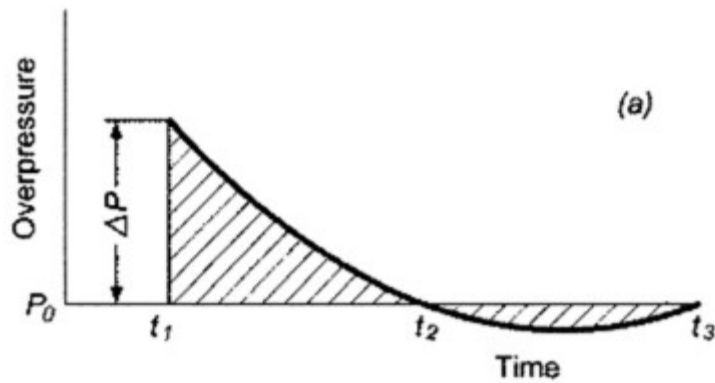
### 3 RÄJÄHDYSPAINE

Tässä luvussa käsitellään räjähdysä, jotka aiheutuvat palavien aineiden (kaasut, höyryt, sumut, pölyt) sekoittumisesta ilmaan ja syttyvät palamaan ulkoisen syttymislähteen vaikutuksesta. Ulkoisia syttymislähteitä voivat olla esimerkiksi kuumat pinnat, liekit ja kuumat kaasut, kipinät ja sähkölaitteet. Päinvastoin kuin avotulesa palaminen, räjähdystä voidaan kuvata liekin itsestään etenemisenä räjähdyskelpoisessa ilmaseoksessa. Kaikki kaasuräjähdykset luokitellaan joko detonaatioksi (luku 3.1) tai deflagraatioksi (luku 3.2). (SFS-EN 1127-1. 2011, 14.)

#### 3.1 Detonaatio

Detonaatio on äkillinen räjähdys, jossa räjähdysaalto leviää ympäröivään reagoimattomaan ilmaseokseen ylääänenupeudella. Detonaatiossa räjähdysaaltole on tyypillistä melkein olematon paineen nousu, sillä räjähdysaalto saavuttaa maksimipaineen heti reaktion alettua. Tästä syystä detonaatiot saavat aikaan enemmän tuhoa kuin deflagraatiot. Käytännössä detonaation syntymisen todennäköisyys määrittelemättömässä räjähdyskelpoisessa ilmaseoksessa on mitätön, koska kaasu-ilmaseos ei ole homogeeninen. Voimakkaiden räjähteiden, kuten TNT:n, räjähdyspaineen kuvaaja on lähellä detonaation ideaalia kuvaajaa (kuva 3). (Casal 2008, 122.)

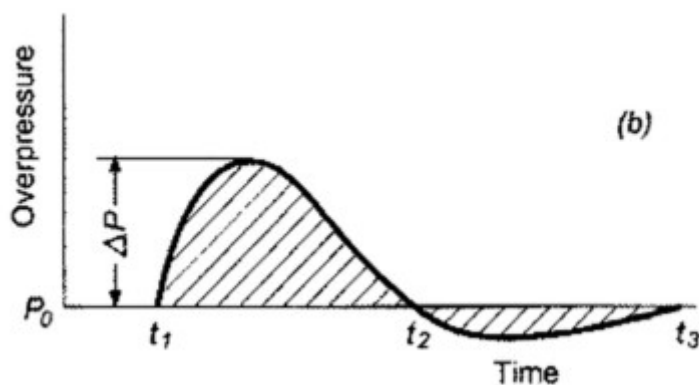
Kuvassa 3 on esitetty detonaation aiheuttama paineenousu ajan hetkellä  $t$  (Casal 2008, 122).



KUVA 3. Detonaation paine-aika -kuvaaja (Casal 2008, 122)

### 3.2 Humahdus/Deflagraatio

Kaasupilviräjähdyistä kutsutaan deflagraatioksi, jos räjähdys ei tapahdu äkillisesti, vaan kehittyy palamalla. Deflagraatioissa kemialliset reaktiot tapahtuvat huomattavasti hitaammin kuin detonaatioissa ja palava ilmaseos levittyy ympäröivään tilaan alisoonisella nopeudella saaden tarvittavan energian palamiseen ympäröivästä palamattomasta ilmaseoksesta. Käytännössä kaikki kaaasupilviräjähdykset ovat deflagraatioita. Kuvassa 4 on esitetty deflagraation aiheuttama paineenousu ajan funktiona. (Casal 2008, 122.)



KUVA 4. Deflagraation paine-aika -kuvaaja (Casal 2008, 122)

### 3.3 Ilmaseoksen palamisominaisuudet

Palavan aineen ja ilman yhdistelmän ominaisuudet on määritettävä, koska mahdollista räjähdysvaaraa ei palava aine aiheuta sellaisenaan, vaan se vaatii sekoittumisen ilman kanssa. Kaasu-ilmaseoksen ominaisuudet vaikuttavat aineen palamiskäyttäytymiseen ja sen mahdollisuuteen syttymiselle tai räjähdykselle. Merkitseviä ominaisuuksia ovat mm. leimahduspiste, räjähdysrajat, rajahappipitoisuus ja palamisnopeus. (SFS-EN 1127-1. 2011, 16.)

Leimahduspiste tarkoittaa alinta lämpötilaa, jossa ilma-kaasuseos pystyy syttymään. Räjähdysrajat ovat palavan aineen pitoisuusrajoja, joiden alueella räjähdys on mahdollinen. Räjähdysalueen rajat ovat alempi räjähdysraja (LEL) ja ylempi räjähdysraja (UEL), jotka ilmoitetaan yleensä tilavuusprosentteina. Räjähdysrajoihin (leimahdusrajat) vaikuttavat mm. lämpötila, paine, syttyvän aineen ominaisuudet ja syttymislähde. Rajahappipitoisuus (LOC) on ilman ja kaasun seoksen maksimihappipitoisuus, jossa räjähdystä ei tapahdu. (SFS-EN 1127-1. 2011, 18.)

Taulukossa 6 on esitetty eri kaasujen palamisominaisuuksia. Kaasujen palamisnopeuksien arvot on saatu NFPA 68 (2013) -standardista ja leimahdusrajat lähteestä Kondo ym. (2006).

## TAULUKKO 6. Kaasujen palamisominaisuuksia

Kaasu	Kaava	Palamisnopeus (m/s)	Alempi leimahdusraja (til-%)	Ylempi leimahdusraja (til-%)
Asetyleeni	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,66	2,5	100
Asetoni	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	0,54	2,6	13
Butaani	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,45	1,6	8,4
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,47	3	12,5
Metaani	CH <sub>4</sub>	0,4	4,9	15,8
Propaani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,46	2,3	9,5
Vety	H <sub>2</sub>	3,12	4	75

### 3.4 Räjähdyksen käyttäytyminen

Räjähdykelpoisen ilmaseoksen syttymisen jälkeistä käyttäytymistä voidaan kuvata mm. seuraavilla parametreillä: suurin räjähdyspaine, suurin räjähdyspaineen nousunopeus ja räjähdysvakio (SFS-EN 1127-1. 2011, 16).

Suurin räjähdyspaine ( $P_{\max}$ ) tarkoittaa enimmäispainetta räjähdyskelpoisen ilmaseoksen räjähtäessä suljetussa tilassa, määritellyissä olosuhteissa (SFS-EN 14034-1. 2011, 6).

Suurin räjähdyspaineen nousunopeus ( $(dp/dt)_{\max}$ ) on räjähdyspaineen nousunopeuden enimmäisarvo deflagraation paine-aika -kuvaajasta. Räjähdyspaineen suurimmasta nousunopeuden arvosta saadaan johdettua räjähdysvakion arvo. Räjähdysvakiota pidetään verrannollisena räjähdyspaineen nousunopeuden ja tarkasteltavan tilan kuutiojuuren tuloon. Räjähdyskuormista kerrotaan tarkemmin luvussa 5. (SFS-EN 14994. 2007, 10.)

Räjähdysvakiota käytetään standardeissa parametrina räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelussa. Räjähdysvakiota tarvitaan mm. kevennusaukkujen koon laskemisessa.  $K_G$  on räjähdysvakio kaasu-ilmaseoksille ja  $K_{St}$  pöly-ilmaseoksille. (SFS-EN 14994. 2007, 14.)

### 3.5 Palavat aineet ilmaseoksessa

Teollisuudessa palavien aineiden esiintyminen ilmassa on mahdollista. Palavina aineina pidetään aineita, jotka voivat muodostaa ilman kanssa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen. Räjähdyskelpoinen ilmaseos voi mahdollisesti muodostua tehtaissa kemiallisten reaktioiden tai biologisten prosessien yhteydessä. (SFS-EN 1127-1. 2011, 16.)

Kaasut, höyryt ja sumut voivat muodostaa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen riittävän korkean sekoittumisasteensa vuoksi. Pölyt voivat oletetusti muodostaa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen, jos hiukkaskoot ovat alle 0,5 mm. Käytännössä esiintyvien aerosolien ja pölyjen hiukkaskoot ovat usein välillä 0,001 mm ja 0,1 mm. (SFS-EN 1127-1. 2011, 16.)

Ilmaseoksen räjähtäminen on mahdollinen, jos palavan aineen pitoisuus ilmassa on räjähdysrajojen välissä, eli yli alemman ja alle ylemmän räjähdysrajan. Pölyillä räjähdysrajat eivät ole yhtä merkitseviä kuin kaasuilla ja sumuilla, koska ilman pölypitoisuus voi vaihdella merkittävästi tarkasteltavassa tilassa kerrostumien ja ilmaan sekoittumisen vuoksi. Räjähdyksiä voi esiintyä kaasujen, pölyjen ja sumujen hybridiseoksissa, vaikka mikään palava aine ei yksinään ole räjähdysalueella. Jotkut kemiallisesti epästabiliitit aineet, kuten asetyleeni ja etyleenioksidi, voivat räjähtää jopa ilman happea. Tämä johtuu niiden mahdollisuudesta aikaansaada eksotermisia, lämpöä tuottavia reaktioita. Näiden aineiden ylempi räjähdysraja on 100 %. (SFS-EN 1127-1. 2011, 18.)

Räjähdysrajat riippuvat vallitsevasta lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Ilmanpaineen ja lämpötilan kasvaessa myös räjähdysalue kasvaa. (SFS-EN 1127-1. 2011, 18.)

### 3.6 Palavan ilmaseoksen syttyminen

Syttymisherkkä ilmaseos syttyy palamaan, jos se saa tarvittavan määrän energiaa syttymistä varten ulkoisesta syttymislähteestä (luku 3.7). Syttymisherkkä ilmaseos voi syttyä myös palamaan, jos se saavuttaa riittävän korkean lämpötilan (itsestäänsyttymislämpötila), jossa se syttyy palamaan ja palaminen jatkuu ilman ulkopuolista energialähdettä. Tätä kutsutaan itsestään syttymiseksi. Itsestään syttyminen voi johtaa myös räjähdykseen. (Luettelo yleisimmistä palavista nesteistä. 1999, 5.)

Räjähdyskelpoiselle ilmaseokselle on määritettävä syttymisominaisuudet. Näitä ovat mm. pienin syttymisenergia ja alin syttymislämpötila. Pienin syttymisenergia on pienin energiamäärä, jonka kaasu/pölypilven syttyminen vaatii. Siihen vaikuttavia tekijöitä ovat palavan aineen tyyppi ja konsentraatio. Alin syttymislämpötila tarkoittaa alinta lämpötilaa, jossa syttymisherkkä ilmaseos syttyy palamaan. (SFS-EN 1127-1. 2011, 18.)

Taulukossa 7 on esitetty eri kaasujen pienin syttymisenergia ja itsesyttymislämpötila (Bartok - Sarofilm, 1991).

*TAULUKKO 7. Kaasujen minimisyttymisenergia ja itsesyttymislämpötila*

Kaasu	Kaava	Minimisyttymisenergia (mJ)	Itsesyttymislämpötila (°C)
Asetyleeni	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,03	305
Asetoni	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	1,15	465
Butaani	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,76	365
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,42	472
Metaani	CH <sub>4</sub>	0,33	537
Propaani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,4	470
Vety	H <sub>2</sub>	0,02	400

### 3.7 Syttymislähteet

Räjähdyksivaarallinen ilmaseos vaatii aina ulkopuolisen syttymislähteen syttyäkseen palamaan (pl. itsestään syttyminen). Kun syttymislähde on riittävän vahva (tarpeeksi energiaa syttymiseen), räjähdyskelpoinen ilmaseos syttyy palamaan seospilven reuna kohtaa syttymislähteen (SFS-EN 1127-1. 2011, 20). Seuraavaksi esitetään mahdollisia syttymislähteitä teollisuudessa.

Kuumat pinnat voivat toimia syttymislähteenä räjähdyskelpoisen ilmaseoksen kohdatessa. Kuumen pinnan lisäksi syttymislähteenä voi toimia kuumalla pinnalla oleva pölykerros tai kiinteä aine, jonka kuuma pinta on sytyttänyt palamaan. Kuumen pinnan sytyttämiskyky kasvaa kuumen pinnan lämpötilan ja pinta-alan kasvaessa. Vaikuttavia tekijöitä on myös kuumen pinnan muoto ja joissakin määrin materiaali. Lisäksi syttymiseen vaikuttaa ilmaan sekoittuneen aineen tyyppi ja pitoisuus. (SFS-EN 1127-1. 2011, 20.)

Liekit ja kuumat kaasut voivat sytyttää räjähdyskelpoisen ilmaseoksen helposti jopa pienissä määrin. Liekkejä esiintyy palamisreaktioissa yli 1 000 °C:n lämpötiloissa ja reaktiotuloksina syntyy kuumia kaasuja. Pölyn palaessa syntyy myös hehkuvia kiinteitä hiukkasia. Hitsaus- ja leikkaustyössä syntyy suuria kipinöitä, jotka ovat erittäin tehokkaita syttymislähteitä. (SFS-EN 1127-1. 2011, 22.)

Mekaanisesti syntyneet kipinät syntyvät kitkaa, iskuja tai kulutusta sisältävissä prosesseissa, joissa kiinteästä aineesta irtoaa kuumia aineksia (kipinöitä). Kipinät toimivat hyvin sytytyslähteinä. (SFS-EN 1127-1. 2011, 22.)

Sähkölaitteet voivat toimia sytytyslähteinä niistä mahdollisesti syntyvistä kipinöistä tai valokaarista. Sähkölaitteiden suojajännitteet ovat mitoitettu henkilöiden suojaksi sähköiskuilta (esim. alle 50 V), mutta sitäkin alemmilla jännitteillä voi riittää energiaa ilmaseoksen syttymiseen. Sähkölaitteet voivat myös kuumentua riittävästi toimiakseen sytytyslähteenä, varsinkin, jos sähkölaitteen pinnalle on kertynyt pölyä. (SFS-EN 1127-1. 2011, 24.)



Sähköiset hajavirrat voivat toimia sytytyslähteenä. Niitä voi esiintyä sähköä johdettavissa järjestelmissä tai niiden osissa. Hajavirrat voivat synnyttää kipinöitä tai valokaaria pienilläkin jännite-eroilla, jos järjestelmän hajavirtojen käyttämiä osia erotetaan tai liitetään toisiinsa. (SFS-EN 1127-1. 2011, 24.)

Staattinen sähkö eli staattinen sähkövaraus voi aiheuttaa purkauksia, jotka synnyttävät kipinöitä. Kipinät ja purkaukset voivat sytyttää kaikenlaisia räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. (SFS-EN 1127-1. 2011, 24.)

Salamapurkauksen sytyttävät aina räjähdyskelpoisen ilmaseoksen osuessaan siihen. Syttyminen on aina myös mahdollinen ukkosenjohdattimen saavuttaman korkean lämpötilan seurauksena. Ukkosmyrskyt voivat indusoida korkeita jännitteitä laitteisiin, suojausjärjestelmiin ja komponentteihin jopa ilman salamapurkauksia ja aiheuttaa syttymisvaaran. (SFS-EN 1127-1. 2011, 26.)

Adiabaattinen puristus sekä paineaallot voivat toimia sytytyslähteenä, koska niiden vaikutuksesta voi syntyä tarvittavan korkeita lämpötiloja räjähdysherkän ilmaseoksen sytyttämiseen. Paineaaltoja syntyy esim., kun johdetaan äkillisesti korkeapaineisia kaasuja putkistoihin, jolloin paineaallot etenevät alemman paineen suuntaan ääntä nopeammin. Paineaaltojen suunnan muutoksissa, kuten putken mutkissa voi syntyä erittäin korkeita lämpötiloja. (SFS-EN 1127-1. 2011, 26.)

Eksotermiset eli lämpöä synnyttävät reaktiot voivat muodostua syttymislähteiksi. Näin voi käydä, jos lämpöä syntyy enemmän kuin sitä häviää ympäristöön. Jos reaktio saavuttaa riittävän korkean lämpötilan, räjähdysherkkä ilmaseos voi syttyä palamaan. Tällaisia reaktioita ovat mm. itsestään syttyvät aineet yhdessä ilman kanssa, vesi ja alkalimetallit yhdessä, orgaanisten peroksidien hajaantuminen ja polymerointireaktiot. (SFS-EN 1127-1. 2011, 28.)

Sytytyslähteinä voi toimia myös sähkömagneettiset aallot, ultraäänit ja ionisoiva säteily. Mahdolliset syttymislähteet on luokiteltava sen mukaan, kuinka usein/todennäköisesti niitä esiintyy. (SFS-EN 1127-1. 2011, 28.)

### 3.8 Räjähdyksen mahdolliset seuraukset

Räjähdyksissä suurimpia vahinkoa aiheuttavia tekijöitä ovat mm. liekit ja kuumat kaasut, lämpösäteily, paineaallot, sinkoutuvat kappaleet ja aineiden vaaraa aiheuttavat päästöt. Rakennesuunnittelun näkökulmasta merkittävin tekijä on räjähdyksestä aiheutuva paineaalto, mikä on otettava huomioon rakenteiden suunnittelussa. Myös liekit ja tulipalo huomioitava. Räjähdykskuormia käsitellään tarkemmin tässä työssä luvussa 5. (SFS-EN 1127-1. 2011, 20.)

Räjähdyksen ja sen vaikutuksien suuruuksiin vaikuttavat palavien aineiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, ilmaseoksen määrä ja rajoitteet, ympäristön geometria ja esteet, räjähtävien laitteiden kotelointi, rakenteiden lujuus, paineenpurkumenetelmät sekä vaaralle altistuvien kohteiden fysikaaliset ominaisuudet. (SFS-EN 1127-1. 2011, 20.)

Rakennetekniikan näkökulmasta räjähdysvaaralliset tilat on pyrittävä suunnittelemaan niin, että räjähdysten sattuessa rakennuksen runko pysyy ehjänä. Räjähdyksen voimakkuutta voidaan keventää rakennuksesta paineenkevennysluukun/luukkujen avulla. (Tourula 2019.)

## **4 RÄJÄHDYKSET TEOLLISUUDESSA**

### **4.1 Räjähdyksen aiheuttajia**

Teollisuudessa räjähdykset ovat pääsääntöisesti kaasu, sumu, höyry tai pölyräjähdyksiä. Kaasut, sumut, höyryt ja pölyt voivat räjähtää syttymislähteen kohdassa. Räjähdykset voidaan luokitella rajoittuneiksi ja rajoittamattomiksi räjähdyksiksi. (Furness - Mucket 2007.)

Rajoittuneet räjähdykset tapahtuvat rajoitetussa ympäristössä, kuten kattiloissa, putkissa, venttiileissä tai kanavissa. Tällaisten räjähdysten varalta laitteet ja putket ym. on suojattava koteloilla niin, ettei räjähdys rajoittuu suojarakenteeseen. (Furness - Mucket 2007.)

Tässä työssä käsitellään pääosin rajoittamattomia kaasuräjähdyksiä, joita voi satua teollisuudessa prosessien yhteydessä, kun kaasua pääsee virtaamaan ympäröivään tilaan jostakin syystä. Tällaisten räjähdysten varalta rakennus/räjähdysvaarallinen tila on suunniteltava niin, että se kestää räjähdyspaineen vaikutukset.

### **4.2 Räjähdysonnettomuuksia**

Vaurio- ja onnettomuusrekisteri VARO on listannut Turvallisuus- ja kemikaaliviraston eri lähteistä keräämiä tietoja Suomessa sattuneista onnettomuuksista. Seuraavat räjähdystapaukset ovat kaikki kyseiseltä listaukselta. (Vaurio- ja onnettomuusrekisteri VARO. 2013.)

Vuonna 2015 teollisuuslaitoksen hakettimella syntyi pölyräjähdys. Puuhakkeen pöly syttyi palamaan murskaimessa olleen kiven aiheuttamasta kitkalämmöstä. Rakennuksen paineenkevennyksluukut toimivat suunnitellusti ja räjähdyspaine pääsi purkautumaan niiden kautta suunnitellusti. (Kitkalämmöstä syttynyt räjähdys aiheutti vaaratilanteen. 2015.)

Vuonna 2012 poistoilmanputki räjähti kemiantehtaalla. Räjähdyks sai alkunsa ilmeisesti hitsauskipinän lentämisestä putkeen, jossa se kohtasi vedyn tai pölyn, joka syttyi palamaan ja räjähti. Räjähdyks rajoittui poistoilmanputkeen, joka tuhoutui. (Poistoilmanputki räjähti kemiantehtaalla. 2012.)

Vuonna 2014 voimalaitoksen koekäytössä olevalla pyrolyysilaitoksella tapahtui kemikaaliräjähdyks. Räjähdyks tapahtui, kun pesurin ja lauhduttimen välissä olevan vesisäiliön huoltoluukku avattiin. Räjähdyksen syynä pidetään prosessin epäonnistunutta työtystä, jonka seurauksena typpi pääsi vuotamaan prosessiin kytköksissä olevaan voimalaitoskattilaan. Avatun huoltoluukun kautta kuumaan prosessiin pääsi happea. Happi reagoi epäonnistuneen työtysten vuoksi prosessissa edelleen olleen typpikaasun kanssa ja räjähti. Räjähdyksessä loukkaantui kolme henkilöä. (Epäonnistunut inertointi johti räjähdykseen ja työntekijöiden loukkaantumiseen. 2014.)

## 5 RÄJÄHDYSKUORMAT

Kaasupilviräjähdyksissä räjähdyspaineen suuruus riippuu palavan kaasun palamisominaisuuksista ja konsentraatiosta sekä ympäröivän tilan tilavuudesta, ilmanpaineesta ja lämpötilasta (SFS-EN 1127-1. 2011, 20).

### 5.1 Mitoittava räjähdys

Opinnäytetyön laskentaesimerkissä mitoittava räjähdys on sellainen kaasupilviräjähdyksessä, jossa ympäröivä tila on täytetty stoikiometrisessä tilassa olevalla kaasuilmasella. Stoikiometrinen tila on ilman ja palavan kaasun konsentraatio, jossa kaasu reagoi hapen kanssa niin, että kaikki happi kuluu reaktiotuotteeksi. Tällöin räjähdyksessä paine ja lämpötila saavuttavat suurimmat teoreettiset arvot. (Valkama 2017, 24.)

Oletetaan, että ympäröivän tilan lämpötila on 300 K (25 °C) ja ympäristön paine on 1 bar (ilman normaalipaine). Lisäksi oletetaan, ettei tilassa ole turbulenssia edistäviä rakenneseosia, jotta laskentaesimerkissä voidaan soveltaa standardin SFS-EN 14994 mukaisia kaavoja kevennysaukon ja liekkiä vaikuttusten laskentaan.

Taulukossa 8 on esitetty eri kaasuille stoikiometrinen konsentraatio sekä palamisen jälkeinen lämpötila ja paine edellä vallitsevissa olosuhteissa, kun räjähdys tapahtuu vakiotilavuudessa ja adiabaattisesti. Arvot on saatu Juha Valkaman vuonna 2017 tekemästä diplomityöstä Räjähdyksivaarallisen tilan paineenkevennys. Valkama on saanut taulukon paineen ja lämpötilan maksimiarvot Gaseq-ohjelmistosta, joka laskee palamisreaktion tasapainotilanteen.

TAULUKKO 8. Kaasujen stoikiometrinen konsentraatio sekä lämpötila ja paine palamisen jälkeen (Valkama 2017)

Kaasu	Kaava	Stoikiometrinen konsentraatio (til-%)	Tv (K)	Pv (bar)
Asetyleeni	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	7,72	2915	9,7
Asetoni	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	5,9	2577	9,2
Butaani	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3,12	2629	9,3
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,64	2622	9,1
Metaani	CH <sub>4</sub>	9,47	2588	8,8
Propaani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,02	2630	9,3
Vety	H <sub>2</sub>	29,6	2767	8

Taulukossa olevia paineen maksimiarvoja voidaan käyttää räjähdyspaineen differentiaaliyhtälön ratkaisemisessa (luku 5.3).

Laskentaesimerkissä (luku 7) ilman kanssa reagoivana aineena toimii metaani. Teollisuuden prosesseissa se on yleinen kaasu, jota voi päästä sekoittumaan ilman kanssa räjähdysvaarallisissa tiloissa.

## 5.2 Suurin räjähdyspaine $P_{max}$

Taulukosta 8 nähdään räjähdyspaineen maksimiarvot eri kaasuille, kun ne ovat stoikiometrisessä tilassa ja ympäristön olosuhteet ovat normaalit eli ilmanpaine 1 bar ja lämpötila 300 K. Esimerkiksi metaanilla suurin räjähdyspaineen arvo on 8,8 bar edellä mainituissa olosuhteissa ja silloin, kun räjähdys tapahtuu vakiotilavuudessa ja adiabaattisesti. Näitä arvoja voidaan käyttää räjähdyspaineen suurimman nousunopeuden määrittämiseen (Valkama 2017, 24).

### 5.3 Suurin räjähdyspaineen nousunopeus $(dP/dt)_{max}$

Räjähdyspaineen suurin nousunopeus  $(dP/dt)_{max}$  saadaan deflagraation differentiaaliyhtälöstä. Nagy ym. (1969) kehittivät yksinkertaistetun differentiaaliyhtälön deflagraation paineen nousulle (kaava 1). Yhtälöä soveltaen voidaan määrittää räjähdyspaineen suurin nousunopeus. (Nagy ym. 1969.)

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u}{R_e} P_m^{2/3} \frac{P}{P_0} (P_m - P_0)^{1/3} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)^{2/3}$$

KAAVA 1

$P$  = paine ajanhetkellä  $t$  [bar]

$t$  = aika [s]

$S_u$  = palamisnopeus [m/s] (taulukko 6)

$R_e$  = tilan säde =  $(3V/4\pi)^{1/3}$  [m]

$P_m$  = paineen maksimiarvo [bar] (taulukko 8)

$P_0$  = ympäröivän tilan paine ennen räjähdystä [bar]

Jos yhtälöön sijoittaa paineen  $P$  arvoksi paineen maksimiarvon  $P_m$  (taulukko 8), yhtälön tulos on yhtä kuin paineen suurin muutosnopeus  $(dP/dt)_{max}$  [bar/s].

Yhtälöstä voidaan haluttaessa piirtää paine-aika-kuvaaja esimerkiksi MathCad-ohjelmistolla ja käyrästä lukea suurin nousunopeus  $P_m$ -arvon kohdalta. Tällä kohdalla käyrä on ”jyrkimmillään”.

Paineen nousulle on kehitetty myös yhtälöitä, joilla saataisiin tarkempia tuloksia, mutta ne voidaan ratkaista vain numeerisesti.

## 5.4 Räjähdyksvakio $K_G$

Räjähdyksvakio saadaan johdettua paineen suurimman nousunopeuden arvosta kaavalla 2 (SFS-EN 14994. 2007, 10).

$$K_G = (dp/dt)_{max} V^{1/3} \text{ [bar m/s]} \quad \text{KAAVA 2}$$

$(dp/dt)_{max}$  = paineen suurin nousunopeus [bar/s]

$V$  = ympäröivän tilan tilavuus [ $m^3$ ]

Räjähdyksvakiota käytetään standardeissa parametrina räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelussa. Kun tiedetään räjähdysvakion arvo, voidaan laskea paineenkevennysluukun koko. Kevennysaukon/aukkojen koko vaikuttaa rekyylivoiman suuruuteen, joka aiheutuu kevennyksessä purkautuvan aineen liikevoimasta. (SFS-EN 14994. 2007, 38.)



## 6 PAINEENPURUN JA RAKENTEIDEN SUUNNITTELU

Opinnäytetyön yksi tärkeimmistä asioista on selvittää, miten räjähdyspaine huomioidaan paineenpoistoluukkujen ja rakenteiden (runko, seinät ja katto) suunnittelun yhteissuunnittelulla.

### 6.1 Paineenpurku

Räjähdyksestä aiheutuvaa ylipainetta voidaan purkaa rakennuksesta ulos kevennysaukkojen avulla. Kevennysaukot voivat olla siihen tarkoitettuja luokkuja tai sitten jokin seinä voidaan rakentaa tarkoituksella heikommaksi niin, että se sitten räjähdysten sattuessa rikkoontuu ja purkaa räjähdyspainetta ulos rakennuksesta. Kevennysaukot on suunniteltava aukeamaan ennalta määrättyssä paineessa ja avaamaan välittömästi räjähdysten tapahduttua paineelle riittävän suuren kevennysaukon, jotta räjähdysten maksimipaine rakenteen sisäpuolella ei ylitä rakenteille suunniteltua paineenkestävyyttä. (SFS-EN 14797. 2007, 8.)

Kevennysaukkojen tarkka mitoitus on kevennyssuunnittelun tärkein osa. Kevennysvaatimukset riippuvat kaasun palamisominaisuuksista, ilmaseoksen olotilasta ja tilan geometriasta. Kevennysaukot on sijoitettava niin, etteivät ne heikennä paineenkevennyksen tehokkuutta. Yksi iso kevennysaukko vastaa useampaa pienempää kevennysaukkoa, jos niiden yhteispinta-ala vastaa ison aukon pinta-alaa. Räjähdyspaineenpurussa on myös huomioitava liekkien vaikutukset, sinkoutuvat pirstaleet, paineaallot kevennysaukon ulkopuolella sekä paineenpurusta aiheutuvat rekyylivoimat. (SFS-EN 14994. 2007, 14.)

#### 6.1.1 Kevennysaukon koon laskenta

Standardin SFS-EN 14994 mukaisesti kevennysaukon pinta-ala erilliselle kompaktille tilalle voidaan laskea kaavalla 3.

$$A = \left\{ \left[ (0,1265 \lg(K_G) - 0,0567) p_{red}^{-0,5817} \right] + \left[ 0,1754 p_{red}^{-0,5722} (p_{stat} - 0,1 \text{ bar}) \right] \right\} V^{2/3} \quad \text{KAAVA 3}$$

$P_{red}$  = räjähdyspaineen arvo kevennyksen jälkeen [bar]

$P_{stat}$  = kevennyslaitteen staattinen toimintapaine, eli paineen arvo, jonka saavutettua kevennysluukku aukeaa [bar]

$K_G$  = kaasun räjähdysvakio [bar m/s]

$V$  = suojattavan tilan tilavuus [ $m^3$ ]

Menetelmää voidaan soveltaa, jos tilassa ei ole turbulenssia merkittävästi edistäviä rakenneosia. Lisäksi yhtälöllä ovat seuraavat käyttöehdot:

- $K_G \leq 550$  bar m/s
- $0,1 \text{ bar} \leq P_{stat} \leq 0,5$  bar
- $P_{red} \leq 2$  bar
- $P_{red} > P_{stat} + 0,05$  bar
- $V \leq 1000$   $m^3$
- $L/D \leq 2$
- lähtötilanteessa normaali ilmanpaine. (SFS-EN 14994. 2007, 14.)

Standardin SFS-EN 1991-1-7 mukaan pölyräjähdyksissä suorakulmion muotoisen tilan paineenkevennyspinta-ala voidaan laskea kaavalla 4.

$$A_v = [4,485 \times 10^{-8} p_{max} K_{St} p_d^{-0,569} + 0,027(p_{stat} - 10)p_d^{-0,5}] V^{0,753} \quad \text{KAAVA 4}$$

$p_{max}$  = pölyräjähdysten aiheuttama suurin paine [ $kN/m^2$ ]

$K_{St}$  = pölyilmaseoksen räjähdysvakio [ $(kN/m^2)(m/s)$ ]

$p_d$  = räjähdyspaineen arvo kevennyksen jälkeen [ $kN/m^2$ ]

$p_{stat}$  = kevennysaukon staattinen toimintapaine [ $kN/m^2$ ]

$V$  = huonetilan tilavuus [ $m^3$ ] (SFS-EN 1991-1-7. 2014, 106.)

Taulukossa 9 on esitetty suuntaa antavia arvoja eri pölyjen maksimipaineelle ja räjähdysvakioille (SFS-EN 1991-1-7. 2014, 106).

TAULUKKO 9. Maksimipaineen ja räjähdysvakion arvoja eri pölyille

Pölyn tyyppi	$p_{max}$ kN/m <sup>2</sup>	$K_{St}$ (kN/m <sup>2</sup> )(m/s)
Ruskohiili	810...1 000	18 000
Selluloosa	800...980	27 000
Kahvi		9 000
Maissi jyvinä, maissirouhe		12 000
Maissitärkkelys		21 000
Muu villja jyvinä		13 000
Maitojauhe	810...970	16 000
Kivihilli		13 000
Sekarehu		4 000
Paperi		6 000
Hernejauho		14 000
Pigmentti (värijauhe)	650...1 070	29 000
Kumi	740	14 000
Ruisjauho, vehnäjäuho		10 000
Soijarehu		12 000
Sokeri	820...940	15 000
Pesujauhe		27 000
Puu, puujauho	770...1 050	22 000

### 6.1.2 Rekyylivoima

Räjähdyspaineen kevennyksessä purkautuvan aineen liikevoima aiheuttaa rekyylin tilan rakenteille. Rekyylivoima vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan purkautuvaan kaasuun nähden. Kevennysaukon vastakkainen sivu/seinä ottaa siis vastaan tämän voiman ja se on huomioitava rakenteiden suunnittelussa. Maksimirekyylivoima lasketaan kaavalla 5.

$$F_{R,max} = 119 A p_{red}$$

KAAVA 5

$A$  = kokonaiskevennyspinta-ala [m<sup>2</sup>]

$p_{red}$  = kevennetty räjähdyspaine [bar] (SFS-EN 14994. 2007, 38.)

### 6.1.3 Räjähdyspaineaallon vaikutukset kevennysaukon ulkopuolella

Kevennysaukosta purkautuva räjähdyspaine aiheuttaa paineaallon aukon ulkopuolella. Tilan ulkopuolisen painehiipun määrittämiseen voidaan käyttää kaavaa 6.

$$P_{ext} = \left[ 1,24 P_{red} \left( \sqrt{A/R} \right)^{1,35} \right] / \left[ 1 + (\alpha/56)^2 \right]$$

KAAVA 6

$P_{ext}$  = painehiippu kevennysaukon ulkopuolella [bar]

$P_{red}$  = maksimi kevennetty räjähdyspaine [bar]

$A$  = kevennyspinta-ala [m<sup>2</sup>]

$R$  = etäisyys kevennysaukolle [m]

$\alpha$  = paineen purkautumissuunnan ja kevennysaukon keskiakselin välinen kulma asteina ( $\alpha = 0^\circ$  suoraan kevennysaukosta ulospäin)

Yhtälössä ovat seuraavat käyttöehdot:

- $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$
- $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$
- $0,1 \text{ bar} < P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}$
- $P_{max} \leq 9 \text{ bar}$
- $K_G \leq 200 \text{ bar m/s}$
- $L/D \leq 2$ . (SFS-EN 14994. 2007, 34.)

### 6.1.4 Liekkien vaikutukset

Kevennysaukosta purkautuvat liekit leviävät joka suuntaan, mutta pisimmälle ne leviävät purkauksen pääsuuntaan. Liekin pituuden arviointiin sen pääsuunnassa voidaan käyttää kaavaa 7.

$$L_F = 5 V^{1/3}$$

KAAVA 7

$L_F$  = liekin pituus sen pääsuunnassa [m]

$V$  = suojattavan tilan tilavuus [m<sup>3</sup>]

Yhtälössä ovat seuraavat käyttöehdot:

- tilassa on yksi kevennysaukko
- $0,1 \leq m^3 V \leq 50 m^3$
- $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$
- $0,1 \text{ bar} < P_{red} \leq 1,0 \text{ bar}, P_{red} > P_{stat}$
- $P_{max} \leq 9 \text{ bar}$
- $K_G \leq 100 \text{ bar m/s}$
- $L/D < 2$ . (SFS-EN 14994. 2007, 34.)

## 6.2 Rakenteet

Kevennyslaitteet keventävät räjähdyksestä aiheutuvaa ylipainetta. Räjähdyksvaarallisen tilan rakenteiden tulee kestää kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ , joka on paineen arvo kevennyksen jälkeen. Rakenteiden tulee kestää myös räjähdyspaineenpurusta aiheutuva rekyylivoima, joka voi olla kevennettyä räjähdyspainetta suurempi paine. Heikoimmilla rakennuksissa ovat kuorirakenteet, minkä vuoksi tämän työn laskentaesimerkissä ne mitoitetaan. On epäselvää, onko mahdollista toteuttaa sellaisia kuorirakenteita, jotka kestävät tietyn suuruisen räjähdyspaineen. Muita rakenteita ei tässä työssä mitoiteta.

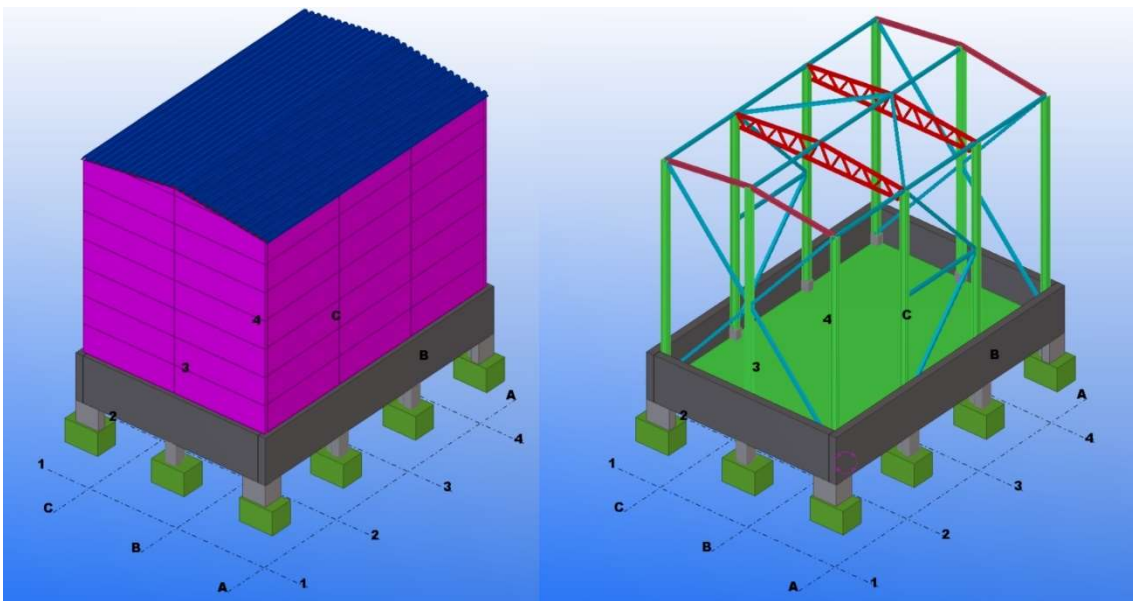
Räjähdyksissä saavutetaan myös huomattavan suuria lämpötiloja, mutta sen lyhyestä kestoajasta johtuen räjähdysvaarallisen tilan rakenteiden palomitoitus ei poikkea normaalin rakennuksen rakenteiden palomitoituksesta. On kuitenkin todennäköistä, että räjähdysten seurauksena rakennukseen syttyy tulipalo.

## 7 LASKENTAESIMERKKI

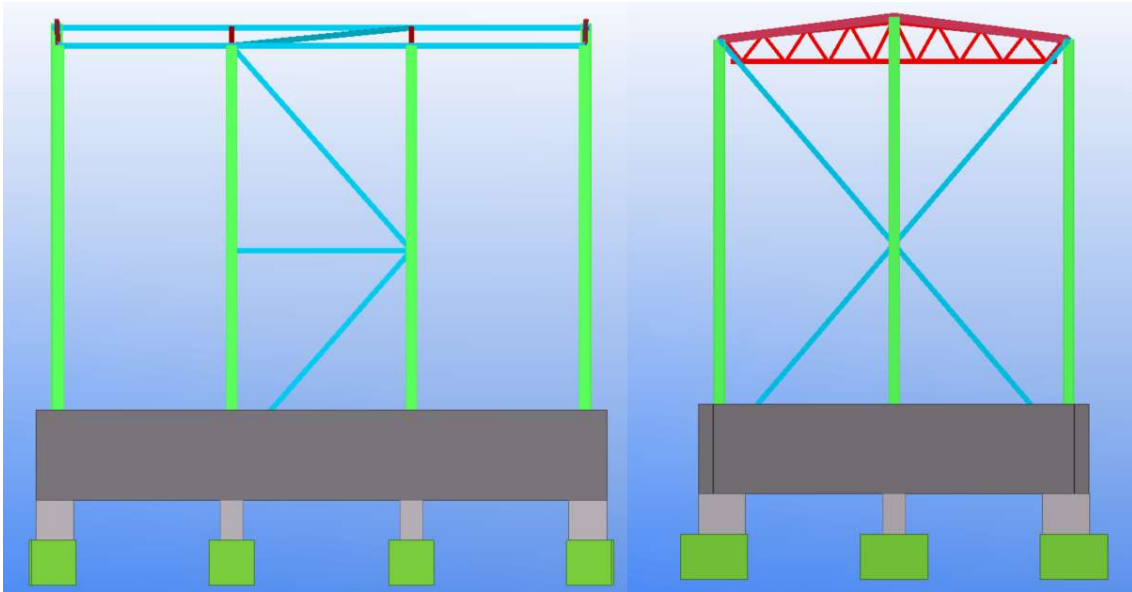
Laskentaesimerkissä esitetään laskentaesimerkki rakennetekniikan näkökulmasta räjähdysvaaralliselle tilalle, jonka koko on 12 m x 8 m ja harjakorkeus 10 m. Laskentaesimerkki sisältää rakennusrungon, perustukset ja kuorirakenteet.

Palavana aineena ilman kanssa toimii metaani. Metaania voi päästä vuotamaan tilaan esimerkiksi putkien liitoksista. Metaania on mahdollista vuotaa tilaan niin paljon, että metaani ja ilma saavuttavat stoikiometrisen konsentraation (89 m<sup>3</sup> metaanikaasua). Tällöin räjähdysten paineaalto on voimakkain mahdollinen, minkä metaani-ilma-yhdistelmä voi saavuttaa räjähtäessään suljetussa tilassa (Valkama 2017). Kuvitellaan, että kaasuseos kohtaa syttymislähteen keskellä tarkasteltavaa tilaa, eli syttyminen tapahtuu keskeisesti. Tilassa ei ole turbulenssia merkittävästi edistäviä rakenneosia.

Kuvissa 5 ja 6 on havainnollistettu räjähdysvaarallisen tilan rakenteita.



KUVA 5. Havainnekuva Ex-tilasta



KUVA 6. Havainnekuva Ex-tilan rungosta

## 7.1 Rakennejärjestelmä

Esimerkin räjähdysvaarallinen tila on teräsrunkoinen lämpöeristetty halli. Taulukossa 10 on esitetty rakennuksen perustietoja.

TAULUKKO 10. Esimerkkirakennuksen perustiedot

Seuraamusluokka	CC2
Maastoluokka	2
Pääasiallinen rakennusmateriaali	Teräs
Pääasiallinen rakennustapa	Työmaalla asennettava konepajalla valmistettu teräsrunko
Kerrosluku	1
Kokonaiskorkeus	10 m
Kerrosala	96 m <sup>2</sup>

Rakennus perustetaan pilarianturoiden päälle soralle. Runkopilareina toimivat 4 metrin jaolla olevat HEB-profiilit pitkällä sivuilla ja päädyissä. Katon pääkannattimina toimivat rakenneputkiristikot. Rakennus jäykistetään rungon poikkisuunnassa kehäpilareilla ja päätyihin asennettavilla jäykistysiteillä. Rungon pituussuunnassa jäykistys toteutetaan kehäpilarien ja pääkannattajien väliin asennettavilla jäykisteristikoilla kuvan 6 mukaisesti.

## 7.2 Kuormat

Räjähdykset luokitellaan onnettomuustilanteiksi, joissa kuormien yhdistely tapahtuu kaavalla 8.

$$G_{kj} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ tai } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 8}$$

$G_{kj}$  = pysyvä kuorma

$A_d$  = määräävä onnettomuuskuorma (räjähdyspaine)

$Q_{k,1}$  = pääasiallinen muuttuva kuorma

$Q_{k,i}$  = muut samanaikaiset muuttuvat kuormat

$\psi_{1,1}$  = yhdistelykerroin, kun muuttuva kuorma on lumi- tai tuulikuorma

$\psi_{2,1}$  = yhdistelykerroin, kun muuttuva kuorma ei ole lumi- tai tuulikuorma

$\psi_{2,i}$  = yhdistelykerroin muille samanaikaisille muuttuville kuormille

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Taulukossa 11 on esitetty Standardin SFS-EN 1990 mukaiset Suomessa käytettävät hyötykuormien yhdistelykertoimet.



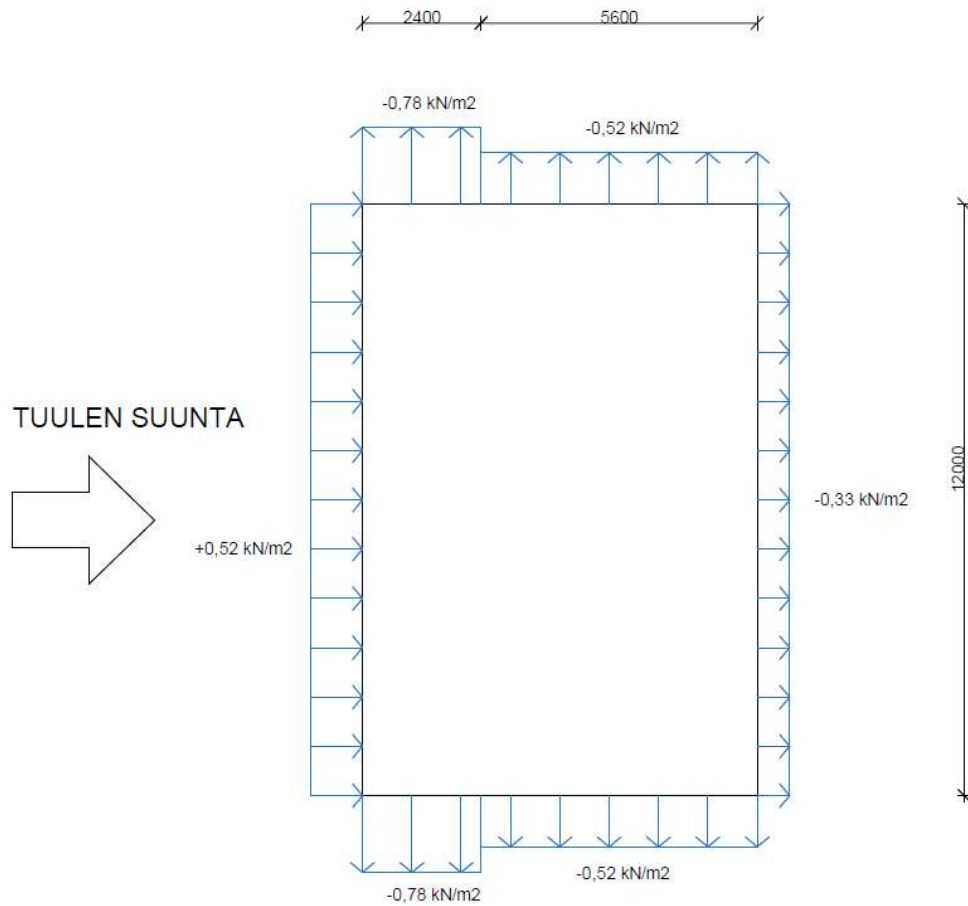
TAULUKKO 11. Suomessa käytettävät hyötykuormien yhdistelykertoimet (SFS-EN 1990. 2006, 86)

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) <sup>*)</sup> kun $s_k < 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,5	0,2
Jaakuorma <sup>**)</sup>	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<sup>*)</sup> Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään $\psi$ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. <sup>**)</sup> Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

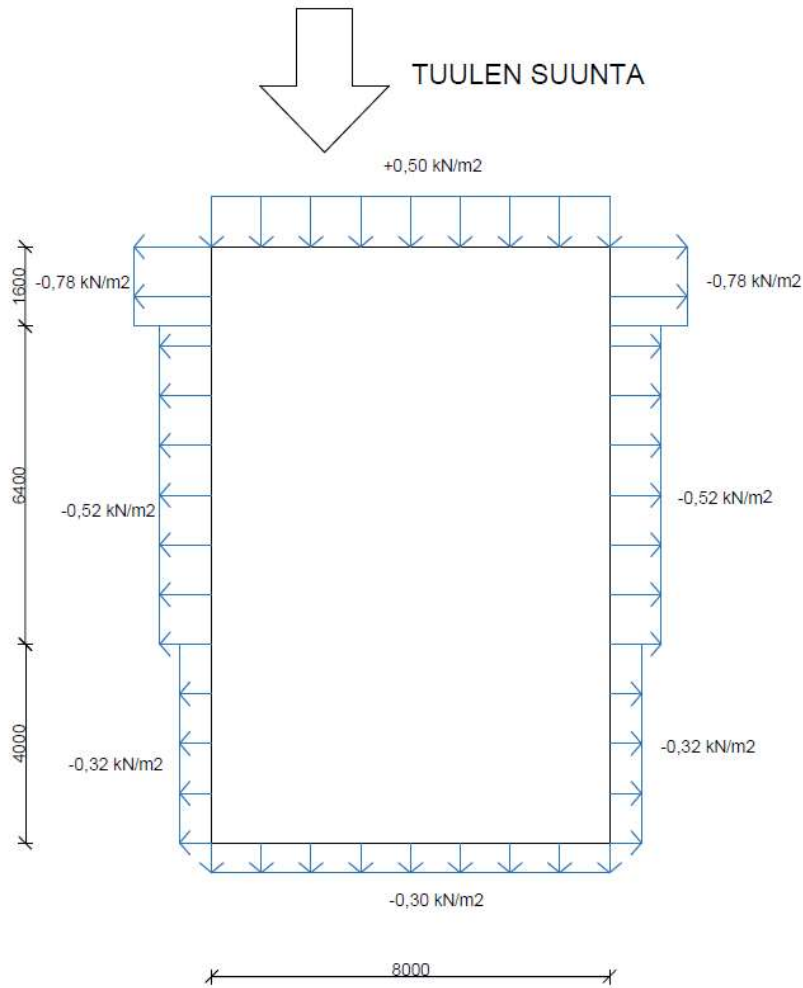
Rakenteet on mitoitettava myös normaalissa murtorajatilassa kestämiin kuormitukset muissa kuin räjähdystapauksissa. Mitoitustilanteissa, joissa ei tarkastella räjähdyskuormia, mitoituskuormat saadaan normaalista murtorajatilasta kuormitusyhdistelyn yhtälöstä. Rakenteiden tulee kestää kaikki eri kuormitusyhdistelmät. Vaarallisin yhdistelmä on mitoitettava. Tässä esimerkissä käsitellään vain räjähdystapauksia.

## 7.2.1 Tuulikuormat

Rakennuksen maastoluokka on 2 ja korkeus on 10 m. Standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan puuskanopeudenpaineeksi saatiin laskettua  $0,65 \text{ kN/m}^2$ . Tuulen suurimmaksi imun arvoksi rakennuksen pystypinnoille saatiin  $-0,78 \text{ kN/m}^2$  ja suurimmaksi tuulen paineeksi  $0,52 \text{ kN/m}^2$ . Kuvissa 7 ja 8 on esitetty tuulen paineet seinille.

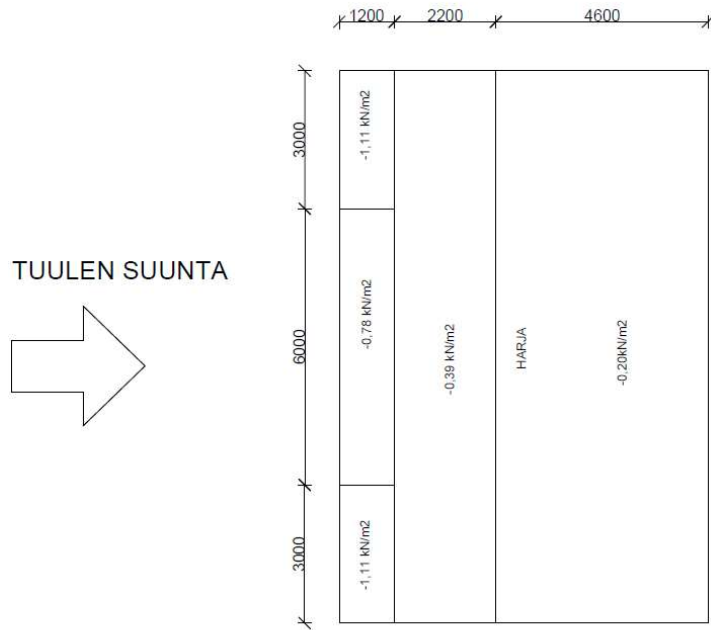


KUVA 7. Tuuli kohden rakennuksen pidempää sivua, tuulen paineet seinille

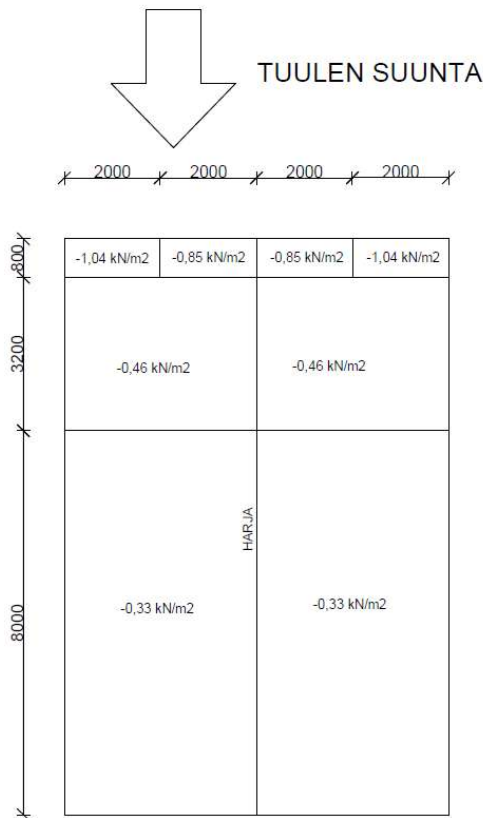


**KUVA 8.** Tuuli kohden rakennuksen lyhempää sivua, tuulen paineet seinille

Katolle suurimmaksi tuulen imun arvoksi saatiin laskettua  $1,1 \text{ kN/m}^2$ . Kuvissa 9 ja 10 on esitetty tuulen paineet katolle.



KUVA 9. Tuuli harjaa vastaan kohtisuorassa, tuulen paineet katolle



KUVA 10. Tuuli harjan suuntaan, tuulen paineet katolle

### 7.2.2 Lumikuormat

Opinnäytetyössä tarkasteltava rakennus sijaitsee Oulussa, joten maanpinnan lumikuorman ominaisarvo  $s_k$  on  $2,75 \text{ kN/m}^2$ . Harjakaton muotokerroin on 0,8 eli katolla olevan lumikuorman ominaisarvo  $q_k$  on  $2,2 \text{ kN/m}^2$ . Kun tarkastellaan tilannetta, jossa tapahtuu räjähdys, lumikuorma on edullinen kuorma eli se parantaa katon ja kattoristikoiden kestävyyttä, koska se vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan räjähdyspaineen kanssa (Tourula 2019). Lumikuormaa ei siis huomioida onnettomuusrajatilamitoituksessa.

### 7.2.3 RäjähdySKUORMAT

940 kuutiometrin tilassa räjähtävälle metaani-ilmaseokselle saatiin laskettua räjähdyspaineen suurimmaksi nousunopeudeksi  $(dP/dt)_{max} = 13,6 \text{ bar/s}$  (kaava 1 sivulla 32). (Nagy ym. 1969.)

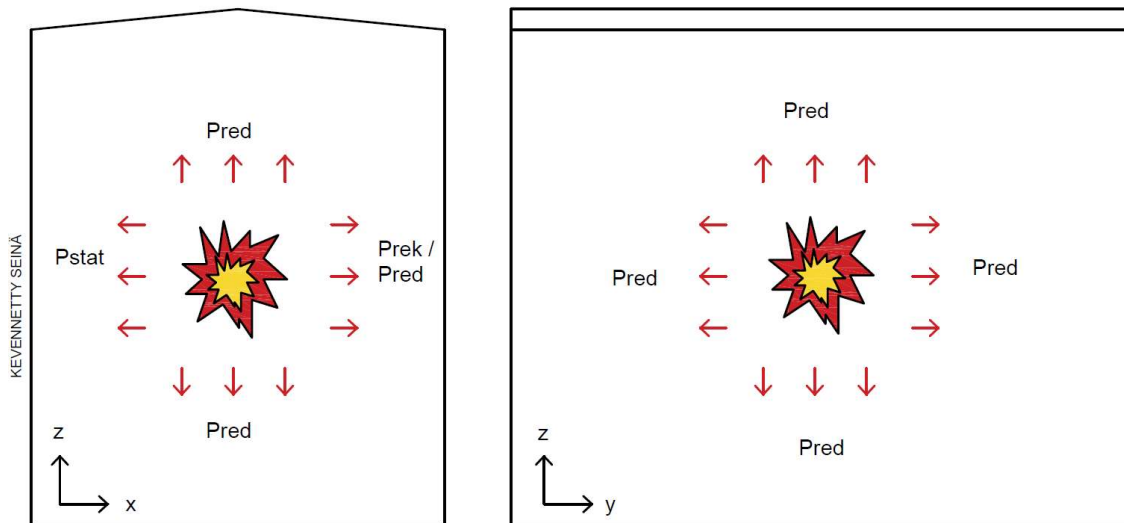
Räjähdysvakiota pidetään verrannollisena räjähdyspaineen nousunopeuden ja tarkasteltavan tilan tilavuuden kuutiojuuren tuloon. Kaavasta 2 (sivulla 32) saatiin laskettua metaanin räjähdysvakioksi  $K_G = 132,8 \text{ bar m/s}$ . (SFS-EN 14994. 2007, 10.)

Jos ilman kanssa reagoivana aineena olisi esimerkiksi vety, sen erittäin suuresta palamisnopeudesta johtuen räjähdysvakion  $K_G$  arvo olisi  $845 \text{ bar m/s}$ . Se on niin suuri arvo, ettei standardin SFS-EN 14994 mukaista kaavaa paineenkevennyspinta-alan määrittämiseen voisi käyttää (kaava 3 sivulla 34). Yhtälön yksi reunaehdoista on, että  $K_G \leq 550 \text{ bar m/s}$ . (SFS-EN 14994. 2007, 14.)

Metaani-ilmaseoksen suurin mahdollinen paine suljetussa tilassa voi olla  $8,8 \text{ bar}$  (taulukko 8 sivulla 30), mutta painetta saadaan kevennettyä kevennysaukon avulla. Tässä esimerkissä kevennetyn räjähdysylipaineen  $P_{red}$  arvoksi voitiin sallia  $6,5 \text{ kN/m}^2$ . Rakenteiden tulee siis kestää tämä paine. Sallitun kevennetyn paineen arvo vaikuttaa kevennysaukon pinta-alan kokoon. Mitä suurempi paineenkevennysaukon koko on, sitä pienempi kevennetty räjähdysylipaine on. (SFS-EN 14994. 2007, 14.)

Kevennetyn räjähdysylipaineen  $P_{red}$  arvoa voidaan käyttää räjähdyskuorman arvona kaikille tilan rakenteille, paitsi kevennetylle seinälle ja sen vastakkaiselle seinälle. Kevennettyyn seinään vaikuttaa heikennetyn seinän staattinen toimintapaine  $P_{stat}$ , mikä on kevennettyä räjähdysylipainetta pienempi paine. Tilassa olevan kevennysaukon vastakkaiseen seinään vaikuttaa paineenpurusta aiheutuva rekyylipaine  $P_{rek}$ , mikä voi olla kevennettyä räjähdyspainetta suurempi paine. (SFS-EN 14994. 2007, 38.) Paineenpurusta ja sen seurauksena aiheutuvien eri suuruisten räjähdyspaineiden arvoista kerrotaan tarkemmin luvussa 7.3. Siinä lasketaan kevennysaukon pinta-ala ja rekyylivoima.

Kuvassa 11 on havainnollistettu räjähdyspaineen vaikutukset eri suunnissa. Jos paineenpurku toteutettaisiin käyttämällä koko seinän heikentämisen sijasta pienempiä kevennysaukkoja, seinän rakenteille tuleva räjähdyskuorma olisi  $P_{red}$ .



*KUVA 11. Räjähdyspaineen laskennalliset arvot eri suuntiin*

Yksityiskohtaisemmat laskelmat räjähdyskuormille on esitetty liitteessä 1.

### 7.3 Paineenpurun toteutus

Tässä esimerkissä räjähdysten aiheuttamaa ylipainetta puretaan rakennuksesta ulos tekemällä jokin seinä heikommaksi, minkä vuoksi se pettää/rikkoontuu räjähdysten seurauksena. Heikennetyin seinän paneelien täytyy kestää tuulen aiheuttaman maksimi-imun, mutta pettää, kun paine saavuttaa tietyn ylipaineen arvon  $P_{stat}$ .

Kevennysaukon pinta-alaa laskettaessa täytyy määrittää staattinen toimintapaine  $P_{stat}$ , jolla kevennetty seinä pettää sekä kevennetty sallittu räjähdysten ylipaine  $P_{red}$ , joka rakenteiden on kestettävä sen jälkeen, kun räjähdyspaine on päässyt purkautumaan kevennysaukosta. Tuulen suurimmaksi imun arvoksi saatiin laskettua murtorajatilassa 1,17 kN/m<sup>2</sup> (maastoluokka 2, rakennuksen korkeus 10 m, tuulen osavarmuuskerroin 1,5). Kevennetyn seinän staattiseksi toimintapaineeksi voitiin asettaa  $P_{stat} = 1,5$  kN/m<sup>2</sup> (0,015 bar).

Standardin SFS EN 14994 mukaan kevennysaukon pinta-alaa laskettaessa  $P_{red}$  arvon on oltava vähintään 5 kN/m<sup>2</sup> suurempi kuin  $P_{stat}$  arvo. Tällöin kevennetyn ylipaineen arvoksi voitiin sallia  $P_{red} = P_{stat} + 5$  kN/m<sup>2</sup> = 6,5 kN/m<sup>2</sup> (0,065 bar). Standardin mukaan kevennyspinta-alaa laskettaessa kevennysaukon staattisen toimintapaineen pitäisi olla yli 0,1 bar, mutta se on niin suuri paine, että vahvimmatkin seinäpaneelit pettävät ennen sitä 4 metrin jännevälillä (Traypan-laskenta-ohjelma).

Edellä mainituilla paineen arvoilla saatiin laskettua tilan kevennyspinta-alaksi 93 m<sup>2</sup> (kaava 3 sivulla 34). Järkevin tapa toteuttaa tämä kevennyspinta-ala oli tehdä toinen rakennuksen pidemmästä seinästä heikommaksi seinäpaneelien osalta. Tällöin kevennyspinta-alaksi tuli 97 m<sup>2</sup>. Toteutuva kevennyspinta-ala on siis laskettua suurempi, jolloin kevennetyn räjähdyspaineen arvo on varmallalla puolella. Heikennetty seinä pitää pystyä purkautumaan vaarattomaan suuntaan, missä sen takana ei oleskele ihmisiä tai ei ole muita rakennuksia, jotka voivat vahingoittua ulos purkautuvan paineaallon, liekkien ja sinkoutuvien kappaleiden vaikutuksesta. Paneelien lentämistä kauas rakennuksesta voidaan estää sitomalla pa-

neelit pilareihin kiinni esimerkiksi narulla jollakin systeemillä. Paineaallon ja liekkien vaikutuksia heikennetyn seinän ulkopuolella voidaan arvioida kaavoilla 6 ja 7.

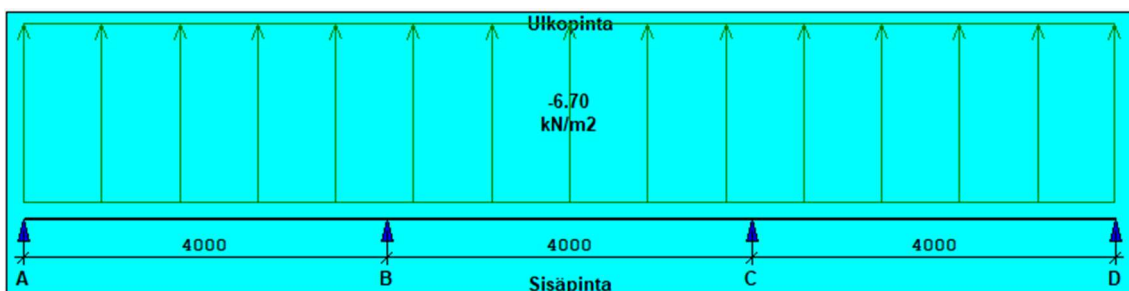
Paineenpurussa aiheutuu rekyylivoima kevennetyn seinän vastakkaiselle seinälle. Rekyylivoimaksi saatiin laskettua  $F_{rek} = 750,3 \text{ kN}$  (kaava 5 sivulla 35). Tämä jaettiin seinän pinta-alalla ( $115 \text{ m}^2$ ), jolloin seinälle tuleva rekyylipaine  $P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2$ . Kevennetyn seinän vastakkaisen seinän pitää siis kestää tämä rekyylipaine. Tässä tapauksessa rekyylivoima sattui olemaan yhtä suuri kuin kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ . Jos kevennyspinta-ala olisi suurempi, rekyylipaine olisi kevennettyä räjähdyspainetta suurempi paine. (SFS-EN 14994. 2007, 38.)

Yksityiskohtaisemmat laskelmat paineenkevennyspinta-alalle ja rekyylivoimalle on esitetty liitteessä 1.

#### 7.4 Sandwich-paneelien mitoitus

Ulkoseinäpaneelit mitoitetaan kestämään tuulen maksimi-imu sekä kevennetty räjähdysten ylipaine. Paneelien suurin jänneväli on 4 m. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä paneeleille tuleva kuorma (kuva 12) voidaan määrittää kaavan 8 avulla (esitetty sivulla 40).

$$P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w = 6,5 \text{ kN/m}^2 + 0,2 * 0,78 \text{ kN/m}^2 = 6,7 \text{ kN/m}^2.$$



KUVA 12. Paneelien kuormat (TrayPan-laskentaohjelma)



Tuulikuorma onnettomuusrajatilassa kerrotaan yhdistelykertoimella 0,2, koska on erittäin epätodennäköistä, että räjähdysten sattuessa ulkona olisi samaan aikaan myrsky, jolloin tuulen imu saavuttaisi suurimman teoreettisen arvon. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä onnettomuuskuormaa ei kerrota osavarmuuskertoimilla. (SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Ruukki on kehittänyt TrayPan-nimisen laskentaohjelman, jolla voidaan mitoittaa erilaisia seinä- ja kattopaneeleita. Ruukin SPA S paneelityyppi on lujin Ruukin Suomen tehtailla valmistettavista paneeleista. Se on jäykin ja sillä on korkeimmat lujuusarvot. Se soveltuu siis hyvin räjähdysvaarallisten tilojen ulkoseinäpaneeliksi. Tätä paneelityyppiä käytetään ulkoseiniin ja sisäkattoihin. Jos oletetaan, että räjähdyspaine vaikuttaa paneeleihin samalla tavalla kuin tuulen imu, TrayPan-laskentaohjelman mukaan SPA 175S -paneeli kestää edellä mainitut kuormitukset, kun jänneväli on 4 m ja kiinnikkeiden etäisyys paneelin reunasta on 30 mm (yleinen reunaetäisyys). Mitoittava kriteeri on leikkausvoima, jolle käyttöaste on 94,2 %. Taulukossa 12 on esitetty paneelien käyttöasteet eri kriteereille.

**TAULUKKO 12. SPA 175S -paneelien käyttöastetaulukko (TrayPan-laskentaohjelma)**

**\*\*\* Mitoittava käyttöaste: 94.2 \*\*\***

**Tulokset levyittäin**

**Levy 1: SPA175S 0.60+0.50**

Jänne/ Tuki	Solmu	M [kNm/m]	F/V [kN/m]	f [mm]	Ka [%]	Kriteeri
B	14	0.0	-13.2		94.2	Leikkausvoima
1	8/2000	-13.1			93.2	Kenttämomenti
1	8/2000			24.0	60.0	Taipuma

**Levy 2: SPA175S 0.60+0.50**

Jänne/ Tuki	Solmu	M [kNm/m]	F/V [kN/m]	f [mm]	Ka [%]	Kriteeri
C	30	0.0	-13.2		93.5	Leikkausvoima
2	22/2000	-12.9			91.8	Kenttämomenti
2	22/2000			23.5	58.6	Taipuma

**Levy 3: SPA175S 0.60+0.50**

Jänne/ Tuki	Solmu	M [kNm/m]	F/V [kN/m]	f [mm]	Ka [%]	Kriteeri
C	30	0.0	-13.2		94.2	Leikkausvoima
3	36/2000	-13.1			93.2	Kenttämomenti
3	36/2000			24.0	60.0	Taipuma

Paneeli kiinnitetään teräksisiin runkopilareihin Ruukin vakiokiinnikkeillä. Ruukin nettisivuilla paneeleille on ilmoitettu kiinnitysten kestävyudet, jotka perustuvat heikoimmalle paneelityypeille testatuille kiinnityksille, jotta niiden kattavuus olisi mahdollisimman hyvä. Kiinnityksen kestävyys riippuu mm. paneelin pintalevyn paksuudesta, aluslevyn mitoista ja reunaetäisyydestä sekä jonkin verran myös paneelin lujuusominaisuuksista. Vahvemmillä paneeleilla kiinnitysten kestävyudet ovat siis ilmoitettuja arvoja paremmat. TrayPanilla voidaan mitoittaa myös paneelien kiinnityksiä. Kiinnitys tarkoittaa paneelia yhdessä kiinnikkeen kanssa, jolloin käytännössä murtuma tapahtuu paneelissa, eli paneelin pintalevy murtuu. Kiinnikkeiden kestävyudet ovat kiinnikevalmistajan vastuulla ja kiinnikkeen kestävyys täytyy olla aina korkeampi kuin paneelin kiinnityksen kestävyys (Heikkilä 2019).

TrayPanin mukaan paneelien kiinnitys kestää karkaistuilla poraruuveilla SDT14-S29-5,5 (vakiokiinnike), joissa on 29 millimetrin aluslevy ja kiinnikkeiden etäisyys paneelin reunasta on 30 mm, kun kiinnikkeitä on 6 kpl / paneelin pääty. Mitoittava kriteeri on läpiveto ja käyttöaste on 84,4 %. Taulukossa 13 on esitetty kiinnitysten käyttöasteet.

**TAULUKKO 13. Kiinnitysten käyttöasteet paneeleille SPA 175S (TrayPan-laskentaohjelma)**

	kpl/lpa	K.aste	Mitoittava kriteeri
A	6	OK 83.1	Läpiveto
B	6/6	OK 84.4	Läpiveto
C	6/6	OK 84.4	Läpiveto
D	6	OK 83.1	Läpiveto

Yleensä vastaavan kaltaisien teollisuusrakennusten pilarijako on 6 m. Kevennetyn räjähdyspaineen arvo 6,5 kN/m<sup>2</sup> on kuitenkin niin suuri, että vahvimmatkin paneelit murtuvat 6 metrin jännevälillä. Jos halutaan suunnitella räjähdysvaarallinen tila/rakennus, jossa käytetään 6 metrin pilarijakoa, täytyy hyväksyä, että pa-

neelit murtuvat ainakin osittain tai saavat pysyviä muodonmuutoksia. Tässä tapauksessa paneelit on kuitenkin kiinnitettävä riittävän jäämäkästi pilareihin kiinni käyttämällä poikkeuksellisen suurta määrää kiinnikkeitä tai käyttämällä poikkeuksellisen suuria kiinnikkeiden aluslevyjä, etteivät paneelit pääse irtoamaan seinästä. TrayPanissa kuitenkin suurin mahdollinen kiinnikkeiden määrä on 6 kpl / paneelin pääty ja suurin mahdollinen aluslevyn halkaisija on 29 mm. Tärkeintä on, että rakennuksen runko pysyy ehjänä, mutta paneeleille voidaan sallia joissakin tapauksissa murtumia.

#### **7.4.1 Rekyylin vastaanottava seinä (vahvistettu seinä)**

Heikennetyn seinän vastakkainen seinä ottaa vastaan paineenpurusta aiheutuvan rekyylipaineen. Tässä esimerkissä se sattui olemaan yhtä suuri paine kuin kevennetty räjähdyspaine. Rekyylin vastaanottavaa seinää ei siis tarvinnut suunnitella yhtään vahvemmaksi eli paneeleina voitiin käyttää edellä mitoitettuja seinäpaneeleita ja kiinnityksiä. Jos rekyylipaine olisi ollut tätä suurempi paine, tämän seinän rakenteet olisi täytynyt mitoittaa erikseen.

#### **7.4.2 Paineenkevennysseinä (heikennetty seinä)**

Heikennetyn seinän tulee kestää tuulen maksimi-imu mutta pettää, kun saavutetaan kevennysaukon staattinen toimintapaine. Käytännössä kaikki paneelityypit kestävät  $1,5 \text{ kN/m}^2$  paineen 4 metrin jännevälillä, mutta kiinnitysten tyypillä ja määrällä voidaan pelata niin, että kiinnitykset pettävät staattisen toimintapaineen vaikutuksesta (TrayPan-laskentaohjelma). Mitoitus staattiselle toimintapaineelle täytyy tehdä paneelien ja kiinnitysten ominaisarvoihin perustuen, ilman varmuuskertoimia, jotta rakenteesta ei tule liian kestävää eikä se välttämättä murru/petä suunnitellulla tavalla (Heikkilä 2019).

TrayPan-laskentaohjelman mukaan paneelin kiinnitys kiinnikkeillä SDT5-S29-5,5 1 kpl / paneelin pääty kestää tuulen maksimi-imun murtorajatilassa  $Q_w = 1,17 \text{ kN/m}^2$  paneelilla SPA 175E. Läpivedon käyttöaste on 88,4 %. Taulukossa 14 on esitetty käyttöasteet em. kuormituksille.

TAULUKKO 14. Kiinnitysten käyttöasteet tuulen imulle  
(TrayPan-laskentaohjelma)

	kpl/lpa	K.aste	Mitoittava kriteeri
A	1	 87.1	Läpiveto
B	1/1	 88.4	Läpiveto
C	1/1	 88.4	Läpiveto
D	1	 87.1	Läpiveto

Kevennysaukon staattinen toimintapaine  $P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2$ , eli paneelin kiinnityksen on petettävä tätä suuremmilla paineen arvoilla. Kun tämä paineen arvo saavutetaan, sama kiinnitys ei enää kestä. Läpivedon käyttöaste on tällöin 113,3 %. Taulukossa 15 on esitetty kiinnitysten käyttöasteet kevennetyn seinän staattiselle toimintapaineelle.

TAULUKKO 15. Kiinnitysten käyttöasteet kevennetyn seinän staattiselle toimintapaineelle (TrayPan-laskentaohjelma)

	kpl/lpa	K.aste	Mitoittava kriteeri
A	1	 111.7	Läpiveto
B	1/1	 113.3	Läpiveto
C	1/1	 113.3	Läpiveto
D	1	 111.7	Läpiveto

Käytännössä kiinnikkeitä pitäisi olla vähintään 2 kpl / paneelin pääty. Kiinnitys kuitenkin kestää  $P_{stat}$  arvon pienimmillään Ruukin vakiokiinnikkeillä 2 kpl / paneelin pääty (ka. 72,5 %), eikä kevennetty seinä petä suunnitellulla tavalla. Jos halutaan pitää kevennetyn seinän staattinen toimintapaine näin alhaalla 4 metrin jännevälillä, paneelien kiinnitys täytyy suunnitella tapauskohtaisesti käyttämällä muita kuin vakiokiinnikkeitä tai esimerkiksi normaalia pienempää kiinnikkeen aluslevyä. TrayPanissa ei kuitenkaan ole mahdollista käyttää muita kuin vakiokiinnikkeitä. (Tourula 2019.)

6 metrin jännevälillä kuitenkin  $P_{stat}$  arvon pitäminen näin alhaalla olisi mahdollista, vaikka kiinnikkeiden määrä olisi 2 kpl / paneelin pääty. Kiinnitysten käyttöaste läpivedolle olisi tällöin pienimmille vakiokiinnikkeille 2 kpl / paneelin pääty 108,5 %, eli kevennetty seinä pettäisi suunnitellulla tavalla (Traypan-laskentaohjelma). Taulukossa 16 on esitetty em. kiinnitysten käyttöasteet 6 metrin jännevälillä.

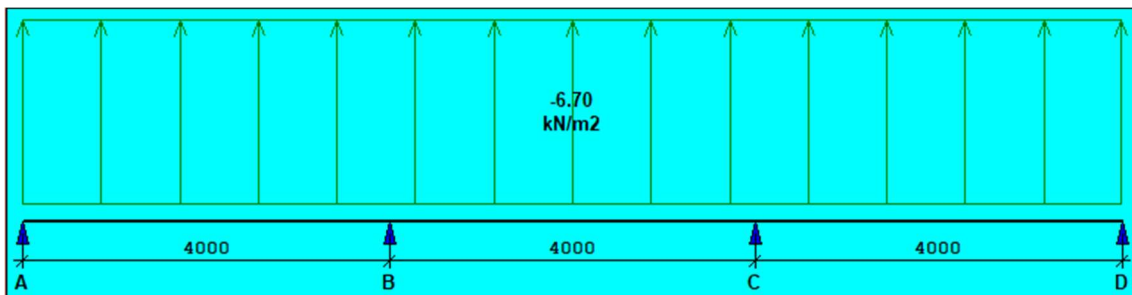
TAULUKKO 16. Kiinnitysten käyttöasteet kevennetyn seinän staattiselle toimintatavalle, 6 m jänneväli (TrayPan-laskentaohjelma)

	kpl/lpa	K.aste	Mitoittava kriteeri
A	2	107.5	Läpiveto
B	2/2	108.5	Läpiveto
C	2/2	108.5	Läpiveto
D	2	107.5	Läpiveto

## 7.5 Katto

Ex-tilan katto on eristetty rakenne, jossa kantavana rakenteena toimii kantava teräksinen poimulevy. Poimulevyn ja sen kiinnitysten on kestettävä räjähdyskevennetty räjähdyspaine ja tuulen maksimi-imu kattoon. Kattopeltien jänneväli on 4 m. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä poimulevyille tuleva kuorma (kuva 13) voidaan laskea kaavan 8 avulla (esitetty sivulla 40).

$$P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w = 6,5 \text{ kN/m}^2 + 0,2 * 1,11 \text{ kN/m}^2 = 6,7 \text{ kN/m}^2$$



KUVA 13. Poimulevyjen kuormitukset (Poimu-laskentaohjelma)

Poimulevyjä voidaan mitoittaa Ruukin Poimu-ohjelmalla. Kantava poimulevy T130M-75-930 kestää edellä mainitut kuormitukset. Mitoittava kriteeri on taipuma, jolle käyttöaste on 95,4 %. Taulukossa 17 on esitetty poimulevyn käyttöasteet. T130M-poimulevy on Ruukin mukaan kantavista poimulevyistä vahvin, joten se soveltuu hyvin räjähdysvaarallisten tilojen kantavaksi kattorakenteeksi.

**TAULUKKO 17. Poimulevyn käyttöasteet (Poimu-laskentaohjelma)**

\*\*\* Mitoittava käyttöaste: 95.4 \*\*\*

**Tulokset levyittäin**

**Poimulevy 1: T130M-75L-930 1.00/350**

Jänne/ Tuki	Solmu/ Etäisyys	M [kNm/m]	F/V [kN/m]	N [kN/m]	f [mm]	Ka [%]	Kriteeri
B	13	10.4	-28.9			51.8	Tukimomentti
3	32/2397	-8.5				41.6	Kenttä momentti
1	6/1603				15.3	95.4	Taipuma

Levyt kiinnitetään ruuveilla katon pääkannattajiin. Poimu-ohjelman mukaan levyjen kiinnitys kestää, kun tukiruuveina käytetään SD14-T15-5.5-poraruuveja ja kiinnikkeitä on keskituilla 10 kpl ja päädyissä 4 kpl. Käyttöaste on 99,7 % läpivedolle + reunapuristukselle. Taulukossa 18 on esitetty levyjen kiinnitysten käyttöasteet.

**TAULUKKO 18. Poimulevyjen kiinnitysten käyttöasteet (Poimu-laskentaohjelma)**

	kpl/lpa	K.aste	Mitoittava kriteeri
A	4	90.9	Läpiveto+reunapuristus
B	10	99.7	Läpiveto+reunapuristus
C	10	99.6	Läpiveto+reunapuristus
D	4	90.9	Läpiveto+reunapuristus

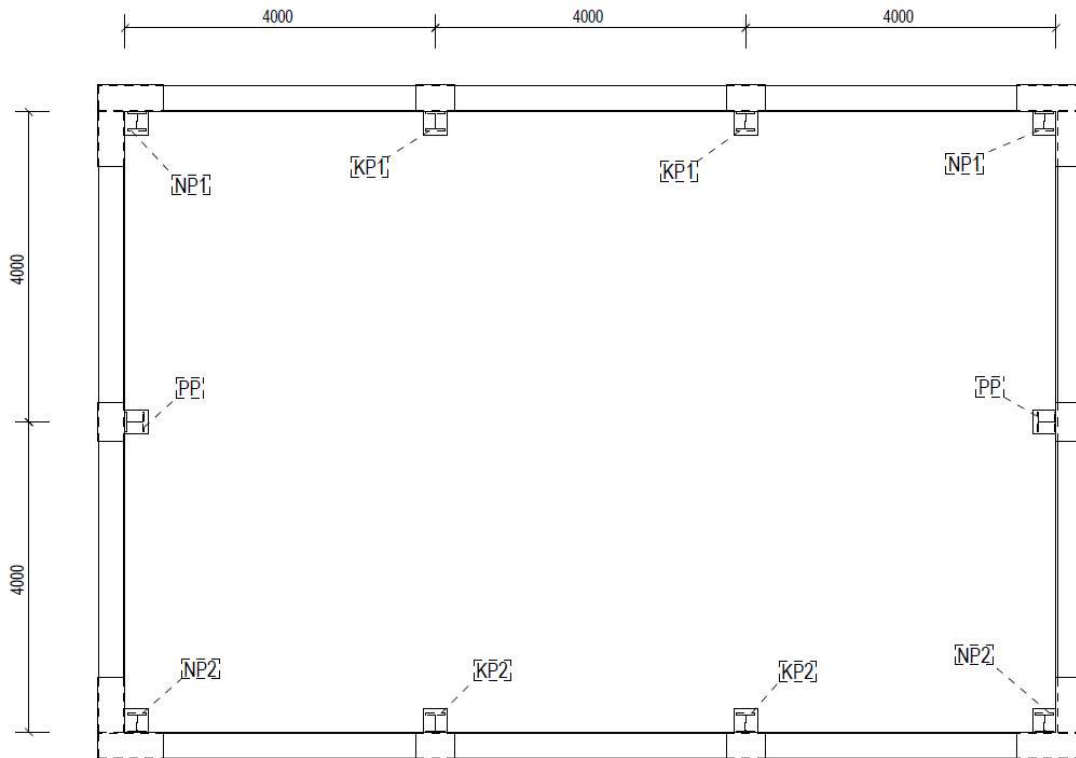
**7.6 Runko**

Ex-tilan rakenteiden kestävyys täytyy tarkastella onnettomuusrajatilassa räjähdyspaine huomioituna ja sen lisäksi normaalissa murtorajatilassa. Tässä esimerkissä kevennetyn räjähdyspaineen arvo on niin suuri, että onnettomuustilanne on käytännössä aina mitoittava tilanne.

Tässä työssä esitettiin ja havainnollistettiin rungon eri rakenteille tulevat kuormat, jotka aiheutuvat räjähdyksestä. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyt esitettiin, mutta normaalin murtorajatilan kuormitusyhdistelyjä katsottu tarpeelliseksi esittää.

### 7.6.1 Kehäpilarit

Kehäpilareiden kehäjako on 4 m, rungon leveys 8 m, rakennuksen korkeus 10 m ja kehäpilareiden korkeus 9,1 m. Tässä esimerkissä kehän eri puolen kehäpilareille aiheutui räjähdyksestä eri suuruiset vaakakuormat johtuen kevennetystä seinästä, joka päästää purkautumaan räjähdyksestä aiheutuvaa ylipainetta toiselta puolen rakennusta. Kevennetyn seinän puolen pilareille tuleva räjähdyskuorma on siis paineenkevennyksestä staattinen toimintapaine  $P_{stat}$  ja vastakkaisen seinän pilareille tuleva räjähdyskuorma on paineenkevennyksestä aiheutuva rekyylivoima  $P_{rek}$  tai kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ . Suurempi paineen arvo valitaan. Tässä esimerkissä ne sattuvat olemaan yhtä suuret. Kuvassa 14 on esitetty kehäpilareiden, nurkkapilareiden ja päätypilareiden sijainnit.



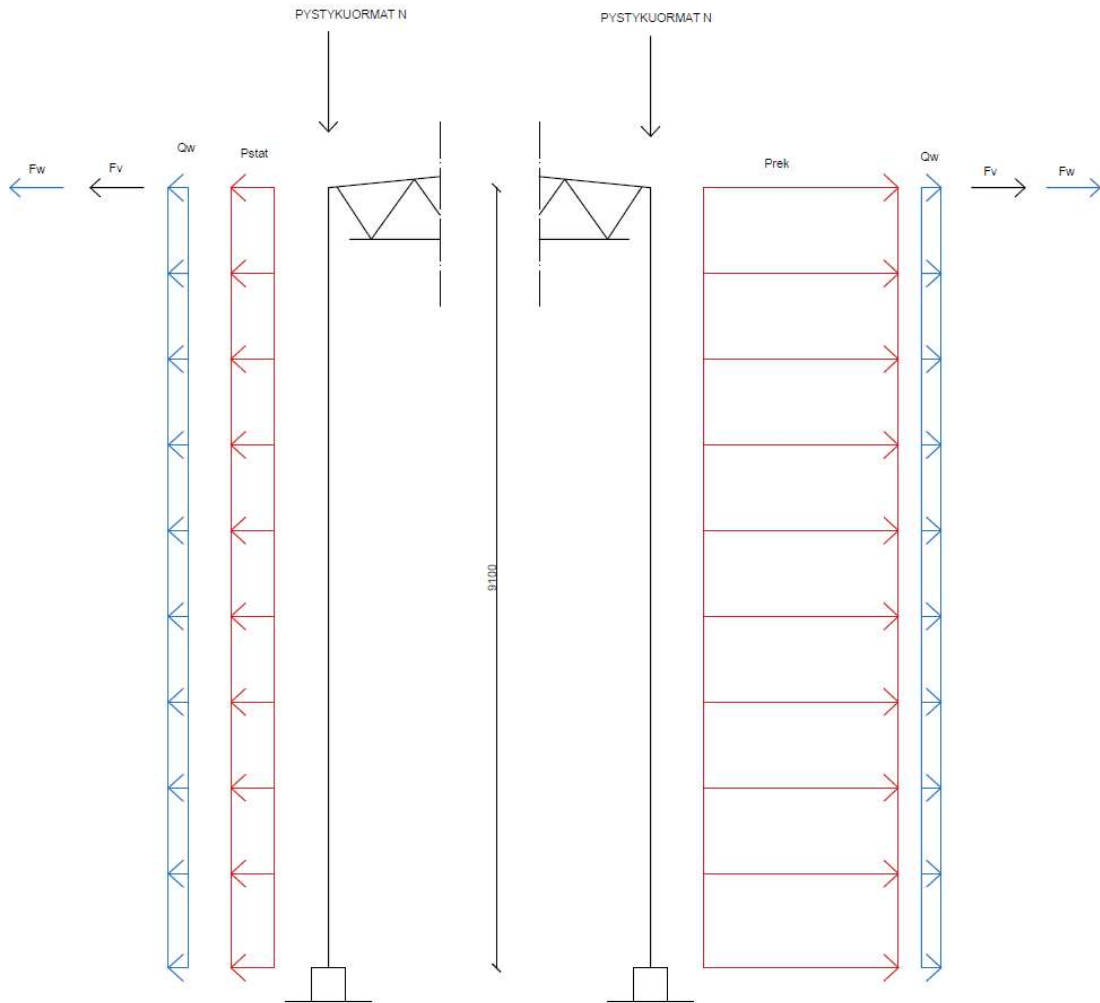
*KUVA 14. Pilareiden sijainnit*

Tuulen osalta vaarallisin tilanne on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhyempää sivua (kuva 8 sivulla 43). Tällöin molemman puolen seinille aiheutuu imua tuulesta ja yhdessä räjähdyspaineen kanssa se vaikuttaa samaan suuntaan. Tuulen imun arvo, joka vaikuttaa kehäpilareiden kohdalla, on  $0,52 \text{ kN/m}^2$ .

Kehäpilareiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 2.

Kuvassa 15 on havainnollistettu kehäpilareille tulevat kuormat onnettomuustilanteissa.





**KUVA 15. Kehäpilareiden 1 ja 2 kuormitukset onnettomuustilanteessa**

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely kehäpilareille 1 voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w = 6,42 \text{ kN/m}$$

Kehäpilarin 2 vaakakuormien kuormitusyhdistely voidaan laskea samalla kaavalla 8.

$$P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w = 26,4 \text{ kN/m}$$

Myös pistekuormien kuormitusyhdistely voidaan määrittää kaavan 8 avulla.

$$F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w = 0,17 \text{ kN}$$

Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta aiheutuva pistekuorma  $F_v$  ovat pysyvä kuorma, eli niitä ei kerrota onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä millään kertoimella.  $F_w$  on tuulesta aiheutuva muuttuva kuorma, jolloin sen yhdistelykerroin on  $\psi_{1,1}$ .

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

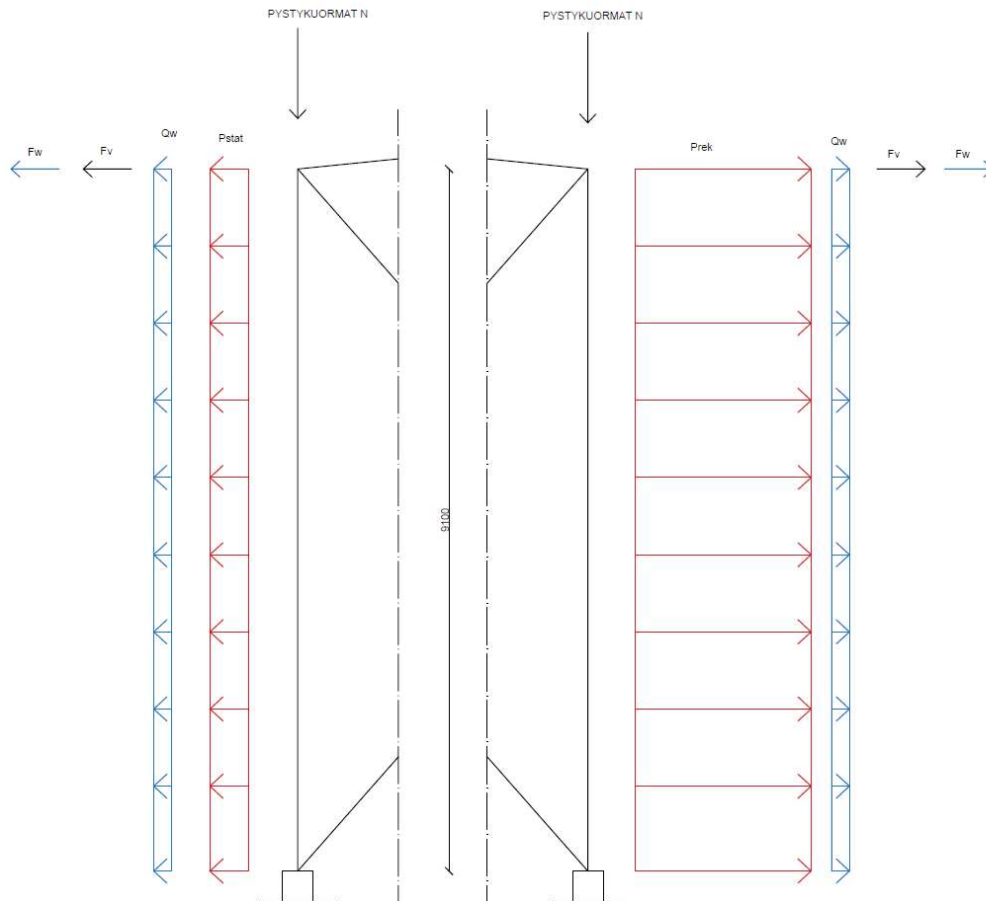
### 7.6.2 Nurkkapilarit

Nurkkapilarit mitoitetaan samalla periaatteella kuin kehäpilarit, mutta ne pitää mitoitaa kestämään räjähdyspaine, joka vaikuttaa yhtä aikaa x- ja y-suuntaan. Toisen puolen nurkkapilarille vaikuttaa tässäkin eri suuruinen paine räjähdyksestä x-suunnassa. Kevennetyn seinän puolella vaikuttaa  $P_{stat}$  ja vastakkaisella puolella  $P_{rek}$ . Y-suunnassa eli rakennuksen pituussuunnassa nurkkapilareihin vaikuttava räjähdyspaine on  $P_{red}$ . Nurkkapilareiden kuormitusala on puolet pienempi kuin kehäpilareilla. Tässä tapauksessa kuormia nurkkapilareille kertyy 2 metrin alueelta.

Nurkkapilareihin vaikuttava tuulen imu on luonnollisesti suurempi kuin kehäpilareiden kohdalla. Vaarallisin tilanne on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhempää sivua (kuva 8 sivulla 43). Tällöin molemmille nurkille tulee imua x-suunnassa  $0,78 \text{ kN/m}^2$  1,6 metrin alueelta ja  $0,52 \text{ kN/m}^2$  0,4 metrin alueelta. Y-suunnassa samaan aikaan vaikuttava tuulen paine on  $0,50 \text{ kN/m}^2$ , joka on puhaltaa tasaisesti koko rakennuksen lyhempää sivua vasten.

Nurkkapilareiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 3.

Kuvassa 16 on esitetty nurkkapilareiden onnettomuustilanteen kuormat x-z-suunnassa.



**KUVA 16.** Nurkkapilareiden 1 ja 2 onnettomuustilanteen kuormitukset x-z-suunnassa

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely nurkkapilarille 1 voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w = 3,31 \text{ kN/m}$$

Nurkkapilarin 2 vaakakuormien kuormitusyhdistely voidaan laskea samalla kaavalla 8.

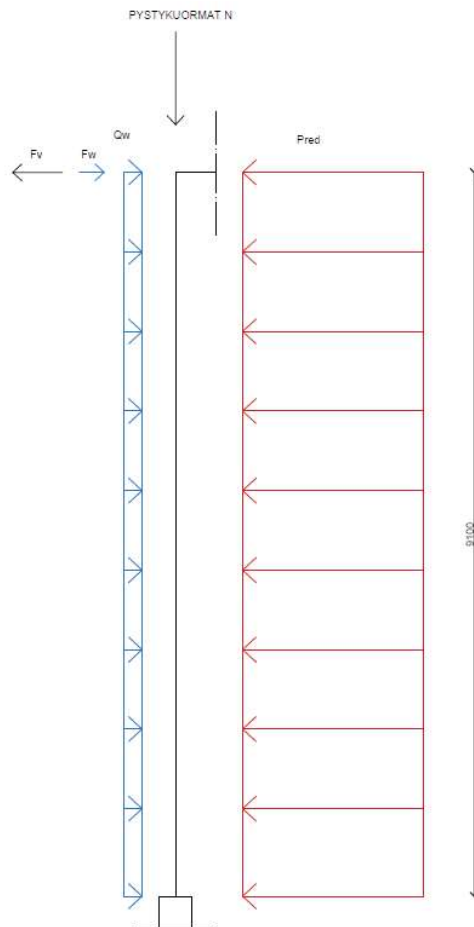
$$P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w = 13,31 \text{ kN/m}$$

Myös pistekuormien kuormitusyhdistely voidaan määrittää kaavan 8 avulla.

$$F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w = 0,12 \text{ kN}$$

Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla (SFS-EN-1990. 2006, 80).

Kuvassa 17 on esitetty nurkkapilareiden onnettomuustilanteen kuormat y-z-suunnassa.



*KUVA 17. Nurkkapilareiden onnettomuustilanteen kuormitukset y-z-suunnassa*

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely y-z-suunnassa nurkkapilareille voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w = 13 \text{ kN/m} - 0,2 * 1,0 \text{ kN/m} = 12,8 \text{ kN/m}$$

Pistekuormien kuormitusyhdistely voidaan määrittää kaavan 8 avulla (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w = 0,04 \text{ kN}$$

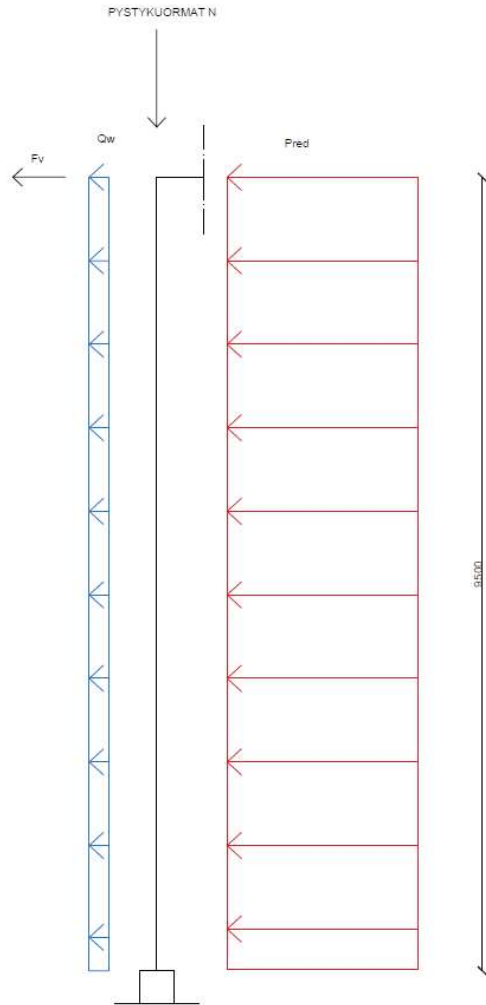
Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla (SFS-EN-1990. 2006, 80).

### **7.6.3 Keskilinjan pääty pilarit**

Päätypilareihin vaikuttava räjähdyspaine on kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ . Kuormia pilareihin tulee 4 metrin alueelta. Tuulen osalta vaarallisin tilanne on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen pidempää sivua (kuva 7 sivulla 42). Tällöin rakennuksen päätyihin aiheutuu imua tuulesta, mikä vaikuttaa räjähdyspaineen kanssa samaan suuntaan. Päätypilareille imua tulee  $0,78 \text{ kN/m}^2$  0,4 metrin alueelta ja  $0,52 \text{ kN/m}^2$  3,6 metrin alueelta.

Päätypilareiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 4.

Kuvassa 18 on esitetty päätypilareiden kuormitukset onnettomuustilanteessa.



**KUVA 18. Päätypilareiden kuormitukset onnettomuustilanteessa**

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely päätypilareille voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$P_{red} + \psi_{1,1} \cdot Q_w = 26,44 \text{ kN/m}$$

Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla (SFS-EN-1990. 2006, 80).

#### 7.6.4 Rakenneputkiristikko

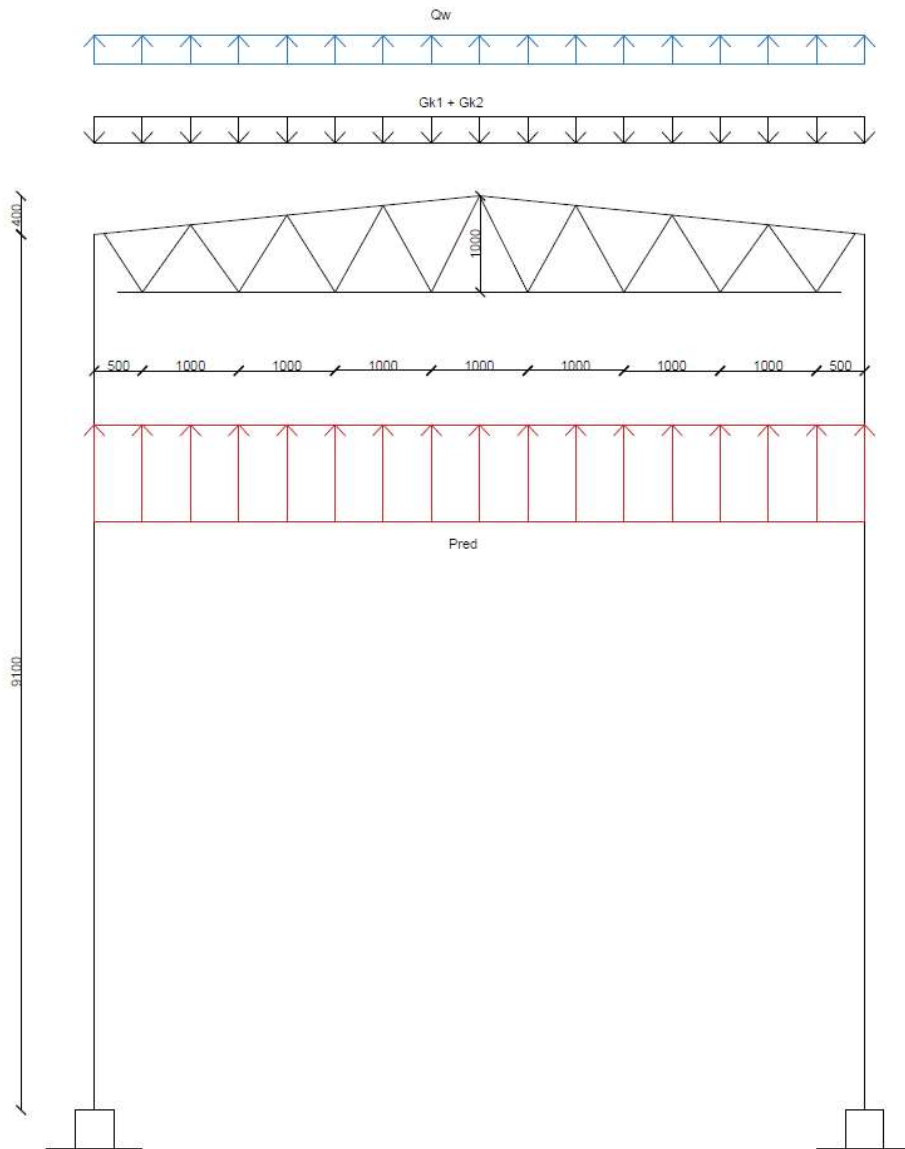
Rakennuksen jänneväli on 8 m, kehäväli 4 m ja pituus 12 m. Ristikon kaltevuus on 1:10 ja korkeus 1 m. Ristikoon vaikuttava räjähdyskuorma on kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ . Kuormia ristikolle tulee 4 metrin alueelta.

Onnettomuustilanteessa kattoristikko mitoitetaan kestämään kattorakenteiden ja ristikon oma paino sekä tuulen imu kattoon ja kevennetty räjähdyspaine. Räjähdystilanteessa lumikuorma on edullinen kuorma, joten sitä ei oteta huomioon.

Tuulen osalta eniten imua tulee kattoon alueelle, joka vaikuttaa ristikoihin, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhempää sivua (kuva 10 sivulla 44). Tällöin 2 metrin alueelta tulee tuulen imua  $0,46 \text{ kN/m}^2$  ja 2 metrin alueelta  $0,33 \text{ kN/m}^2$ .

Rakenneputkiristikon kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 5.

Kuvassa 19 on esitetty kattoristikon pystykuormat onnettomuustilanteessa.



KUVA 19. Rakenneputkiristikon kuormitukset onnettomuustilanteessa

Pystykuormien kuormitusyhdistely rakenneputkiristikolle onnettomuustilanteessa voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$G_{kj} + P_{red} + \psi_{1,1} * Q_{k,1(tuuli)} = -24,12 \text{ kN/m}$$



### 7.6.5 Päädyn kattopalkki

Päädyn kattopalkkiin vaikuttava räjähdyspaine on  $P_{red}$ . Kuormia päätypalkille tulee 2 metrin alueelta.

Onnettomuustilanteessa päädyn kattopalkki mitoitetaan kestävänsä kattorakenteiden ja palkin oma paino sekä tuulen imu kattoon ja kevennetty räjähdyspaine. Lumikuormaa ei oteta huomioon tässä tilanteessa.

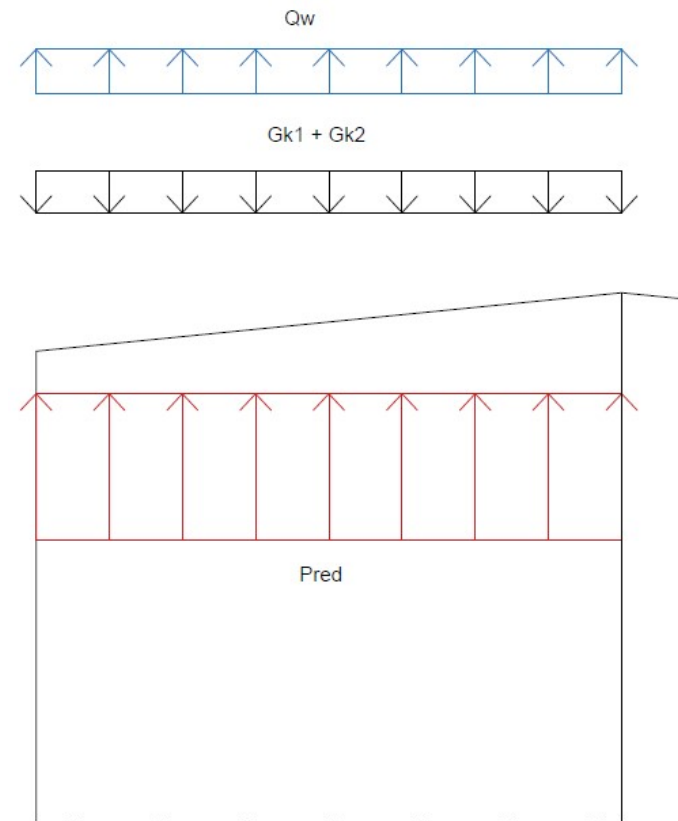
Tuulen osalta vaarallisin tilanne on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhempää sivua (kuva 10 sivulla 44). Tällöin tuulen imu vaikuttaa katon päätyyn 2 metrin alueella kahdella eri voimakkuudella. Tuulesta aiheutuu imua 0,8 metriä leveällä alueella seuraavan laskelman mukaisesti.

$$0,5 * 1,04 \text{ kN/m}^2 + 0,5 * 0,85 \text{ kN/m}^2 = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Vastaavasti 1,2 metrin alueelle tuulesta aiheutuu imua 0,46 kN/m<sup>2</sup>.

Kattopalkin kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 6.

Kuvassa 20 on esitetty katon päätypalkin kuormitukset onnettomuustilanteessa.



*KUVA 20. Päätypalkin kuormitukset onnettomuustilanteessa*

Pystykuormien kuormitusyhdistely onnettomuustilanteessa voidaan määrittää kaavan 8 avulla (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

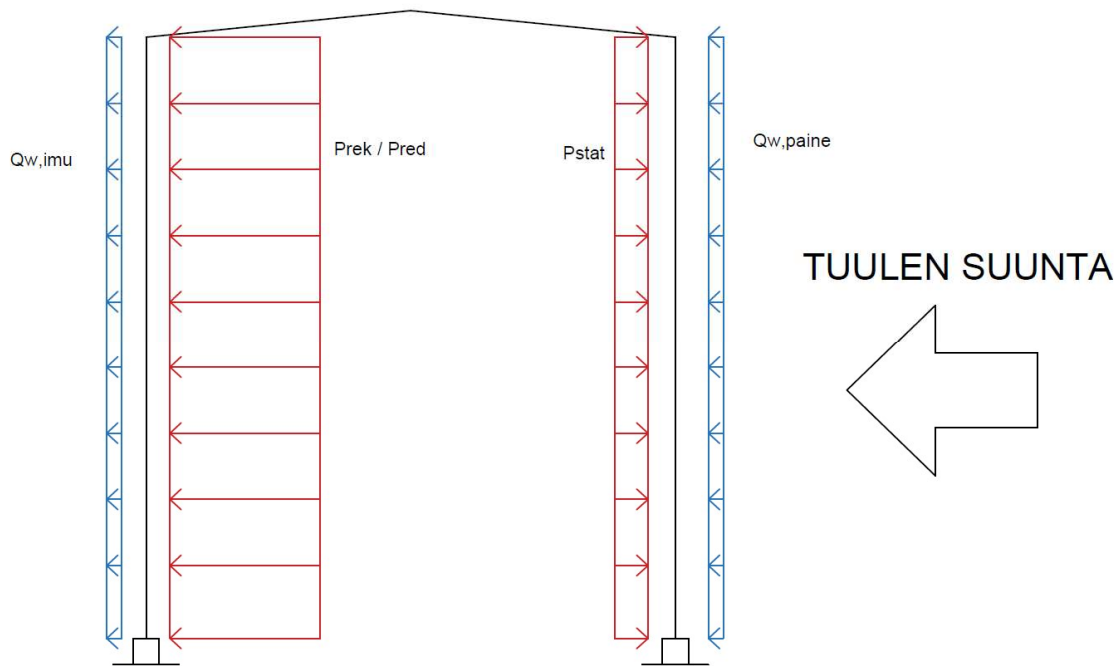
$$G_{kj} + P_{red} + \psi_{1,1} * Q_{k,1(tuuli)} = -12,46 \text{ kN/m}$$

### 7.6.6 Jäykistys

Jäykistyksen kannalta räjähdys on merkityksellinen vain kevennettyä seinää nähdessä poikkisuunnassa, koska vastakkaisiin seiniin kohdistuu erisuuruinen räjähdyspaine. Toisessa suunnassa eli tässä esimerkissä rakennuksen pituussuunnassa räjähdysten aiheuttamat kuormitukset ovat symmetrisiä, eli vaikuttavat yhtä paljon molempiin suuntiin. Tällöin räjähdystilanne ei ole jäykistyksen kannalta mitoitettava rakennuksen pituussuunnassa. Rakennuksen jäykistystä on havainnollistettu kuvassa 6 sivulla 39.

Tuulen osalta rakennuksen poikkisuuntaisen jäykistyksen kannalta vaarallisin tilanne on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen pidempää sivua (kuva 7). Tällöin toiselta puolen rakennusta tuulesta aiheutuu tasaisesti painetta ja toiselle puolelle tasaisesti imua. Kuvassa 21 on havainnollistettu poikkisuunnan jäykistämisen kannalta vaarallisin tilanne, jossa vaikuttaa tuulen kanssa yhtä aikaa räjähdyspaineen arvot  $P_{rek} / P_{red}$  ja  $P_{stat}$ . Vaakakuormien resultantti on suurimmillaan, kun tuulen imu vaikuttaa samalla puolen rakennusta kuin  $P_{rek} / P_{red}$ .

Jäykistyksen kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 7.



*KUVA 21. Rakennuksen poikkisuunnan jäykistämisen kannalta vaarallisin tilanne vaakakuormien osalta*

Onnettomuustilanteen vaakakuormien resultantti voidaan määrittää kaavan 8 avulla (esitetty sivulla 40) (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$R_x = P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_{w,imu} - P_{stat} - \psi_{1,1} * Q_{w,paine} = 577 \text{ kN}$$

Tässä esimerkissä siis pahimmassa tapauksessa rakennusta kaatava voima rakennuksen poikkisuunnassa on 577 kN. Päätyjen jäykistyssiteet ottavat siis vastaan tämän kuorman kokonaisuudessaan.

### 7.6.7 Liitokset

Liitosten mitoittamisessa täytyy ottaa huomioon räjähdyksestä rakenneosille aiheutuvat kuormat. Liitoksia ei käsitellä tässä työssä yksityiskohtaisesti.

## 7.7 Perustukset

Räjähdyksestä aiheutuu vaakavoimia, jotka pyrkivät työntämään perustuksia ulospäin rakennuksesta ja momenttia, joka pyrkii kaatamaan anturaa. Pilarianturalle tulevan räjähdyskseen aiheutuvan vaakakuorman suuruus riippuu siitä, minkä seinän puolen anturasta on kyse. Tässä esimerkissä heikennetyn seinän pilarianturoille tuleva räjähdyspaine on  $P_{stat}$  ja vastakkaisen seinän anturoille tuleva räjähdyspaine on  $P_{rek}$ . Päätyjen anturoille tuleva vaakakuorma räjähdyskseen on  $P_{red}$ . Rakennuksen nurkkien anturoille aiheutuu vaakakuormia x- ja y-suunnassa.

Räjähdystilanteessa anturan pystykuormat pienenevät, koska ylöspäin vaikuttava räjähdyspaine jakautuu koko katon alalle ja välittyy pilarin kautta perustukselle. Alaspäin vaikuttava räjähdyspaine kohdistuu anturalle vain siltä lattian alalta, joka on anturan päällä.

Onnettomuustilanteessa vaakakuormia pilarianturoille tulee tässä esimerkissä kuten pilareille, eli räjähdyskseen, tuulesta ja rakenteiden mahdollisesta vinoudesta johtuvia lisävaakakuormia. Pystykuormia tulee rakenteiden painosta, hyötykuormasta ja räjähdyskseen. Tässä työssä esitettiin onnettomuustilanteen kuormitukset pilarianturoille.

### 7.7.1 Kehäpilarianturat

Tuulen osalta kehäpilarianturoille vaarallisin tilanne on kuten kehäpilareilla, eli kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhempää sivua (kuva 8 sivulla 43). Räjähdyspaine vaikuttaa myös samalla tavalla kuin kehäpilareilla, eli toisen puolen anturalle vaikuttaa  $P_{stat}$  ja toiselle puolelle  $P_{rek}$  (luku 7.6.1).

Kehäpilarianturoiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 8.

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely pystykuormille voidaan laskea kaavalla 8 (esitetty sivulla 40).

$$V_{Ed} = P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k = 85,26 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen vaakakuormien kuormitusyhdistely kehäpilarianturalle 1 voidaan laskea kaavalla 8.

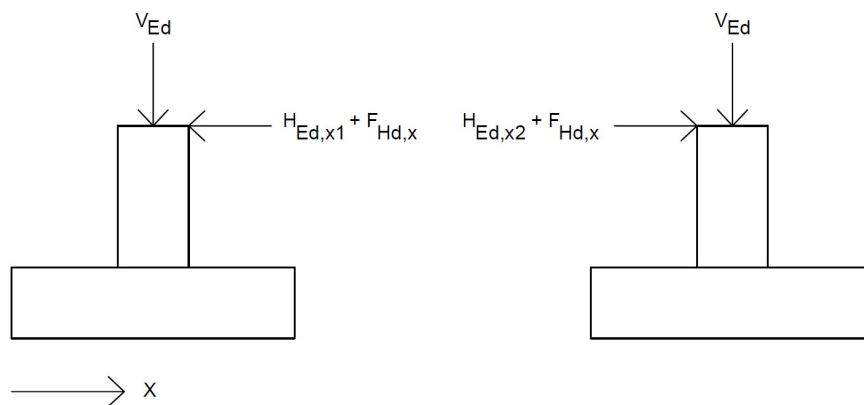
$$H_{Ed,x1} + F_{Hd,x} = P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} = 61,73 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen vaakakuormien kuormitusyhdistely kehäpilarianturalle 2 voidaan laskea kaavalla 8.

$$H_{Ed,x2} + F_{Hd,x} = P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} = 251,73 \text{ kN}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Kuvassa 22 on esitetty kehäpilarianturoiden 1 ja 2 kuormitukset.



KUVA 22. Kehäpilarianturoiden 1 ja 2 kuormitukset onnettomuustilanteessa

### 7.7.2 Nurkkapilarianturat

Tuulen kannalta kuvan 8 mukaan vaarallisin tilanne nurkissa sijaitseville pilarianturoille on, kun tuuli puhaltaa kohden rakennuksen lyhyttä sivua, kuten nurkkapilareilla. Kuormitukset räjähdyksestä vaikuttavat samoin kuin nurkkapilareilla (luku 7.6.2).

Nurkkapilarianturoiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 9.

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely nurkkapilarianturoiden pystykuormille voidaan määrittää kaavalla 8 (esitetty sivulla 40).

$$V_{Ed} = P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k = 85,5 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely nurkkapilarianturan 1 vaakakuormille (x-suunta) voidaan määrittää kaavalla 8.

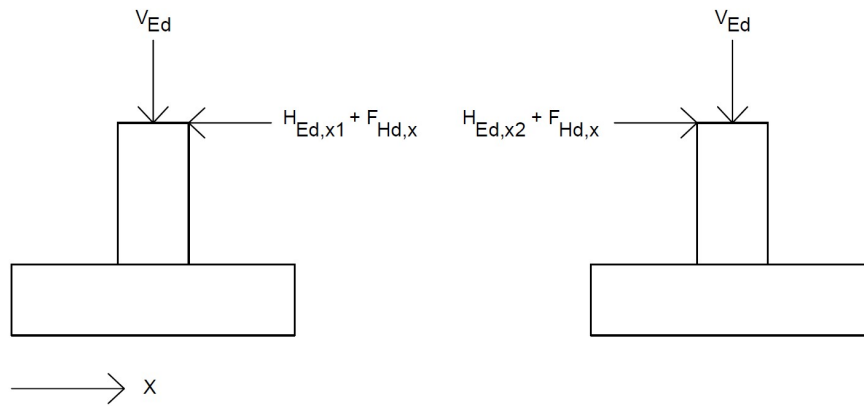
$$H_{Ed,x1} + F_{Hd,x} = P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} = 31,99 \text{ kN}$$

Vastaavasti nurkkapilarin 2 onnettomuustilanteen vaakakuormien x-suuntainen kuormitusyhdistely voidaan laskea kaavalla 8.

$$H_{Ed,x2} + F_{Hd,x} = P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} = 126,99 \text{ kN}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Kuvassa 23 on esitetty nurkkapilarianturoiden kuormitukset x-z -suunnassa.

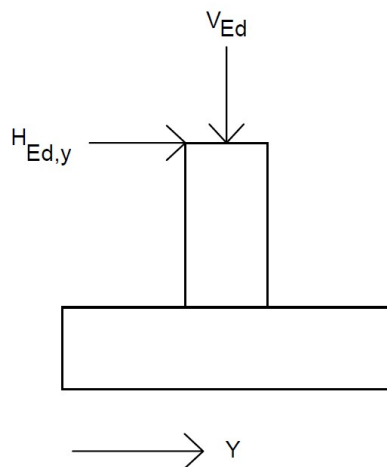


*KUVA 23. Nurkkapilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa (x-z)*

Nurkkapilarianturoiden onnettomuustilanteen y-suuntainen kuormien yhdistely voidaan laskea kaavalla 8 (SFS-EN-1990. 2006, 80).

$$H_{Ed,y} = P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w = 121,56 \text{ kN}$$

Kuvassa 24 on esitetty nurkkapilarianturoiden kuormitukset y-z-suunnassa.



*KUVA 24. Nurkkapilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa (y-z)*



### 7.7.3 Päätypilarianturat

Kuvan 7 mukaisesti päätypilarianturoilla vaarallisin tilanne tuulen osalta on kuin päätypilareilla (ks. luku 7.6.3). Räjähdyspaine vaikuttaa myös samalla lailla, eli päätypilarianturoihin vaikuttava räjähdyspaine on  $P_{red}$ .

Päätypilarianturoiden kuormituslaskelmat on esitetty liitteessä 10.

Onnettomustilanteen kuormitusyhdistelyt pystykuormille voidaan laskea kaavalla 8.

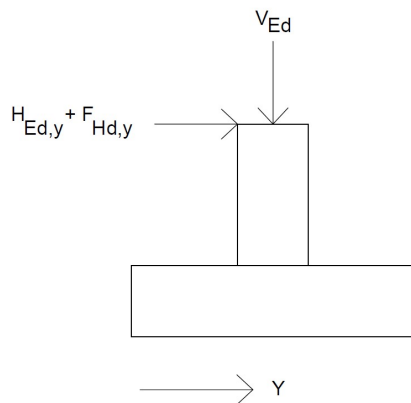
$$V_{Ed} = P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k = 87,26 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyt vaakakuormille voidaan laskea myös kaavalla 8.

$$H_{Ed,y} + F_{Hd,y} = P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,y} = 264,75 \text{ kN}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Kuvassa 25 on esitetty päätypilarianturoiden kuormat onnettomuustilanteessa.

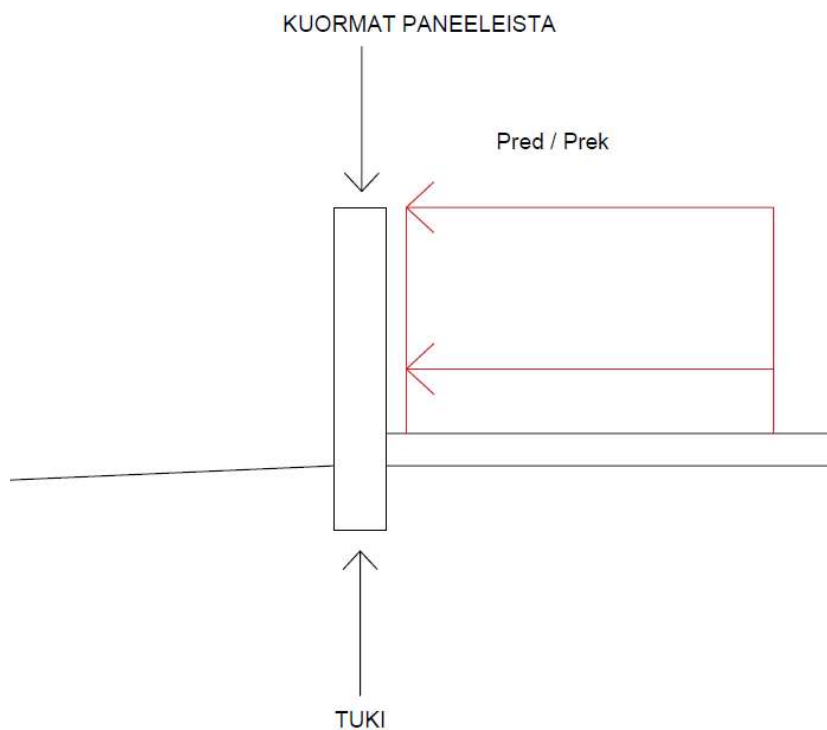


KUVA 25. Päätypilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa

#### 7.7.4 Sokkelit

Ex-tilan sokkelit mitoitetaan normaalisti, mutta räjähdyksestä aiheutuu sisäpuolista painetta niihin. Kaikkiin rakennuksen sokkeleihin vaikuttava räjähdyspaine on kevennetty räjähdyspaine  $P_{red}$ , paitsi kevennetyn seinän vastakkaisen puoleisen seinän sokkelille, johon vaikuttaa paineenpurusta aiheutuva rekyyli  $P_{rek}$ , jos se on kevennettyä räjähdyspainetta suurempi paine.

Kuvassa 26 on havainnollistettu räjähdyspaineen vaikutusta sokkeleihin. Muita sokkeliin vaikuttavia ulkoisia kuormituksia tulee tuulesta ja maanpaineesta.



KUVA 26. Sokkeliin vaikuttava räjähdyspaine

## 8 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli havainnollistaa rakennuksen sisäpuolista räjähdyspainetta ja sitä, miten räjähdyspaine huomioidaan räjähdyspaineenkevennysluukun ja rakenteiden yhteissuunnittelulla. Työn alussa käytiin läpi lainsäädännön näkökulmaa räjähdysvaarallisiin tiloihin. Sitten käsiteltiin räjähdyspainetta ja teollisuuden prosesseissa mahdollisesti tapahtuvia räjähdyksiä. Työssä kerrottiin myös räjähdyskuormista ja rakennuksen sisäisestä räjähdyspaineenpurusta. Lopuksi työn soveltavassa osassa laadittiin laskentaesimerkki räjähdysvaaralliselle esimerkkirakennukselle rakennetekniikan näkökulmasta.

Lain mukaan räjähdysvaarallisia tiloja suunnitellessa ensisijainen tavoite on, ettei räjähdyksiä pääse syntymään. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, joten räjähdysten vaikutuksia pyritään rajoittamaan erilaisin keinoin. Räjähdyspaineen teoriaosassa kerrotaan räjähdysten käyttäytymisestä, ilmaseoksien palamisominaisuuksista, palavista aineista ilmaseoksessa, ilmaseoksen syttymisestä ja räjähdysten mahdollisista seurauksista. Teollisuuden räjähdyksistä kerrotaan muutama esimerkki. Yleisesti ottaen räjähdys tapahtuu, kun räjähdysherkkä ilmaseos kohtaa syttymislähteen jostakin syystä.

Räjähdyspaineen voimakkuuteen vaikuttavat räjähdysherkän ilmaseoksen ja ympäröivän tilan ominaisuudet. Tässä työssä mitoitettava räjähdys on sellainen räjähdys, mikä voi olla voimakkain mahdollinen tietyllä kaasulla tietyn kokoisessa suljetussa tilassa. Eri kaasut voivat saavuttaa eri suuruisia paineita räjähtäessään suljetussa tilassa. Tärkeä tekijä räjähdyspaineenpurun suunnittelussa on määrittää räjähtävän ilmaseoksen suurin paineen nousunopeus. Siitä saadaan johdettua räjähdysvakio, jota käytetään parametrina räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelussa. Räjähdysvakiota tarvitaan esimerkiksi paineenkevennysluukun koon laskemiseen. Paineenkevennyspinta-alan, kevennyksestä aiheutuvan rekyylivoiman ja kevennysluukun ulkopuolisten paineen sekä liekkien vaikutusten arvioinnissa voidaan käyttää standardien mukaisia yhtälöitä. Yhtälöt on ilmeisesti kuitenkin alun perin kehitetty pienemmille koteloille eikä rakennuksille. Tulokset ovat kuitenkin hyvin suuntaa antavia.

Laskentaesimerkissä laadittiin esimerkkikohde räjähdysvaarallisesta tilasta, jossa räjähtävänä kaasuna ilman kanssa toimi metaani, jonka maksimipaine suljetussa tilassa voi olla 8,8 bar. Esimerkkikohteen paineenpurku toteutettiin teemmällä rakennuksen yksi seinä kokonaan heikoksi paneelien osalta. Näin se toimii räjähdys-  
sattuessa paineenkevennysluukkuna. Tässä esimerkissä räjähdys-  
painetta saatiin kevennettyä paineenpurun avulla arvoon 0,065 bar. Huomioitavaa on paineenpurusta aiheutuva rekyylivoima, joka kohdistuu paineenkevennys-  
aukon vastakkaiselle seinälle. Laskentaesimerkissä esitettiin ja havainnollistettiin räjähdyksestä aiheutuvat kuormitukset eri rakenteille. Rungon rakenteita ei tässä työssä mitoitettu. Kuorirakenteet mitoitettiin, koska niiden kestävyys on epäselvää. Kestävät kuorirakenteet on mahdollista toteuttaa 0,065 bar kevennetylle räjähdyspaineelle 4 metrin kehäjaolla.

## LÄHTEET

ATEX starttipaketti 2006. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-starttipaketti-2017.pdf/b440ed57-218e-4eda-a5b9-42df468e0b5f>. Hakupäivä 28.5.2019.

Bartok, William - Sarofim, Adel 1991. Fossil fuel combustion: A source book. New York, NY: Wiley.

Casal, Joaquim 2008. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Amsterdam;London: Elsevier.

EU 26.2.2014/34 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi räjähdysvaarallissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettuja laitteita ja suojajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta.

Furness, Andrew & Mucket, Martin 2007. Introduction of fire safety management, first edition.

Heikkilä, Simo 2019. Re: Sandwich paneelin kestävyys. Sähköpostiviesti. Vastanottaja: Ville Herva. 12.4.2019.

Kondo, Shiego - Urano, Youkichi - Takizawa, Kenji - Takahashi, Akifumi - Tokuhashi, Kazuaki - Sekiya, Akira 2006. Flammability limits of multi-fluorinated compounds. Fire Safety Journal, 41(1), 46-56. doi:10.1016/j.firesaf.2005.08.002

L 18.6.2003/586. Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta.

Luettelo yleisimmistä palavista nesteistä 1999. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/6410384/Luettelo+yleisimmist%C3%A4+palavista+nesteista/14929f0e-cd3d-475c-b278-98d82bb5d740/Luettelo+yleisimmist%C3%A4+palavista+nesteista.pdf?version=1.2>. Hakupäivä 28.5.2019.

Maistiaisia ATEX-koulutuksesta 2017. Exvira. Saatavissa: [https://www.exvira.fi/fi/wp-content/uploads/2017/01/Maistiaisia\\_ATEX\\_koulutuksesta2016-1.pdf](https://www.exvira.fi/fi/wp-content/uploads/2017/01/Maistiaisia_ATEX_koulutuksesta2016-1.pdf). Hakupäivä 8.5.2019.

Nagy, John - Conn, John - Verakis, Harry 1969. Explosion development in a spherical vessel. Washington, DC. 23 p. (U. S. Bureau of Mines, Report of investigations 7729.)

NFPA 68. 2013. Standard on explosion protection by deflagration venting. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 80 s.

RIL: 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodi. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Räjähdyksivaarallisten tilojen turvallisuus 2015. ATEX opas. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/ATEX+r%C3%A4j%C3%A4hdysvaarallisten+tilojen+turvallisuus/310d29f5-57bc-431a-90e5-27bf0b6e0f8d/ATEX+r%C3%A4j%C3%A4hdysvaarallisten+tilojen+turvallisuus.pdf?version=1.0>. Hakupäivä 28.5.2019.

SFS-EN 1127-1. 2011. Räjähdyksivaaralliset tilat. Räjähdyksen esto ja suojaus. Osa 1: peruskäsitteet ja menetelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-3 + AC + A1. 2015. Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014. Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 14491. 2012. Pölyräjähdysten paineenkevennysjärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 14994. 2007. Kaasuräjähdyksiä keventävät suojausjärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 15967. 2011. Determination of maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Tourula, Tuomo 2019. Yksikönpäällikkö, Sweco Rakennetekniikka Oy. Keskustelu 1.4.2019.

Vaurio- ja onnettomuusrekisteri VARO. Saatavissa: <http://varo.tukes.fi/>. Hakupäivä 28.5.2019.

## LIITTEET

- LIITE 1 Räjähdyslaskenta, paineenpurku
- LIITE 2 Kehäpilareiden kuormituslaskenta
- LIITE 3 Nurkkapilareiden kuormituslaskenta
- LIITE 4 Keskilinjan päätypilareiden kuormituslaskenta
- LIITE 5 Rakenneputkiristikon kuormituslaskenta
- LIITE 6 Päädyn kattopalkin kuormituslaskenta
- LIITE 7 Jäykistyksen kuormituslaskenta
- LIITE 8 Kehäpilarianturoiden kuormituslaskenta
- LIITE 9 Nurkkapilarianturoiden kuormituslaskenta
- LIITE 10 Päätypilarianturoiden kuormituslaskenta



$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u}{R_c} P_m^{2/3} \frac{P}{P_0} (P_m - P_0)^{1/3} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)^{2/3}$$

V =	940	m <sup>3</sup>
Su =	0,4	m/s
Re =	6,076869	m
Pm =	8,8	bar
P =	8,8	bar
Po =	1	bar

Kaasujen palamisnopeus ja maksimipaine

Kaasu	Su [m/s]	Pm [bar]
Asetyleeni	1,66	9,7
Asetoni	0,54	9,2
Butaani	0,45	9,3
Etaani	0,47	9,1
Metaani	0,4	8,8
Propaani	0,46	9,3
Vety	3,12	8

**Metaani:**Räjähdyspaineen suurin nousunopeus:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} &= \frac{3 * 0,4 \frac{m}{s}}{6,08 m} * (8,8 bar)^{\frac{2}{3}} * \frac{8,8 bar}{1 bar} * (8,8 bar - 1,0 bar)^{\frac{1}{3}} \\ &\quad * \left(1 - \frac{1 bar}{8,8 bar}\right)^{\frac{2}{3}} \\ &= \mathbf{13,55 bar/s} \end{aligned}$$

Räjähdysvakio:

$$KG = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} * V^{\frac{1}{3}} = 13,55 \frac{bar}{s} * (940 m^3)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{132,77 bar \frac{m}{s}}$$

Kevennysaukon koon laskenta, vaadittu kevennyspinta-ala A:Kevennetty räjähdyspaine,  $P_{red} = 0,065 bar$ Kevennysaukon staattinen toimintapaine,  $P_{stat} = 0,015 bar$

$$\begin{aligned}
 A &= \left\{ \left[ (0,1265 \lg(K_G) - 0,0567) p_{red}^{-0,5817} \right] + \left[ 0,1754 p_{red}^{-0,5722} (p_{stat} - 0,1 \text{ bar}) \right] \right\} V^{2/3} \\
 &= \left( (0,1265 \lg(132,77 \text{ bar} \frac{m}{s}) - 0,0567) * (0,065 \text{ bar})^{-0,5817} \right) + \\
 &\quad (0,1754 * ((0,065 \text{ bar})^{-0,5722} (0,015 \text{ bar} - 0,1 \text{ bar})) * (940 \text{ m}^3)^{\frac{2}{3}} \\
 &= \mathbf{92,9 \text{ m}^2}
 \end{aligned}$$

Toteutunut kevennuspinta-ala = **97 m<sup>2</sup>**

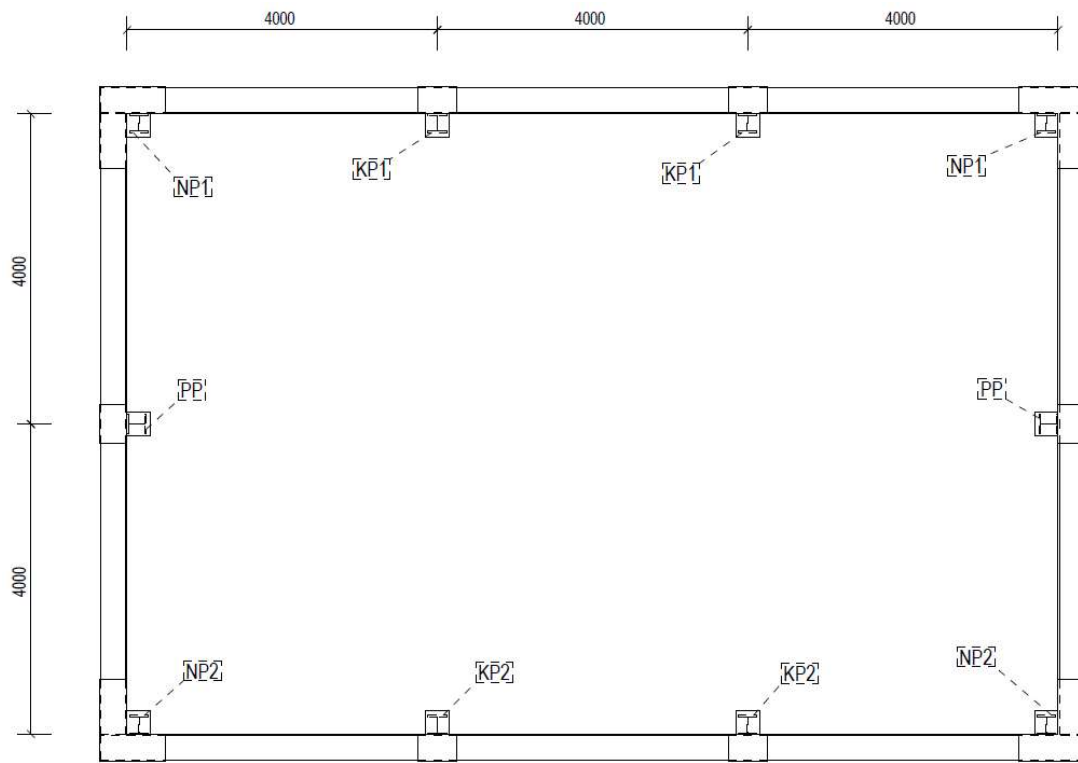
Rekyyli voima:

$$\begin{aligned}
 F_{R,max} &= 119 A p_{red} \\
 &= 119 * 97 \text{ m}^2 * 0,065 \text{ bar} \\
 &= \mathbf{750,3 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

Rekyyli paine:

Rekyylin vastaanottavan seinän pinta-ala,  $A_1 = 115 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned}
 P_{rek} &= F_{R,max} / A_1 \\
 &= 750,3 \text{ kN} / 115 \text{ m}^2 \\
 &= \mathbf{6,5 \text{ kN/m}^2}
 \end{aligned}$$



Kuva: Pilareiden sijainnit

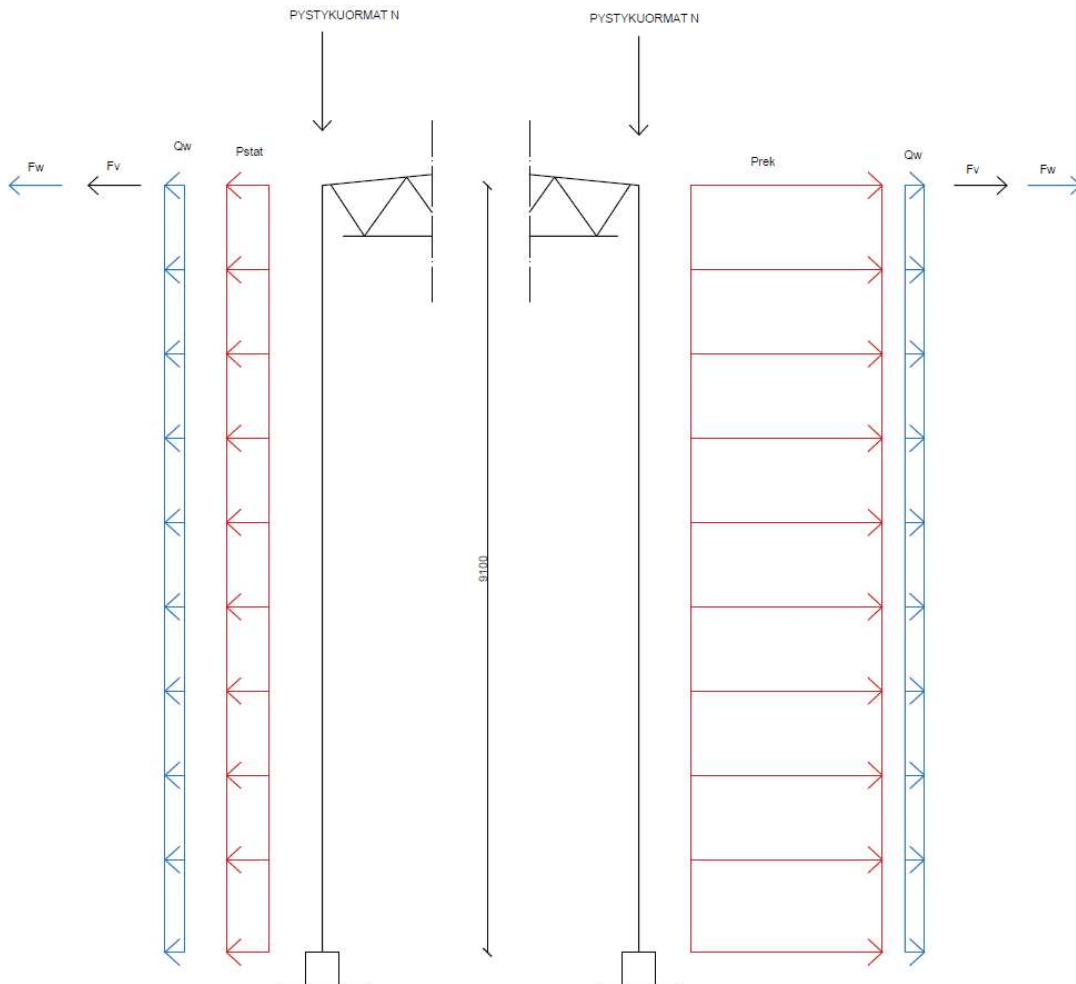
Onnettomuustilanteen pystykuormat kehäpilareille:

- ristikon paino  
 $G_{k1} \sim 8 \text{ kN} / 2 = 4 \text{ kN}$
  - kattorakenne  
 $G_{k2} \sim 0,30 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 8 \text{ m} / 2 = 4,80 \text{ kN}$
  - seinärakenne  
 $G_{k3} \sim 0,35 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 9,1 \text{ m} = 12,74 \text{ kN}$
  - pilarin paino  
 $G_{k4} \sim 7,50 \text{ kN}$
- ⇒ yhteensä:  $G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + G_{k4} = N_{Ed} = 29,04 \text{ kN}$

Kaikki pilareihin vaikuttavat onnettomuustilanteen pystykuormat ovat pysyviä kuormia. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä pysyviä kuormia ei kerrota millään kertoimilla. (SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Onnettomustilanteen vaakakuormat kehäpilareille:

- paineenkevennyssseinän staattinen toimintapaine  
 $P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = 6 \text{ kN/m}$
- paineenpurusta aiheutuva rekyyli  
 $P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = 26 \text{ kN/m}$
- tuulen imu  
 $Q_w = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = 2,08 \text{ kN/m}$
- rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat  
 $F_v = N_{Ed} * \theta_i = 29,04 \text{ kN} * 0,0029 = 0,084 \text{ kN}$  (SFS-EN 1993-1-1, 38.)
- pilarin tuulikuorma yläpohjan osalta  
 $F_w = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 0,4 \text{ m}$  (etäisyys pilarilta harjalle) = 0,83 kN



Kuva: Kehäpilareiden 1 ja 2 kuormitukset onnettomuustilanteessa

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely:

- kehäpilari 1

$$P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w = 6 \text{ kN/m} + 0,2 * 2,08 \text{ kN/m} = 6,42 \text{ kN/m}$$

- kehäpilari 2

$$P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w = 26 \text{ kN/m} + 0,2 * 2,08 \text{ kN/m} = 26,4 \text{ kN/m}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Pistekuormien kuormitusyhdistely:

$$- F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w = 0,2 * 0,83 \text{ kN} = 0,17 \text{ kN}$$

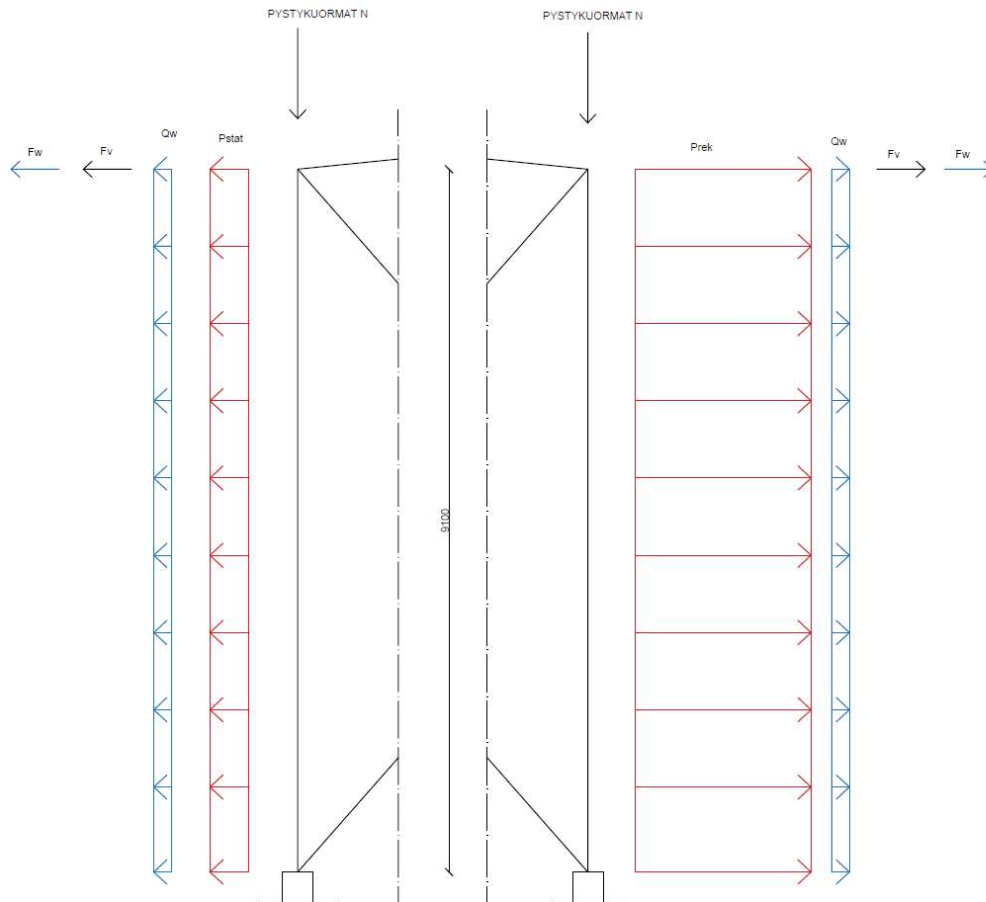
Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta aiheutuva pistekuorma  $F_v$  ovat pysyvä kuorma, eli niitä ei kerrota onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyssä millään kertoimella.  $F_w$  on tuulesta aiheutuva muuttuva kuorma, jolloin sen yhdistelykerroin on  $\psi_{1,1}$ . (SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Onnettomuustilanteen pystykuormat nurkkapilarille:

- kattopalkin paino  
 $G_{k1} \sim 1 \text{ kN} / 2 = 0,5 \text{ kN}$
- kattorakenne  
 $G_{k2} \sim 0,30 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 2 \text{ m} = 1,2 \text{ kN}$
- seinärakenne  
 $G_{k3} \sim 0,35 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 9,1 \text{ m} = 6,37 \text{ kN}$
- pilarin paino  
 $G_{k4} \sim 7,50 \text{ kN}$   
 $\Rightarrow$  yhteensä:  $G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + G_{k4} = N_{Ed} = 15,64 \text{ kN}$

Onnettomustilanteen vaakakuormat nurkkapilareille, x-suunta:

- paineenkevennyssseinän staattinen toimintapaine  
 $P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = 3 \text{ kN/m}$
- paineenpurusta aiheutuva rekyyli  
 $P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}$
- tuulen imu nurkkiin  
 $Q_w = 0,78 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m} + 0,52 \text{ kN/m}^2 * 0,4 \text{ m} = 1,46 \text{ kN/m}$
- rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat  
 $F_v = N_{Ed} * \theta_i = 15,64 \text{ kN} * 0,0029 = 0,045 \text{ kN}$  (SFS-EN 1993-1-1, 38)
- pilarin tuulikuorma yläpohjan osalta  
 $F_w = 0,78 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 0,4 \text{ m}$  (etäisyys pilarilta harjalle) = 0,62 kN



Kuva: Nurkkapilareiden 1 ja 2 onnettomuustilanteen kuormitukset x-z -suunnassa

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely:

- nurkkapilari 1  
 $P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w = 3 \text{ kN/m} + 0,2 * 1,56 \text{ kN/m} = 3,31 \text{ kN/m}$
- nurkkapilari 2  
 $P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w = 13 \text{ kN/m} + 0,2 * 1,56 \text{ kN/m} = 13,31 \text{ kN/m}$   
 (SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Pistekuormien kuormitusyhdistely:

- $F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w = 0,2 * 0,62 \text{ kN} = 0,12 \text{ kN}$   
 (SFS-EN-1990. 2006, 80.)



Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla.

Onnettomustilanteen vaakakuormat nurkkapilareille, y-suunta:

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{red} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}$$

- tuulen paine lyhyelle seinälle

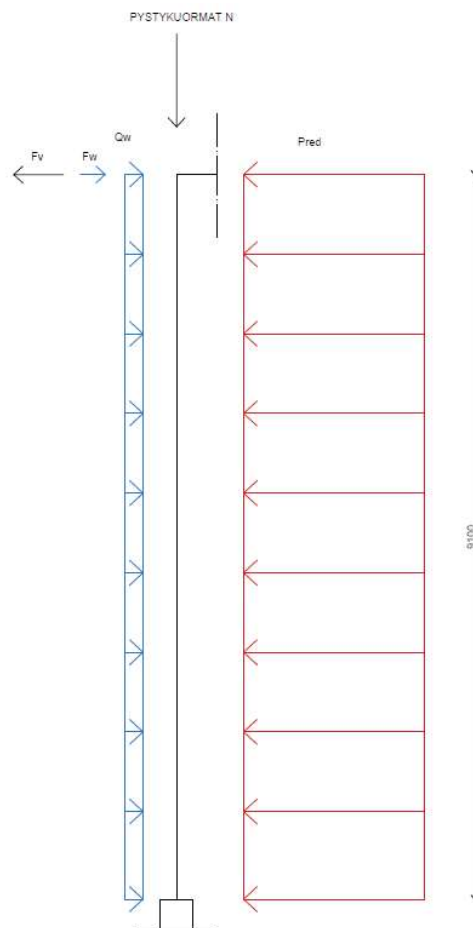
$$Q_w = 0,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = 1,0 \text{ kN/m}$$

- rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat

$$F_v = N_{Ed} * \theta_i = 15,64 \text{ kN} * 0,0029 = 0,045 \text{ kN (SFS-EN 1993-1-1, 38.)}$$

- pilarin tuulikuorma harjan osalta

$$F_w = 0,5 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m}^2 / 4 = 0,2 \text{ kN}$$



Kuva: Nurkkapilareiden onnettomuustilanteen kuormitukset y-z -suunnassa

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely:

$$- P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w = 13 \text{ kN/m} - 0,2 * 1,0 \text{ kN/m} = 12,8 \text{ kN/m}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Pistekuormien kuormitusyhdistely:

$$- F_{w,d} = \psi_{1,1} * F_w 0,2 * 0,2 \text{ kN} = 0,04 \text{ kN}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

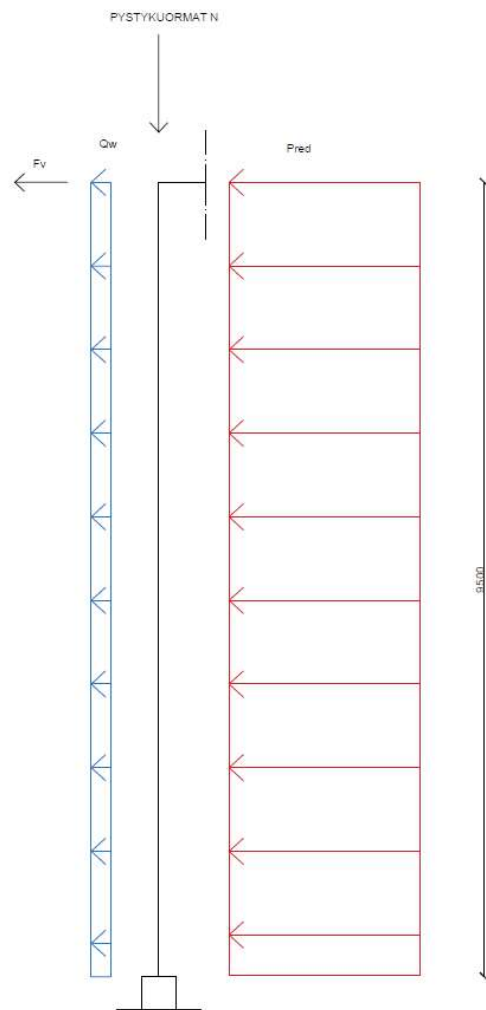
Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla.

Onnettomuustilanteen pystykuormat päätypilareille:

- kattopalkin paino  
 $G_{k1} \sim 1 \text{ kN} / 2 = 0,5 \text{ kN}$
- kattorakenne  
 $G_{k2} \sim 0,30 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 2 \text{ m} = 2,4 \text{ kN}$
- seinärakenne  
 $G_{k3} \sim 0,35 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 13,3 \text{ kN}$
- pilarin paino  
 $G_{k4} \sim 8 \text{ kN}$   
 $\Rightarrow$  yhteensä:  $G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + G_{k4} = N_{Ed} = 24,2 \text{ kN}$

Onnettomuustilanteen vaakakuormat päätypilareille:

- kevennetty räjähdyspaine  
 $P_{red} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = 26 \text{ kN/m}$
- tuulen imu  
 $Q_w = 0,78 \text{ kN/m}^2 * 0,4 \text{ m} + 0,52 \text{ kN/m}^2 * 3,6 \text{ m} = 2,18 \text{ kN/m}$
- rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat  
 $F_v = N_{Ed} * \theta_i = 24,2 \text{ kN} * 0,0029 = 0,070 \text{ kN}$  (SFS-EN 1993-1-1, 38.)



*Kuva: Päätypilareiden kuormitukset onnettomuustilanteessa*

Viivamaisten vaakakuormien onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely:

$$- P_{red} + \psi_{1,1} \cdot Q_w = 26 \text{ kN/m} + 0,2 \cdot 2,18 \text{ kN/m} = 26,44 \text{ kN/m}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Pystykuormat ja rakenteen vinoudesta johtuvat kuormat ovat pysyviä kuormia, eli niitä ei kerrota millään kertoimilla.

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Onnettomustilanteen pystykuormat ristikolle:

- kattorakenteiden paino

$$G_{k1} = 0,3 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = 1,2 \text{ kN/m}$$

- ristikon oma paino

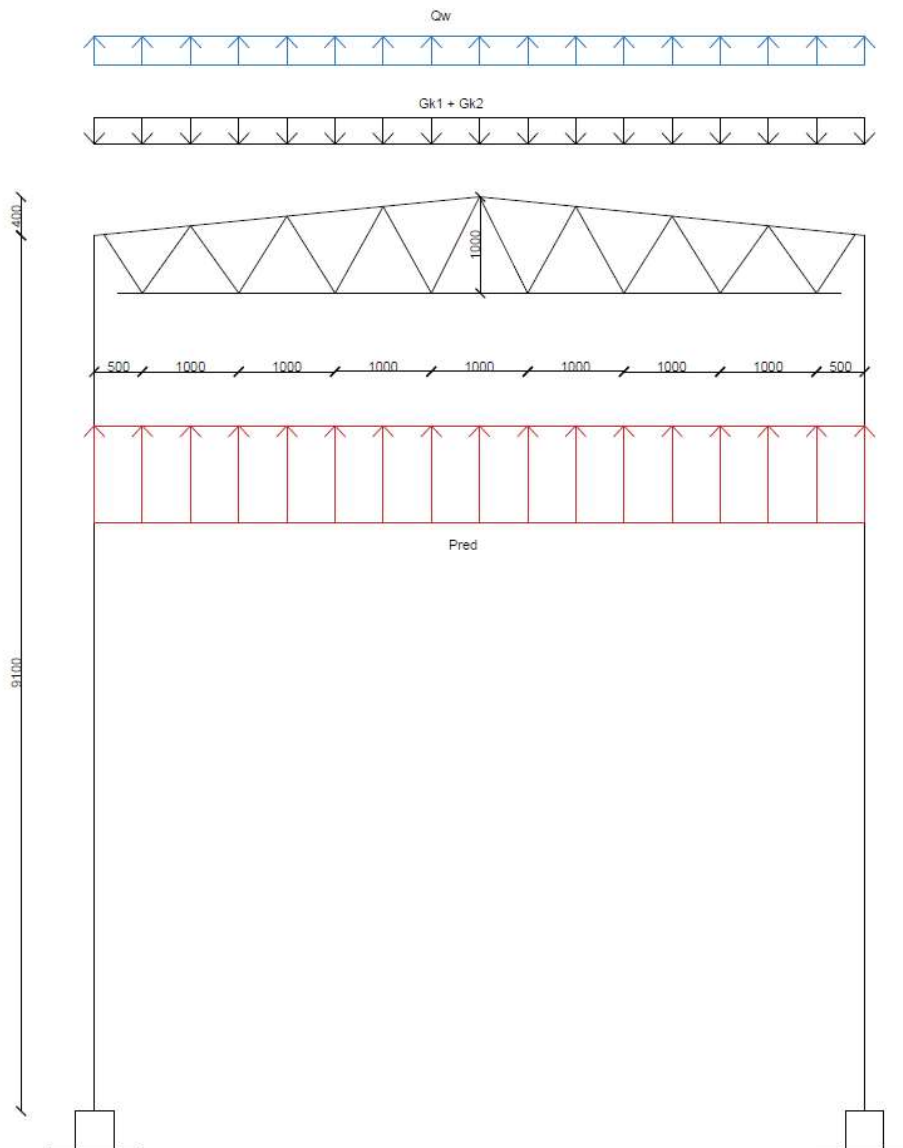
$$G_{k2} = 1 \text{ kN/m}$$

- tuulen imu

$$Q_w = -0,46 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} - 0,33 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = -1,58 \text{ kN/m}$$

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{red} = -6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} = -26 \text{ kN/m}.$$



Kuva: Rakenneputkiristikon kuormitukset onnettomuustilanteessa

Pystykuormien kuormitusyhdistely onnettomuustilanteessa:

$$- G_{kj} + P_{red} + \psi_{1,1} * Q_{k,1(tuuli)} = 2,2 \text{ kN/m} - 26 \text{ kN/m} + 0,2 * -1,58 \text{ kN/m} = -24,12 \text{ kN/m.}$$

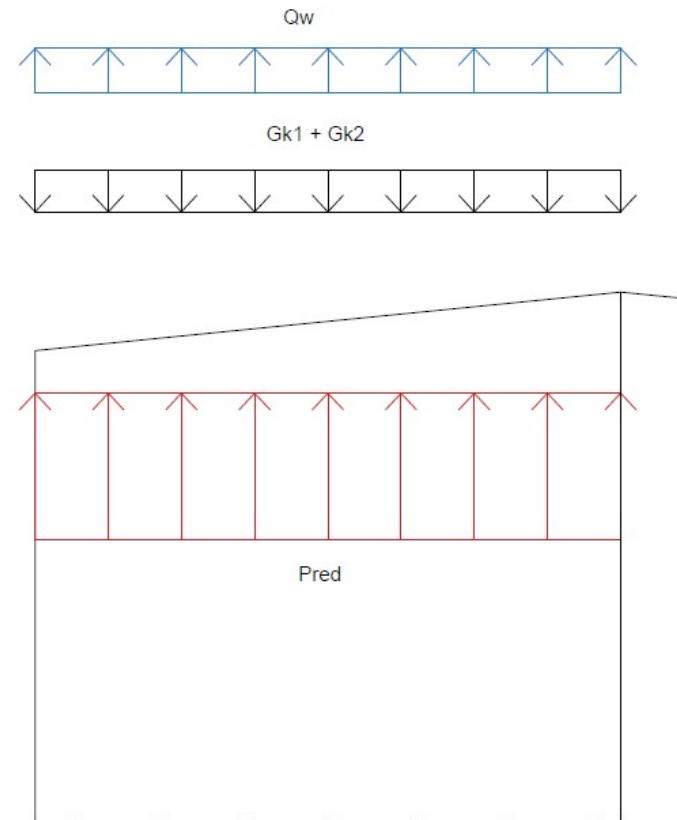
(SFS-EN-1990. 2006, 80.)

Tuulen imu:

- 0,8 m alue  
 $0,5 * 1,04 \text{ kN/m}^2 + 0,5 * 0,85 \text{ kN/m}^2$   
 $= 0,95 \text{ kN/m}^2$
- 1,2 m alue  
 $= 0,46 \text{ kN/m}^2.$

Onnettomustilanteen pystykuormat päätypalkille:

- kattorakenteiden paino  
 $G_{k1} = 0,3 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = 0,6 \text{ kN/m}$
- palkin oma paino  
 $G_{k2} = 0,2 \text{ kN/m}$
- tuulen imu  
 $Q_w = -0,95 \text{ kN/m}^2 * 0,8 \text{ m} - 0,46 \text{ kN/m}^2 * 1,2 \text{ m}$   
 $= -1,31 \text{ kN/m}^2$
- kevennetty räjähdyspaine  
 $P_{red} = -6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} = -13 \text{ kN/m}.$



*Kuva: Päätypalkin kuormitukset onnettomuustilanteessa*

Pystykuormien kuormitusyhdistely onnettomuustilanteessa:

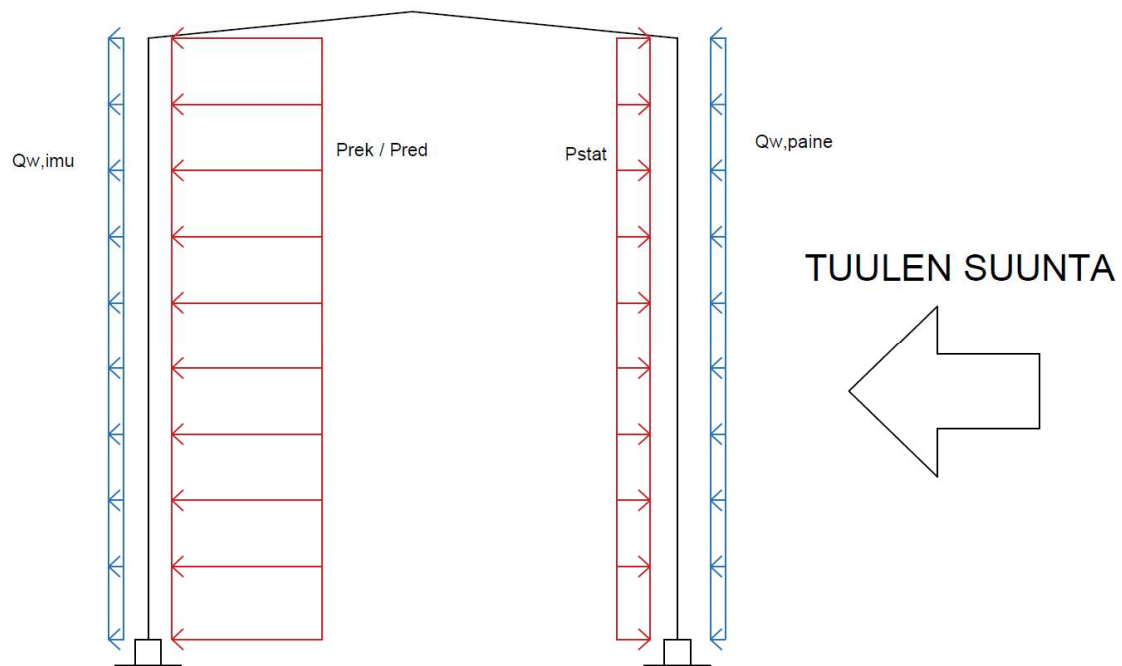
$$G_{kj} + P_{red} + \psi_{1,1} * Q_{k,1(tuuli)} = 0,8 \text{ kN/m} - 13 \text{ kN/m} + 0,2 * -1,31 \text{ kN/m} = -12,46 \text{ kN/m.}$$

(SFS-EN-1990. 2006, 80.)



Onnettomuustilanteen vaakakuormat:

- $Q_{w,imu} = 0,33 \text{ kN/m}^2 * 12 \text{ m} * 10 \text{ m} = 97,2 \text{ kN}$
- $Q_{w,paine} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 12 \text{ m} * 10 \text{ m} = 62,4 \text{ kN}$
- $P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 12 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 741 \text{ kN}$
- $P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2 * 12 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 171 \text{ kN}$



*Kuva: Rakennuksen poikkisuunnan jäykistämisen kannalta vaarallisin tilanne vaakakuormien osalta*

Onnettomuustilanteen vaakakuormien resultantti:

$$\begin{aligned}
 R_x &= P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_{w,imu} - P_{stat} - \psi_{1,1} * Q_{w,paine} \\
 &= 741 \text{ kN} + 0,2 * 97,2 \text{ kN} - 171 \text{ kN} - 0,2 * 62,4 \text{ kN} \\
 &= 577 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}
 \end{aligned}$$

Onnettomustilanteen pystykuormat kehäpilarianturalle:

- kevennetty räjähdyspaine (ylöspäin)  
 $P_{red,1} = -6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 4 \text{ m} = -104 \text{ kN}$
- kevennetty räjähdyspaine (alaspäin)  
 $P_{red,2} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 0,75 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$   
 $= 4,88 \text{ kN}$
- rakenteiden paino  
 $G_{k,1} = \sim 600 \text{ kN} / 6 = 100 \text{ kN}$
- anturan paino  
 $G_{k,2} = \sim 46 \text{ kN}$
- anturan päällä olevan maan paino  
 $G_{k,3} = \sim 35 \text{ kN}$
- hyötykuorma  
 $Q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2 * 0,75 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$   
 $= 5,63 \text{ kN}$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely pystykuormille:

$$\begin{aligned} V_{Ed} &= P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k \\ &= -104 \text{ kN} + 4,88 \text{ kN} + 100 \text{ kN} + 46 \text{ kN} + 35 \text{ kN} + 0,6 * 5,63 \text{ kN} \\ &= 85,26 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)} \end{aligned}$$

Onnettomustilanteen vaakakuormat kehäpilarianturoille:

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 57 \text{ kN}$$

- paineenpurusta aiheutuva rekyyli

$$P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 247 \text{ kN}$$

- tuulen imu

$$Q_w = 2,08 \text{ kN/m} * 10 \text{ m} = 20,8 \text{ kN}$$

- lisävaakavoima (RIL201-1-2011, 74)

$$F_{Hd,x} = V_{Ed} / 150 = 85,26 \text{ kN} / 150 \\ = 0,57 \text{ kN}$$

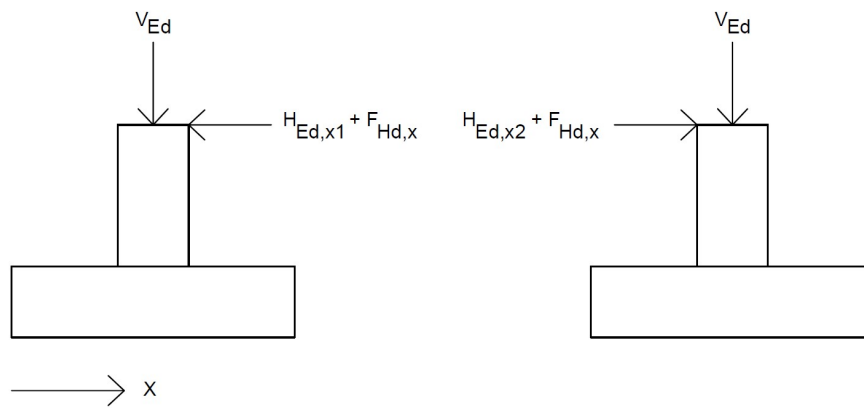
Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely vaakakuormille:

- kehäpilariantura 1

$$H_{Ed,x1} + F_{Hd,x} = P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} \\ = 57 \text{ kN} + 0,2 * 20,8 \text{ kN} + 0,57 \text{ kN} \\ = 61,73 \text{ kN}$$

- kehäpilariantura 2

$$H_{Ed,x2} + F_{Hd,x} = P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} \\ = 247 \text{ kN} + 0,2 * 20,8 \text{ kN} + 0,57 \text{ kN} \\ = 251,73 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}$$



Kuva: Kehäpilarianturoiden 1 ja 2 kuormitukset onnettomuustilanteessa

Onnettomustilanteen pystykuormat nurkkapilarianturalle:

- kevennetty räjähdyspaine (ylöspäin)  
 $P_{red,1} = -6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 2 \text{ m} = -26 \text{ kN}$
- kevennetty räjähdyspaine (alaspäin)  
 $P_{red,2} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 0,50 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$   
 $= 3,25 \text{ kN}$
- rakenteiden paino  
 $G_{k,1} = \sim 600 \text{ kN} / 24 = 25 \text{ kN}$
- anturan paino  
 $G_{k,2} = \sim 46 \text{ kN}$
- anturan päällä olevan maan paino  
 $G_{k,3} = \sim 35 \text{ kN}$
- hyötykuorma  
 $Q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2 * 0,50 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$   
 $= 3,75 \text{ kN}$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely pystykuormille:

$$\begin{aligned} V_{Ed} &= P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k \\ &= -26 \text{ kN} + 3,25 \text{ kN} + 25 \text{ kN} + 46 \text{ kN} + 35 \text{ kN} + 0,6 * 3,75 \text{ kN} \\ &= 85,5 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)} \end{aligned}$$

Onnettomustilanteen vaakakuormat nurkkapilarianturoille, x-suunta:

- paineenpurusta aiheutuva rekyyli

$$P_{rek} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 123,5 \text{ kN}$$

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{stat} = 1,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 28,5 \text{ kN}$$

- tuulen imu

$$Q_w = 1,46 \text{ kN/m} * 10 \text{ m} = 14,6 \text{ kN}$$

- lisävaakavoima (RIL201-1-2011, 74)

$$F_{Hd,x} = V_{Ed} / 150 = 85,5 \text{ kN} / 150 \\ = 0,57 \text{ kN}$$

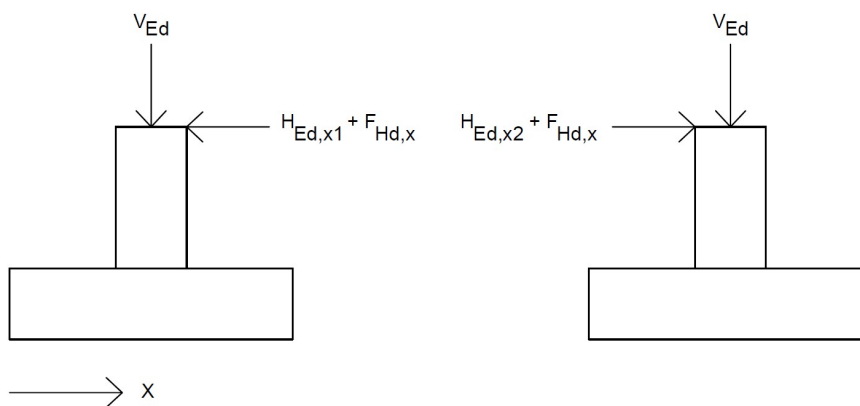
Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely vaakakuormille, x-suunta:

- nurkkapilariantura 1

$$H_{Ed,x1} + F_{Hd,x} = P_{stat} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} \\ = 28,5 \text{ kN} + 0,2 * 14,6 \text{ kN} + 0,57 \text{ kN} \\ = 31,99 \text{ kN}$$

- nurkkapilariantura 2

$$H_{Ed,x2} + F_{Hd,x} = P_{rek} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,x} \\ = 123,5 \text{ kN} + 0,2 * 14,6 \text{ kN} + 0,57 \text{ kN} \\ = 126,99 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}$$



Kuva: Nurkkapilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa (x-z)

Onnettomustilanteen vaakakuormat nurkkapilarianturoille, y-suunta:

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{red} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 9,5 \text{ m} = 123,5 \text{ kN}$$

- tuulen paine

$$Q_k = 0,50 \text{ kN/m}^2 * 2 \text{ m} * 9,5 \text{ m} + 0,2 \text{ kN} = 9,7 \text{ kN}$$

- lisävaakavoima (RIL201-1-2011, 74)

$$F_{Hd,y} = B / L * V_{Ed} / 150$$

$$= 8 \text{ m} / 12 \text{ m} * 85,5 \text{ kN} / 150 = 0,38 \text{ kN}$$

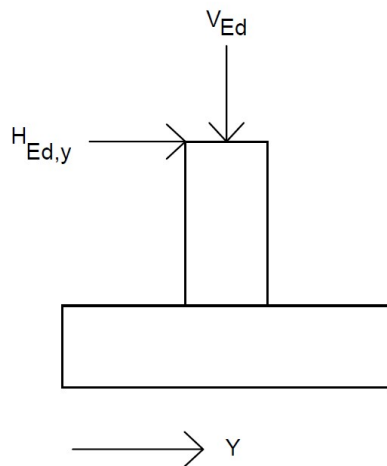
Lisävaakavoimaa ei tarvitse olettaa, että se vaikuttaisi samaan aikaan molempiin suuntiin. Otetaan huomioon vain määräävä suunta, eli tässä tapauksessa  $H_{Hd,x}$ .

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistely vaakakuormille, y-suunta:

$$H_{Ed,y} = P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w$$

$$= 123,5 \text{ kN} - 0,2 * 9,7 \text{ kN}$$

$$= 121,56 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}$$



Kuva: Nurkkapilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa (y-z)

Onnettomustilanteen pystykuormat päätypilarianturoille:

- kevennetty räjähdyspaine (ylöspäin)

$$P_{red,1} = -6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 2 \text{ m} = -52 \text{ kN}$$

- kevennetty räjähdyspaine (alaspäin)

$$P_{red,2} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 0,75 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$$
$$= 4,88 \text{ kN}$$

- rakenteiden paino

$$G_{k,1} = \sim 600 \text{ kN} / 12 = 50 \text{ kN}$$

- anturan paino

$$G_{k,2} = \sim 46 \text{ kN}$$

- anturan päällä olevan maan paino

$$G_{k,3} = \sim 35 \text{ kN}$$

- hyötykuorma

$$Q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2 * 0,75 \text{ m}^2 \text{ (alapohjan alapuolinen anturan ala)}$$
$$= 5,63 \text{ kN}$$

Onnettomustilanteen kuormitusyhdistelyt pystykuormille:

$$V_{Ed} = P_{red,1} + P_{red,2} + G_{k,1} + G_{k,2} + G_{k,3} + \psi_{2,1} * Q_k$$

$$= -52 \text{ kN} + 4,88 \text{ kN} + 50 \text{ kN} + 46 \text{ kN} + 35 \text{ kN} + 0,6 * 5,63 \text{ kN}$$

$$= 87,26 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}$$



Onnettomustilanteen vaakakuormat päätypilarianturoille:

- kevennetty räjähdyspaine

$$P_{red} = 6,5 \text{ kN/m}^2 * 4 \text{ m} * 10 \text{ m} = 260 \text{ kN}$$

- tuulen imu

$$Q_w = 2,18 \text{ kN/m} * 10 \text{ m} = 21,8 \text{ kN}$$

- lisävaakavoima (RIL201-1-2011, 74)

$$F_{Hd,y} = B / L * V_{Ed} / 150$$

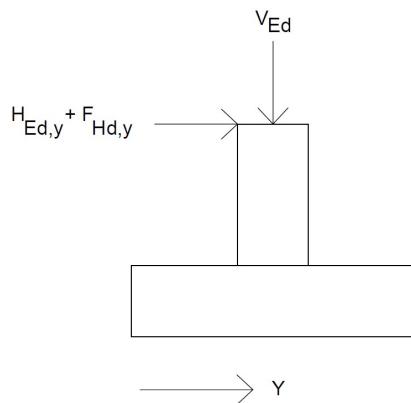
$$= 8 \text{ m} / 12 \text{ m} * 87,26 \text{ kN} / 150 = 0,39 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyt vaakakuormille:

$$H_{Ed,y} + F_{Hd,y} = P_{red} + \psi_{1,1} * Q_w + F_{Hd,y}$$

$$= 260 \text{ kN} + 0,2 * 21,8 \text{ kN} + 0,39 \text{ kN}$$

$$= 264,75 \text{ kN (SFS-EN-1990. 2006, 80.)}$$



Kuva: Päätypilarianturoiden kuormitukset onnettomuustilanteessa