

# **Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus**

**Työhallin rakentaminen ja kattoristikkojen suunnittelu**

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Syksy 2022

Sami Daneshpayeh

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Sami Daneshpayeh	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 52	Valmistumisaika Syksy 2022
Työn nimi <b>Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus</b> Työhalli ja kattoristikot		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), konetekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio Oscar Chia Moradi, toimitusjohtaja, Air-Q-c Co. Ltd.		
Tiivistelmä Opinnäytetyössä käsiteltiin teräsrakenteen ja kattoristikon suunnittelua Air-Q-c-yrityksille, jotka sijaitsevat Thaimassa. Tavoitteena oli suunnitella kattoristikko ja teräsrakenne teollisuushallin rakentamistavarten. Suunnittelussa matemaattisesti mitoitettiin ja laskettiin materiaalien lujuudet, kestävyys taivutusmomentille sekä kuormitukset teollisuushalliprojektin toteuttamiseen. Suunnitteluvaiheessa yleisesti huomioitiin rakenteiden kestävyttä eri sääolosuhteissa esimerkiksi tuuli- ja sadekuormien suhteen. Suunnittelussa noudatettiin EU:n standardeja ja niiden pohjalta työhallin suunnittelua vietiin eteenpäin. Työssä selvitettiin mahdolliset vaihtoehtoiset kattoristikot ja tuloksena päädyttiin suunnittelemaan nelinkertainen howe-kattoristikko.		
Asiasanat lujuus, rakenneputket, taivutus, momentti, kattoristikko		

### Abstract

Author(s) Sami Daneshpayeh	Type of Publication Thesis, UAS	Published Autumn 2022
	Number of Pages 52	
Title of Publication <b>Structure design</b> Roof trusses		
Degree, Field of Study Engineer (UAS), Mechanical Engineering		
Organisation of the client Oscar Chia Moradi, CEO, Air-Q-c Co. Ltd.		
Abstract <p>The subject of this thesis the design of a new industrial hall for the Air-Q-c company.</p> <p>The aim is to get acquainted with the design process and to design the root truss and the steel structure for an industrial hall establishment. In the design process, the dimensions of the structure and the requirements for the materials were calculated. This was done by performing structural analyses and calculating the strength and the bending moment of the materials.</p> <p>Attention was also paid to the wind and rain loads in local weather conditions in Rayong city in Thailand.</p> <p>The workshop design was carried out according to EU standards</p> <p>After considering different possibilities for the roof truss design, a quadruple Howe roof truss was selected as final design</p>		
Keywords Strength, structural, pipes, bending, moment, roof truss		

## Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Yritysten esittely.....	2
3	Suunnittelun osa-alueet .....	3
3.1	Teräsristikon suunnittelu .....	3
3.1.1	Suunnittelun vaiheet .....	3
3.1.2	Teräsristikon koostumus .....	3
3.2	Rajatilamitoitus .....	4
4	Rajatilaluokitukset.....	5
4.1	Murtorajatila.....	5
4.1.1	Murtumismekanismit.....	7
4.1.2	Suunnittelun valvonnan tasoluokitukset .....	8
4.2	Käyttörajatilat.....	9
5	Rakenteen kohdistuvia kuormia .....	11
5.1	Rakenteen omapaino.....	11
5.1.1	Sadekuorma .....	12
5.1.2	Tuulen kuorma.....	13
5.2	Tuulen nopeusprofiili.....	14
6	Tuulen aiheuttama paine ja painekertoimet.....	15
6.1	Ulkopinnat .....	15
6.1.1	Ulkopuoliset kertoimet .....	15
6.1.2	Harjakaton painekertoimet.....	17
6.1.3	Rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormat .....	19
6.2	Voimakertoimen määrittäminen .....	20
7	Poikkileikkausluokitus .....	21
7.1	Perusteet ja luokitus .....	21
7.1.1	Poikkileikkausmäärittely.....	21
7.1.2	Poikkileikkausten kestävyys.....	23
7.2	Taivutus ja leikkaus .....	23
8	Nurjahdus .....	25
9	Kuormien mitoitukset .....	28
9.1	Tuuli, sade ja omapaino.....	28
9.1.1	Tuulen paine rakenneosille .....	29
9.1.2	Teräspilarin mitoitus.....	30

9.2	Vesikaton palkin mitoitus .....	31
10	Teräsrakenteen mitoitus .....	34
10.1	Työhallin mallinnus .....	34
10.1.1	Robot structural Analyis -ohjelma .....	35
10.1.2	Kuormien asettelu.....	36
10.1.3	Kuormien yhdistäminen .....	38
10.2	Kuormien loppulaskenta .....	42
11	Yhteenveto ja pohdinta .....	44
	Lähteet .....	45

### **Merkinnät, termit ja lyhenteet**

$A_0$	Poikkileikkauksen alkuperäinen pinta-ala.
$A_V$	leikkauspinta-ala
$A_{net}$	Poikkileikkauksen nettopinta-ala
$c_d$	Asianomaisen käyttökelpoisuuskriteerin rajoittava mitoitusarvo
$C_{pi}$	Sisäisen paineen painekerroin
$C_{pe}$	Ulkoisen paineen painekerroin
$E$	Kimmokerroin
$E_d$	Kuormien vaikutuksen mitoitusarvo
$F$	Kuorma / Kuormitus
$F_d$	Kuorman mitoitusarvo
$F_{wk}$	Tuulikuorman ominaisarvo
$F_k$	Kuorman ominaisarvo
$F_{w,e}$	Tuulikuorman resultantti
$f_y$	Rakenneteräksen myötöraja
$G$	Pysyvä kuorma
$G_d$	Pysyvä kuorman mitoitusarvo
$I$	Hitausmomentti
$I_y$	Hitausmomentti y-y-akselin suhteen
$I_z$	Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti z-akselin suhteen
$K_{FI}$	Seuraamusluokasta riippuen kuormakerroin
$M_{cr}$	Kiepahduksen kriittinen momentti
$M_{c,,Rd}$	Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{Ed}$	Taivutusmomentin mitoitusarvo

$N_{Ed}$	Normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{c,Rd}$	Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo
$N_{Ed}$	puristusvoiman mitoitusarvo
$N_{b,Rd}$	Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
$Q_{k,1}$	Määräävä muuttuva kuorma
$Q$	Muuttuva kuorma
$Q_k$	Muuttuvan kuorman ominaisarvo
$q_p(z)$	Puuskannoepuspaine
$R$	Kestävyys
$V_{Ed}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{c,Rd}$	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo
$W_{Pl}$	Taivutusvastus
$\gamma_G$	Pysyvien kuormainen osavarmuusluku
$\gamma_Q$	Muuttuvien kuormien osavarmuusluku
$\psi_0$	Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (mm. ominaisyhdistelmässä)
$\psi_1$	Muuttuvan kuorman tavallisen arvon yhdistelykerroin
$\psi_2$	Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin
$\Phi$	Apusuure nurjahduksessa

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella Air-Q-c yritykselle tulevaisuudessa, valitsin teräsrakenteiden suunnittelua aiheeksi kahdesta syystä.

Teräsrakenteiden suunnittelu on insinöörialan yksi tärkeimmistä osaamisalueista. Italian Genovassa sortuneen sillan tapauksen jälkeen kiinnostuin yhä enemmän teräsrakenteiden suunnittelusta.

Teollisuushallin suunnittelu alkoi tutustumalla teräsrakenteiden eri suunnitteluvaihtoehtoihin ja siihen tarvittaviin menetelmiin, kuten 3D-ohjelmiin ja CAD-parametrisoinnin virtuaalisiin malleihin.

Opiskelin laajasti itsenäisesti optimointia, LCC-arvojen analyysijä, lujuuslaskentaa ja materiaalien määrän laskentamaista.

Projektinsuunnittelua lähestyin perehtymällä rakenteen kokonaisuuden ja tilojen mittojen suunnitteluun siten, että mittauksissa huomioidaan rakennuksen omapainon ja ulkopuoliset kuormat.

Tarkoituksena työssä oli laajentaa ja kehittää omaa osaamistani. Lähteinä on käytetty googlesta löytyneitä materiaaleja ja kurssien oppimateriaaleja sekä rakentamisen eurostandardeja.



## 2 Yritysten esittely

### **Air-Q-c**

Air-Q-c Oy sijaitsee Thaimaassa Rayongin kaupungissa. Air-Q-c on perustettu 2019 ja se on keskittynyt teollisuuskoneiden ja tukkimittarien suunnitteluun ja valmistukseen. Air-Q-c:ssa on käytössä työkaluina Solidwork, Beckhoffin automaatio, Odoo-ohjelmistoa ja Microsoftin ohjelmistoja. Air-Q-c on Suomessa toimiva Finnoksen yhteistyökumppani ja yritys työllistää lähes kolmekymmentä henkilöä tällä hetkellä.

### **Finnos**

Finnos on maailman johtavia tukkiröntgenvalmistajia yli 50 asennetun röntgenjärjestelmän kokemuksella Suomessa ja ulkomailla. Laatulajittelua optimoimalla tukkiröntgen pienentää sahateollisuuden kustannuksia 3-4 eurolla raaka-ainekuutiota kohden ja synnyttää 1-2 euroa vastaavan raaka-ainesäästön tarkasta kuorettomasta latvahalkaisijasta. (Finnos 2022.)

Finnoksen sahateollisuuden ratkaisut ovat tukkimittari, lautamittarit, tukkikentän hallintajärjestelmät ja huolto sekä varaosien toimitus ja asennus metsäteollisuuteen. UPM ja Metsä ovat Finnoksen asiakasryhmään kuuluvia yrityksiä. (Finnos 2022.)

### **Morandin silta**

Kokkosen (2018) mukaan Morandin silta Genova kaupungissa oli rakennettu 1967 ja sortui vuonna 2018. Silta oli 1102 metriä pitkä ja sillan kannen korkeus maasta oli 45 metriä, pisin jännevälin pituus oli 210 metriä.

Morandin sillan kannatintorni sortui sillan keskeltä ja osa sillasta romahti maahan. Sortumisen syynä pidetään rekanteiden rappeutuneisuutta. Morandin suunnittelija oli Riccardo Morandi. (Kokkonen 2018.)

### 3 Suunnittelun osa-alueet

#### 3.1 Teräsristikon suunnittelu

Salosen (2018) mukaan rakennustekniikassa kautta aikojen ihmiskunta on pyrkinyt suunnittelemaan rakenteet Kestämään eri sääolosuhteita, ja rakenteista on pyritty tekemään turvallisia

Ristikon suunnittelu alkaa siitä, että selvitetään ristikkoon eri suunnista kohdistuvat kuormat. Täytyy arvioida ristikon korkeus ja tehdä selvitys tarvittavasta tilasta, kyseisen alueen ulkoisista rasitustekijöistä, kuten tuulen, sateen ja lumen kuormista. Näiden tietojen perusteella valitaan ristikon tyyppi. (Salonen 2018.)

Katoristikot toimivat rakennusten kantavana yläpohjarakenteena ja katoristikko kantaa 1,6-kertaisen kuorman. Normaalisti ristikot kestävät vertikaalista voimia, mutta aina rakennusvaiheessa huomioidaan myös se, että ristikkoja voidaan joutua tukemaan vinositeillä myös horisontaalisessa suunnassa. Insinöörien on oltava ehdottomasti tarkkoja suunnitteluvaiheessa, että vältettäisi luonnon ilmiön aiheuttamia sortumisia. (Urakkamaailma 2022.)

##### 3.1.1 Suunnittelun vaiheet

Teräsrakenteen suunnittelu on suuri projekti, jossa täytyy huomioida toimeksiantajan toimintavaatimukset sekä lujuustekniikan ja valmistustekniikan näkökulmat. Suunnitteluvaiheessa täytyy huomioida laajasti teoria ja aihetta koskeva tieteellinen tieto. (Björk 2017.)

Suunnittelussa on tärkeää osata ideoida visuaalisesti, pohjata suunnittelu tarkkoihin laskelmiin ja käyttää FDM-analyysin mukaisia statiikan ja dynamiikan periaatteita. Suunnittelussa täytyy soveltaa lujuustekniikan periaatteita ja selvittää rakenneratkaisujen kannalta tarpeelliset poikkileikkausmuodot ja -mitat. (Björk 2017.)

##### 3.1.2 Teräsristikon koostumus

Urakkamaailman (2022) suurin osa tukiristikoista valmistetaan puusta. Kolmioita ja ristikon leveydestä riippuen materiaalina saatetaan käyttää puuta tai metallia. Ristikon kolmiomainen rakenne lisää ristikon lujuutta ja kantokykyä sekä vähentää liitosten taivutusjännitystä.

Palkkeja valmistetaan puusta, betonista ja metallista. Suomessa rakennuksiin käytetään eniten puupalkkeja. Muut tyypit ovat teräsbetoni- ja alumiinipalkki. Yleisiä ristikoita ovat harjaristikko, saksiristikko, pulpettiristikko ja kehäristikko. (Urakkamaailma 2022.)

## 3.2 Rajatilamitoitus

Turvallisuuden huomioimiseksi rajatilamitoitukset täytyy tarkistaa huolella. Murtorajatilat ja käyttörajatilat huomioidaan erikseen ja kun murtorajatila on selvitetty riittävän tarkasti, voidaan olettaa myös käyttörajatilan olevan vaatimusten mukainen. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 52.)

Rajatilat liittyvät mitoitustilanteisiin. Mitoitustilanteet jaotellaan kolmeen osa-alueeseen: vakinaisiin, satunnaisiin ja sattumatilanteisiin. Opinnäytetyössä tarkastellaan käyttörajatiloja ja murtorajatiloja. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 52–57.)

## 4 Rajatilaluokitukset

### 4.1 Murtorajatila

Murorajatilalla tarkoitetaan tilanteita, jotka voivat vaarantaa ihmisten tai eläinten hengen. Murtorajatilaksi määritellään rakenteen sortuminen, vahingoittuminen, kuluminen tai epätasapainoisuus. (SFS-EN 1990 + A1 + AC.2006, 76–82.)

Murtorajatila kirjoitetaan yhtälömuodossa  $E_d \leq R_d$  missä  $E_d$  on kuormien vaikutuksen, kuten voiman suureen [F] mitoitusarvo, voima tarkoittaa sisäistä voimaa tai momenttia [N] sekä vektori käsitteenä.  $R_d$  on vastaava suunnittelun kestävyuden mitoitusarvo. (SFS-EN 1990 + A1 + AC.2006, 76–82.)

#### Murtoraja osa-alueet

Tarkistetaan seuraavat murtorajat niiden tulleessa kyseeseen, EQU (equilibrium) joustamaton kappaleen rakenne tai jokin liikkumattoman osan tasapainon menetys. Tapauksia ovat jäykistysrakenteen kaatumistarkastus, perustuksen kaatuminen ja kaatumisen syy on jokin muu kuin maapohjan murtumisesta. (RIL 201-1-2017 Osa 0.)

STR (strenght), rakenteelle tai rakenneosille tulee sisäisiä vaurioita tai syntyy suuria siirtymiä sellaisissa tapauksissa, kun rakennusmateriaalien lujuus on määräävä. Silloin täytyy tarkastella mainittujen rakenteiden, eli paalujen kellareiden seinien ja anturoiden STR eli vahvuus. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 114–119.)

GEO (geotechnical tarkoitetaan maan pettämisestä johtuvaa liian suurta siirtymää, kun rakenne on sijoitettu kallioperän tai maakerroksen päälle ja näiden lujuus vaikuttaa rakennuksen kestävyyskonkreettisesti. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 114–119.)

FAT (fatigue) ilmaisee rakenteen tai rakenneosien väsymismurtumista. ja HYD: hydraulisten luiskien johdosta maapohjan kasvua aiheuttava sisäistä eroosiota ja putkieroosioista (putket) maassa. Seuraavaksi määritellään luotettavuusluokka (RC1-3) ja seuraamusluokat CC1-3) murtorajatila mittauksessa taulukon 1 mukaan (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 114–119.)

Luotettavuusluokka ja indeksin $\beta$ arvot	1 vuoden tarkastelujakso	50 vuoden tarkastusjakso	kuormakerroin $k_{FI}$	Luotettavuusluokka		
				RC1	RC2	RC3
RC3	5,2	4,3	$k_{FI}$	0,9	1,0	1,1
RC2	4,7	3,8				
RC1	4,2	3,3				
Seuraamusluokat	Kuvaus		Esimerki rakennukset			
CC3	Suuren henkilö kuolma tai suuri rahaa menetys sosiaalisia ja ympäristö vahingojen takia		Julkiset rakennukset, teatterit, iso kaupakeskukset			
CC2	Suht suuri henkilö ja taloudellinen menhtys sosiaalisia ja ympäristön takia		Asuin ja liikerakennukset, pienempi vaurio seuraus			
CC1	kohtu pieni seuraamukset ylämainnituista asioista		Maa ja metsätalousrakennukset eli varasto, kasvihuone			

Taulukko 1. Rakennusten seuraamus- ja luotettavuusindeksi  $\beta$  ja kuormakerroin  $k_{FI}$  (muokailtu, SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006)

Murtorajatilan kuormienyhdistelyssä arvioidaan sellaisia kuormia, joita voidaan katsoa esiintyvänä yhtäaikaaisesti, luiskien ja kokonaisvakavuuden mitoituksessa käytetään GEO tapausta ja rakenteen tai rakenneosien kestävyydelle ja kantavuudelle käytetään STR-osa- aluetta. Kuormitusyhdistelmä on esitetty murtorajatilamitoitukselle alla kaavoilla 1 ja 2. (RIL 201-1-2017 Osa 0.)

$$F_d = 1,15 k_{FI} G_{kj,sup} + 1,5 k_{FI} Q_{k,1} + 1,5 k_{FI} \sum \psi_{0,i} Q_{k,i} \geq 1,35 G_{kj,sup} \quad (1)$$

$$F_d = 0,9 k_{FI} G_{kj,inf} + 1,5 k_{FI} Q_{k,1} + 1,5 k_{FI} \sum \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

Missä:  $k_{FI}$  luotettavuusluokille RC1-3 määritellään taulukon 1 mukaisesti ja  $G_{kj,sup}$  Tarkoittaa pysyviä epäedullisia kuormia ja  $G_{kj,inf}$  kuvaa pysyviä edullisia kuormia kuten taulukossa 2.

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusolot	Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)		Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusolot	Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)	
	Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut		Epäedulliset	Edulliset		Kuorma	Pääasiallinen
(Yht. 6.10)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	(Yht. 6.10a)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$		$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
						(Yht. 6.10b)	$\xi \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(\*) Muuttuvia kuormia ovat taulukossa A1.1 mainitut kuormat.

HUOM. 1 Valinta kaavan 6.10 tai kaavojen 6.10a ja 6.10b välillä esitetään kansallisessa liitteessä. Jos kansallisessa liitteessä valitaan 6.10a ja 6.10b, niin siinä voidaan kaavasta 6.10a poiketa lisäksi siten, että siihen sisältyvät vain pysyvät kuormat.

HUOM. 2 Osavarmuuslukujen  $\gamma$  ja kertoimen  $\xi$  arvot voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Seuraavia lukujen  $\gamma$  ja kertoimen  $\xi$  arvoja suositellaan käytettäessä lauseketta 6.10 tai lausekkeita 6.10a ja 6.10b.  
 $\gamma_{G,j,sup} = 1,35$   
 $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$   
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$  epäedullisissa tapauksissa (0 edullisissa tapauksessa)  
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$  epäedullisissa tapauksissa (0 edullisissa tapauksessa)  
 $\xi = 0,85$  (siten, että  $\xi \gamma_{G,j,sup} = 0,85 \times 1,35 = 1,15$ ).

Ks. myös standardeista EN 1991...EN 1999 pakkosiirtymille tai pakkomuodonmuutoksille käytettäviä osavarmuusluvun  $\gamma$  arvoja.

HUOM. 3 Kaikkien samasta syystä aiheutuvien pysyvien kuormien ominaisarvot kerrotaan osavarmuusluvulla  $\gamma_{G,sup}$ , jos kuormien kokonaisvaikutus on epäedullinen ja osavarmuusluvulla  $\gamma_{G,inf}$ , jos kuormien kokonaisvaikutus on edullinen. Esimerkiksi kaikkien rakenteen omasta painosta aiheutuvien kuormien voidaan katsoa aiheutuvan samasta syystä; tämä pitää paikkansa silloinkin, kun kyseessä on erilaisia materiaaleja.

HUOM. 4 Erityistarkasteluissa osavarmuuslukujen  $\gamma_G$  ja  $\gamma_Q$  arvot voidaan jakaa osiin  $\gamma_g$  ja  $\gamma_q$  ja mallin epävarmuuteen  $\gamma_{SD}$ . Useimmissa tapauksissa voidaan käyttää välillä 1,05...1,15 olevaa  $\gamma_{SD}$ -arvoa ja siitä voidaan poiketa kansallisessa liitteessä.

&lt;AC|

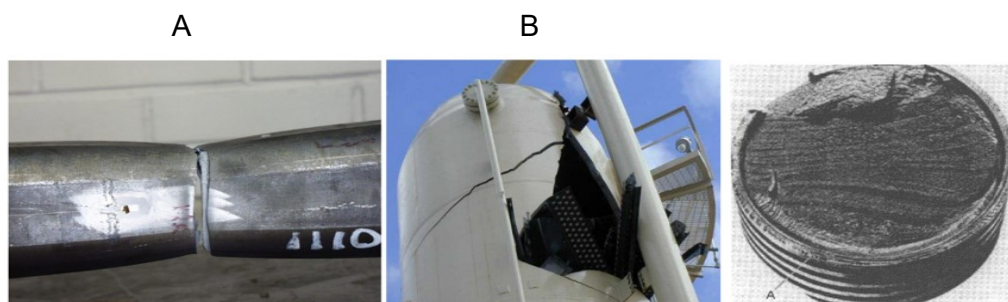
Taulukko 2. kuormien mitoitusarvot (STR/GEO rakenneosien kestävyys ja geotekninen kantavuus (SFS-EN 1990 + A1 + AC taulukko A1.2b)

#### 4.1.1 Murtumismekanismit

Björkin (2019) mukaan murtumismekaniikalla tarkoitetaan materiaalien murtumista eri asteikkotasolla: atomitaso, reataso, särötaso, testikappaleet, kokonaiset rakenteet, mutta tavallisesti menetelmää käytetään väsymislaskennassa, toisaalta samat periaatteet pätevät muihin murtumismekanismiin.

Yleisimmät murtumismekanismit ovat sitkeä [ductile], hauraus [brittle], väsymismurtuma [fatigue] ja näiden lisäksi tieteen historiassa on todettu myös muita vaurioitumismekanismeja.

Kuvassa 1 on esitetty A sitkeämurtuma, kuvassa B haurausmurtuman ja kuvassa C väsymismurtuman jäljet. (Björk 2019.)



Kuva 1. Yleiset murtumismekanismit A, B ja C (Björk 2019)

Murtumismekaniikka kaavalla (3) lasketaan väsymisjännitystä joissa  $\sigma_f$  on murtojännitys,  $E$  on kuormien vaikutus,  $\Gamma_E$  kimoinen pintaenergia,  $\Gamma_p$  plastinen pintaenergia  $a$  mikrosärmän pituus. (Björk 2019.)

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E \cdot (\Gamma_E + \Gamma_p)}{\pi \cdot a}} \quad (3)$$

#### 4.1.2 Suunnittelun valvonnan tasoluokitukset

Organisaatiot valvovat suunnittelua ja niiden tasoluokituksia, ja täällä tavalla pystyvät tämentämään suunnittelun valvontatasoa. DSL luokitellaan kolmeen eri tasoon.

Näillä luokituksilla varmistetaan rakenteen kannattavuutta. Samalla nämä luokitukset varmistavat, että rakenteet täyttävät kansalliset standardit ja että ne muodostetaan käyttöohjeiden mukaisesti. Valvonnassa huomioidaan patentoineiden henkilöiden pätevyys ja kokemus. Tällöin laadunvalvontaprosessissa toteutuvat taulukossa 3 esitellyt DSL-tasot. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006 140-142.)

Suunnittelun säätötasot	Piirteet	Matemaattiset arvot, piirrokset ja jaotelmien tarkastamisen suositetut minimivaatimukset
DSL3 sulautu tasoon RC3 kanssa	Karkea tarkkailu	Tarkastuksen tekee kolmas osapuoli: Sen suorittaa eri yhtiö, kuin suunnittelun laatinut organisaatio
DSL2 sulautu tasoon RC2 kanssa	Perustarkkailu	Tarkastuksen tekee muut henkilöt kuin alun perin vastuussa olleet ja suoritus menettelytavat vaihtelevat
DSL1 sulautu tasoon RC1 kanssa	Perustarkkailu	Tarkastuksen hoitaa henkilökohtaisesti suunnittelija

Taulukko 3. Suunnittelun valvonnan tasoluokitus DSL (mukailtu, SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 137)

## 4.2 Käyttörajatilat

Käyttörajatilaan sisältyy seuraavia rajatiloja: rakenteen tai rakenneosien toiminta normaali-käytössä, ihmisten mukavuus ja rakennuskohteen ulkonäkö. Käyttörajatila jaetaan palautu-viin ja palautumattomiin osiin. Tarkastuksessa huomioidaan kolme osa-aluetta: rakenteen siirtymä, värähtelyt ja vauriot. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 56-59.)

Eurokoodeissa käyttörajatilan yhtälö on esitelty muodossa  $E_d \leq C_d$

Jossa  $C_d$  on pätevän käyttökelpoisuuskriteerin mukaan rajattu mitoitusarvo.  $E_d$  on käyttö-kelpoisuuskriteereissä määriteltujen kuormien seurausten mitoitusarvo, joka Määräytyy ky-seessä olevan materiaalin koostumuksen perustella. Käyttörajatilan kuormityshdistelmät jaetaan kolmeen Lausekeryhmään erilaisilla kriteereillä. Nämä kriteerit ovat ominaisyhdis-telmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikaisyhdistelmä. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 56-59.)

Käyttörajatilojen kuormayhdistelmät määritellään seuraavien Kaavojen avulla. Näissä kaa-voissa oletetaan, että kaikki omavarmuusluvut ovat Suuruudeltaan 1. Kuormitusyhdistel-missä kuormia, jotka eivät voi vaikuttaa ja esiintyä samanaikaisesti fysikaalisista tai toimin-nallisista syistä, ei huomioida samanaikaisesti. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 82–85.)

Ominaisyhdistelmän kaava (4)

$$E_d = \Sigma G_{kj} + Q_{k,1} + \Sigma \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

missä:

$E_d$  kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

$Q_{k,1}$  muuttuva kuorman

$G_{kj}$  pysyvä kuorma (oma paino)

$Q_{k,i}$  muuttuvat hyötykuormat lumi- ja tuulikuormat

$\Psi_0$  muuttuva kerroin ominaisyhdistelmässä.

Tavallisen yhdistelmän kaava (5)

$$E_d = \Sigma G_{kj} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \Sigma \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5)$$



jossa:

$\Psi_1$  muuttuvan tavallisen kuorman yhdistelykerroin.

Pitkäaikaisyhdistelmässä käytetään kaava (6)

$$E_d = \Sigma G_{kj} + \Sigma \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6)$$

jossa:

$\Psi_2$  muuttuvan pitkäaikaisen kuorman yhdistelykerroin.

Sellaisia kuormia, jotka ei muodostu tai esiintyy samankaikuisesti rakenneosille tai rakennuksille fyysikaalisista tai toiminnallisista syistä jätetään huomioitta kuormayhdistelmissä. Hyötykuormien luokitukset erilaisille rakennuksille ja niiden yhdistelykertoimet esitetty taulukossa 4. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 86.)

Kuorma	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1-1)			
Luokka B: toimistotila	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistila	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka H: Vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuorma pohjoismaat	0,7	0,5	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa)	0,6	0,5	0

Taulukko 4. kertoimien  $\Psi$  suositusarvot rakennuksille (mukailtu, SFS-EN 1990 + A1 + AC 2006, 86)

## 5 Rakenteen kohdistuvia kuormia

### 5.1 Rakenteen omapaino

Oma painolla tarkoitetaan kaikkia kuormia, jotka vaikuttavat rakennukseen, kun rakenne on pystyssä eli toisin sanoen kiinteitä kuormia. Oman painon muuttuessa esimerkiksi rakennuksen ikääntymisen takia on tehtävä muutoksia huomioiden ylä- ja alarajan ominaisarvot. Esimerkiksi väliseinän siirtäminen käsitellään lisähyötykuormana. Kyseinen muutos astuu voimaan ainoastaan pysyvien kuormien ollessa edullisia. (SFS-EN 1991-1-1 + AC 2002, 18.)

Vesikattoluokituksia tehdään sen perusteella, millaiset pääsymahdollisuudet katolle on. Työhallin tapauksessa tarvitaan luokka H eli pääsy katolle ainoastaan huolto ja kunnostusta varten. Kyseisen työhallin vesikaton vähimmäisominaisarvon  $q_k$  hyötykuormat ovat väliltä  $0,00...1,0 \text{ kN/m}^2$  ja  $Q_k$  hyötykuormat väliltä  $0,9... 1,5 \text{ kN}$  [kansallisessa liitteessä suositusarvot ovat  $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$  ,  $Q_k = 1,0 \text{ kN}$ ]. Seuraavassa taulukossa 5 esitellään luokitusluokat. (SFS-EN 1991-1-1 + AC 2002, 42.)

Kuormitusalueen luokka	Käyttötarkoitus	
H	Vesikatot, joille on pääsy vain huolto ja kunnostusta varten	
<b>Vesikatto</b>	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]
<b>Luokka H</b>	$q_k$	$Q_k$
Luokassa H kuorma $q_k$ voidaan valita väliltä $0,00... 1,0 \text{ kN/m}^2$ ja kuorma $Q_k$ väliltä $0,9... 1,5 \text{ kN}$ . Kansallisessa liitteessä suositusarvot ovat: $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$ , $Q_k = 1,0 \text{ kN}$		

Taulukko 5. vesikattojen hyötykuormat ja luokitusluokat (mukailtu, SFS-EN 1991-1-1 + AC 2002, 42)

Työhallin rakenteen omaa painon kuuluvat kaikki kiinteät kantavat ja ei kantavat-massat, vesikattoon käytetyt materiaalit, pilarit, kattoristikkojen omatpainot, palkit ja diagonaalit. Näiden ominaisarvojen tilavuuspainot on huomioitava, esimerkiksi teräksen tilavuuspaino on  $7859 \text{ kg/m}^3$  noin  $77 \text{ kN/m}^3$ .

### 5.1.1 Sadekuorma

Tässä opinnäytetyössä ei laskettu lumen kuormaa, rakennuksen sijainnista johtuen, mutta lumen kuorman tilalle laskettiin sateen vaikutus kuormarakenteisiin. Rakennuksiin ja rakenteisiin elinikänsä aikana kohdistuu monenlaisia rakenteellisia kuormituksia ja yksi niistä on sadekuorma sijainnista riippuen.

Sade on aiheuttanut paljon romahduksia varsinkin, kun sade ja tuuli yhdistyvät, jolloin ne samanaikaisesti kuormittavat ja vaurioittavat kattorakenteita. Havainnollistamalla komplikaatioita voidaan huomioida rakennussuunnittelumenetelmässä sateen Aiheuttama kuormallinen paine yhdistettynä kattorakenteen muihin kuormiin. Sademäärä ei tule kohdistamaan suurta kuormaa galvanoidulle katolle, jossa on sopiva kaltevuus.

Sadekuorman laskemisessa tasakatoille voidaan hyödyntää kaavaa 7

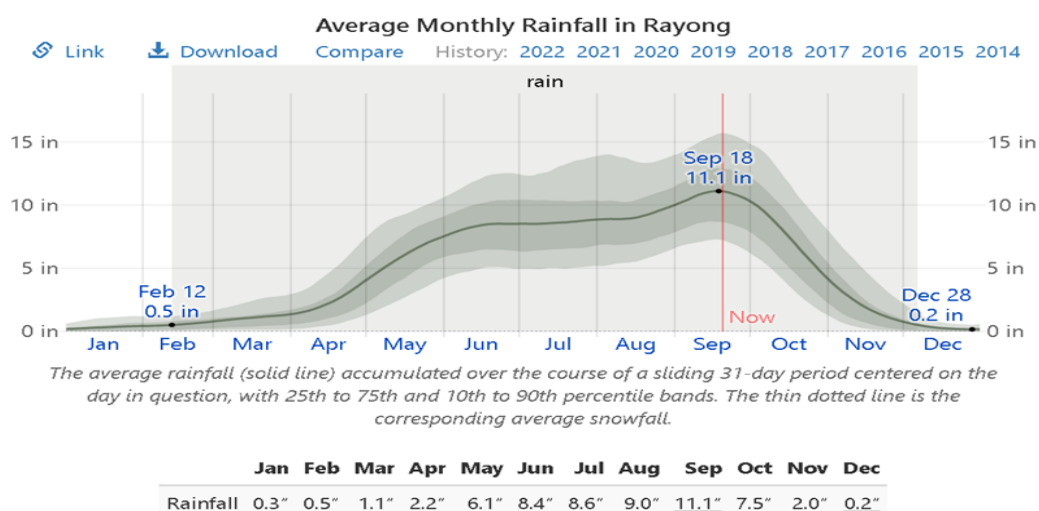
$$RL = 5.2 * (ds+dh) \text{ (Jaiswal 2022)}. \quad (7)$$

Missä RL on sadekuorma psi (engl. Pounds per square inch)

Ds on toissijaisen tyhjennysputken veden syvyys tuumina (engl. Inch)

Dh on veden syvyys tyhjennysputken yläpuolella tuumina (engl. Inch)

Rayongissa korkein sademäärä on syyskuussa, jolloin sademäärä nousi 11 tuumaan. Opinnäytetyön työhallin katon tapauksessa ei käytetty yllä mainittua kaavaa (7). Sen sijaan laskin, että sateen kokonaismäärästä aiheutuu maksimissaan 2,7kN voima vesikatoille. Kun 2700N jaetaan koko katon pinta-alalla, saadaan sateen aiheuttamaksi paineeksi 4.4 N/m<sup>2</sup>. Sademäärää arvioitiin kuvion 1 perusteella. (weatherspark 2022.)



kuvio 1. Rayongin vuoden sademäärän arviointi (weatherspark 2022)

### 5.1.2 Tuulen kuorma

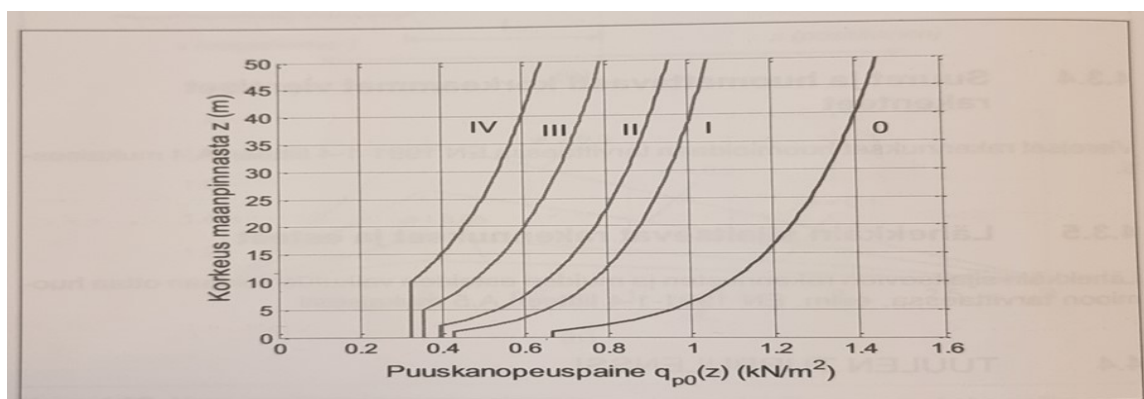
Tuulikuorma esitetään yksinkertaistettuna paineiden ja voimien ryhmässä ja se lajitellaan vakituisiksi ja muuttuviksi kuormiksi. Tuulikuorman vaikutus riippuu rakenteesta sen suunnittelumuodosta. Tuulennopeus ja nopeuspaine täytyy laskea komponenttien summana (SFS-EN 1991-1-4 2011, 30.)

Tuulikuorma on vaihteleva kuorma, ja se aiheuttaa painetta rakenteiden ja rakennuksien ulkoseinä- ja tai ulkopintaan, sisäpintoihin ja kattoihin. Tuulikuorman paine ei ole sama ja jatkuva vaan se vaihtelee vuodenaajoista ja asuinalueesta. Opinnäytetyössä suunniteltava työhalli sijaitsee Rayongissa. Tämän kohteen maastoluokan luokitus on esitetty taulukossa 6. (SFS-EN 1991-1-4 2011, 30.)

Maastoluokka	z (m)	III
III sijaintti, joissa ympärillä on kasvillisuutta ja rakennuksia, joilla tuuliesteitä, etäisyys on 20 kertaa esteen korkeus kuten kylät ja pysyvät metsät.	8	0,46

Taulukko 6. puuskannopeuspaineen ominaisarvot  $q_{p0}(z)$  [ $kN/m^2$ ]. (mukailtu, RIL 201-1-2017 Osa1.4)

Tuulesta aiheutuvien kuormien määrittäminen edellyttää seuraavia laskentavaiheita Puuskannopeuspaine  $q_p(z)$ , sisältää tuulennopeuden muokattu alkeelliset ja hetkelliset arvot vauhtimuunnokset kannattaa määrittää. Kuviossa 2 on määritetty puuskannopeuspaine eri maastoluokituksille korkeuden z suhteen. (SFS-EN 1991-1-4 2011, 42.)



Kuvio 2. puuskanopeuspaineen ominaisarvo eri maastoluokissa (RIL 201-1-2017 Osa1.4 s 136)

Tuulen puuskanopeuspaine korkeudelle  $z$ , joka sisältää tuulennopeuden modifioidun perusarvon ja lyhytaikaisten nopeusvaihteluiden vaikutukset määritellään seuraavasti kaavalla 8.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V_m^2(z) = c_e(z) q_p \quad (8)$$

missä:

Ilman tiheys ja se on riippuvainen monesta tekijästä (eli korkeus, lämpötila ja ilmapaine)

$$c_e(z) \text{ altistuskerroin} = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

$$q_p \text{ nopeuspainen perusarvo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Kansallisessa liitteessä  $\rho$  suositusarvo on  $1,25 \text{ kg} / \text{m}^3$

Lukuarvo 7 perustuu huippuarvokertoimen arvoon 3,5 ja on yhdenmukainen paine ja voimakertoimen kanssa. Suuntakertoimen arvo on 1, joka on määritetty kansallisessa liitteessä suoritusarvoksi.

## 5.2 Tuulen nopeusprofiili

Tuulen nopeuden perusarvo Rayongissa  $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$ . Tuulen nopeuden perusarvo  $v_b$  on määritelty tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvona 10 metrin korkeudella maanpinnasta. Laskelman määrittäminen on tehty maastoluokituksen III mukaisissa olosuhteissa ja 50 vuoden toistuvina arvoina. (RIL 201-1-2017 Osa1.4.)

Sain tuulen nopeusprofiilin modifioiduksi perusarvoiksi  $v_m(z)$  14,77 m/s korkeudella  $z$ , jonka esitelty kaavassa 9.

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b \quad (9)$$

missä:

$c_r(z)$  on maaston rosaisuuskerroin (EN 1991-1-4 kohdassa 4.3.1 Taulukko 4.1) mukaan.

$c_o(z)$  on pinnanmuotokerroin = (1)

$v_b$  on Tuulennopeuden perusarvo

## 6 Tuulen aiheuttama paine ja painekertoimet

### 6.1 Ulkopinnat

Tuulikuorma tulee konfiguroida ottamalla huomioon ulkopuoliset ja sisäpuoliset tuulen paineet. Sen jälkeen, kun tuulen nopeuspaine on selvitetty, aletaan määrittää tuulenpaineen vaikutusta  $w_e$  ulkopinnoille kaavan 10 (SFS-EN 1991-1-4 2011, 42.)

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (10)$$

joissa:  $w_e$  on yksittäiseen pintaan korkeudelle  $z_e$  vaikuttava ulkopuolinen paine,  $q_p(z_e)$  on puuskanopeuspaine, joka on määritelty. (SFS-EN 1991-1-4. kohdassa 4.5).  $z_e$  on nopeuspaine korkeus ja  $c_{pe}$  on painekerroin.

### Sisäpinnat

Rakenteiden sisäpintaan vaikuttavalle tuulenpaineelle  $w_i$  käytetään kaava 11.

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (11)$$

missä  $w_i$  on yksittäiseen pintaan tietyllä korkeudella vaikuttava sisäpuolinen paine,  $z_i$  sisäpuolisen nopeuspaine korkeus ja  $c_{pi}$  paineen painekerroin.

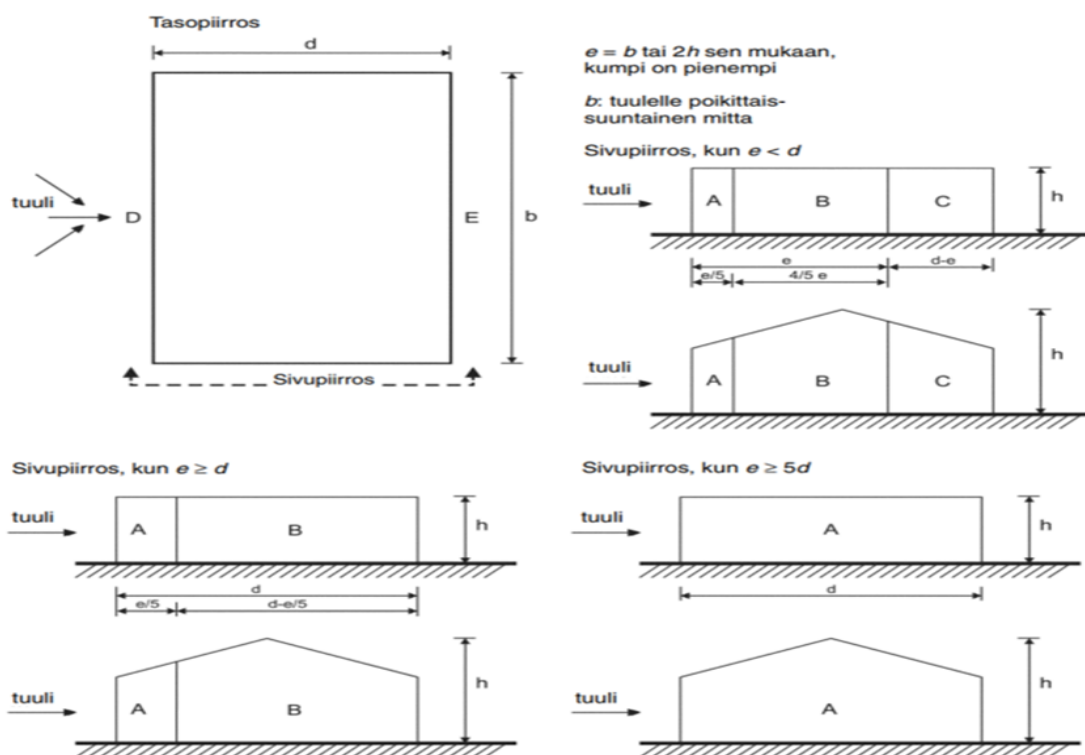
#### 6.1.1 Ulkopuoliset kertoimet

Painekerroin  $c_{pe}$  riippuu kuormitetusta pinta-alasta A, joka lisää merkittävän tuulikuorman poikkileikkauksissa.  $c_{pe}$  jaetaan kahteen ryhmään vakion,  $c_{pe,1}$  arvot on tarkoitettu pienten osien tai kiinnitysten kuten verhouksien mitoituksiin  $1m^2$  alalla. (SFS-EN 1991-1-1-4 2011, 62.)

Painekerrointa  $c_{pe,10}$  hyödynnetään  $10m^2$  pinta-alalle. Tätä arvoa käytetään rakennusten runkojen suunnittelussa.  $c_{pe,10}$  ja  $c_{pe,1}$  kertoimien suositusarvot on esitetty taulukossa 7 mittasuhteesta h/d riippuen. Nämä arvot soveltuvat kalteviin kattorakenteisiin, kuten harjakattoon ja pulpettikattoon. Kuvassa 2 esitellään pystyseiniä koskevat vyöhykekaaviot. (SFS-EN 1991-1-1-4 2011, 62.)

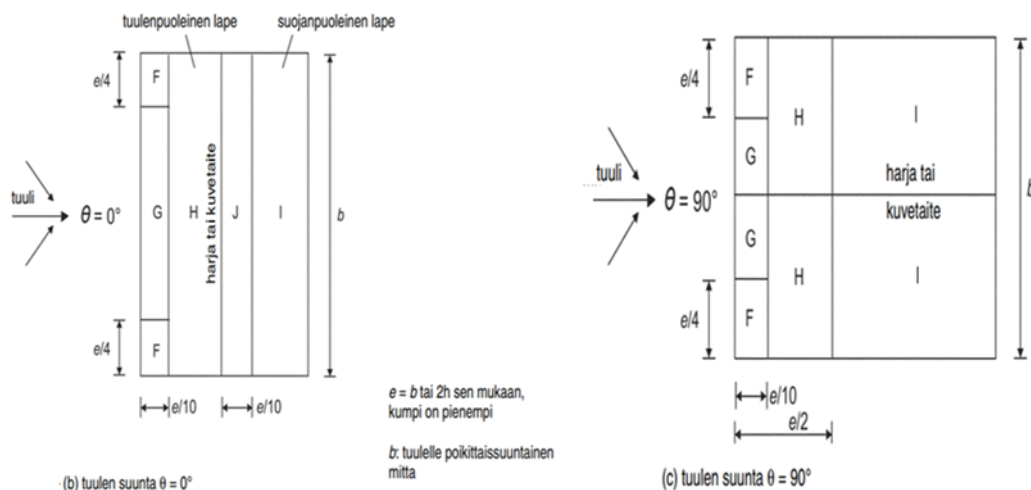
Vyöhyke	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Taulukko 7. Ulkopuolisten painekertoimien suositusarvot suorakaiteen muotoisille rakennuksille (SFS-EN 1991-1-1-4 2011, 62)



Kuva 2. pystyseiniä koskevat vyöhykekaaviot (SFS-EN 1991-1-1-4)

Ulkoisen painekertoimen  $c_{pe}$  arvot vaihtelevat kattorakenteen muodon, korkeuden ja leveyden sekä katon tyypin mukaan. Katot jaetaan vyöhykkeisiin kuvassa 3 esitetyllä tavalla, kun tuulen suunta on  $0^\circ$  ja  $90^\circ$  asteen väliltä. (SFS-EN 1991-1-1-4 2011, 74.)



Kuva 3. harjakattoja koskevat vyöhykekaaviot (SFS-EN 1991-1-1- 4)

### 6.1.2 Harjakaton painekertoimet

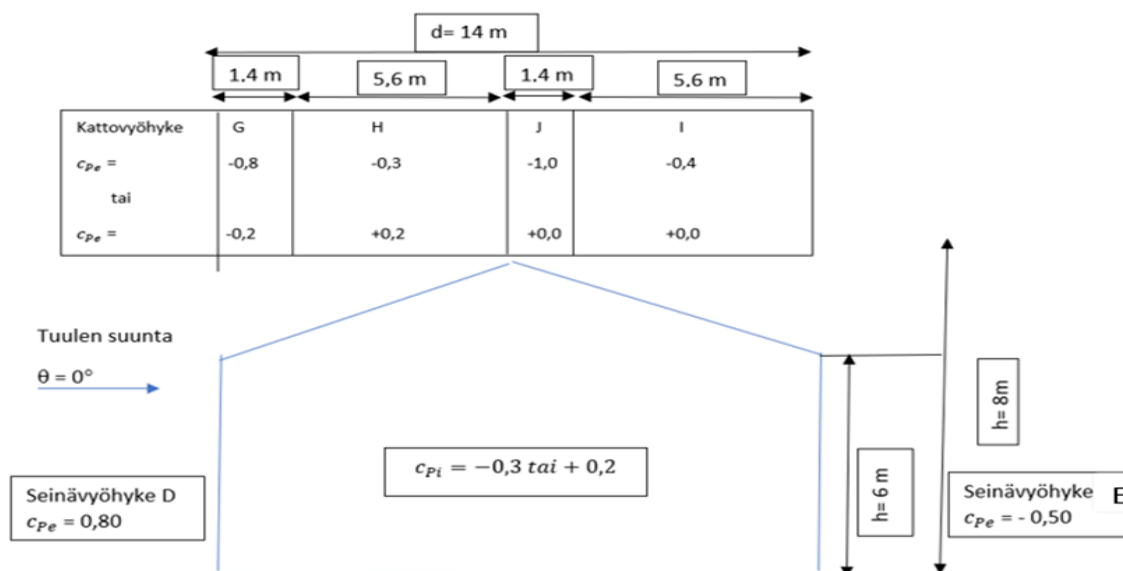
Rakennuksissa suunnitellaan erilaisia vaihtoehtoisia vesikattoja alueista ja sääolosuhteista riippuen. Kattotyypit ovat seuraavat: tasakatot, harjakatot ja kuvetaitteiset katot, aumakatot, sahakatot, kaarikatot ja kupolit. Opinnäytetyössä suunnitellaan harjakattoa, sen kaltevuuskulma  $\alpha$  on välillä  $15^\circ$  ja  $30^\circ$  asteetta. Ulkopuolisten painekertoimien suositusarvot on esitelty taulukossa 8. (SFS-EN 1991-1-1- 4 2011, 76.)

Kaltevuuskulma $\alpha$	Vyöhyke, kun tuulen suunta $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
$15^\circ$	- 0,9	- 2,0	- 0,8	- 1,5	- 0,3		- 0,4		- 1,0	- 1,5
	+ 0,2		+ 0,2		+ 0,2		+ 0,0		+ 0,0	+ 0,0
$30^\circ$	- 0,5	- 1,5	- 0,5	- 1,5	- 0,2		- 0,4		- 0,5	
	+ 0,7		+ 0,7		+ 0,4		+ 0,0		+ 0,0	
Kaltevuuskulma $\alpha$	Vyöhyke, kun tuulen suunta $\theta = 90^\circ$									
	F		G		H		I			
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$		
$15^\circ$	- 1,3	- 2,0	- 1,3	- 2,0	- 0,6		- 1,2		- 0,5	
$30^\circ$	- 1,1	- 1,5	- 1,4	- 2,0	- 0,8		- 1,2		- 0,5	

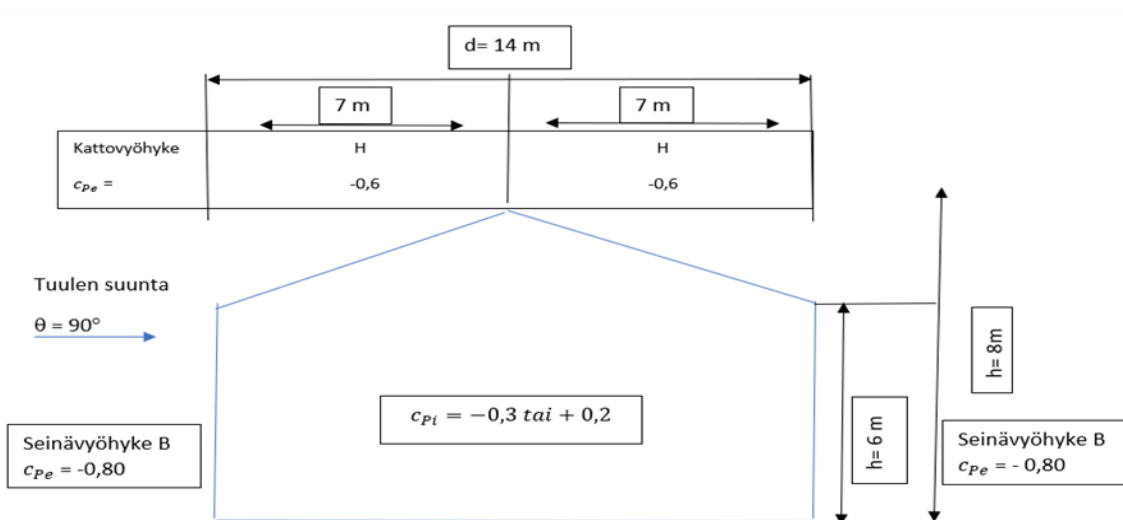
Taulukko 8. Ulkopuolisen paineen kertoimien suositusarvot harjakatoille ja kuvetaitteisille katoille (mukailtu SFS-EN 1991-1-1- 4)



Seuraavaksi on määritetty työhallin harjakaton painekertoimet tuulen suunnan ollessa  $\theta = 0^\circ$  kuvassa 4 sekä kuvassa 5, kun tuulen suunta on  $\theta = 90^\circ$  rakennuksen keskialueeseen nähden.  $c_{pi}$  Arvona on molemmissa tapauksissa käytetty sitä arvoa, jonka aiheuttaa rakenteille suuremman rasituksen/riskin. (RIL 201-1-2017, 141. S 178–191.)



Kuva 4. painekertoimet määritetty, kun tuulen suunta on  $\theta = 0^\circ$  (mukailtu, RIL 201-1-2017)



Kuva 5. painekertoimet määritetty rakennuksen keskialueelle, kun tuulen suunta on  $\theta = 90^\circ$  (mukailtu, RIL 201-1-2017)

### 6.1.3 Rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormat

Rakennukselle kohdistuva ulkoiset ja sisäpuoliset tuulikuormat  $F_w$  määritetään käyttämällä ulkopuolisia ja sisäpuolisia kuormia kuvaavia kaavoja 12 ja 13. (SFS-EN 1991-1-1- 4 2011, 46.)

Ulkopuoliset kuormat:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \Sigma w_e \cdot A_{ref} \quad (12)$$

Sisäpuoliset kuormat:

$$F_{w,i} = \Sigma w_i \cdot A_{ref} \quad (13)$$

missä  $c_s c_d$  on rakennekerroin, jonka arvo on 1, mikäli rakenteen tai rakennuksen korkeus on alle 15 metriä,  $w_e$  yksittäiseen pintaan korkeudelle  $z_e$  vaikuttava ulkopuolinen paine,  $w_i$  yksittäisen pintaan korkeudelle  $z_i$  vaikuttava sisäpuolinen paine ja  $A_{ref}$  on tuulenpaineen vaikutusala yksittäisin pintoihin. (SFS-EN 1991-1-1- 4 2011, 46.)

Matalissa rakennuksissa, Joiden korkeus on pienempi kuin leveys ( $h < b$ ) oletetaan, että tuulenpaine vaikuttaa rakennuksen kaikkiin osiin samalla tavalla ja niihin kohdistuva kokonaisvoima ( $kN$ ) voidaan laskea kaavalla 14. (RIL 201-1-2017 osa 1.4)

$$F_{w,k} = c_s c_d c_f q_k(h) A_{ref} \quad (14)$$

kaavassa  $c_f$  on voimakerroin, jonka arvo saadaan taulukosta 9, ja  $A_{ref}$  on kokonaistuulikuorma, joka vaikuttaa rakennuksen pätyyn ja pitkälle sivulle.  $A_{ref} = b \cdot h$  ja  $F_{w,k}$  koko rakennukseen kohdistuva tuulikuorma.

	Sivusuhdet/b								
$\lambda$	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
$\leq 1$	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58
10	1,4	1,4	1,6	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

Taulukko 9. voimakertoimen  $c_f$  arvot (RIL 201-1-2017 osa 1.4)

## 6.2 Voimakertoimen määrittäminen

Voimakertoimen avulla selvitetään tuulen kokonaisvaikutus rakenteeseen tai sen osiin. Alle 15 metriä korkeilla rakennuksilla voimakertoimen  $c_f$  määrittämiseen käytetään rakenteen mitoista ja sijainnista riippuvaa tehollista hoikkuutta ( $\lambda$ ), jonka arvo saadaan kaavasta 15 silloin, kun tuulen suunta on kohti rakennuksen päätä. (RIL 201-1-2017, osa 1.4.)

$$\lambda = 2 \cdot \frac{h}{b} \Rightarrow 2 \cdot \frac{8m}{14m} = 1,1 \quad (15)$$

$$\text{Sivusuhteena } \frac{d}{b} \Rightarrow \frac{42m}{14m} = 3,$$

taulukon 9 ja (RIL 201-1-2017, 141 kuva 5.2S.) perusteella vakion  $c_f$  arvo = 0,8.

Kun tuulee rakennuksen pitkää sivua kohti, käytetään kaava 15, mutta jaetaan rakennuksen korkeus rakennuksen pituudelle:

$$\lambda = 2 \cdot \frac{h}{d} \Rightarrow 2 \cdot \frac{8m}{42m} = 0,38$$

$$\text{Ja sivusuhte } \frac{b}{d} \Rightarrow \frac{14m}{42m} = 0,33$$

Taulukon 9 ja (RIL 201-1-2017, 141 kuva 5.2S.) perusteella  $c_f$  arvo = 0,75.

## 7 Poikkileikkausluokitus

### 7.1 Perusteet ja luokitus

Poikkileikkauksien luokituksilla on mahdollista selvittää, missä laajuudessa paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauskestävyyttä ja kiertymiskykyä. Tämä tarkoittaa sitä, että eri materiaaleilla on erilaisia lujuuksia ja kiertymiskykyjä. Poikkileikkaukset on jaoteltu neljään eri luokkaan: (SFS EN- 1993-1-1, kohta 5.5.2 2005, 42)

Luokassa PLL1 profiili koostuu paksuista levyistä ja pystyy saavuttamaan plastisen kestävyytensä ilman lommahdus vaaraa sekä kiertymään plastisena nivelenä. Ja tämä puolestaan pienentää poikkileikkauskestävyyden tarvetta.

Luokka PLL2 on muuten sama kuin PLL1 paitsi sitä osin, että lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä.

Luokassa PLL3 profiililla on kyky saavuttaa kimmoteorian mukainen kestävyys lommahtamatta, mutta ei plastista kestävyyttä.

Luokassa PLL4 profiili koostuu ohuista levyistä ja se lommahtaa saavuttamatta kimmoteorian mukaista kestävyyttä.

#### 7.1.1 Poikkileikkausmäärittely

Poikkileikkausluokitus voidaan määritellä osien puristuksista leveyden ja paksuuden suhteissa. Tällöin vaihtoehtoisesti määritellään laipan ja uuman poikkileikkausluokka. Poikkileikkaukset, joissa uuma kuuluu luokkaan PLL3 ja laippa luokkaan PLL1 tai PLL2 määritellään luokkaan PLL2 kuuluviksi tehollisiksi poikkileikkauksiksi. Poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 puristettujen osien limiitit on esitetty taulukoissa 10 ja 11. (SFS EN- 1993-1-1, kohta 6.2.2.4.)

Kahdelta reunailta tuetut puristetut taso-osat						
						Taivutus ko. akselin suhteen
						Taivutus ko. akselin suhteen
Poikkileik-kausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ <sup>1)</sup>	$c/t \leq 42\epsilon$ <sup>2)</sup>	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ <sup>3)</sup> $kun \psi \leq -1^7): c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Taulukko 10. Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS-EN 1993-1-1, taulukko 5.2, osa1)

Ulokkeelliset laipat						
	Valssatut profiilit		Hitsatut profiilit			
Poikkileik-kausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ <sup>4)</sup>	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ <sup>5)</sup>				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Taulukko 11. Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS-EN 1993-1-1, taulukko 5.2, osa2)

### 7.1.2 Poikkileikkausten kestävyys

Mitoittava paineen (N) suuruuden täytyy olla poikkileikkauksessa alle kestävyysrajan ja kestävyuden mitoitusarvot riippuvat poikkileikkausluokasta. Rakenteisiin kohdistuvan puristuksen mitoitusarvon  $N_{Ed}$  poikkileikkauksissa on täytettävä alla oleva ehto: (SFS-EN 1993-1-1, kohta 6.2.4.)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

missä  $N_{Ed}$  on puristavan normaalivoiman mitoitusarvo. Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo  $N_{c,Rd}$  tasaiselle puristukselle saadaan selvitettyä poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 kaavasta 16.

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala,  $f_y$  rakenneteräksen myötöraja ja  $\gamma_{M0}$  poikkileikkauksen kestävyuden osavarmuusluku.

### 7.2 Taivutus ja leikkaus

Laskelmissa on otettava huomioon leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen tilanteissa, joissa leikkausvoima on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta. Leikkauskestävyydestä tällöin voidaan jättää huomioimatta taivutusmomenttikestävyys. (SFS-EN 1993-1-1.)

#### Taivutusmomentti

Taivutusmomentti kuvaa ulkoisen kuorman kappaleeseen tuottamaa sisäistä momenttijakaumaa. Taivutusmomentin mitoitusarvo  $M_{Ed}$  poikkileikkauksissa tarkistetaan seuraavaksi:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

jossa  $M_{c,Rd}$  on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo.

Yhden pääjäyhyysakselin suhteen tapahtuvan taivutuksen poikkileikkausluokat 1 ja 2. lasketaan kaavalla 17. (SFS-EN 1993-1-1, kohde 6.2.5.)

$$M_{c,Rd} = M_{Pl,Rd} = \frac{W_{Pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (17)$$

## Leikkaus

Leikkausvoima kuormittaa liitoksia, joihin kohdistuu iskuja, värähtelyä tai vaihtuvasuuntaista kuormitusta. Leikkausvoiman  $V_{Ed}$  tulee pysyä ala olevassa ehdossa. (SFS-EN 1993-1-1.)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$$

missä  $V_{c,Rd}$  on leikkauskestävyyden mitoitusarvo. Plastisuusteoriassa  $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$  ja tämä saadaan selville kaavalla 18 kun vääntömomenttia ei ole. (SFS-EN 1993-1-1.)

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (18)$$

jossa  $A_v$  on leikkauspinta-ala.  $A_v$  lasketaan. (SFS-EN 1993-1-1, kohde 6.2.6/3).

Välilykisteettömän uuman leikkauslommahduskestävyyttä ei huomioida, kun seuraava ehto pätee:

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 * \frac{\varepsilon}{\eta}$$

missä suureen  $\eta$  arvo on 1,0 ja  $\varepsilon$ :n arvo saadaan kaavalla 19

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} * \frac{E}{210000} \right]^{0,5} \quad (19)$$

Hallin katolle Käytetään suorakaiteen muotoista rakenneputkiprofiilia H90X B50 T3. Ehdon

$\frac{h_w}{t_w} < 72 * \frac{\varepsilon}{\eta}$  perusteella leikkauslommahdus ei rajoita leikkauskestävyyttä.

$$\frac{84}{3} < 72 * \frac{0,81}{1} \Rightarrow 28 < 58,32$$

## 8 Nurjahdus

### Nurjahduskestävyys

Nurjahdus riippuu pohjimmiltaan myös sivusuuntaisesta jäykkyydestä. Toisin sanoen nurjahduksessa kimmomoduulista riippuva sivusuuntainen jäykkyys vaikuttaa jollain tavalla sauvan taipumiseen sivusuunnassa. Puristetun sauvan nurjahduskestävyyksiä voidaan laskea poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3 alla olevalla kaavalla 20. (SFS-EN 1993-1-1.)

$$N_{b,Rd} = \frac{X A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (20)$$

Kimmomoduuli eli kimmokerroin on kiinteän aineen jäykkyyttä kuvaava fysikaalinen suure.

### Nurjahduskäyrä

missä  $\chi$  on kyseeseen tuleva nurjahduskestävyyden pienennustekijä ja  $\chi$  saadaan laskettua kaavasta 21. (SFS-EN 1993-1-1, kohta 6.3,1,2)

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (21)$$

missä apusuure  $\phi = 0,5 * (1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2)$ ,  $\alpha$  on epätarkkuustekijä.  $\lambda$  eli muunnettu hoikkuus poikkileikkausluokille 1, 2, ja 3 saadaan kaavasta 22.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (22)$$

missä  $N_{cr}$  on laskettu kriittinen voima kyseeseen tulevassa nurjahdusmuodossa.  $N_{cr}$  lasketaan kaavalla 23.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_{cr}^2} \quad (23)$$

missä  $L_{cr}$  on nurjahduspituus,  $E$  teräksen kimmomoduuli ja  $I$  jäyhyysmomentti.

Epätarkkuustekijä  $\alpha$

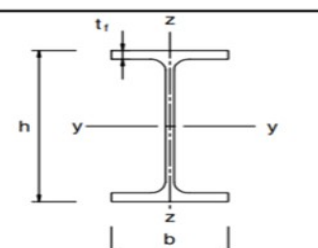
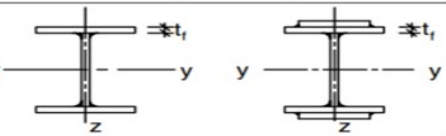

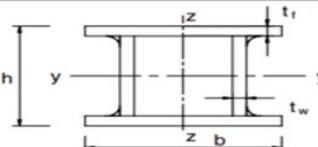
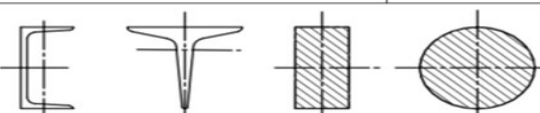

Kyseeseen tulevaa nurjahduskäyrää vastaava epätarkkuustekijä valitaan alla olevista taulukoista 12 ja 13.



Nurjahduskäyrä	$a_0$	$\alpha$	b	c	d
Epätarkkuustekijä $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 12. Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1 Taulukko 6.1)

Nurjahdus jätetään huomiotta, kun muunnettu hoikkuus  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  tai  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$ . Tässä tapauksessa ainut tarkistus kohde on poikkileikkaus.

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Valssatut profiilit 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y - y z - z	a a <sub>0</sub>
		$40$ mm $< t_f \leq 100$	y - y z - z	b c a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y - y z - z	b c a
		$t_f > 100$ mm	y - y z - z	d d c
Hitsatut I-profiilit 	$t_f \leq 40$ mm	y - y z - z	b c	b c
	$t_f > 40$ mm	y - y z - z	c d	c d
Rakenneputket 	Kuumamuovattu	Kaikki	a	a <sub>0</sub>
	Kylmämuovattu	Kaikki	c	c
Hitsatut kotelo-profiilit 	Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b
	Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c
U-, T- ja umpiprofiilit 		Kaikki	c	c
L-teräkset 		Kaikki	b	b

Taulukko 13. Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksesta riippuen (SFS-EN 1993-1-1 Taulukko 6.2)

Suunniteltavassa teräsrakenteessa opinnäytetyön tapauksessa rakeenteen pilarit ovat alapäästä jäykästi kiinnitetty ja yläpäästä nivelletty. Pilareina on käytetty kuumavalssattuja HEA-pilareita leveällä I-profiililla

## Kiepahduskestävyys

(SFS-EN 1993-1-1 2005, osa 6.3.2.1) perusteella vahvemman pääjäyhyysakselin suhteen taivutettu sivusuunnassa tukematon sauva mitoitetaan siten, että kiepahduksen suhteen seuraava ehto toteutuu:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

missä  $M_{b,Rd}$  on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo.

Kiepahduskestävyys lasketaan alla olevalla kaavalla 24. Jos sauvan puristettu laippa on riittävästi tuettu sivusuunnassa, kiepahduskestävyyttä ei tarvitse huomioida. Tätä ei tarvitse tehdä myöskään nelion muotoisten ja pyöreiden rakenneputkien kohdalla. (SFS-EN 1993-1-1 2005, osa 6.3.2.1.)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} w_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (24)$$

missä  $w_y$  on kyseeseen tuleva taivutusvastus poikkileikkausluokista riippuen ja  $\chi_{LT}$  on pienennystekijä.

Kiepahduskäyrän yleisessä tapauksissa vakiopoikkileikkauksisten taivutettujen sauvojen pienennystekijä  $\chi_{LT}$  lasketaan kaavasta 25. (SFS-EN 1993-1-1. S 66)

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \quad (25)$$

missä:

$$\phi_{LT} = 0,5 [1 + a_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2]$$

$a_{LT}$  on epätarkkuustekijän (SFS-EN 1993-1-1. kohta 6.3.2.2 taulukot.)

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{w_y f_y}{M_{cr}}} \text{ on muunnettu hoikkuus}$$

$M_{cr}$  on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa.

## 9 Kuormien mitoitukset

### 9.1 Tuuli, sade ja omapaino

Matalissa rakennuksissa työhalleissa ja varastoissa rakennuksen korkeus on pienempi kuin rakennuksen leveys ( $h < b$ ). Tällöin oletetaan niin, että tuulenpaineella on kaikissa korkeusase-  
missa harjakatolla valitseva arvo. Seuraavaksi lasketaan kokonaistuulivoima rakennuksen pit-  
källe sivulle  $F_{w,k}$  voimakertoimen avulla. (RIL 201-1-2017 S140.)

$$1 * 0,75 * 0,46 (8 \text{ m} * 42 \text{ m}) = 116 \text{ kN}$$

Kokonaistuulivoima rakennuksen päädylle  $F_{w,k}$  voimakertoimen avulla on:

$$1 * 0,80 * 0,46 (8 \text{ m} * 14 \text{ m}) = 41 \text{ kN}$$

$$\text{Tuulikuorman jakautuma rakenneosille } q_{w,k} = 0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sateen maksimikuorma Rayongissa (11.1) inch} = 0,0044 \text{ kN/m}^2$$

Kokonaistuulivoima ulkopintoihin painokertoimen avulla pitkälle sivulle, kun tuulen suunta on  $0^\circ$

$$F_{w,k} = 1 * 0,85 * (0,80 + 0,50) * 0,46 * (8 * 42) = 170 \text{ kN}$$

Kun tuulen suunta on  $90^\circ$

$$F_{w,k} = 1 * 0,85 * (0,80 + 0,80) * 0,46 * (8 * 42) = 210 \text{ kN}$$

Kokonaistuulivoima ulkopintoihin painokertoimen avulla lyhyelle sivulle, kun tuulen suunta on  $0^\circ$

$$F_{w,k} = 1 * 0,85 * (0,80 + 0,50) * 0,46 * (8 * 14) = 57 \text{ kN}$$

### Vesikatto ja katoristikko

$$\text{Vesikaton omapaino vain pellin osalta on } 30 \text{ kN} / 622 \text{ m}^2 = 0,05 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Palkki } 90 \times 50 \text{ t3 rakenneputkien kokonaispainot} = 33 \text{ kN}$$

$$\text{Yhden ristikon kokonaispaino on} = 4,1 \text{ kN}$$

### 9.1.1 Tuulen paine rakenneosille

Tuulikuormien määritelmässä hyödynnetään aerodynaamisia ominaisuuksia kuvaavia kertoimia kuten  $c_{pe}$  rakennuksen ulkopuolta varten ja  $c_{pi}$  sisäpintoja varten. Seuraavaksi on laskettu ulkopintoihin vaikuttava tuulen paine rakenneosille tuullessa pitkälle sivulle. Tarvi- taan D, E, A, B vyöhykkeiden arvoja, kun  $e > d$ . kuvassa 6 esitetty tuulen aiheuttamat  $c_{pe}$  arvot. (RIL 201-1-2017 osa 1.4.)

$$A = 0,46q_{w,k} * (-1,2) = - 0,55 \text{ kN/m}^2$$

$$B = 0,46q_{w,k} * (-0,8) = - 0,37 \text{ kN/m}^2$$

$$D = 0,46q_{w,k} * (0,8) = 0,37 \text{ kN/m}^2$$

$$E = 0,46q_{w,k} * (-0,5) = - 0,23 \text{ kN/m}^2$$

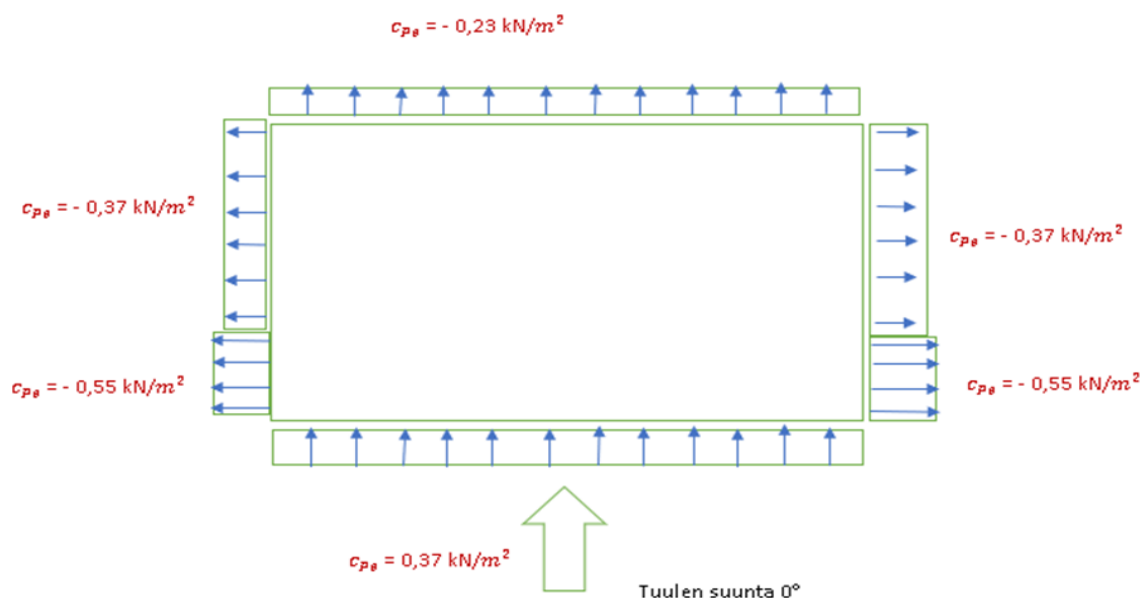
Ja kattorakenteisiin vaikuttava tuulen paine on

$$G = 0,46q_{w,k} * (-0,8) = - 0,37 \text{ kN/m}^2$$

$$H = 0,46q_{w,k} * (-0,3) = - 0,14 \text{ kN/m}^2$$

$$I = 0,46q_{w,k} * (-0,4) = - 0,18 \text{ kN/m}^2$$

$$J = 0,46q_{w,k} * (-1,0) = - 0,05 \text{ kN/m}^2$$



Kuva 6.  $c_{pe}$  kertoimet kun tuulen suunta on  $0^\circ$  pitkälle sivulle (mukailtu RIL 201-1-2017 S179)

Katokseen vaikuttava tuulen paine rakenneosille, kun tuulee lyhyemmälle sivulle ja tuulen suunta on  $\theta = 90^\circ$

$$G = 0,46q_{w,k} * (- 1,3) = - 0,6 \text{ kN/m}^2$$

$$F = 0,46q_{w,k} * (- 1,2) = - 0,55 \text{ kN/m}^2$$

$$H = 0,46q_{w,k} * (- 0,8) = - 0,4 \text{ kN/m}^2$$

$$I = 0,46q_{w,k} * (- 0,8) = - 0,4 \text{ kN/m}^2$$

### 9.1.2 Teräspilarin mitoitus

Työhallissa käytetään 20 kappaletta 6 metrin pitkiä teräspilareita. Rakenteen lyhyemmässä sivuissa käytetään neljä pilaria ja etupuolelle tulee, rakennetaan sisääntuloportti. Pilarit kiinnitetään perusteisiin hitsaamalla ne kiinni perusteisiin asennettuihin levyihin, jotka on tuettu yläpäästä sivuttaissuunnassa. HE140B materiaali S355.

Pilarin välit ovat 6 metriä ja jokaisen pilarin päähän vaikuttaa kattoristikolta aiheutuva piste-kuorma, jonka laskettu Autodesk Robot Structural Analyysi -ohjelmalla.

Saatu  $N_{Ed}$  piste-kuorma pilarin päähän:

$$N_{Ed} = 8,64 \text{ kN}$$

Teräspilariin vaikuttava suurin sivusuuntainen voima on tuulikuorma:

$$(0,46 \text{ kN/m}^2 \cdot 6 \text{ m}) \cdot 1,5 = 4,2 \text{ kNm}$$

Katolle aiheutuva tuulikuorma pilarille on:

$$(6 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot 0,46 \text{ kN/m}^2) \cdot 1,5 = 8,3 \text{ kN}$$

Autodesk -ohjelmalla on analysoitu suunniteltuun rakenteeseen kohdistuva kokonais-kuorma ja määritellyt kuormat piste-kuormana tai laajempina neliömetrikuormana. Huomi-oon on otettu rakenteen omapainot sekä tuuli- ja sadekuormat. Alla on laskettu mainitut rasitukset.

$$\text{Pahin taivutusmomentti } M_{Ed} = 49,96 \text{ kNm}$$

$$\text{Suurin leikkausvoima } V_{Ed} = 23,6 \text{ kN}$$

Poikkileikkausluokka 1, puristetut ja taivutetut taso-osat

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon \Rightarrow \frac{116}{7} = 16,57 < 33 \cdot 0,81 \text{ Puristetut taso-osat}$$

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \Rightarrow \frac{116}{7} = 16,57 < 72 \cdot 0,81 \text{ taivutetut taso-osat}$$

Puristuskestävyys  $N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$  **OK**

$$N_{Ed} = 8,64 \text{ kN ja } N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4300 \text{ mm}^2 \cdot 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 1524,94 \text{ kN}$$

Seuravaksi on tarkistettu pilarin taivutuskestävyys  $M_{Ed} 49,96 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd}$  **OK**

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} \Rightarrow \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{245440 \text{ mm}^2 \cdot 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 87,13 \text{ kNm}$$

Leikkauskestävyyden on täytettävä seuraava ehto:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \text{ **OK** } \quad V_{Ed} = 23,6 \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{1312 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)}{1,0} = 268,9 \text{ kN}$$

**Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus**

$$V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd} \Rightarrow 23,6 \leq 180$$

Nurjahdustarkastuksen ehto on  $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$ .  $N_{Ed}$  kuvaa pistekuorman aiheuttamia rasituksia, jotka on selvitetty Autodesk Robot Structural Analysisi -ohjelmalla ja  $N_{b,Rd}$  lasketaan seuraavasti:

$$N_{b,Rd} = x \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0,167 \cdot \frac{4300 \cdot 355}{1,0} = 254,9 \text{ kN eli } \frac{8,64 \text{ kN}}{254,9 \text{ kN}} \leq 1,0 \text{ **OK**}$$

## 9.2 Vesikaton palkin mitoitus

Suorakaiteen muotoisten 90x50x3 palkkien pituus on 6 metriä ja ristikon välit ovat 6 metriä. Palkit kannattelevat aaltopeltilevyjä 1,2 metrin jaolla. Palkkeihin vaikuttaa tasainen aaltopeltikuorma  $0,05 \text{ kN/m}^2$  ja lisäksi tuulikuorma, sadekuorma sekä palkin oma paino.

$$\text{Tuulikuorma on } 0,46 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,2 \text{ m} = 0,55 \text{ kN/m}$$

$$\text{Aaltopelti- ja sadekuormat } 0,054 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,2 \text{ m} = 0,065 \text{ kN/m}$$

Vesikaton, tuuli- ja sadekuormat murtorajatilassa ovat:

$1,15 \cdot 1,0 \cdot 0,065 + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 0,55 = 0,899 \text{ kN/m}$ . Tähän lisätään palkin oma paino  $0,414 \text{ kN}$

Palkin taivutusmomentti  $M_{Ed} = 5,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ , alla laskettu  $M_{c,Rd}$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} \Rightarrow \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{22600 \cdot 355}{1,0} = 8023000 = 8,02 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ eli } M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \text{ OK}$$

Plakin leikkauskestävyyden mitoitusehto on:  $V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$  **OK**

Vesikaton palkin tapauksessa  $V_{Ed} = 3,9 \text{ kN} \leq V_{c,Rd} = 102,90 \text{ kN}$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{502,07 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)}{1,0} = 102,90 \text{ kN}$$

Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutusta ei tarvitse tarkistaa, jos  $V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$  pätee.

$$3,9 \leq 51,45.$$

Palkin taipuma lasketaan käyttörajatilassa, palkkiin vaikuttaa  $0,899 \text{ kN}$  raskaus. Taipuma  $f_m$  saadaan seuraavasti:

$$f_m = \frac{q l^4}{384 EI} = \frac{1,3 \cdot 6000^4}{384 \cdot 210000 \cdot 819000} = 25,5 \text{ mm}$$

Kyseinen palkki ei ole pääkantaja, joten siihen käytetään taipuman raja-arvoa  $\frac{L}{200}$

$$\frac{6000}{200} = 30 \Rightarrow \text{eli } 25,5 \text{ mm} < 30 \text{ mm} \text{ OK}$$

### **Paarreiden kuormitus laskut**

Yläpaarrelle kohdistuu pistekuorma vesikaton ja palkin aiheuttamista kuormista lisäksi siihen kohdistuu tuulen ja sateen aiheuttamaa kuormaa. Materiaaliksi on valittu suorakaiteen muotoinen  $90 \times 80 \times 5$ -rakenneputki. Yläpaarren kuormitukselle on mitattu seuraavat tulokset:

$$N_{Ed} = 54,1 \text{ kN}, M_{Ed} = 10,32 \text{ kN/m}, V_{Ed} = 11,45 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15600 \text{ mm}^2 \cdot 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 546,7 \text{ kN}$$

Puristuskestävyys  $N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$  **OK**

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} \Rightarrow \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{47160 \text{ mm}^2 \cdot 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,0} = 16,74 \text{ kNm}$$

Taivutuskestävyys  $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$  **OK**

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{8258 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)}{1,0} = 169,2 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys  $V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$  **OK**

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus on  $V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd} \Rightarrow 11,45 \leq 84,6$

$A_v$  leikkauspinta-ala lasketaan suorakaiteen muotoisen rakenneputkille, kun kuormitusvaikutus on korkeuden suunnassa  $Ah/(b+h)$  ja kuormitus leveyden suunnassa  $Ab/(b+h)$ . (SFS-EN1993-1-1.)

Alapaarteen 80x80x5-rakenneputken laskut tehdään samalla periaatteella kuin yläpaarteen:

Puristuskestävyys  $74,4 \leq 511,20$  **OK**, Taivutuskestävyys  $6,8 \leq 14,11$  **OK**

Leikkauskestävyys  $7,6 \leq 144,24$  **OK**

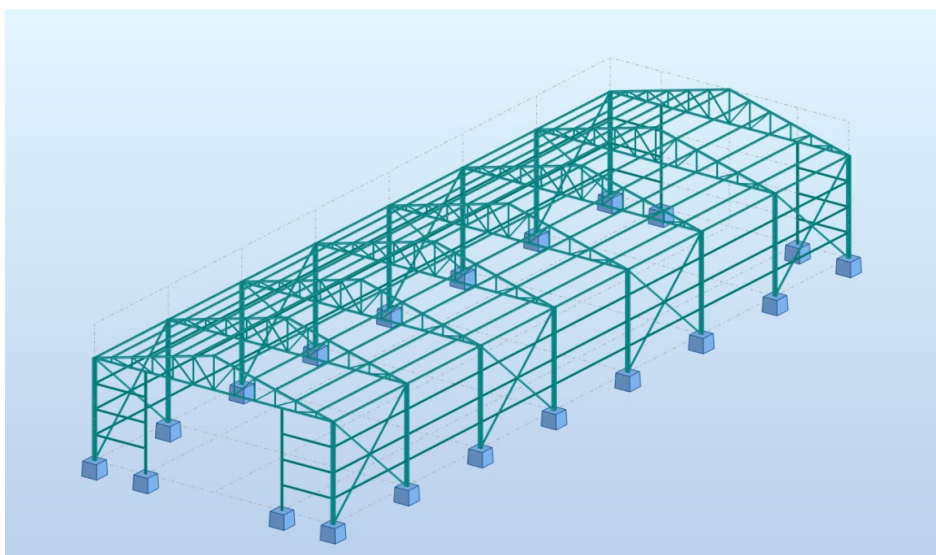


## 10 Teräsrakenteen mitoitus

### 10.1 Työhallin mallinnus

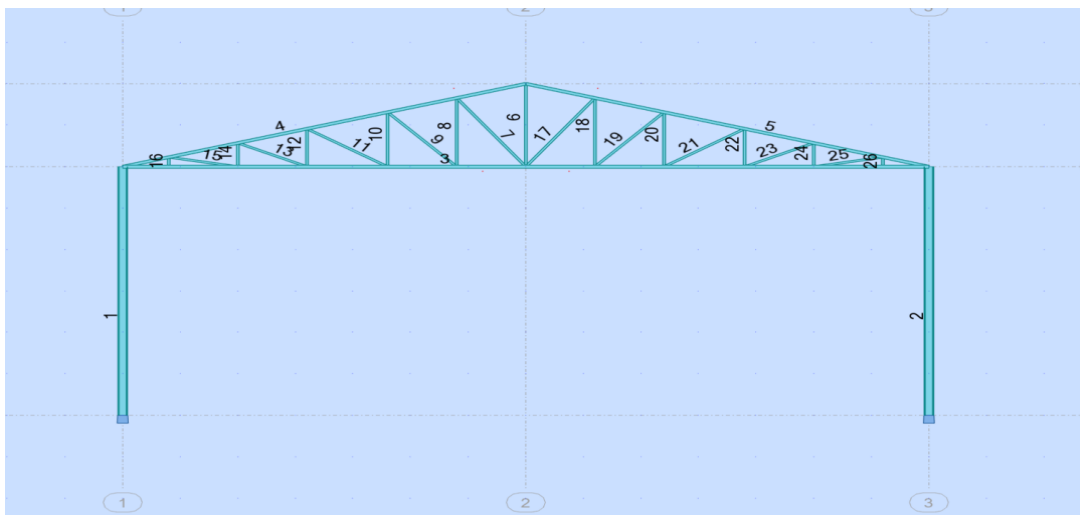
Työhalli on mallinnettu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022 Student -ohjelmistolla. Työssä selvitettiin, miten mallinnetaan rakenteen runkoa 3D-ohjelmalla. Kuormia määritettiin eri kuormitusvaihtoehdoilla. Sen jälkeen tulokset käsiteltiin ja esiteltiin. (Autodesk 2022.)

Mallinnettu työhalli ja kattoristikko on esitetty kuvassa 7. Hallirakennuksen pitkä sivu on 42 metriä pitkä 14 metrin jännevälillä. Rakennuksen harjankorkeus on 8 metriä ja ristikkojako on 6 metriä.



Kuva 7. Teollisuushallin runkorakenne (Autodesk 2022)

Mitoitusta varten valittiin yksi keskimmäisistä ristikoista. Kuvassa 8 Howe-ristikon mallinnus. Ristikot on yhdistetty solmukohtista kattopalkkien avulla. Kattopalkkeihin kohdistuvat kuormat on kohdistettu pistekuormana solmukohtiin.



Kuva 8. Howe-ristikko kaikki jäsenet numeroituna (Autodesk 2022)

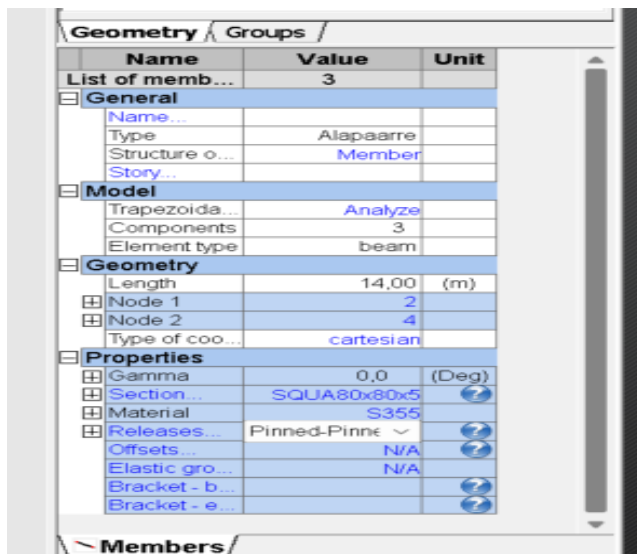
### 10.1.1 Robot structural Analysis -ohjelma

Uuden projektin mallinnus aloitettiin Frame 2D -suunnittelulla. Ensimmäisenä Oli tarkistettava tarvittavat eurokoodit ja standardit. Työssä käytettiin SF-EN 1990/2016 RC – standardia.

Aloitin mallin Toteuttamisen antamalla x- ja z-akseleille arvoja Axis Definition valikosta. Akselien määrittäminen helpottaa mallintamista Frame 2D vaiheessa. Y-akselia ei huomioitu. (Autodesk 2023.)

Piirretään ristikkorakenne Bars-työkalun beam- ja section-kohdissa pääsee tekemään valintoja laajasta poikkileikkausvalikoimasta. Mallintamisessa suositetaan, että ensin valitaan pilarit ja sen jälkeen ristikon ylä- ja alapaaret valitsemalla Geometry > Additional Attributes > Offsets. Tämän jälkeen lisätään ristikon sauvat yhdelle puolelle ristikkoo. Toisen puolen voi täydentää käyttämällä Mirror-työkalua. Lopuksi pilarien alapäähän lisätään tuennat. (Autodesk 2023.)

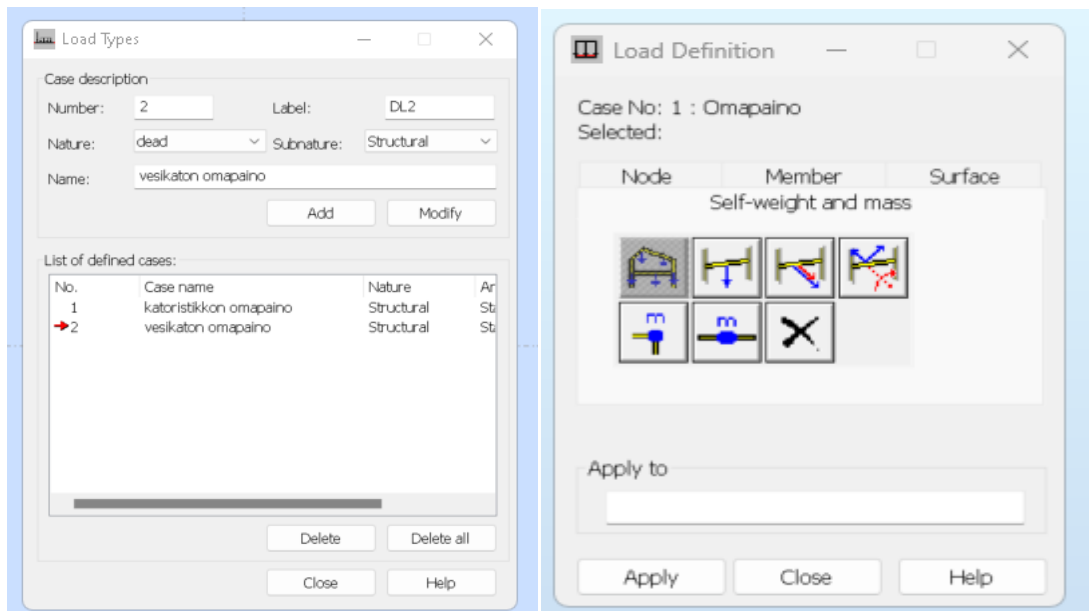
Ristikon sauvat on muutettava sauvamalliksi Geometry > Additional Attributes > Advanced member properties-valikoimalla, jolloin niihin kohdistuu vain pystysuuntaiset kuormat. Lisäksi kuten kuvassa 9 Muiden osien, kuten pilarien ja ristikoiden paareiden solmukohtat voi muuttaa nivelellisiksi. (Autodesk 2022.)



Kuva 9. Display inspector Dialogue Box (Autodesk 2022)

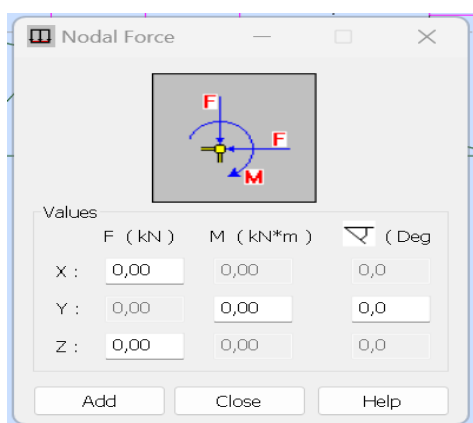
### 10.1.2 Kuormien asettelu

Rakenteen mallinnuksen jälkeen Asetetaan rakenteeseen kohdistuvat kuormat ja rakenteen omapaino Loads > Load types -valikoimasta kuvan 10 osoittamalla tavalla. Ohjelma automaattisesti huomioi rakenteen omapainoa, ja se voidaan varmistaa Loads > load definition välilehdestä kuva 11 mukaisesti. (Autodesk 2022.)



Kuva 10. kuormatyytit (Autodesk 2022) Kuva 11. kuormatyytit, kun omapaino on huomioitu (Autodesk 2022)

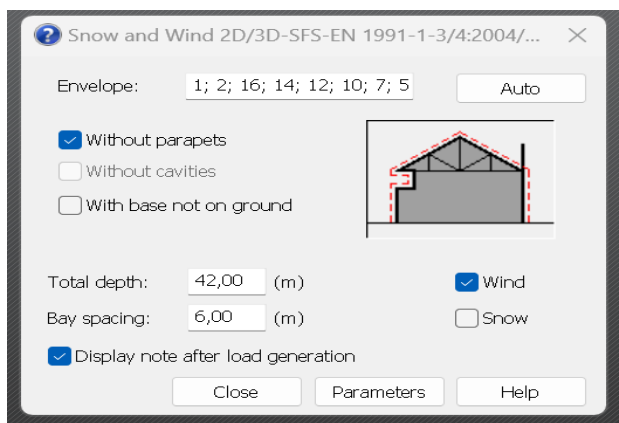
Kuitenkin vesikaton paino on lisättävä käsin menemällä välilehteen Loads > Load definition > Node > Nodal force Kuvan 12 mukaisesti vesikaton kuorma vaikuttaa z-suunnassa, joten on tärkeää huomioida kuormien etumerkit. Tarvittaessa voisi lisätä voimia erilaisilla lähtöasteilla. Add -painikkeella hyväksytään muutokset. (Autodesk 2022.)



Kuva 12. Pistekuormien määrittelyikkuna (Autodesk 2022)

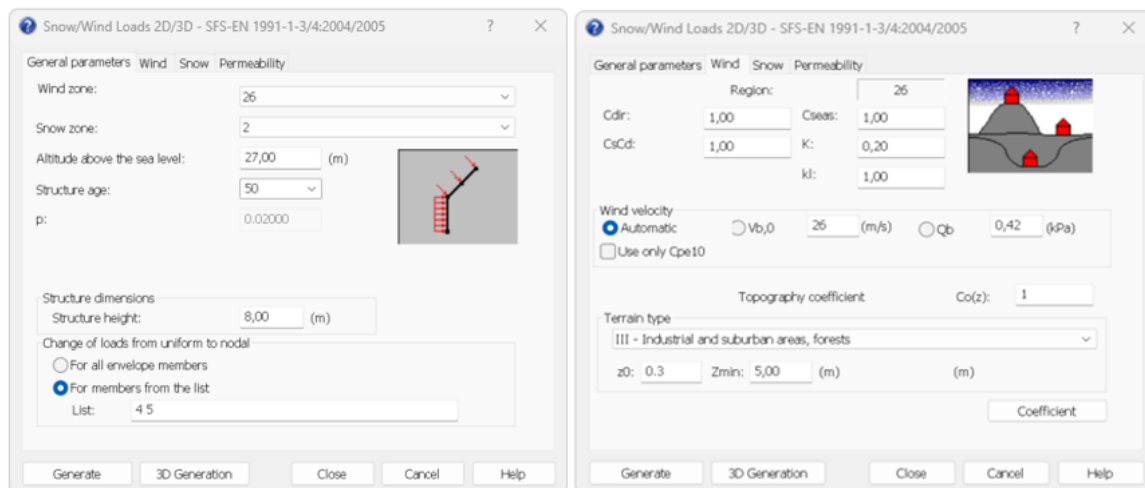
## Tuulikuorma

Lisätään tuulikuorma Show/Wind Loads työkalulla. Tässä opinnäytetyössä ei tarvitse huomioida lumikuormaa rakennuksen sijainnista johtuen. Kun ikkuna aukeaa, klikataan Auto painiketta ja määritellään Envelope -kohdasta rakenteen ulkokehä valitsemalla kuvan 13 mukaiset kohdat. (Autodesk 2022.)



Kuva 13. Rakenteen mittojen syöttö ja ulkokehän määrittely (Autodesk 2022)

Ulkokehän määrittelyn jälkeen klikataan parametres-valikoimaan, jolloin aukeaa uusi ikkuna. Sinne valitaan ja kirjoitetaan tietyt arvoja, kuten rakennuksen korkeusmerenpinnan suhteen ja rakennusvuosi. Nämä pitää huomioida erityisesti, kun muutetaan tasaista kuormaa pistekuormaksi, jos halutaan voimien vaikuttavan pistekuormana yläpaarteille kuvan 14 mukaisesti. Määrittelyjen jälkeen avataan Generate > frame -valikko, klikataan keskimäistä ristikköä ja hyväksytään muutokset. (Autodesk 2022.)

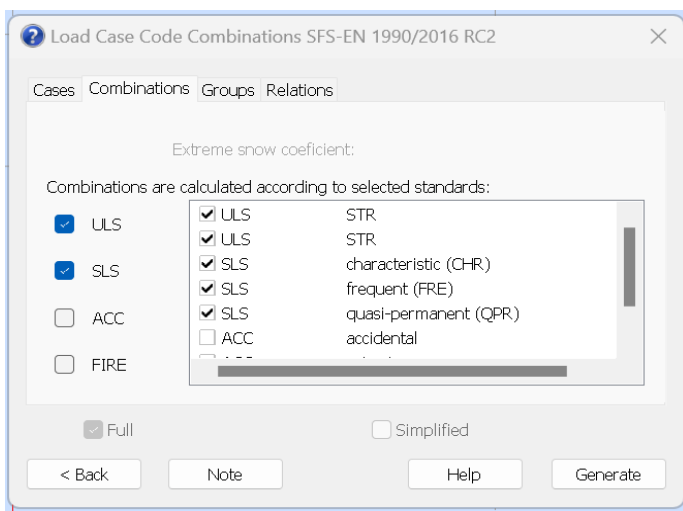


Kuva14. Lumi- ja tuulikuormaparametrit kuvan oikealla ja tuulikuorman laskennalliset arvot kuvan vasemmalla puolella (Autodesk 2022)

### 10.1.3 Kuormien yhdistäminen

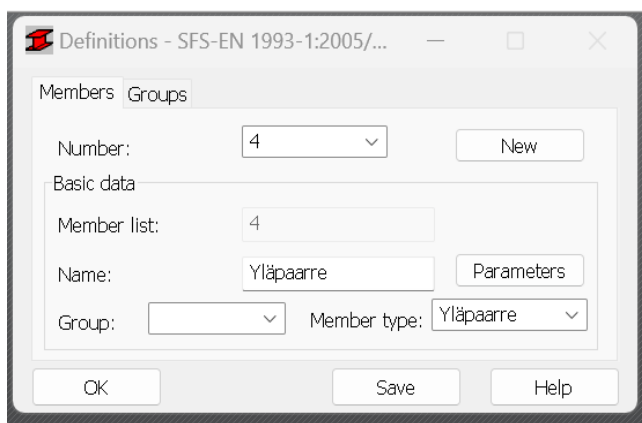
Kuormia voidaan yhdistellä kuormitusten määrittelyn jälkeen. Ensiksi valitaan Loads > Automatic Combinations, tarkistetaan oikea standardi, jonka tässä työssä oli käytetty SFS-EN 1990/2016 RC2, ja Full Automatic Combinations. Alakulmasta More -painikkeella -ohjelma laskee tärkeimmät yhdistelmät. (Autodesk 2022.)

Seuraavaksi Combinations -välilehdellä kuvan15 mukaisesti valittu ULS (murtorajatila) ja SLS (käyttörajatila) ACC sekä FIRE eivät ole työn tarkastelukohteena. (Autodesk 2022.)

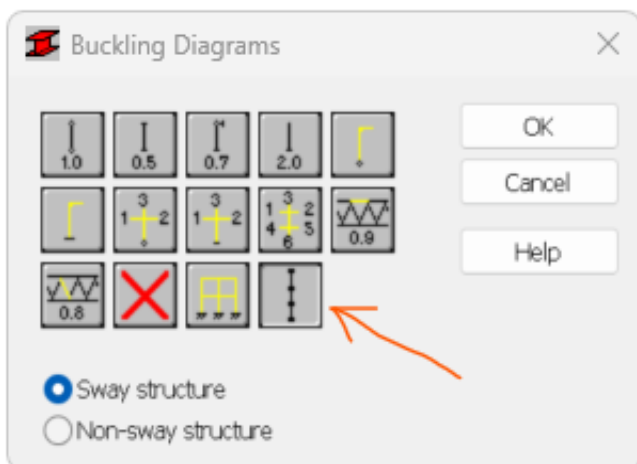


Kuva 15. kuormitusyhdistelmien valinta (Autodesk 2022)

Seuraavaksi täytyy muokata nurjahduspituusasetuksia tilassa Design > Steel Members Design. Definitions -välilehdestä valitaan yläpaarre kuten kuvassa 16. Parameters-painikkeella avautuvasta ikkunasta vaihdetaan Member type -kohtaan yläpaarre ja buckling length coeff -kohdassa punaista rastia klikkaamalla avautuu buckling diagrams valikko, kuten kuvassa 17. Ikkunasta valitaan internal bracings -vaihtoehto. (Autodesk 2022.)



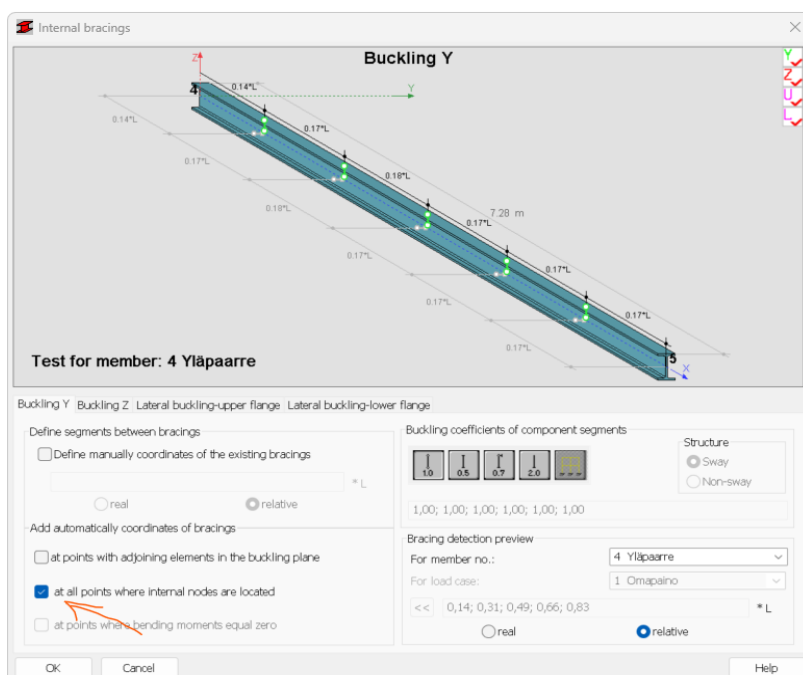
Kuva 16. Definitions- valikko ikkuna (Autodesk 2022)



Kuva 17. Nurjahdusten eri vaihtoehtoja (Autodesk 2022)

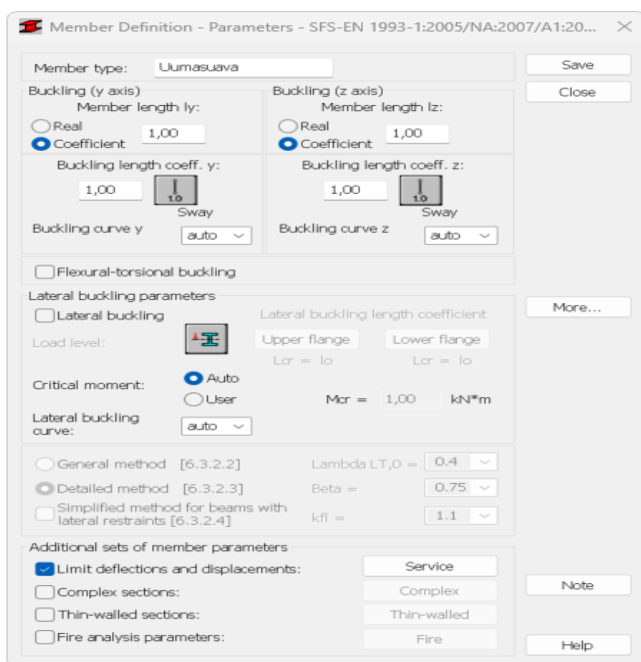
Internal bracings -valikossa nähdään pistekuormien sijainnit. Ensin valitaan buckling Y ja laitetaan ruksin kuva 18 mukaisesti. Mikä tarkoittaa, että nurjahdukset lisätään solmukohteisiin. (Autodesk 2022.)

Klikataan buckling Z kohtaan ja laitetaan ruksi samalla tavalla kuin buckling y-kohdassa. Asetetaan nämä kummallekin yläparrelle, klikataan ok ja edellisessä välilehdessä Save. (Autodesk 2022.)

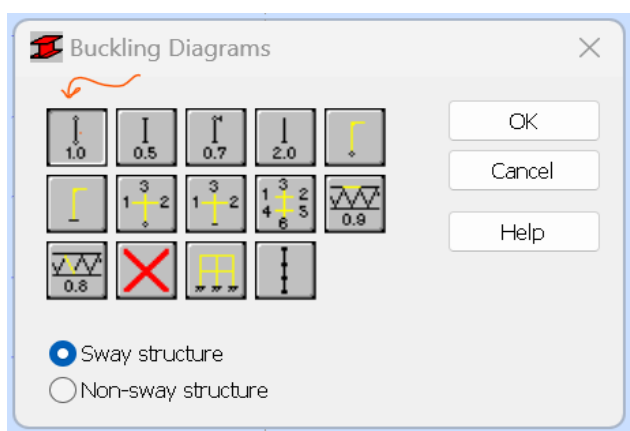


Kuva 18. Nurjahdusparametrit rakennuksen eri osille (Autodesk 2022)

Seuraavaksi tehdään profiiliasetukset kaikille uumasauvoille Member Definition – Parameters -kohdasta kuvan 19 mukaisesti, mutta Buckling diagrams -valkoista täytyy klikata kerrointa 1.0 kuten kuvassa 20. (Autodesk 2022.)



Kuva 19. Sauvojen profiiliasetukset (Autodesk 2022)

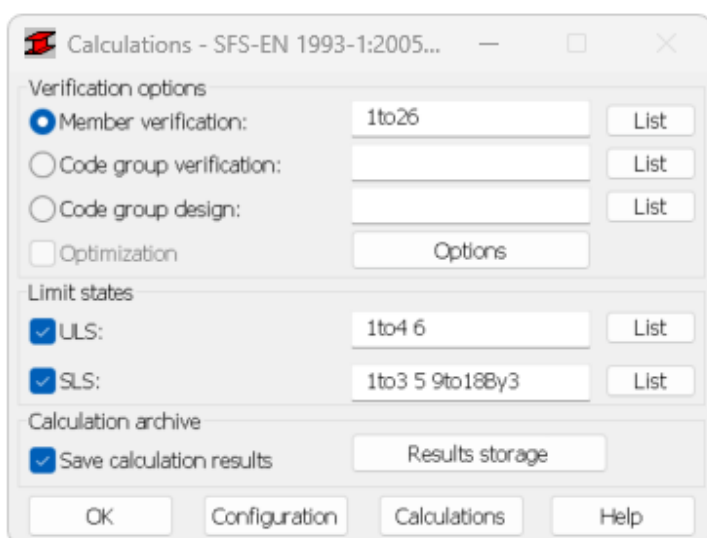


Kuva 20. Uumasauvojen nurjahdusvalikko (Autodesk 2022)



## 10.2 Kuormien loppulaskenta

Nurjahdusparametrien asetusten määrittämisen jälkeen siirrytään Calculations -valikkoon, joka aukei saaman aikaan, kuin Definitons -valikko. Varmistetaan, että kaikki osat ovat Member Verification -listassa ja että on valittu kuormitusyhdistelmät ULS JA SLS, kuten kuvassa 21 (Autodesk 2022.)



Kuva 21. Laskentatyökalun asetukset (Autodesk 2022)

Klikkaamalla laskentaohjelma mittaa mallinnetusta rakenteesta jokaisen osan ja esittää listattuna kaikkien osien kestävyden uudessa ikkunassa. (Autodesk 2022.)

Jos osan poikkileikkaus on riittävän kestävä, sen vieressä näkyy vihreä ruutu. Jos jokin osa ei ole riittävän kestävä, sen kohdalla näkyy punainen rasti. Tulokset kuvassa 22. (Autodesk 2022.)

SFS-EN 1993-1:2005/NA:2007/A1:2014 - Member Verification ( SLS ; ULS ) 1to16 19to28

Results Messages

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case	Ratio(uy)	Case (uy)	Ratio(uz)	Case (uz)
1 Column	HE140B	S355	101.22	167.73	0.78	13 ULS /13/	0.00	1 Omapaino	0.34	4 Wind L/R Cpe + Fra
2 Column	HE140B	S355	101.22	167.73	0.78	13 ULS /11/	0.00	1 Omapaino	0.34	8 Wind R/L Cpe + Fra
3 Yläpaarre	RECT90x80x5	S355	30.67	33.58	0.89	13 ULS /5/	-	-	-	-
4 Yläpaarre	RECT90x80x5	S355	30.67	33.58	0.89	13 ULS /7/	-	-	-	-
5 Alapaarre	SQUA80x80x5	S355	39.79	39.79	0.20	13 ULS /12/	-	-	-	-
6 Uumasauava	50x30x3	S355	111.78	169.51	0.25	11 Wind Fr/Rear Fra	-	-	-	-
7 Uumasauava	50x30x3	S355	114.35	173.40	0.38	13 ULS /5/	-	-	-	-
8 Uumasauava	50x30x3	S355	92.62	140.45	0.10	7 Wind R/L Cpe - Fra	-	-	-	-
9 Uumasauava	50x30x3	S355	99.47	150.84	0.29	13 ULS /5/	-	-	-	-
10 Uumasauava	50x30x3	S355	73.46	111.39	0.06	7 Wind R/L Cpe - Fra	-	-	-	-
11 Uumasauava	50x30x3	S355	86.29	130.85	0.22	13 ULS /5/	-	-	-	-
12 Uumasauava	50x30x3	S355	54.29	82.33	0.04	13 ULS /12/	-	-	-	-
13 Uumasauava	50x30x3	S355	75.71	114.81	0.22	13 ULS /5/	-	-	-	-
14 Uumasauava	50x30x3	S355	35.13	53.27	0.07	13 ULS /7/	-	-	-	-
15 Uumasauava	50x30x3	S355	68.94	104.55	0.35	13 ULS /11/	-	-	-	-
16 Uumasauava	50x30x3	S355	15.97	24.22	0.02	13 ULS /5/	-	-	-	-
19 Uumasauava	50x30x3	S355	114.35	173.40	0.38	13 ULS /7/	-	-	-	-
20 Uumasauava	50x30x3	S355	92.62	140.45	0.10	3 Wind L/R Cpe - Fra	-	-	-	-
21 Uumasauava	50x30x3	S355	99.47	150.84	0.29	13 ULS /7/	-	-	-	-
22 Uumasauava	50x30x3	S355	73.46	111.39	0.06	3 Wind L/R Cpe - Fra	-	-	-	-
23 Uumasauava	50x30x3	S355	86.29	130.85	0.22	13 ULS /7/	-	-	-	-
24 Uumasauava	50x30x3	S355	54.29	82.33	0.04	13 ULS /10/	-	-	-	-
25 Uumasauava	50x30x3	S355	75.71	114.81	0.22	13 ULS /7/	-	-	-	-
26 Uumasauava	50x30x3	S355	35.13	53.27	0.07	13 ULS /5/	-	-	-	-
27 Uumasauava	50x30x3	S355	68.94	104.55	0.35	13 ULS /13/	-	-	-	-
28 Uumasauava	50x30x3	S355	15.97	24.22	0.02	13 ULS /7/	-	-	-	-

Calc. Note Close  
Help  
Ratio  
Analysis Map  
Calculation points  
Division: n = 3  
Extremes: none  
Additional: none

Kuva 22. Rakenteen kuormitustulokset (Autodesk 2022)

Kaikkien osien Ratio-arvot eli käyttöasteet ovat alle 1. Tämä tarkoittaa, että jokainen osa rakenteesta on riittävän kestävä käytettyihin kuormitusyhdistelmiin. Suurimman käyttöasteen saivat yläpaarit, joiden arvo oli 0,89. Monet rakenneosat ovat turvallisuussyistä kestoiltaan ylimitoitettuja.

## 11 Yhteenveto ja pohdinta

Työn aiheena oli uuteen teollisuushallin suunnittelu ja tarkoituksena oli kasvattaa yrityksen tiloja tulevaisuuden projekteihin. Opinnäytetyön aiheen sain työharjoittelujaksolla Thaimaassa. Toimeksiantajan kanssa sovittiin hallin mitat, ja tarkoitus oli tehdä halli teräsmateriaaleista ja mahdollisimman kevytrakenteiseksi.

Yksinkertainen halli koostui kattoristikoita kannattelevista pilareista, palkeista ja aaltolevyillä peitetystä vesikatosta ja sivuseinistä. Opinnäytetyön aikana tutustuin Eurokoodeihin ja käytin erilaisia ohjelmia, kuten Autodeskin Robot Structural Analysisia ja siihen perehtymistä.

Teoriaosuudessa ja matemaattisten kaavojen soveltamisessa on käytetty Eurokoodien SFS-EN standardeja ja RIL 201-1-2007 suunnitteluperusteita ja rakenteiden kuormat kirjasta, jonka pohjautuu Eurokoodin standardeihin.

Opin, että melko yksinkertaisenkin työhallin rakentaminen vaatii laajasti tietoja ja ratkaisumenetelmiä, kun tarkoituksena on saavuttaa luotettavia tuloksia. Myös Autodeskin ohjelman käyttö tuli tutuksi.

Työssä laskettiin pääkantajien poikkileikkauksien Puristus-, leikkaus-, taivutus- ja jäykistyskestävyyksiä, joiden perusteella on valittu sopivat poikkileikkaukset. Luvussa 9 on esitetty saadut tulokset. Kestävyyden kannalta teräsrakenteen osat vastaavat niihin kohdistuvia kuormituksia ja ovat ylimitoituja.

Eräs haaste oli Autodesk-ohjelman lataaminen omalle PC:lleni, sillä koneeni ohjain ja muistikapasiteetti eivät kestäneet sen käyttöä samaan aikaan Solidworks-ohjelman kanssa. Ratkaisin ongelman poistamalla toisen ohjelman käyttäessäni toista ohjelmaa.

## Lähteet

- Autodesk. 2022. Autodesk knowledge network. Robot Structural Analysis Professional support and learning. Viitattu 10.18.2021. Saatavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-professional>
- Björk, T. 2017. Suunnittelun osa-alueet. teräsrakenteet 1 Johdanto. LUT, Lappeenranta.
- Björk, T. 2019. Murtumismekaniikka. Teräsrakenteiden suunnittelu. LUT, Lappeenranta.
- Finnos 2022. Toimintaprosessi Saatavissa: <https://www.finnos.fi/fi/toimitusprosessi>
- Salonen, J. 2018. Teräsristikon suunnittelu. Docplayer. Viitattu 31.10.2018. Saatavissa: <https://docplayer.fi/107793946-Terasristikon-suunnittelu.html>
- RIL 201-1- 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat - yleiset kuormat. Tuulikuormat. Osa 1.4. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- SFS-EN 1990 + A1+ AC. 2010. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1991-1-1 + AC. 2010. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Oma paino ja hyötykuorma. Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1993-1-1. 2010. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu osa1-1. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto.
- Jaiswal, M. 2022. ASCE 7-10- rain load calculation. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/383701189/ASCE-7-10-Rain-Load-Calculation>
- Urakkamaailma. 2022. kattoristikko. Urakkamaailma. Saatavissa: <https://www.urakkamaailma.fi/kattotuolit>
- Weatherspark. 2022. Climate and Average Weather Year-Round in Rayong. Saatavissa: <https://weatherspark.com/y/113873/Average-Weather-in-Rayong-Thailand-Year-Round>
- Kokkonen, Y. 2018. Miksi silta romahti Genovassa. Yle uutiset. Viitattu 15.08.2018. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10354175>