

Aatu Rankinen

**LASKURI AURINKOKERÄIMEN TUKIRAKENTEIDEN KUOR-
MILLE**

**LASKURI AURINKOKERÄIMEN TUKIRAKENTEIDEN KUOR-
MILLE**

Aatu Rankinen

Opinnäytetyö

Kevät 2019

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, talonrakennustekniikan suuntautuminen

Tekijä: Aatu Rankinen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Laskuri aurinkokeräimen tukirakenteiden kuormille

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Calculator for loads of a solar collector's supporting framework

Työn ohjaaja: Pekka Kilpinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2019

Sivumäärä: 46

Teollisen kokoluokan sovelluksiin suunnitellut Savosolar Oyj:n tasokeräimet vaativat tukirakenteiltaan erityistä kestävyyttä. Keräinten itsekantavalla teräs-rungolla mahdollistetaan kustannustehokkaammat telineratkaisut ja asennukset tuulisille alueille.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Excel-laskuri, jolla voidaan laskea aurinkokeräimen tukijalkojen kuormitukset käyttäjän syöttämien alkuarvojen perusteella. Työ tehtiin WSP Finland Oy:lle, jolta Savosolar Oyj tilasi työn.

Aurinkokeräimiä kuormittavat omapaino sekä lumi- ja tuulikuorma, joten opinnäytetyössä määritettiin aluksi niiden laskentatapa. Tuulikuormaa laskettaessa huomioitiin myös nostevaikutus. Sen jälkeen laadittiin laskuri, joka laskee kaikki eurokoodin mukaiset kuormitusyhdistelmät ja antaa tuloksena rakenteen tukireaktiot.

Laskentamallina käytettiin kolminivelkehärakennetta, jotta laskenta voitiin suorittaa tasapainoyhtälöitä käyttämällä. Tämä yksinkertaisti laskentaa. Vertailussa Robot Structural Analysis -ohjelman tuloksiin osoittautui, että tukireaktioiden arvot eivät poikkea merkittävästi, vaikka kehä olisi mallinnettu jäykkänä.

Opinnäytetyössä tehdyssä Excel-laskurissa huomioitiin käytettävyys ja selkeys sekä asiakkaan toiveet ja vaatimukset. Tuloksena saatiin toimiva, loogisesti etenevä ratkaisu, josta olennaisimmat voimasuureet ovat helposti nähtävissä ja tulostettavissa.

Asiasanat: eurokoodi, aurinkokeräin, Excel

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author: Aatu Rankinen

Title of thesis: Calculator for loads of a solar collector's supporting framework

Supervisor: Pekka Kilpinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2019

Pages: 46

Objective of this thesis was to create an Excel-calculator, which calculates loads of a solar collector's supporting framework based on values given by its user. This thesis was made for WSP Finland Oy, from where the calculator was ordered by Savosolar Oyj.

Calculator is based completely on Eurocode. Definition of loads is based on standards SFS-EN 1990, SFS-EN 1991-1-3 and SFS-EN 1991-1-4. National Annexes were not taken into consideration in this thesis, because calculator is meant to be applicable anywhere.

Solar collectors are loaded by self-weight, snow- and wind load. Upward acting wind action is also considered. Calculator calculates every load combination and gives results as a structure's reaction forces.

Structure is modelled as a three-pinned frame, which allows equilibrium equations to be used in determining the reaction forces. This simplifies calculations and when comparing three-pinned frame to a rigid frame no significant difference was found.

Calculator was made taking usability and clarity into consideration, as well as client's expectations and requirements. This resulted into functional, logically structured solution, from where the essential results are easily printable.

Keywords: Eurocode, solar collector, Excel

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 KÄYTETYT STANDARDIT, OHJELMAT JA LASKENTAMALLI	8
2.1 Laskennassa käytetyt standardit	8
2.2 Käytetyt ohjelmistot	8
2.3 Laskentamalli	8
3 KUORMITUKSET	13
3.1 Lumikuorma	13
3.2 Tuulikuorma	15
3.2.1 Tuulennopeuden perusarvo	15
3.2.2 Rosoisuuskerroin	16
3.2.3 Tuulenpuuskien intensiteetti	17
3.2.4 Puuskanopeuspaine	18
3.2.5 Rakenteen tuulikuorma	18
3.3 Omapaino	21
3.4 Kuormitusyhdistelyt	21
3.4.1 Murtorajatila	21
3.4.2 Käyttörajatila	23
3.5 Kuormitustapaukset	23
4 EXCEL-LASKURI	26
4.1 Lähtöarvot	26
4.2 Lumikuorman määrittäminen laskurissa	27
4.3 Tuulikuorman määrittäminen laskurissa	28
4.4 Voimasuureiden laskenta	30
4.5 Laskurin tulokset	31
5 ESIMERKKILASKELMA	34
6 TUKIREAKTIOIDEN TULOSTEN VERTAILU	44

7 YHTEENVETO	46
LÄHTEET	47

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on valmistaa Excel-laskuri, joka laskee aurinkokeräimen tukijalkoihin kohdistuvat kuormat käyttäjän syöttämien alkuarvojen perusteella. Laskenta suoritetaan normien SFS-EN 1990, SFS-EN 1991-1-3 ja SFS-EN 1991-1-4 mukaan ilman kansallisia liitteitä.

Aurinkokeräimet ovat Savosolar Oyj:n valmistamia tasokeräimiä, joita valmistetaan mm. kaukolämmön ja teollisuuden prosessilämmön tuotantoon (1). Keräimien runko on galvanoitua terästä ja yksi keräin on tuettu neljällä tukijalalla, jotka on kiinnitetty maata vasten lepääviin betonipalkkeihin. Keräimet sijaitsevat avoimilla keräinkentillä (2).

Keräimen runkoa tarkastellaan kehärakenteena, johon vaikuttavat lumi- ja tuulikuorma sekä keräimen omapaino. Opinnäytetyössä laadittava Excel-laskuri on tarkoitus rakentaa niin, että keräimen omapaino ja dimensiot ovat muokattavissa niin, että laskuria voidaan myöhemmin soveltaa eri kokoihin ja eri kaltevuuskulmissa oleviin keräimiin. Laskurin tulee antaa tulokset kehärakenteen tukireaktioina.

Opinnäytetyö tehdään WSP Finland Oy:lle, jolta työn on tilannut Savosolar Oyj.

2 KÄYTETYT STANDARDIT, OHJELMAT JA LASKENTAMALLI

Aurinkokeräimen tukijalkojen kuormitusten määrittämiseen laadittavan Excel-laskurin laadinnassa noudatettiin Eurokoodia. Luvuissa 2.1–2.3 esitetään opinnäytetyössä käytetyt standardit, ohjelmistot ja aurinkokeräimen laskentamalli.

2.1 Laskennassa käytetyt standardit

Excel-laskuri perustuu seuraaviin standardeihin:

- SFS-EN 1990, Rakenteiden suunnitteluperusteet
- SFS-EN 1991-1-3, Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-3: Lumi-kuormat
- SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: Tuuli-kuormat.

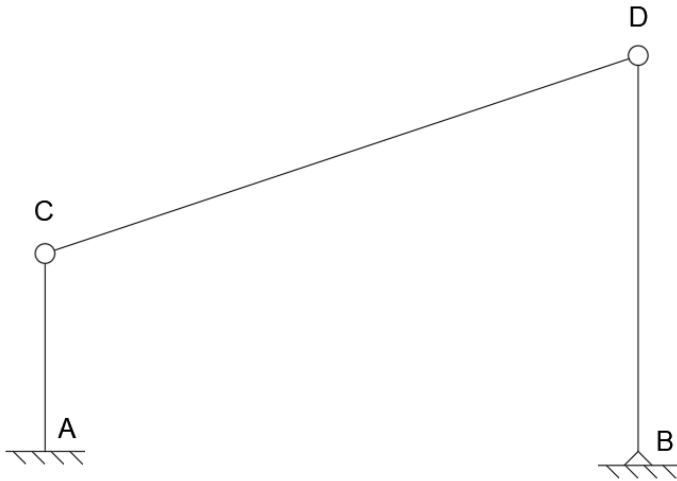
Kansallisia liitteitä ei oteta huomioon laskennassa, jotta laskuria voidaan soveltaa missä tahansa maassa.

2.2 Käytetyt ohjelmistot

Laskenta suoritettiin Microsoft Excel -ohjelmalla. Autodesk AutoCAD -ohjelmaa käytettiin piirustusten tekemiseen. Laskujen oikeellisuus tarkistettiin Robot Structural Analysis -ohjelmalla sekä käsinlaskennalla.

2.3 Laskentamalli

Aurinkokeräimen laskentamalliksi valittiin kolminivelkehä (kuva 1). Nurkkien C ja D sekä tuen B niveltämisellä rakenteesta saatiin staattisesti määrätty, jolloin tukireaktioiden ratkaisemiseen riittävät tasapainoyhtälöt.



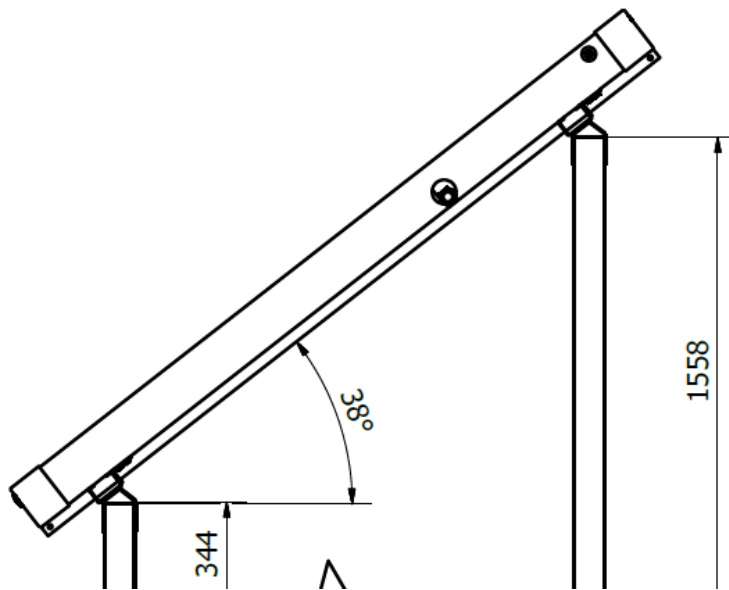
KUVA 1. Aurinkokeräimen laskentamalli, kolminivelkehä (3)

Aurinkokeräimen rakennetta on esitetty kuvassa 2. Tukijalat ovat kiinnitetty maassa lepäävään betonipalkkiin.



KUVA 2. Valokuva aurinkokeräimestä (3)

Kuvassa 3 on esitetty aurinkokeräimen rakennetta piirustuksen muodossa.

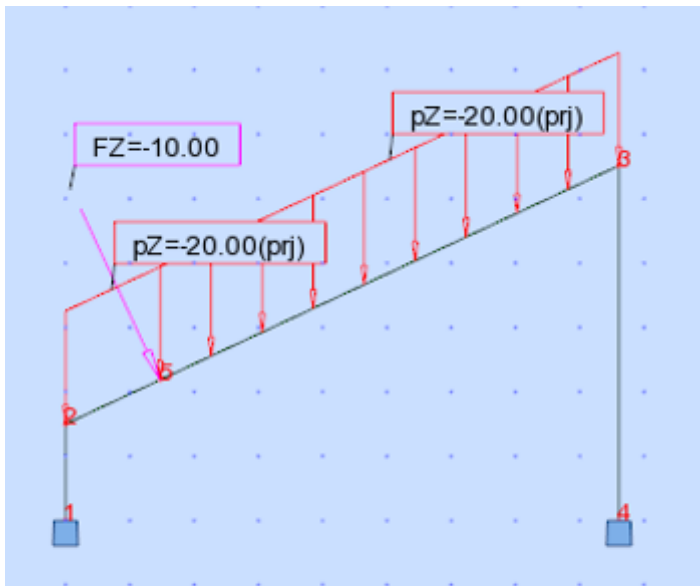


KUVA 3. Piirustus aurinkokeräimestä (3)

Tukien kiinnitykset

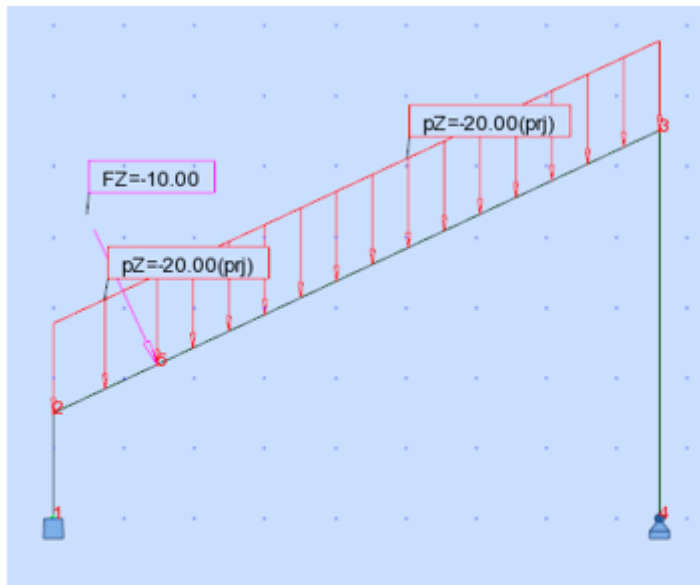
Aurinkokeräimen tukijalat on kiinnitetty betonipalkkeihin, joten tuen B jäykkä kiinnitys vastaisi paremmin todellista tilannetta. Ratkaisemalla kehärakenne Robot Structural Analysis -ohjelmalla voitiin kuitenkin todentaa, että tuen B niveltämisellä ei ole merkittävää vaikutusta tukireaktioiden arvoihin.

Esimerkkilaskuissa (kuva 4; kuva 5) tasaiselle kuormalle ja pistekuormalle annettiin arvot 20 kN/m ja 10 kN. Ensimmäisessä tapauksessa tuki B on jäykkä, toisessa tapauksessa tuki on nivel. Tukireaktioiden arvoja vertailemalla havaittiin, että niiden ero tapausten välillä on hyvin pieni.



Node/Case	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
1/ 1	-3,72	24,63	-1,12
4/ 1	-0,50	18,87	-0,56

KUVA 4. Tukireaktiot tuen B ollessa jäykkä Robot Structural Analysis -ohjelmassa



Node/Case	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
1/ 1	-4,23	24,40	-1,27
4/ 1		19,11	-0,00

KUVA 5. Tukireaktiot tuen B ollessa nivelletty Robot Structural Analysis -ohjelmassa

Nivelletty tuki B ei ota vastaan lainkaan vaakavoimia, mikä tulee ilmi Robot-tulosten lisäksi myös seuraavasta tasapainoyhtälöstä (kaava 1).

$$-B_x \times h_2 + M_B = 0 \quad \text{KAAVA 1}$$

Tuen B ollessa nivelletty se ei ota vastaan momenttia (kaava 2).

$$M_B = 0 \quad \text{KAAVA 2}$$

Kaavan 2 seurauksena yhtälö sieventyy kaavan 3 muotoon:

$$-B_x \times h_2 = 0 \rightarrow B_x = 0 \quad \text{KAAVA 3}$$

Kehän tukireaktioiksi jäivät tuen A pystysuuntainen tukireaktio A_y , vaakasuuntainen tukireaktio A_x , tuen B pystysuuntainen tukireaktio B_y sekä tuen A tukimomentti M_A .

3 KUORMITUKSET

Rakennetta kuormittavat aurinkokeräimen omapainon lisäksi lumi- ja tuulikuorma. Seismisiä kuormia ei oteta huomioon, koska niitä ei lasketa yhtä aikaa tuulikuorman kanssa. Maanjäristyskuormat aiheuttavat oletuksena pienemmät kuormitukset kuin tuulikuorma. Lämpökuormia ei oteta huomioon, koska kehän pidempi jalka on nivelletty. (4, s. 82.)

3.1 Lumikuorma

Lumikuorma määriteltiin standardin SFS-EN 1991-1-3 mukaisesti. Aurinkokeräin mallinnettiin pulpettikattona, jossa ei ole lumiesteitä. Mitoitustilanteeksi valittiin normaaliolosuhteet, koska poikkeuksellisen lumisateen ja kinostumisen esiintyminen on epätodennäköistä. Lumi ei pääse kinostumaan, koska lumen putoamista paneelin päältä ei ole estetty. (5, s. 20.)

Normaalisti vallitsevissa olosuhteissa kattojen lumikuorma määritetään kaavalla 4 (5, s. 26).

$$s = \mu_1 \times C_e \times C_t \times s_k$$

KAAVA 4

μ_1 = lumikuorman muotokerroin

C_e = tuulensuojaisuuskerroin

C_t = lämpökerroin

s_k = lumikuorman arvo maassa

Lumikuorman muotokerroin μ_1 riippuu katon kaltevuuskulmasta α . Muotokerroin μ_1 määritetään taulukosta 1.

TAULUKKO 1. Lumikuorman muotokertoimet (5, s. 30)

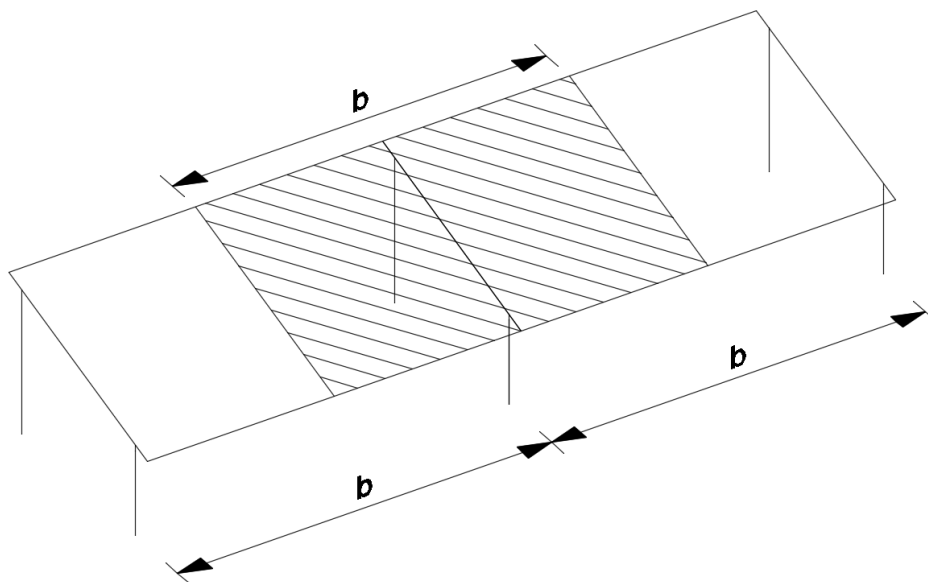
Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	–

Tuulensuojaiskerroin C_e on riippuvainen rakennuskohdetta ympäröivän maaston muodoista ja rakennusten sekä puiden korkeudesta. Tuulensuojaiskerrointa C_e määritettäessä tulee ottaa huomioon myös ympäristön tuleva kehittyminen, esimerkiksi jos alueelle tullaan rakentamaan korkeita rakennuksia. (5, s. 28.)

Lämpökerroin C_t ottaa huomioon lämpöhäviöiden aiheuttaman lumen sulamisen katolla. Aurinkokeräimissä kierrätetään jäätyminen estämiseksi lämmintä nestettä, joka aiheuttaa lumen sulamista keräimen päällä. Suositusarvo lämpökertoimelle on 1,0, jos lämpöhäviöiden aiheuttamaa lumen sulamista ei tapahdu. (5, s. 28.)

Laskurin käyttäjä määrittää paikallisen lumikuorman s_k arvon maassa, mikä selviää maakohtaisesta lumikartasta. Lumikuorma maassa ilmoitetaan yksikössä kN/m^2 . (5, s. 22.)

Lumikuormaa kertyy tuille viivoitetulta alalta (kuva 6). Huomioitavaa on, että lumikuorma ilmoitetaan kattopinnan vaakaprojektiota kohti (5, s. 28).



KUVA 6. Lumikuorman kertymisala tuille (3)

3.2 Tuulikuorma

Tuulikuormaa määritettäessä tarkasteltiin vain keräimen pidempää sivua vasten kohtisuorassa vaikuttava tuuli. Pitkän sivun suuntaiset tuulikuomat aiheuttavat rakenteelle kitkakuormaa, jonka vaikutus tukireaktioihin on merkityksetön. Kitkakuorman merkityksettömyys todennetaan kappaleessa 5.3.1. (6, s. 44.)

3.2.1 Tuulennopeuden perusarvo

Tuulennopeuden perusarvo v_b lasketaan kaavasta 5 (6, s. 30).

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0}$$

KAAVA 5

c_{dir} = suuntakerroin

c_{season} = vuodenaikakerroin

$v_{b,0}$ = tuulennopeuden modifioimaton perusarvo

Suuntakerroin c_{dir} ja vuodenaikakerroin c_{season} voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Suositusarvo on 1,0. (6, s. 30.)

Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo $v_{b,0}$ määritellään tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvona 10 m korkeudella riippumatta vuodenajasta ja tuulen suunnasta. Alueella saa olla tuulenesteitä, mutta niiden on oltava vähintään esteen 20-kertaisen korkeuden etäisyydellä toisistaan. (6, s. 30.)

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella z maaston yläpuolella saadaan kaavasta 6 (6, s. 32).

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) * v_b$$

KAAVA 6

$c_r(z)$ = rosoisuuskerroin

$c_0(z)$ = pinnanmuotokerroin

v_b = tuulennopeuden perusarvo

3.2.2 Rosoisuuskerroin

Rosoisuuskerroin $c_r(z)$ saadaan kaavoista 7 tai 8 riippuen rakenteen korkeudesta z (6, s. 32).

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{KAAVA 7}$$

kun $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \quad \text{KAAVA 8}$$

kun $z \leq z_{min}$

k_r = maastokerroin

z = rakennuksen korkeus maanpinnasta

z_0 = rosoisuusmitta

z_{min} = minimikorkeus

z_{max} = maksimikorkeus

Edellisten kaavojen maastokerroin k_r lasketaan kaavasta 9.

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad \text{KAAVA 9}$$

Rosoisuusmitta z_0 , minimikorkeus z_{min} ja $z_{0,II}$ määritetään taulukosta 2 kohteen maastoluokasta riippuen (6, s. 34).

TAULUKKO 2. Maastoluokat ja maastoparametrit (6, s. 34)

Maastoluokka	z_0 m	z_{min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

Pinnanmuotokerrointa $c_0(z)$ koskevia tietoja esitetään kansallisessa liitteessä. Tuulennopeuden lisääntyessä pinnanmuodostuksen vuoksi yli 5 % käytetään pinnanmuotokerrointa. Tuulenpuoleisen maaston keskimääräisen kaltevuuden ollessa alle 3° voidaan pinnanmuodostus jättää huomioimatta. (6, s. 36.)

3.2.3 Tuulenpuuskien intensiteetti

Tuulenpuuskien intensiteetti $I_v(z)$ korkeudella z määritetään kaavoilla 10 tai 11 (6, s. 36).

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0 \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{KAAVA 10}$$

kun $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0 \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right)} \quad \text{KAAVA 11}$$

kun $z \leq z_{min}$

k_l = pyörteisyyskerroin

c_0 = pinnanmuotokerroin

Kaavojen 10 ja 11 pyörteisyyskerroimen k_l arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Pyörteisyyskerroimen suositusarvo on 1,0. (6, s. 36.)

3.2.4 Puuskanopeuspaine

Puuskanopeuspaine $q_p(z)$, joka vallitsee korkeudella z , määritetään kaavalla 9 (6, s. 38).

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad \text{KAAVA 12}$$

$I_v(z)$ = tuulenpuuskien intensiteetti

ρ = ilman tiheys

$v_m(z)$ = tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Ilman tiheys ρ riippuu maantieteellisestä korkeusasemasta, lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Ilman tiheyden arvo voidaan määrittää kansallisessa liitteessä, suositusarvo on $1,25 \text{ kg} / \text{m}^3$. (6, s. 38.)

3.2.5 Rakenteen tuulikuorma

Aurinkokeräin mallinnetaan avoimena katoksena, joten tuulikuormat määritetään voimakertoimia käyttäen. Rakenteen tuulikuorma F_w voidaan määrittää käyttämällä kaavaa 13 (6, s. 42).

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z_e) \times A_{ref} \quad \text{KAAVA 13}$$

$c_s c_d$ = rakennekerroin

c_f = voimakerroin

$q_p(z_e)$ = puuskanopeuspaine nopeuspainekorkeudella z_e

A_{ref} = rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala

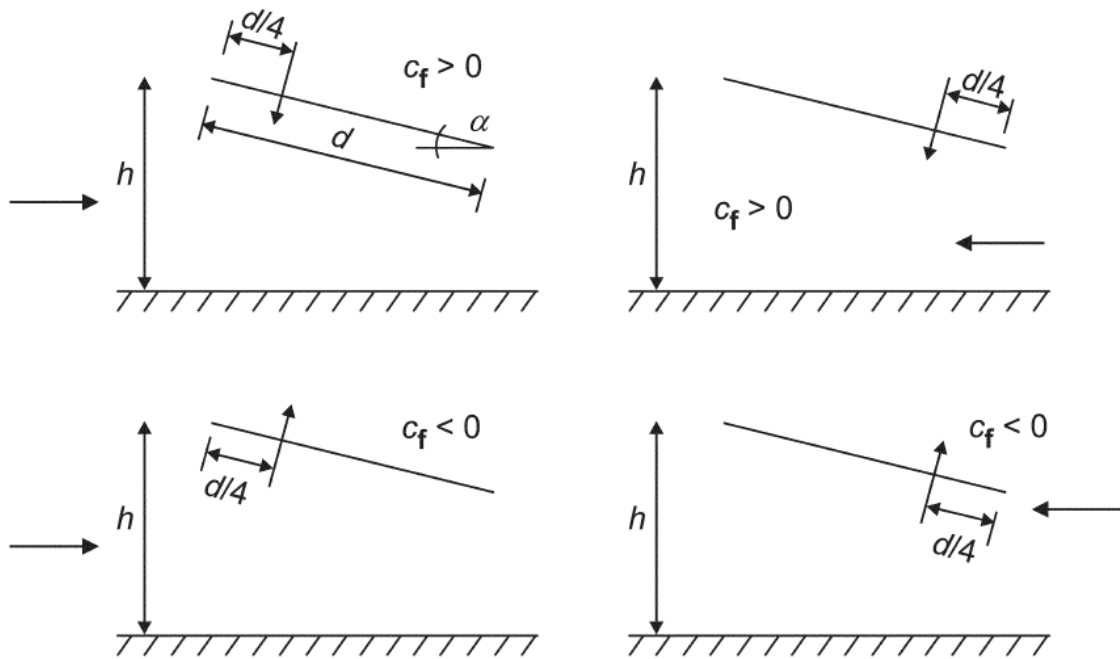
Rakennekerroin c_{sC_d} ottaa huomioon tuulikuormiin vaikuttavat tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuudet rakenteen pinnalla (c_s) ja rakenteen värähtelyä aiheuttavan turbulenssin (c_d). Alle 15 m korkeille rakennuksille rakennekerroin c_{sC_d} on 1,0. Tuulenpaineen vaikutusala A_{ref} on sama kuin keräimen pinta-ala. (6, s. 46.)

Voimakerroin c_f suoralle katokselle määritetään keräimen kaltevuuskulman ja umpinaisuussuhteen avulla (taulukko 3). Umpinaisuussuhde ϕ on aurinkokeräinten tapauksessa 0, koska ne ovat tyhjiä katoksia. Voimakerroin saa positiivisia ja negatiivisia arvoja, jotka ilmaisevat nettotuulikuorman vaikutussuunnan. (6, s. 94.)

TAULUKKO 3. Voimakertoimien arvot c_f arvot suoralle katokselle (6, s. 94)

			Nettopaineen kertoimet $c_{p,net}$		
			<p>Vyöhykekaavio</p>		
Kaltevuuskulma α	Umpinaisuussuhde φ	Kokonaisvoimakerroin c_f	Vyöhyke A	Vyöhyke B	Vyöhyke C
0°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Minimi $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Minimi $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Minimi $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 2,1	- 2,6	- 2,7
15°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Minimi $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Minimi $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Minimi $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Maksimi $\forall \varphi$	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Minimi $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Minimi $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7
HUOM. Merkintä $\forall \varphi$ tarkoittaa kaikkia suhteen φ arvoja Etumerkki + ilmaisee, että nettotuulikuorma vaikuttaa alaspäin Etumerkki - ilmaisee, että nettotuulikuorma vaikuttaa ylöspäin.					

Tuulikuorma F_w sijoittuu suorassa katoksessa kuvan 7 mukaisesti. (6, s. 94.)



KUVA 7. Suorien katosten tuulikuormaresultantin paikka (6, s. 96)

3.3 Omapaino

Keräimen kuivapaino on noin 450 kg. Keräimen sisällä kiertävän nesteen (28 l) paino on noin 30 kg. Kokonaismassaksi keräimelle saadaan 480 kg. (3.)

3.4 Kuormitusyhdistelyt

Tukijalkoja rasittavat pysyvä kuorma (G) sekä muuttuvat kuormat (Q). Keräimen omapaino on pysyvää kuormaa ja lumi- sekä tuulikuorma muuttuvaa kuormaa. Tuulen osalta otetaan huomioon nostevaikutus. Kuormitukset lasketaan murtorajatilassa (MRT) ja käyttörajatilassa (KRT). (4, s. 58.)

3.4.1 Murtorajatila

Murtorajatilassa käytetään kuormituksille seuraavia kertoimia (4, s. 112):

- $\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,35$ (epäedullinen pysyvä kuorma)
- $\gamma_{G,j,\text{inf}} = 1,00$ (edullinen pysyvä kuorma)
- $\gamma_{Q,1} = 1,5$ (määrävä muuttuva kuorma, epäedullinen tapaus)

- $\gamma_{Q,1} = 0$ (määräävä muuttuva kuorma, edullinen tapaus)
- $\gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i}$ (muu samanaikainen muuttuva kuorma)
 - $\gamma_{Q,i} = 1,5$
 - $\psi_{0,i} = 0,7$ (lumikuorma)
 - $\psi_{0,i} = 0,6$ (tuulikuorma)

Lumi- ja tuulikuorman vaikuttaessa samaan aikaan ja samaan suuntaan toista pienennetään pienennyskertoimella. Kaavan 14 lausekkeella saadaan muodostettua omapainon sekä lumi- ja tuulikuorman yhdistelmät. (4, s. 80.)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 14}$$

Tuulen nettovaikutuksen ollessa alaspäin ja lumikuorman ollessa määräävä muodostuu kaava 15 (4, s. 80).

$$1,35 \times G_{k,1} \times +1,5 \times Q_{s,1} + 1,5 \times 0,6 \times Q_{w,2} \quad \text{KAAVA 15}$$

$G_{k,1}$ = pysyvä kuorma (omapaino)

$Q_{s,1}$ = määräävä muuttuva kuorma (lumi)

$Q_{w,2}$ = muu samanaikainen muuttuva kuorma (tuuli)

Vastaavasti tuulikuorman vaikuttaessa alaspäin ja ollessa määräävä muodostuu kaava 16 (4, s. 80).

$$1,35 \times G_{k,1} \times +1,5 \times Q_{w,1} + 1,5 \times 0,7 \times Q_{s,2} \quad \text{KAAVA 16}$$

Tuulella on myös nostevaikutus, jolloin omapaino G_k on edullista pysyvää kuormaa ja lumikuorma Q_s edullista muuttuvaa kuormaa. Edullisen muuttuvan kuorman kerroin γ_Q on 0, joten kaavasta sievenee lumikuorman osuus kokonaan pois. Tuulen vaikuttaessa ylöspäin se on määräävä muuttuva kuorma, jolloin muodostuu kaava 17. (4, s. 80.)

$$1,0 \times G_{k,1} + 1,5 \times Q_{w,1} \quad \text{KAAVA 17}$$

Murtorajatilatarkastelussa saadaan siis seuraavat yhdistelmät, kun tuulen nettovaikutus on alaspäin (kaava 18).

$$\begin{cases} 1,35 \times G_{k,1} \times +1,5 \times Q_{s,1} + 1,5 \times 0,6 \times Q_{w,2} \\ 1,35 \times G_{k,1} \times +1,5 \times Q_{w,1} + 1,5 \times 0,7 \times Q_{s,2} \end{cases} \quad \text{KAAVA 18}$$

Tuulen vaikuttaessa ylöspäin käytetään kaavaa 19.

$$1,0 \times G_{k,1} + 1,5 \times Q_{w,1} \quad \text{KAAVA 19}$$

3.4.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa käytetään ominaisyhdistelmää, koska se aiheuttaa vaarallisimman tilanteen. Ominaisyhdistelmän lauseke on esitetty kaavassa 20. (4, s. 84.)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 20}$$

Käyttörajatilassa pysyvää kuormaa ja määräävää muuttuvaa kuormaa ei kerrota osavarmuusluvuilla vaan ne säilyttävät ominaisarvonsa. Muu samanaikainen muuttuva kuorma kerrotaan kertoimella ψ_0 . (4, s. 84.)

Käyttörajatilatarkastelussa saadaan seuraavat yhdistelmät, kun tuulen nettovai-
kutkus on alaspäin (kaava 21).

$$\begin{cases} G_{k,1} + Q_{s,1} + 0,6 \times Q_{w,2} \\ G_{k,1} + Q_{w,1} + 0,7 \times Q_{s,2} \end{cases} \quad \text{KAAVA 21}$$

Tuulen vaikuttaessa ylöspäin käytetään kaavaa 22.

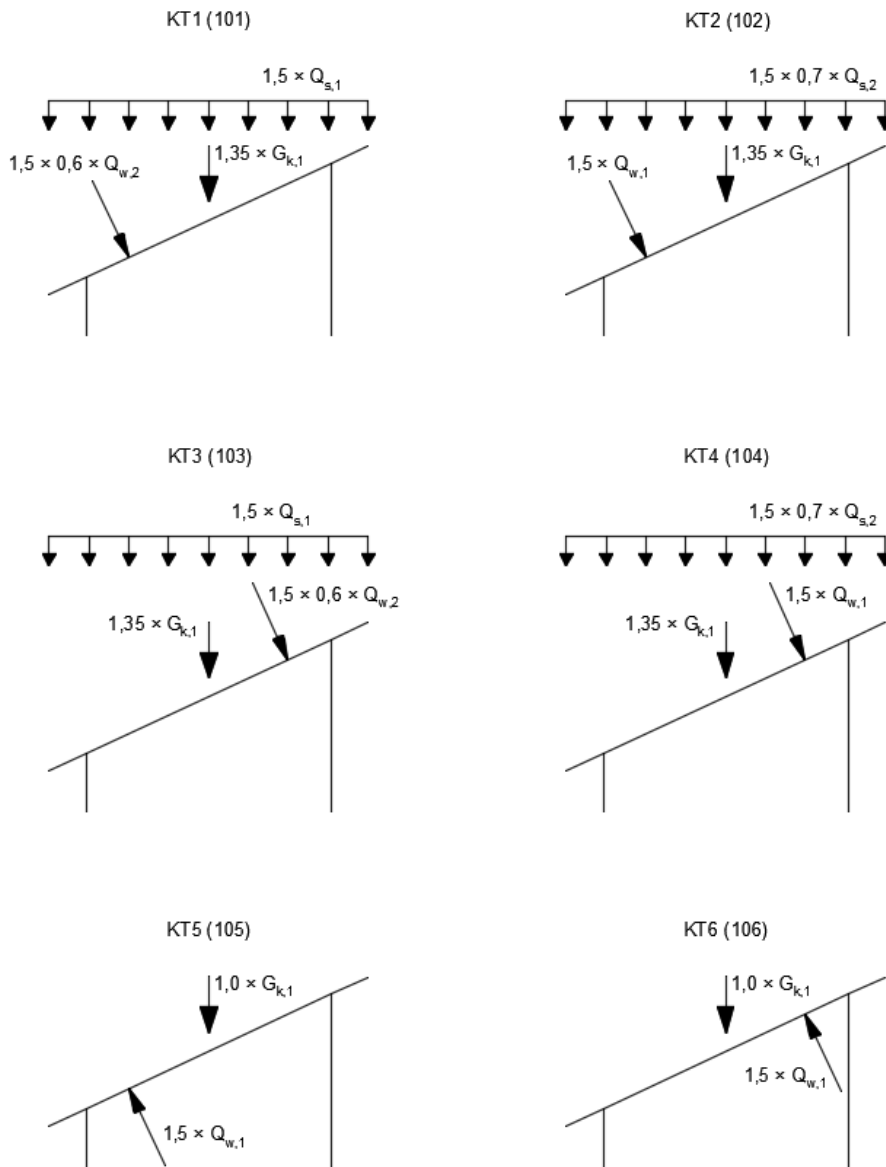
$$G_{k,1} + Q_{w,1} \quad \text{KAAVA 22}$$

3.5 Kuormitustapaukset

Rakenteen kuormituksia tarkastellaan murtorajatilassa (MRT) ja käyttörajatilassa (KRT). Molemmissa rajatiloissa on kuusi kuormitustapausta. (4, s. 86.)

Murtorajatila

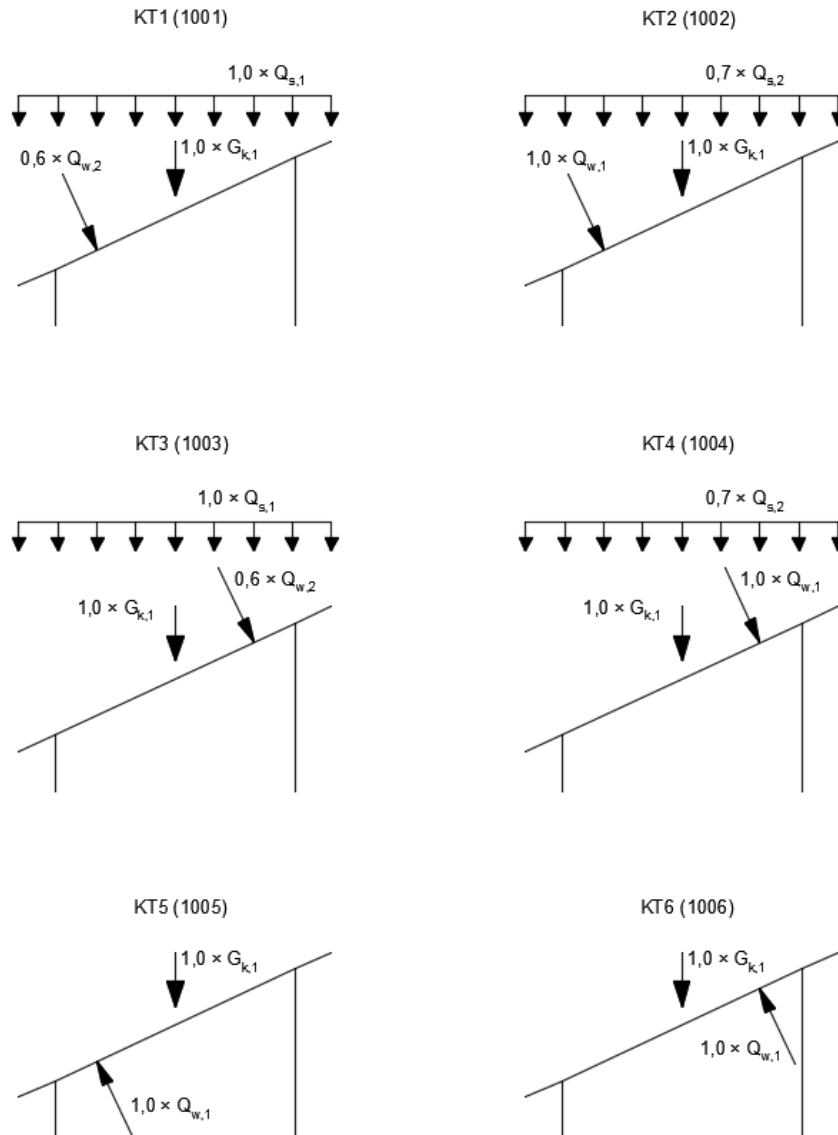
Murtorajatilan kuormitustapaukset ovat esitetty kuvassa 8. Kuormitustapauksissa 1-4 tuulikuormaresultantti vaikuttaa alaspäin, jolloin mukana ovat myös lumi-kuorma ja omapaino asianmukaisilla kertoimillaan. Kuormitustapauksissa 5 ja 6 tuulikuormaresultantin vaikutussuunta on ylöspäin, jolloin lumikuormaa edullisena muuttuvana kuormana ei huomioida ollenkaan. (4, s. 86.)



KUVA 8. Murtorajatilan kuormitustapaukset

Käyttörajatila

Käyttörajan kuormitustapaukset ovat esitetty kuvassa 9. Ainoastaan kuormitusten kertoimet muuttuvat, muuten kuormitustapaukset ovat täysin samoja kuin murtorajatilassa. (4, s. 86.)



KUVA 9. Käyttörajan kuormitustapaukset

4 EXCEL-LASKURI


Luvussa 4 käsitellään opinnäytetyössä laaditun Excel-laskurin toimintaa ja siinä käytettyjä kaavoja. Laskuri perustuu yksinkertaiseen laskentaan ja Excel-funktioihin. Makroja työssä ei käytetty lainkaan. Laskuri on tilaajan vaatimuksesta englanniksi.

Laskuri koostuu viidestä välilehdestä: Dimensions, Snow actions, Wind actions, Calculations ja Results. Valkoisella pohjalla olevat solut ovat soluja, joihin laskurin käyttäjä syöttää arvoja. Harmaalla pohjalla olevat solut sisältävät laskettuja arvoja, joita laskurin käyttäjä ei muokkaa.

4.1 Lähtöarvot

Excel-laskurin ensimmäinen välilehti Dimensions sisältää keräimen painoon ja mittoihin liittyvät arvot. Laskuri laskee annettujen arvojen perusteella keräimen muut mitat. Välilehden Dimensions ulkoasua on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Dimensions-välilehti

	A	B	C	D	E
1	Solar Field Design				
2		Project: .			
3		Date: 05-05-19			
4		Version: .			
5		Designed by: .			
6	Collector parameters				
7	b	6150 mm		h ₂	1265 mm
8	c	300 mm		a	1797 mm
9	D	2583 mm		d	1983 mm
10	h ₁	427 mm		x ₁	346 mm
11	α	25 °		x ₂	180 mm
12	m	450 kg		x ₃	1637 mm

Sarakkeella E lasketut arvot perustuvat sarakkeelle B syötettyihin arvoihin. Käytetyt funktiot ovat trigonometrisia funktioita. Esimerkiksi mitta h_2 , joka on keräimen pidemmän tukijalan korkeus, lasketaan Excelissä kaavalla 23.

$$=B10+TAN(B11*PI()/180)*E8$$

KAAVA 23

4.2 Lumikuorman määrittäminen laskurissa

Laskurissa lumikuormaa koskeva Snow Actions -välilehti sisältää kolme käyttäjän muokattavissa olevaa solua. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvo s_k saadaan selville kyseisen alueen lumikartasta. Maastotyyppi valitaan pudotusvalikosta ja lämpökerroin c_t syötetään arvona. Taulukossa 5 on esitetty Snow Actions -välilehden ulkoasua.

TAULUKKO 5. Snow actions -välilehti

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Snow Actions								
2									
3	s_k	3,00 kN/m ²		Topography					C_e
4	Topography	Windswept		Windswept	Flat unobstructed areas exposed on all sides without, or little shelter afforded by terrain, higher construction works or trees.				0,8
5	C_t	1,0							
6	C_e	0,8		Normal	Areas where there is no significant removal of snow by wind on construction work, because of terrain, other construction works or trees.				1,0
7	α	25 °							
8	μ_1	0,8							
9	s	1,92 kN/m ²		Sheltered	Areas in which the construction work being considered is considerably lower than the surrounding terrain or surrounded by high trees and/or surrounded by				1,2
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Snow Actions -välilehdellä on käytetty VLOOKUP- ja IF-funktioita. Tuulensuojaiskerroin C_e solussa B6 on määritetty käyttämällä kaavaa 24.

$$=VLOOKUP(B4;D4:I15;6;FALSE)$$

KAAVA 24

Funktio tarkistaa solun B4 arvon ja palauttaa alueelta D4:I15 sitä vastaavan arvon sarakkeelta I (alueen kuudes sarake). Tässä tapauksessa solun B4 pudotusvalikosta on valittu Windswept, joten funktio palauttaa soluun B6 alueen D4:I15 kuudennen sarakkeen arvon 0,8.

Lumikuorman muotokerroin μ_1 (taulukko 1, s. 14) on määritetty solussa B8 käytämällä IF-funktiota (kaava 25).

$$=IF(B7<=30;0,8;IF(B7<60;0,8*(60-B7)/30;0)) \quad \text{KAAVA 25}$$

Keräimen kulman ollessa alle 30° funktio palauttaa soluun B8 arvon 0,8. IF-funktion sisällä on toinen IF-funktio, jos ensimmäinen ehto ei toteudu.

Toisen IF-funktion ehto on, että keräimen kulma on 30 ja 60° välissä. Tällöin muotokertoimen μ_1 arvo lasketaan kaavalla 26.

$$\mu_1 = 0,8 \times \frac{(60-\alpha)}{30} \quad \text{KAAVA 26}$$

Keräimen kulman ollessa 60° tai suurempi muotokertoimen arvoksi tulee 0.

4.3 Tuulikuorman määrittäminen laskurissa

Laskurin Wind actions -välilehdellä (taulukko 6; taulukko 7) käsitellään tuulikuormaa. Se on viimeinen välilehti, johon käyttäjä syöttää arvoja. Syötettävät arvot ovat tuulennopeuden modifioimaton perusarvo $v_{b,0}$, ilmanpaine ρ , maastoluokka, suuntakerroin c_{dir} , vuodenaikakerroin c_{season} , pyörteisyyserroin k_l ja pinnanmuotokerroin $c_0(z)$.

TAULUKKO 6. Wind actions -välilehti osa 1

	A	B	C	D	E
1	Wind Actions				
2					
3	$v_{b,0}$	21,0 m/s		$c_r(z)$	0,817
4	ρ	1,25 kg/m ³		$v_m(z)$	17,2 m/s
5	Terrain category	I		$I_v(z)$	0,208
6	c_{dir}	1		$q_p(z)$	0,45 kN/m ²
7	c_{season}	1		α	24 °
8	k_l	1		$c_s c_d$	1
9	$c_o(z)$	1		A_{ref}	15,9 m ²
10	z	1,23 m		ϕ	0
11	v_b	21,0 m/s		$c_{f,1}$	0,96
12	z_0	0,010 m		$c_{f,2}$	-1,54
13	z_{min}	1 m		$F_{w,1}$	6,89 kN
14	z_{max}	200 m		$F_{w,2}$	-11,05 kN
15	k_r	0,17			

Laskuri perustuu Eurokoodiin ilman kansallisia liitteitä, joten kertoimien arvoina on käytetty suositusarvoa 1,0. Kansallisissa liitteissä voi olla tapoja määritellä kertoimille muita arvoja, mutta niitä ei tässä työssä käsitellä.

IF- ja VLOOKUP-funktioiden lisäksi tällä välilehdellä käytetään AND-, INDEX- ja MATCH-funktioita. Tuulenpuuskien intensiteettiä $I_v(z)$ laskettaessa (kaava 27) käytetään AND-funktiota, jolla saadaan asetettua IF-funktiolle kaksi ehtoa.

$$=IF(AND(B13<=B10;B10<=B14);B8/(B9*LN(B10/B12));$$

$$IF(B10<B13;B8/(B9*LN(B13/B12));"N/A"))$$

KAAVA 27

Voimakertoimet

Voimakertoimet $c_{f,1}$ ja $c_{f,2}$ lasketaan lineaarisesti interpoloimalla (taulukko 7). Lineaarisen interpolaation kaavan yleinen muoto on esitetty kaavassa 28.

$$y = y_1 + (x - x_1) \times \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

KAAVA 28

TAULUKKO 7. Wind actions -välilehti osa 2

	A	B	C	D	E
31		Roof angle α	c_f (maximum all ϕ)		c_f (minimum $\phi = 0$)
32		0 °	+0,2		-0,5
33		5 °	+0,4		-0,7
34		10 °	+0,5		-0,9
35		15 °	+0,7		-1,1
36		20 °	+0,8		-1,3
37		25 °	+1,0		-1,6
38		30 °	+1,2		-1,8

Laskurissa on kaavaan 28 perustuva INDEX- ja MATCH-funktioiden yhdistelmä, jolla määritellään voimakertoimien $c_{f,1}$ ja $c_{f,2}$ arvot. Esimerkiksi keräimen kulman ollessa 24° INDEX- ja MATCH-funktio hakee kaavan 28 muuttujan x_1 arvon kaavalla 29.

$(INDEX(B32:B38;MATCH(E7;B32:B38;1)))$

KAAVA 29

Funktio etsii alueelta B32:B38 solun E7 arvoa 24°. Täysin vastaavaa arvoa ei alueella ole, joten funktio palauttaa arvoa seuraavaksi pienemmän arvon 20°.

4.4 Voimasuureiden laskenta

Laskurin Calculations-välilehdellä (taulukko 8) lasketaan tukireaktiot ja kuormitusten ominaisarvot. Tukireaktiot ovat lueteltu taulukossa erikseen jokaiselle kuormatypille.

TAULUKKO 8. Calculations -välilehti

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Calculations							
2								
3		g	q _s	F _w	A _y	B _y	A _x	M _A
4	D	4,41 kN			2,21 kN	2,21 kN		
5	S		11,81 kN/m		13,93 kN	13,93 kN		
6	W ₁			6,89 kN	4,98 kN	1,32 kN	-2,80 kN	-1,20 kNm
7	W ₂			6,89 kN	0,07 kN	6,23 kN	-2,80 kN	-1,20 kNm
8	W ₃			11,05 kN	-7,99 kN	-2,11 kN	4,50 kN	1,92 kNm
9	W ₄			11,05 kN	-0,11 kN	-9,99 kN	4,50 kN	1,92 kNm

Tukireaktioiden laskenta perustuu tasapainoyhtälöihin. Kaavassa 30 on esimerkki tukireaktion A_y laskennasta, minkä aiheuttaa kuormitustapauksen 1 tuuli-kuormaresultantti.

$$=(G6*(Dimensions!E7/1000))$$

$$+D6*(Dimensions!E12/1000)-H6)/(Dimensions!E8/1000)$$

KAAVA 30

4.5 Laskurin tulokset

Kuormitusyhdistelyt ja lopulliset tukireaktiot esitetään Results-välilehdellä. Taulukon 9 yläreunaan Maximum values -otsikon alle on koottu tukireaktioiden suurimmat arvot.

TAULUKKO 9. Results -välilehti, tuen A tulokset

	A	B	C	D	E	
6	MAXIMUM VALUES					
7	JOINT		FORCE-X	FORCE-Y	MOM-Z	
8	A		6,74 kN	28,36 kN	2,88 kNm	
9	B		0,00 kN	29,48 kN	0,00 kNm	
10	REACTIONS					
11	JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	MOM-Z	
12	A	D	0,00 kN	2,21 kN	0,00 kNm	
13		S	0,00 kN	13,93 kN	0,00 kNm	
14		W ₁	-2,80 kN	4,98 kN	-1,20 kNm	
15		W ₂	-2,80 kN	0,07 kN	-1,20 kNm	
16		W ₃	4,50 kN	-7,99 kN	1,92 kNm	
17		W ₄	4,50 kN	-0,11 kN	1,92 kNm	
18		Ultimate limit state combinations				
19		101		-2,52 kN	28,36 kN	-1,08 kNm
20		102		-4,20 kN	25,08 kN	-1,80 kNm
21		103		-2,52 kN	23,94 kN	-1,08 kNm
22		104		-4,20 kN	17,71 kN	-1,80 kNm
23		105		6,74 kN	-9,78 kN	2,88 kNm
24		106		6,74 kN	2,05 kN	2,88 kNm
25		Serviceability limit state combinations				
26		1001		-1,68 kN	19,13 kN	-0,72 kNm
27		1002		-2,80 kN	16,94 kN	-1,20 kNm
28	1003		-1,68 kN	16,18 kN	-0,72 kNm	
29	1004		-2,80 kN	12,03 kN	-1,20 kNm	
30	1005		4,50 kN	-5,78 kN	1,92 kNm	
31	1006		4,50 kN	2,10 kN	1,92 kNm	

Alueella C8:E9 lasketut tukireaktioiden maksimiarvot on saatu INDEX-, MATCH-, MAX- ja ABS-funktioita yhdistelemällä. Esimerkiksi taulukon 9 solun D8 suurimman pystysuuntaisen tukireaktion arvo on laskettu kaavalla 31.

=INDEX(D12:D31;MATCH(MAX(ABS(D12:D31));

ABS(D12:D31);0))

KAAVA 31

Kaava etsii alueelta D12:D31 itseisarvoltaan suurimman arvon ja palauttaa sen soluun D8. Kaavaa syötettäessä Exceliin on painettava näppäinyhdistelmää Ctrl + Shift + Enter, jotta kaavasta saadaan ns. matriisikaava.

Murtoraja- ja käyttörajatilan kuormitustapausten tukireaktioiden lopulliset arvot on laskettu kertomalla eri kuormituslähteiden aiheuttamat tukireaktiot asianmukaisilla yhdistelykertoimilla. Esimerkkinä on tuen A tukireaktion kaava murtorajatilan kuormitustapauksessa 2 solussa C20 (kaava 32).

$$=1,35*C12+1,5*0,7*C13+1,5*C14$$

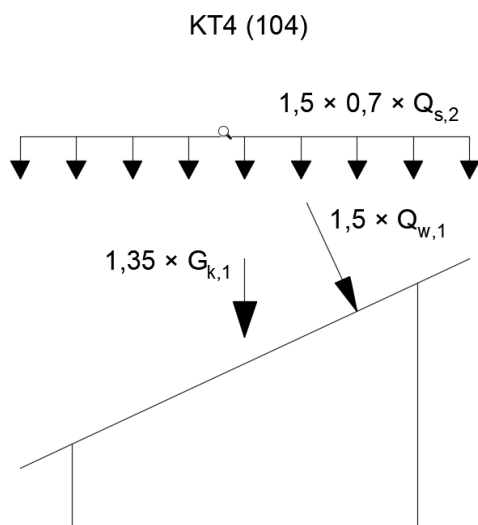
KAAVA 32

5 ESIMERKKILASKELMA

Luvussa 5 lasketaan esimerkkinä pidemmän tukijalan murtorajatilan pystysuuntainen tukireaktio B_y kuormitustapauksessa 4 (kuva 10). Lumi- ja tuulikuorman määrittämiseen käytetään standardeja SFS-EN 1991-1-3 ja SFS-EN 1991-1-4. Lopussa vertaillaan saatua tulosta Excel-laskurilla ja Robot Structural Analysis -ohjelmalla saatuihin tuloksiin.

Keräimen lähtöarvot ovat seuraavat:

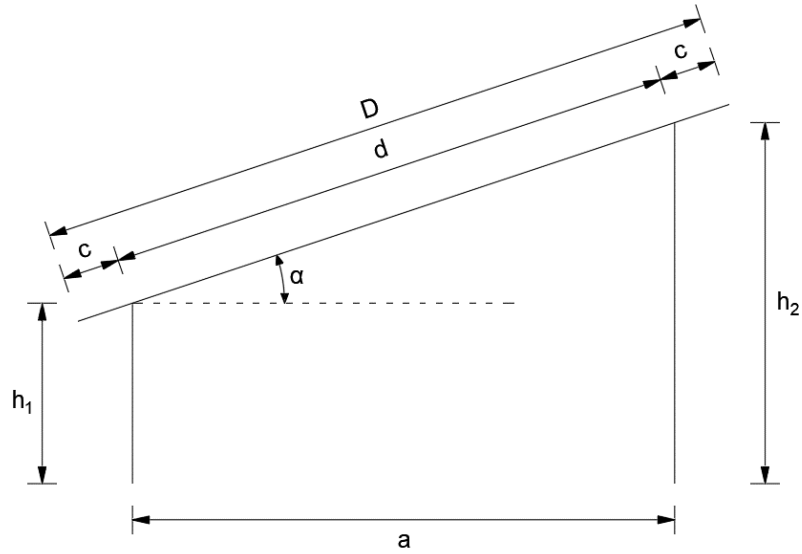
- $b = 6\,150\text{ mm}$
- $c = 300\text{ mm}$
- $D = 2\,583\text{ mm}$
- $h_1 = 427\text{ mm}$
- $\alpha = 28^\circ$
- $m = 450\text{ kg}$.



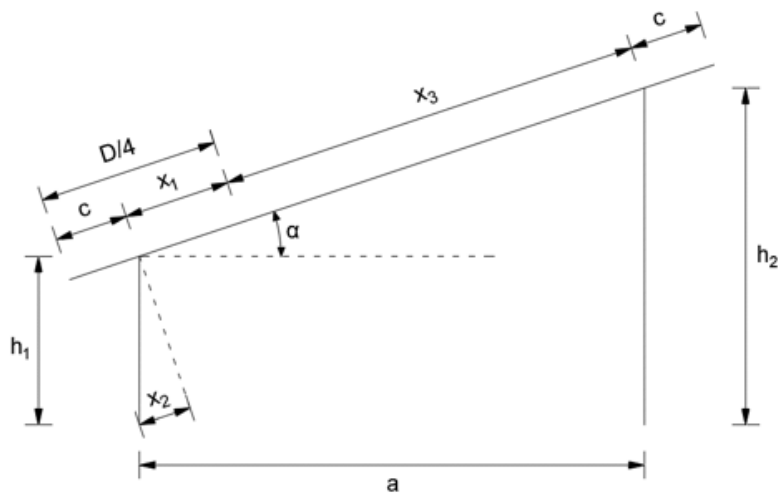
KUVA 10. Kuormitustapaus 4

Keräimen mitat

Ensimmäisenä laskettiin voimasuureiden määrittämiseen tarvittavat apumitat. Apumitat ovat esitetty kuvissa 11 ja 12.



KUVA 11. Keräimen mitat



KUVA 12. Laskennassa käytettävät apumitat

Mitta d (kuva 11) on paneelin leveys, josta on vähennetty tukijalkojen yli menevä osa c . Mitta d laskettiin kaavalla 33.

$$d = D - 2 \times c$$

KAAVA 33

$$d = 2\,583\text{ mm} - 2 \times 300\text{ mm}$$

$$d = 1\,983\text{ mm}$$

Keräimen tukijalkojen välinen etäisyys a (kuva 11) saatiin keräimen kulman α avulla kosinifunktiolla (kaava 34).

$$a = \cos(\alpha) \times d \quad \text{KAAVA 34}$$

$$a = \cos(28^\circ) \times 1\,983 \text{ mm}$$

$$a = 1\,751 \text{ mm}$$

Excel-laskurin lähtöarvoihin ei syötetä tukijalan korkeutta h_2 (kuva 11). Korkeus h_2 laskettiin kaavalla 35 lyhyemmän jalan korkeuden h_1 ja tangenttifunktion avulla (kaava 35).

$$h_2 = h_1 + \tan(\alpha) \times a \quad \text{KAAVA 35}$$

$$h_2 = 427 \text{ mm} + \tan(28^\circ) \times 1\,751 \text{ mm}$$

$$h_2 = 1\,358 \text{ mm}$$

Apumitta x_1 (kuva 12) on tarpeellinen, kun myöhemmin lasketaan tukireaktioita tasapainoyhtälöiden avulla. Apumitta x_1 saatiin jakamalla keräimen leveys D neljällä ja vähentämällä siitä tukijalkojen yli menevä osa c (kaava 36).

$$x_1 = \frac{D}{4} - c \quad \text{KAAVA 36}$$

$$x_1 = \frac{2\,583 \text{ mm}}{4} - 300 \text{ mm}$$

$$x_1 = 346 \text{ mm}$$

Apumitat x_2 ja x_3 (kuva 12) ovat myös tarpeellisia tasapainoyhtälöitä muodostaessa. Apumitta x_2 määritettiin sinifunktion ja keräimen lyhyemmän jalan korkeuden h_1 avulla (kaava 37). Apumitta x_3 määritettiin keräimen leveyden D ja tukijalkojen ylimenevän osan c avulla (kaava 38).

$$x_2 = \sin(\alpha) \times h_1$$

KAAVA 37

$$x_2 = \sin(28^\circ) \times 427 \text{ mm}$$

$$x_2 = 200 \text{ mm}$$

$$x_3 = 0,75 \times D - c$$

KAAVA 38

$$x_3 = 0,75 \times 2\,583 \text{ mm} - 300 \text{ mm}$$

$$x_3 = 1\,637 \text{ mm}$$

Lumikuorma

Esimerkkilaskelmassa katon lumikuorma s määritettiin käyttäen kaavaa 4 (s. 13). Maastotyyppiä esimerkkiin valittiin tuulinen, jonka seurauksena tuulensuojaisuskertoimeksi C_e saatiin 0,8. Oletettiin, että lumen sulamista lämpöhäviöiden takia ei tapahdu, joten lämpökertoimeksi C_t saatiin 1,0. Muotokerroin μ_1 on 0,8, koska keräimen kulma on alle 30° (Taulukko 1, s. 13). Esimerkissä lumikuorman ominaisarvo maassa s_k on $3,00 \text{ kN/m}^2$.

$$s = C_e \times C_t \times \mu_1 \times s_k$$

$$s = 0,8 \times 1 \times 0,8 \times 3,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s = 1,92 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorma

Tuulikuormaresultti F_w laskettiin luvun 3.2 mukaisesti. Kertoimien C_{dir} , C_{season} , k_l ja $c_o(z)$ arvoiksi valittiin Eurokoodin suositusarvo 1,0. Rakennekerroin C_{sCd} on myös 1,0, koska keräimen korkeus on alle 15 m. Tuulennopeuden modifioimattomaksi perusarvoksi $v_{b,0}$ valittiin esimerkissä 21,0 m/s. Ilman tiheydeksi ρ valittiin Eurokoodin suositusarvo $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Tuulennopeuden perusarvo v_b laskettiin kaavalla 5 (s. 15). Suuntakertoimen c_{dir} ja vuodenaikakertoimen c_{season} arvojen ollessa 1,0, tuulennopeuden perusarvo v_b on sama kuin tuulennopeuden modifioimaton perusarvo $v_{b,0}$.

$$v_b = v_{b,0} \times c_{dir} \times c_{season}$$

$$v_b = 21,0 \frac{m}{s} \times 1 \times 1$$

$$v_b = 21,0 \frac{m}{s}$$

Maastoluokaksi esimerkkilaskelmaan valittiin maastoluokka I, minkä seurauksena saadaan seuraavat maastoparametrit:

- $z_0 = 0,01 \text{ m}$
- $z_{min} = 1 \text{ m}$
- $z_{max} = 200 \text{ m}$
- $z_{0,II} = 0,05$.

Rosoisuusmitasta riippuva maastokerroin k_r laskettiin kaavalla 9 (s. 16). Rosoisuuskerroin $c_r(z)$ laskettiin kaavalla 7 (s. 16), koska keräimen korkeus z oli suurempi kuin maastoparametri z_{min} .

$$k_r = 0,19 \times \frac{z_0^{0,07}}{z_{0,II}}$$

$$k_r = 0,19 \times \frac{0,01 \text{ m}^{0,07}}{0,05 \text{ m}}$$

$$k_r = 0,17$$

$$c_r(z) = k_r \times \ln \frac{z}{z_0}$$

$$c_r(z) = 0,17 \times \ln \frac{1,358 \text{ m}}{0,01 \text{ m}}$$

$$c_r(z) = 0,834$$

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella z laskettiin kaavalla 6 (s. 15). Tuulenpuuskien intensiteetti $I_v(z)$ laskettiin kaavalla 10 (s. 17), koska keräimen korkeus z oli suurempi kuin maastoparametri z_{\min} .

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b$$

$$v_m(z) = 0,834 \times 1 \times 21,0 \frac{m}{s}$$

$$v_m(z) = 17,5 \frac{m}{s}$$

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) \times \ln \frac{z}{z_0}}$$

$$I_v(z) = \frac{1}{1 \times \ln \frac{1,358 m}{0,01 m}}$$

$$I_v(z) = 0,204$$

Korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine $q_p(z)$ laskettiin kaavalla 12 (s. 18). Yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala A_{ref} laskettiin keräimen mittojen b ja D avulla (kaava 39).

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \times 0,204] \times \frac{1}{2} \times 1,25 \frac{kg}{m^3} \times 17,5^2 \frac{m}{s}$$

$$q_p(z) = 0,465 \frac{kN}{m^2}$$

$$A_{ref} = b \times D$$

KAAVA 39

$$A_{ref} = 6,150 m \times 2,583 m$$

$$A_{ref} = 15,9 \text{ m}^2$$

Voimakertoimen c_f arvo laskettiin lineaarisesti interpoloimalla (kaava 40) (Taulukko 3, s. 19). Kuormitustapauksessa 4 tuulen nettovaikutus on alaspäin, joten voimakerroin c_f saa positiivisen arvon.

$$c_f = c_{f_1} + (\alpha - \alpha_1) \times \frac{c_{f_2} - c_{f_1}}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad \text{KAAVA 40}$$

$$c_f = 1,0 + (28^\circ - 25^\circ) \times \frac{1,2 - 1,0}{30^\circ - 25^\circ}$$

$$c_f = 1,12$$

Tuulikuormaresultanttia F_w laskettaessa tarvittiin rakennekerroin c_{scd} , voimakerroin c_f , puuskanopeuspaine $q_p(z)$ ja yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala A_{ref} (kaava 13, s. 18). Tuulikuormaresultantti F_w vaikuttaa aurinkokeräimen leveyden D neljännesspisteessä (kuva 7, s. 20).

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z) \times A_{ref}$$

$$F_w = 1 \times 1,12 \times 0,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 15,9 \text{ m}^2$$

$$F_w = 8,27 \text{ kN}$$

Kitkakuorma

Tuulen aiheuttaman kitkakuorman merkityksettömyys keräimen pituussuunnassa todennettiin laskemalla (kaava 41).

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr} \quad \text{KAAVA 41}$$

$$c_{fr} = \text{kitkakerroin}$$

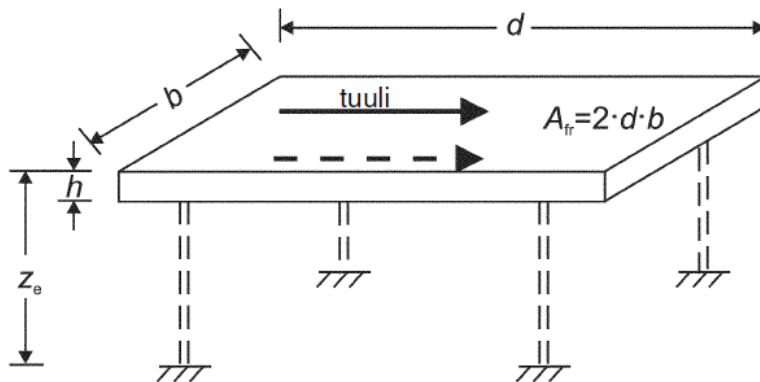
$$q_p(z_e) = \text{puuskanopeuspaine nopeuspainekorkeudella } z_e$$

$$A_{fr} = \text{kitkakuorman vaikutusala}$$

Kitkakertoimen c_{fr} arvo määritellään taulukkoa 10 käyttämällä. Aurinkokeräimien tapauksessa kitkakertoimen arvoksi valittiin 0,01. Kitkakuorman vaikutusala on esitetty kuvassa 13.

TAULUKKO 10. Kitkakertoimet c_{fr} seinille, kaiteille ja kattopinnoille (5, s. 108)

Pinta	Kitkakerroin c_{fr}
Sileä (eli teräs, sileä betoni)	0,01
Karhea (eli karhea betoni, bitumihuopa)	0,02
hyvin karhea (eli aalto-, ripa- tai poimuprofilointi)	0,04



KUVA 13. Kitkakuorman vaikutusala (5, s. 110)

Huomioitavaa on, että kitkakuorman vaikutusala A_{fr} on sama kuin yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala A_{ref} kerrottuna kahdella (kaava 42). Puuskanopeuspaine $q_p(z_e)$ nopeuspaine korkeudella z_e on sama kuin aiemmin tässä luvussa sivulla 39 laskettu $q_p(z)$.

$$A_{fr} = 2 \times D \times b$$

KAAVA 42

$$A_{fr} = 2 \times 6,150 \text{ m} \times 2,583 \text{ m}$$

$$A_{fr} = 31,8 \text{ m}^2$$

$$F_{fr} = 0,01 \times 0,465 \frac{kN}{m^2} \times 31,8 m^2$$

$$F_{fr} = 0,148 kN$$

Kitkakuorman arvo 0,148 kN on hyvin pieni, joten se voidaan todeta merkityksettömäksi.

Omapaino

Aurinkokeräimen omapainon aiheuttama pistekuorma g laskettiin kaavalla 43. Pistekuorma g vaikuttaa aurinkokeräimen keskellä.

$$g = \frac{m \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{1\,000} \quad \text{KAAVA 43}$$

$$g = \frac{450 kg \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{1\,000}$$

$$g = 4,41 kN$$

Tukireaktio B_y

Superpositioperiaatteen mukaisesti tukireaktiot laskettiin kuormitustyyppi kerrallaan ja lisättiin ne lopuksi yhteen yhdistelykertoimineen. Omapainon osuus on laskettu kaavassa 44.

$$B_{y,g} = \frac{g}{2} \quad \text{KAAVA 44}$$

$$B_{y,g} = \frac{4,41 kN}{2}$$

$$B_{y,g} = 2,21 kN$$

Katon lumikuorma muutettiin pintakuormasta viivakuormaksi kertomalla katon lumikuorma s aurinkokeräimen pituudella (kaava 45). Tukireaktio $B_{y,s}$ laskettiin kosinifunktion, aurinkokeräimen leveyden D ja lumikuorman q_s avulla (kaava 46).

$$q_s = s \times b$$

KAAVA 45

$$q_s = 1,92 \frac{kN}{m^2} \times 6,150 m$$

$$q_s = 11,81 \frac{kN}{m}$$

$$B_{y,s} = \cos \alpha \times D \times \frac{q_s}{2}$$

KAAVA 46

$$B_{y,s} = \cos 28^\circ \times 2,583 m \times \frac{11,81 \frac{kN}{m}}{2}$$

$$B_{y,s} = 13,46 kN$$

Tuulikuormasta aiheutuva tukireaktio $B_{y,w}$ laskettiin tuulikuormaresultantin F_w , apumitat x_3 ja keräimen tukijalkojen välisen etäisyyden a avulla (kaava 47).

$$B_{y,w} = \frac{F_w \times x_3}{a}$$

KAAVA 47

$$B_{y,w} = \frac{8,27 kN \times 1,637 m}{1,751 m}$$

$$B_{y,w} = 7,73 kN$$

Kuormitusyhdistely

Omapainon, lumi- ja tuulikuorman aiheuttamat tukireaktiot $B_{y,g}$, $B_{y,s}$ ja $B_{y,w}$ kerrotaan asianmukaisilla yhdistelykertoimilla ja lasketaan ne yhteen (kaava 48), jolloin saadaan tukireaktion B_y suunnitteluarvo.

$$B_y = 1,35 \times B_{y,g} + 1,5 \times B_{y,w} + 1,5 \times 0,7 \times B_{y,s}$$

KAAVA 48

$$B_y = 1,35 \times 2,21 kN + 1,5 \times 7,73 kN + 1,5 \times 0,7 \times 13,46 kN$$

$$B_y = 28,71 kN$$

6 TUKIREAKTIOIDEN TULOSTEN VERTAILU

Esimerkkilaskelman, Excel-laskurin ja Robot Structural Analysis -ohjelman tulosten tulisi vastata toisiaan tarkasti, koska laskenta perustuu tasapainoyhtälöihin. Taulukkoon 11 on koottu Excel-laskurilla, käsinlaskennalla ja Robot Structural Analysis -ohjelmalla saadut tukireaktion B_y arvot.

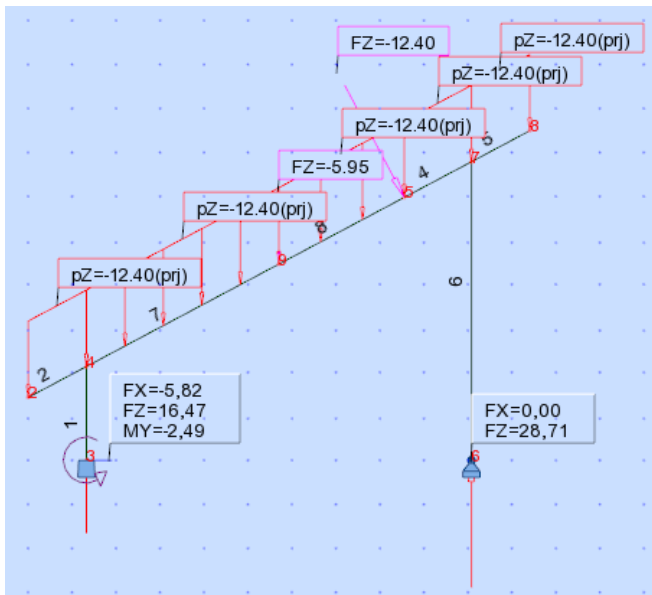
TAULUKKO 11. Tukireaktion B_y arvojen vertailu

	Käsinlaskenta	Excel	Robot Structural Analysis
Tukireaktio B_y	28,71 kN	28,71 kN	28,71 kN

Taulukosta voidaan huomata, että tulokset vastaavat toisiaan. Eroa olisi mahdollisesti voinut tulla mittojen tai kuormitusten pyöristyksistä, mutta käsinlaskennassa käytettiin tarkkoja arvoja. Lisäksi rakennemalli Robot Structural Analysis -ohjelmassa tehtiin vastaamaan täysin keräimen laskentamallia. Taulukossa 12 on esitetty Excel-laskurin tulokset ja kuvassa 14 Robot Structural Analysis -ohjelman tukireaktioiden arvot.

TAULUKKO 12. Tuen B tukireaktiot Excel-laskurissa

	A	B	C	D	E
	JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	MOM-Z
32	B	D	0,00 kN	2,21 kN	0,00 kNm
33	B	S	0,00 kN	13,46 kN	0,00 kNm
34	B	W ₁	0,00 kN	1,63 kN	0,00 kNm
35	B	W ₂	0,00 kN	7,73 kN	0,00 kNm
36	B	W ₃	0,00 kN	-2,51 kN	0,00 kNm
37	B	W ₄	0,00 kN	-11,87 kN	0,00 kNm
38					
39		Ultimate limit state combinations			
40		101	0,00 kN	24,65 kN	0,00 kNm
41		102	0,00 kN	19,57 kN	0,00 kNm
42		103	0,00 kN	30,13 kN	0,00 kNm
43		104	0,00 kN	28,71 kN	0,00 kNm
44		105	0,00 kN	-1,55 kN	0,00 kNm
45		106	0,00 kN	-15,60 kN	0,00 kNm
46		Serviceability limit state combinations			
47		1001	0,00 kN	16,65 kN	0,00 kNm
48		1002	0,00 kN	13,27 kN	0,00 kNm
49		1003	0,00 kN	20,31 kN	0,00 kNm
50		1004	0,00 kN	19,36 kN	0,00 kNm
51		1005	0,00 kN	-0,30 kN	0,00 kNm
52		1006	0,00 kN	-9,66 kN	0,00 kNm
53	Note: Joint A is assumed to receive all of the horizontal load.				



KUVA 14. Robot Structural Analysis -tulokset

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Excel-laskuri, joka laskee aurinkokeräimen tukireaktiot käyttäjän syöttämien alkuarvojen perusteella. Laskuri tulee käyttöön Savosolar Oyj:lle.

Laskuri on täysin eurokoodipohjainen. Kuormitusten määrittäminen perustui standardeihin SFS-EN 1990, SFS-EN 1991-1-3 ja SFS-EN 1991-1-4. Kansallisia liitteitä ei otettu tässä työssä huomioon, koska laskurin tarkoitus on olla käyttökelpoinen missä tahansa.

Opinnäytetyö aloitettiin tekemällä Excel-laskuri lähes valmiiksi, minkä jälkeen alettiin kirjoittaa raporttia. Raporttia kirjoitettaessa laskuriin tehtiin muutoksia ja ulkoasu saavutti lopullisen muotonsa.

Laskurin ulkoasu noudattaa Savosolar Oyj:n tyyliä ja se on helppokäyttöinen. Soluihin kiinnitetyt kommentit antavat käyttäjälle tietoa käytetyistä kaavoista ja standardeista. Laskuria on havainnollistettu kuvilla ja se etenee loogisesti. Taulukoiden muotoilu on tehty niin, että tulosten tulostaminen on helppoa.

Opinnäytetyö oli mielenkiintoinen ja sopivan haastava. Työn tekeminen eteni sujuvasti, koska yhteistyö WSP Finland Oy:n ja Savosolar Oyj:n kanssa oli tiivistä. Ongelmien ja epäselvyyksien ilmetessä apua sai nopeasti.

LÄHTEET

1. Keräimet. 2018. Savosolar Oyj. Saatavissa: <https://savosolar.com/fi/tuotteet/keraimet/>. Hakupäivä 7.1.2019.
2. Keräinkentät. 2018. Savosolar Oyj. Saatavissa: <https://savosolar.com/fi/tuotteet/kerainkentat/>. Hakupäivä 7.1.2019.
3. Opinnäytetyön materiaalit. 2019. Savosolar Oyj.
4. SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
5. SFS-EN 1991-1-3. 2004. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
6. SFS-EN 1991-1-4. 2005. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: Tuulikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.