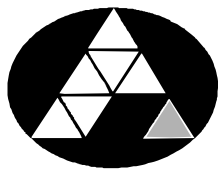


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Jarno Luntinen

**TUULIKUORMIEN EUROKOODI-PERUSTEINEN
LASKENTAOHJELMA**

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2011



POHJOIS-KARJALAN
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2011
Rakennustekniikan
koulutusohjelma
Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
p. (013) 260 6800

Tekijä
Jarno Luntinen

Nimeke
Tuulikuormien eurokoodi-perusteinen laskentaohjelma

Toimeksiantaja
Insinööritoimisto Creo₃ Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää laskentaohjelma rakennusten tuulikuormien määrittämiseen eurokoodin ohjeiden mukaisesti. Työ tehtiin yhteistyössä Insinööritoimisto Creo₃ Oy:n kanssa ja se oli tarkoitus ottaa käyttöön toimistolla tehtävissä rakennussunnittelutehtävissä.

Opinnäytetyön teoriaosiossa selostetaan tuulikuormien laskennan perusteet tiivistetysti, minkä tarkoituksena on selventää laskentaohjelman käyttäjälle laskennan etenemistä. Teoriaosiossa esitellään myös ohjelman toiminta sekä annetaan ohjeita käyttäjälle.

Ohjelma laskee tuulikuormat tasa-, pulpetti-, kuvetaite- ja harjakattoisille rakennuksille käyttäen eurokoodin antamaa kahta eri laskentatapaa. Toinen tapa määrittää tuulikuormat voimakertoimen C_f avulla ja toinen pintapaineiden $C_{p,net}$ avulla. Tulokset esitetään kootusti ohjelman tulossivuilla.

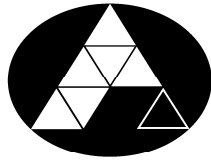
Laskentaohjelman avulla pyritään tehostamaan rakennesuunnittelua sekä tarkentamaan kuormalaskentaa eurokoodin mukaan toteutettavissa rakennushankkeissa.

Kieli
suomi

Sivuja 32
Liitteet -
Liitesivumäärä -

Asiasanat

Tuulikuorma, eurokoodi, laskentaohjelma



NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
Spring 2011
Degree Programme in civil
engineering
Karjalankatu 3
FIN 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. 358-13-260 6800

Author
Jarno Luntinen

Title
Eurocode based Calculation Application for wind loads

Commissioned by
Insinööritoimisto Creo₃ Oy

Abstract

The subject of this thesis was to create an application for calculating wind loads of buildings according to the instructions of eurocodes. This thesis was made in co-operation with Insinööritoimisto Creo₃ Oy to be used in the structural designing projects of the company.

In the theory section of the thesis the basics of wind load calculation is explained summarized. This is for the application user to understand the progression of the calculation. The function of the application and instructions for the user are also presented in the theory section.

The application calculates wind loads for buildings with flat, monopitch or duopitch roof using two alternative ways of calculating that are presented in the eurocode standard. One of them defines wind loads by force coefficient C_f and the other by pressure coefficient $C_{p,net}$. The results are shown in result tab collectively.

The aim of developing this calculation application was to make structural designing more efficient and to make load calculation more accurate in the projects operated on eurocodes.

Language
Finnish

Pages	32
Appendices	-
Pages of Appendices	-

Keywords

Wind load, eurocodes, calculation application

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Eurokoodit	6
2.1	Taustaa käyttöönnotosta.....	6
2.2	Muutokset rakennesuunnitteluun.....	6
3	Tuulikuormien laskenta eurokoodin mukaisesti.....	6
3.1	Lähtökohdat ja oletukset	7
3.2	Puuskanopeuspaineen $q_p(z)$ määrittäminen.....	7
3.3	Tuulikuorma voimakertoimen C_f avulla.....	9
3.3.1	Rakennekerroin $c_s c_d$	11
3.3.2	Korkea rakennus	12
3.3.3	Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla	13
3.4	Tuulikuorma pintapaineiden avulla	13
3.4.1	Kitkavoima F_{fr}	16
3.4.2	Kokonaistuulivoima pintapaineiden avulla.....	17
3.5	Tuulikuorman laskenta yksittäisille rakennesosille	17
3.5.1	Sisäpuolinen painekerroin.....	18
3.5.2	Nettopaine ja neliötuulikuorma	20
4	Laskentaohjelman esittely	21
4.1	Perustietoja ohjelmasta	21
4.2	Käytön rajoitukset.....	21
4.3	Alkuarvot.....	22
4.4	Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla	25
4.5	Painekertoimien laskenta	25
4.6	Kitkavoiman laskenta.....	27
4.7	Laskennan tulokset	27
5	Pohdinta	30
5.1	Tuulikuormien mallintamisen hyödyt ja ongelmat.....	30
5.2	Laskentatulosten tulkinta	30
	Lähteet.....	32

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää laskentaohjelma helpottamaan rakennusten suunnittelussa käytettävien tuulikuormien määrittämistä. Ohjelma on tehty yhteistyössä Insinööritoimisto Creo₃ Oy:n kanssa ja se on tarkoitus ottaa käyttöön toimistolla tehtävissä rakennesuunnitteluprojekteissa. Suurin tarve kyseiselle laskentaohjelmalle syntyi uuden eurooppalaisen suunnittelustandardin, eurokoodin myötä, sillä se määrittelee tuulikuormat huomattavasti edeltäjänsä, Rakentamismääräyskokoelman B-osaa tarkemmin ja monimutkaisemmin. Tästä johtuen kuormien määrittäminen ilman avustavia laskentaohjelmia on erittäin työlästä sekä epätarkkaa.

Laskentaohjelman perusajatus oli olla käyttäjälle mahdollisimman yksinkertainen, mutta silti tarkka ja moneen tilanteeseen soveltuva. Tämä asetti jonkin verran haasteita ohjelman teolle, sillä laskennan taustalla oleva teoretinen tieto oli melko yksityiskohtaista ja sitä oli laajasti. Kuitenkin ohjelmasta käytännössä saatava hyöty tulee korvaamaan sen tekemiseen käytetyt panokset tulevaisuudessa.

2 Eurokoodit

2.1 Taustaa käyttöönnotosta

Vuonna 2007 otettiin Suomessa käyttöön eurooppalainen yhteinen suunnittelustandardi eurokoodi, jonka tarkoituksena oli yhdistää Euroopan maiden suunnittelukäytännöt ja täten helpottaa maiden välistä yhteistyötä rakennesuunnittelun saralla. Standardin oli määrä tulla pakolliseksi vuoden 2010 alusta lähtien, mutta koulutuksen riittämättömyys ja liian pikainen aikataulu tutun suomalaisen suunnittelunormin hylkäämiseen johti Suomessa eurokoodin pakollisen käyttöönoton lykkäämiseen. Nykyisellään oletetaan pakollisuuden astuvan voimaan aikaisintaan vuoden 2012 aikana ja siihen asti eurokoodia käytetään vaihtoehtoisena suunnitteluohjeena Suomen rakentamismääräyskokoelman B-osan rinnalla. (Eurokoodi help desk).

2.2 Muutokset rakennesuunnitteluun

Eurokoodi tuo mukanaan monia muutoksia kuormien määritykseen ja lujuuslaskentaan. Tässä raportissa keskitytään standardin EN 1991 osioon 1-4, joka käsittelee rakennusten tuulikuormia ja niiden mallintamista. Uusien ohjeiden mukanaan tuomia muutoksia on tullut ehkä eniten juuri tuulikuormien osalta. Suunnittelijoille helpotuksena on nykyään jo jonkin verran esimerkkilaskelmia, mutta tarkka eurokoodin mukainen tuulikuormalaskenta on todella aikaavievää ja työlästä ilman laskentatyökaluja.

3 Tuulikuormien laskenta eurokoodin mukaisesti

Tässä laskennan etenemistä esittelevässä osiossa kerrotaan eurokoodin mukaisen, rakennusten tuulikuormalaskennan kulku pääpiirteittäin. Esitys ei paneudu kaikkiin tuulikuormalaskennan vaiheisiin välttämättä kovin yksityiskohtaisesti ja kaikkia tekstissä viitattuja kaavoja tai määritelmiä ei tässä raportissa ole esitetty. Kuitenkin tämän esityksen perusteella saadaan kattava kuva siitä, mihin tietopohjaan

opinnäytetyönä tehdyn tuulikuormien laskentaohjelman toiminta perustuu. Raportissa esitetään tarkat viittaukset lähdeaineistoihin kaikkien puuttuvien tietojen osalta. Nimityksen ”eurokoodi” esiintyessä tekstissä, tarkoitetaan aina eurokoodin standardoitua osaa EN 1991-1-4 tai sen liitteitä.

3.1 Lähtökohdat ja oletukset

Tuulikuormien laskennan lähtökohtana oletetaan tuulen kohdistuvan rakennukseen vaakatasossa, yleensä neljästä eri ilmansuunnasta. Rakenteiden lujuuslaskentaa varten oleellinen tieto on tuulen aiheuttama paine tai imu neliömetriä kohden. Neliökuormien avulla voidaan kuormitus jakaa mitoitettavalle rakenneosalle tai vastaavasti neliökuormien avulla voidaan määrittää koko rakennukseen kohdistuva tuulivoima.

Ennen laskennan aloittamista täytyy olla selvillä, aiotaanko määrittää kuormia yksittäiselle rakenneosalle, tuulta vastaan jäykistäville rakenteille vai perustuksille. Tämä johtuu siitä, että eurokoodi antaa kaksi erilaista tapaa määrittää tuulikuormia ja toinen tapa ei sovellu yksittäisille rakenneosille. (RIL 201-1-2008, 135). Myös kuormitetun pinta-alan koko vaikuttaa tuulen maksimiarvoihin, joten yleistä, koko rakennusta koskevaa neliötuulikuormaa on eurokoodin avulla hankala määrittää. Tämä johtaa perusrakennesuunnittelussa yksinkertaistuksiin, joita on lähes pakko tehdä suunnittelun jouhevuuden kannalta. Yksinkertaistukset puolestaan johtavat monesti kuormien ylimitoitukseen, varsinkin jäykistävien rakenteiden yhteydessä. Toisaalta yksittäisten rakenneosien tuulikuormat saattavat tulla alimitoitetuksi.

3.2 Puuskanopeuspaineen $q_p(z)$ määrittäminen

Laskenta alkaa rakennuksen geometriatietojen selvittämisellä. Tarvitaan korkeus- ja vaakamitat sekä mahdolliset kattokaltevuudet. Seuraavaksi on laskettava tuulennopeuden modifioitu perusarvo v_m , joka koostuu maakohtaisesti määrättävästä tuulennopeuden perusarvosta v_b sekä maaston rosoisuus- ja pinnanmuotokertoimista $c_t(z)$ ja $c_0(z)$. Suomen kansallisen liitteen mukaan tuulennopeuden perusarvona käytetään manneralueilla 21 m/s. Erityisen tuulisille alueille, kuten tunturien lähistöille sekä merialueille on kansallisessa liitteessä annettu hieman suurempia arvoja.

(Kansallinen liite standardiin EN1991-1-4, liite 5, 4.2.) Mikäli ympäröivän maaston keskimääräinen kaltevuus on alle 3 astetta käytetään pinnanmuotokertoimenä 1,0, eli sillä ei ole vaikutusta tuulennopeuteen. Jos kaltevuus on suurempi, tulee kerroin määrittää erikseen eurokoodin liitteessä A, kohdassa A.3 esitetyllä tavalla. Rosoisuuskertoimen määrittäminen perustuu maastoluokkiin liittyviin maastoparametreihin. Eurokoodi esittää maastoluokkajaon kohtuullisen selkeästi (EN 1990-1-4, LIITE A, A.1). Maastoluokat määrittyvät maaston rosoisuuden ja läheisen rakennuskannan sekä muiden tuulelta suojaavien rakennelmien perusteella ja niitä on valittavana viisi erilaista, 0, I, II, III ja IV. Suurempi roomalainen numero kuvaa suurempaa rosoisuutta ja täten pienempää tuulennopeutta. Huomattavaa rosoisuuden määrittämisessä on Suomen kansallisen liitteen määräämä merialueiden maastokerroin k_r , joka on tiukemmin rajattu kuin eurokoodissa. (Kansallinen liite standardiin EN1991-1-4, liite 5, 4.3.2.)

Kun tuulennopeuden modifioitu perusarvo on saatu selvitettyä, on määritettävä puuskanopeuspaine $q_p(z)$. Puuskanopeuspaine voidaan laskea numeerisesti käyttäen eurokoodin kaavaa 4.8, johon sisältyy turbulenssia kuvaava kerroin $I_v(z)$ sekä ilman tiheys ρ ja tuulen modifioitu perusarvo v_m .

Toinen, ehkä yksinkertaisempi keino, on laskea nopeuspaineen perusarvo q_b kaavalla 1 ja tämän jälkeen määrittää altistuskerroin $c_e(z)$ kuvasta 1. Näiden kahden kertoimen tulona saadaan puuskanopeuspaineen arvo $q_p(z)$. (EN 1991-1-4, kaava 4.8) Puuskanopeuspaine $q_p(z)$ kertoo tuulen aiheuttaman paineen neliometriä kohden ja tätä arvoa käytetään jatkolaskennassa tuulenpaineen ominaisarvona.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad [1]^*$$

jossa

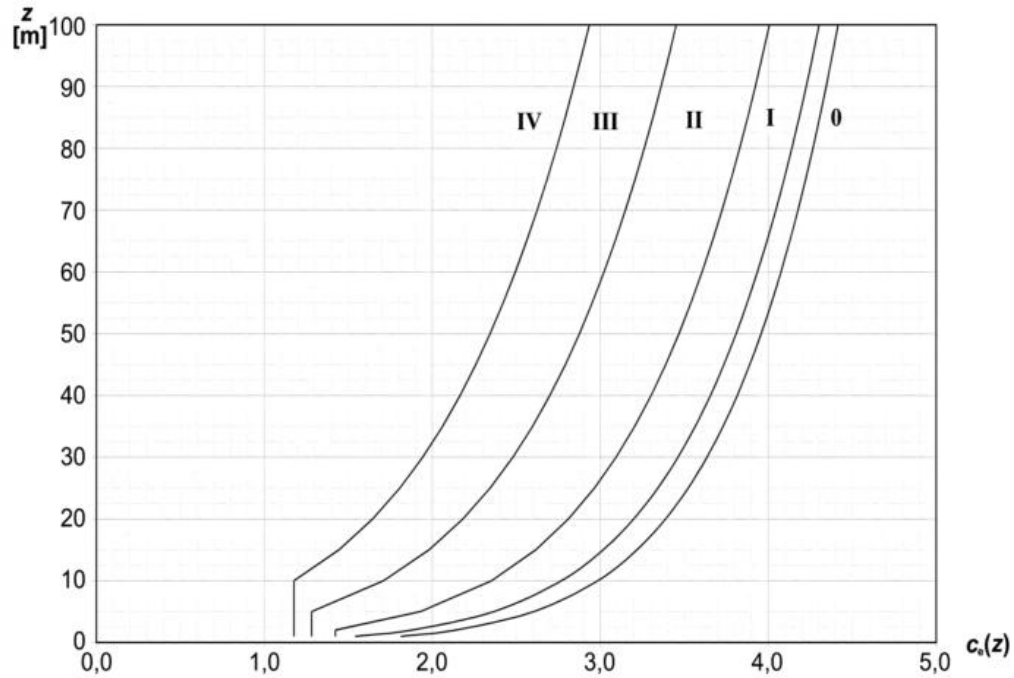
q_b nopeuspaineen perusarvo

ρ ilman tiheys

(suositus $1,25 \text{ kg/m}^3$, EN 1991-1-4, 4.5, Huom.2)

v_b tuulennopeuden perusarvo

*kaava on standardista EN 1991-1-4, kaava 4.10



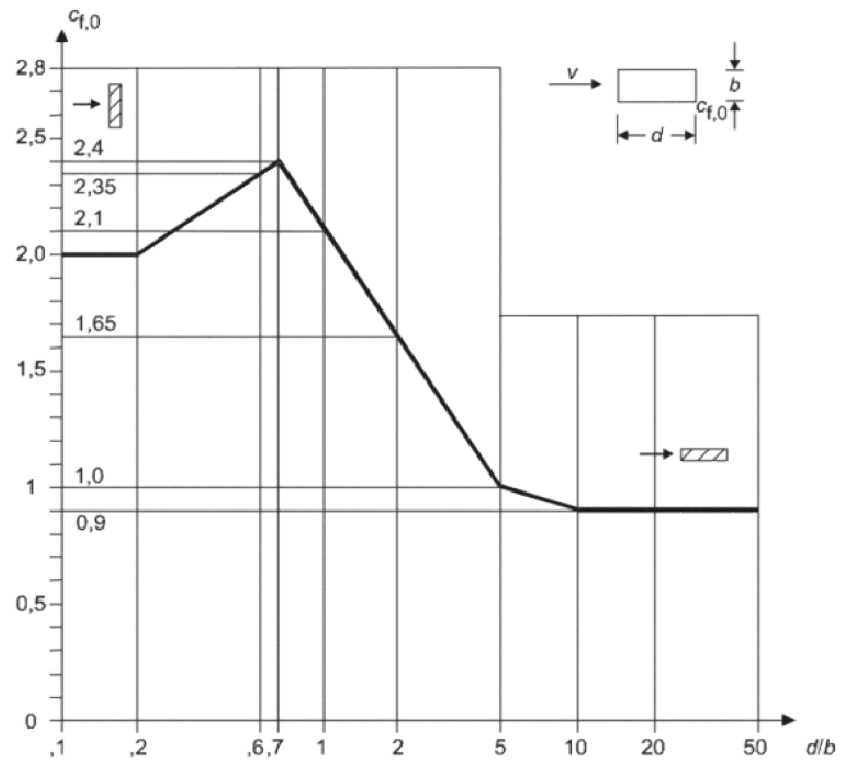
Kuva 1 Altistuskertoimien kuvaajat eri maastoluokissa (EN 1991-1-4, kuva 4.2)

Rakennukseen kohdistuvat tuulikuormat voidaan tästä eteenpäin laskea eurokoodin mukaan kahdella eri tavalla. Toinen tapa on voimakertoimen C_f avulla ja toinen pintapaineiden w_e ja w_i avulla tapahtuva laskenta.

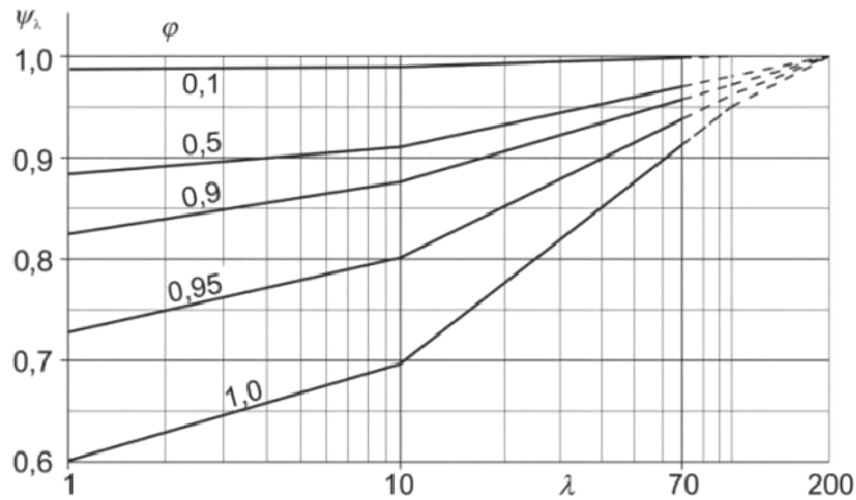
3.3 Tuulikuorma voimakertoimen C_f avulla

C_f -kerroin on tuulitunnelikokein määritetty kokonaisvoimakerroin, johon vaikuttaa rakennuksen hoikkuus ja muoto. Kerroin huomioi kitkan vaikutukset sekä tuulen pyörteisyyden aiheuttamat pintapaineiden paikalliset tuulenpaineet. C_f -kertoimen käyttö rajoittuu kuitenkin rakennuksen kokonaistuulivoimien määrittämiseen sekä tuulta vastaan jäykistävien rakenteiden suunnitteluun. (Heinisuo 2007, 49). Kerroin ei huomioi rakennuksen sisäpuolisia paineita, joten yksittäisiä rakenneosia mitoitettaessa se voi antaa epävarmalla puolella olevia kuormituksia.

C_f -kertoimen määrittäminen tavanomaisessa talonrakennuksessa tapahtuu eurokoodin kohdan 7.6 mukaisesti. Ohjeesta löytyy käyrä (kuva 2), jonka perusteella saadaan selvitettyä kyseisen rakennusmuodon $C_{f,0}$ -kerroin. Tämä kerroin tulee vielä kertoa päätevaikutuskertoimella Ψ_λ , joka huomioi rakennuksen vapaan pään ohittavan tuulen virtauksen. Se voidaan selvittää kuvasta 3, jossa esitetään päätevaikutuskertoimen arvoja eri eheyssuhteilla ϕ laskettuna. Talonrakennuksessa eheyssuhteena voidaan pitää arvoa 1,0. (Heinisuo 2007, 50.)



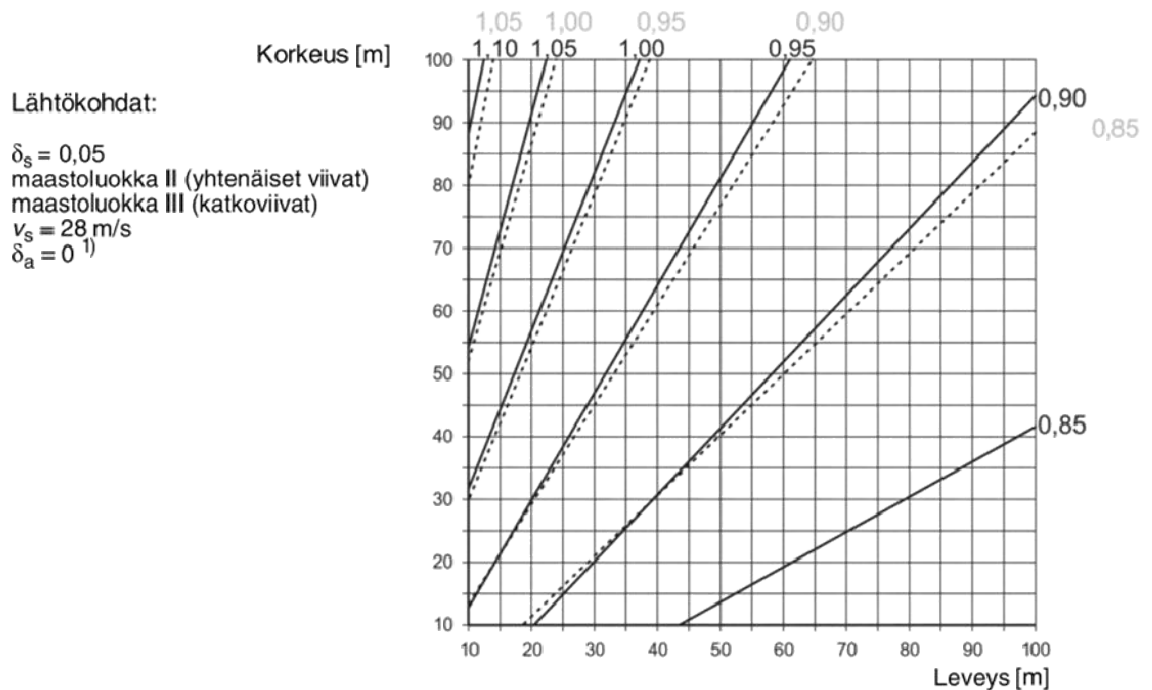
Kuva 2 Käyrä $C_{f,0}$ -kertoimen määrittämiseksi (EN 1991-1-4, kuva 7.23)



Kuva 3 Käyrästä päätevaikutuskertoimen ψ_λ määrittämiseen (EN 1991-1-4, kuva 7.36)

3.3.1 Rakennekerroin c_{s,c_d}

C_f -kertoimen avulla laskettaessa tarvitaan vielä c_{s,c_d} -rakennekerroin, joka pohjautuu rakennuksen värähtelyyn liittyvään ominaistajuuteen. Eurokoodi antaa ohjeita kertoimen määrittämiseen kohdassa 6, mutta sen laskeminen on erittäin vaativaa. Suosituksena on käyttää arvoa 1,0, tai jos halutaan hieman tarkempia arvoja, voidaan niitä hakea eurokoodin liitteen D kuvista D.1 ja D.2, joissa on esitetty muutamia valmiiksi laskettuja suoria tietyillä lähtöarvoilla. Kuvassa 4 on c_{s,c_d} -kerrointa kuvaavia suoria monikerroksisille teräsrakennuksille.



Kuva 4 Rakennekertoimelle laskettuja kvaajia (EN 1991-1-4, Liite D, kuva D1)

3.3.2 Korkea rakennus

Jos tarkasteltava rakennus on hyvin korkea saattaa tuulikuorman määrittäminen, käytettäessä tarkastelukorkeutena harjakorkeutta, tuottaa ylisuuria kokonaistuulikuormia. Eurokoodin mukaan rakennusta, jonka korkeus on pienempi kuin sen tuulta vastaan kohtisuorassa olevan sivun leveys, voidaan tarkastella käyttämällä koko rakennukseen harjan korkeudella vaikuttavaa puuskanopeuspainetta. Tätä määritelmää korkeampiin rakennuksiin esitetään sovellettavaksi tarkempia laskentatapoja. (EN 1991-1-4, 7.2.2).

Tällöin voidaan rakennus jakaa korkeussunnassa eri osiin, joille tuleva tuulen puuskanopeuspaine määritetään kullekin osalle erikseen. Vaihtoehtoisesti kokonaiskuorma voidaan laskea tuulenpaineen korkeusprofiilin avulla, joka noudattaa muodoltaan kuvassa 1 esitettyä altistuskertoimen $C_e(z)$ käyrää. (RIL 201-1-2008, 137-

138). Käytännössä kokonaiskuorman määrittäminen tällä tavalla tarkoittaa puuskanopeuspaineen kuvaajan pinta-alan integrointia haluttuun korkeuteen saakka. Eurokoodi ei kuitenkaan esitä kyseistä kuvaajaa. Tarvittaessa kuvaaja ja sen sisältämät lausekkeet löytyvät Rakennusinsinööriliitto RIL:n kuormitusohjeesta RIL 201-1-2008. RIL:n ohjeessa olevat kuvaajat on laskettu valmiiksi eri maastoluokille rakennuksen sijaitessa tasaisessa maastossa ja ne ovat päteviä Suomessa rakennettaessa.

3.3.3 Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla

Rakennuksen kokonaistuulivoimaksi $F_{w,k}$ tulee voimakerrointa käyttäen:

$$F_{w,k} = c_s c_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad [2]^*$$

jossa

$F_{w,k}$	rakennuksen kokonaistuulivoima
$c_s c_d$	rakennekerroin
C_f	voimakerroin
$q_p(z_e)$	puuskanopeuspaine korkeudella z [m]
A_{ref}	tuulen projektiopinta-ala

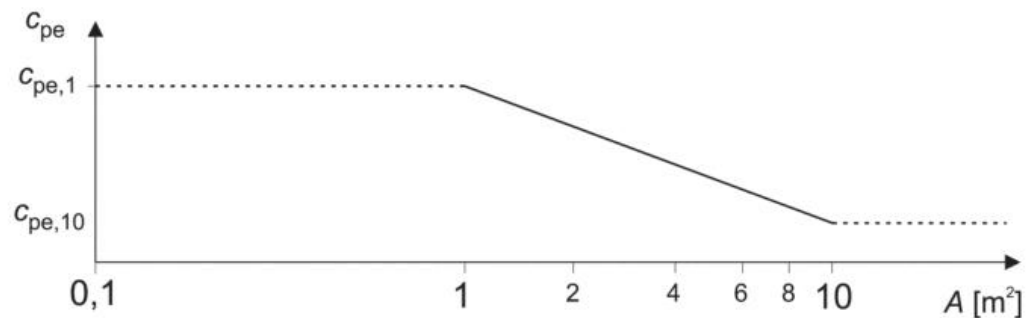
3.4 Tuulikuorma pintapaineiden avulla

Jos tuulikuormia ei pystytä tai haluta määrittää C_f -kertoimen avulla, voidaan se vaihtoehtoisesti tehdä käyttäen rakennuksen ulkopintoihin vaikuttavien painekertoimien C_{pe} ja sisäpintoihin vaikuttavien painekertoimien C_{pi} avulla. Tämä menetelmä on jonkin verran työläämpi verrattuna voimakertoimen käyttöön, mutta ainut eurokoodin esittämä keino määrittää tuulenpaineet yksittäisille rakenneosille. (EN 1991-1-4, 5.3(3)).

Painekertoimilla laskettaessa ensimmäisenä tulee jakaa rakennuksen ulkopinnat eri vyöhykkeisiin. Vyöhykejakoon vaikuttavat rakennuksen ulkomitat sekä kattomuoto. Eurokoodi esittää vyöhykejaon periaatteet sekä kullekin vyöhykkeelle tulevat painekertoimet kohdassa 7.2.

*kaava on standardista EN 1991-1-4, kaava 5.3

Kun rakennuksen eri pintavyöhykkeet on saatu selvitettyä, etsitään jokaiselle vyöhykkeelle oma paine kerroin C_{pe} . Paine kertoimet löytyvät myös eurokoodin kohdasta 7.2, aina kyseisen vyöhykekaavion yhteydestä. Paine kerrointaulukot esittävät yleensä kaksi eri kerrointa jokaiselle vyöhykkeelle. Toinen kerroin $C_{pe,10}$ kuvaa painetta tuulen kuormittaman pinta-alan ollessa 10 m^2 tai suurempi ja toinen $C_{pe,1}$ alan ollessa 1 m^2 . Mikäli halutaan selvittää paine kerroin pinta-alalle, joka on välillä $1-10 \text{ m}^2$, voidaan taulukon arvot interpoloida logaritmisesti kuvan 5 mukaan. (EN 1991-1-4, 7.2, 7.2.1).



Kuvaaja perustuu seuraavaan logaritmiseseen interpolaatioon:
välillä $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$ $C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \log_{10} A$

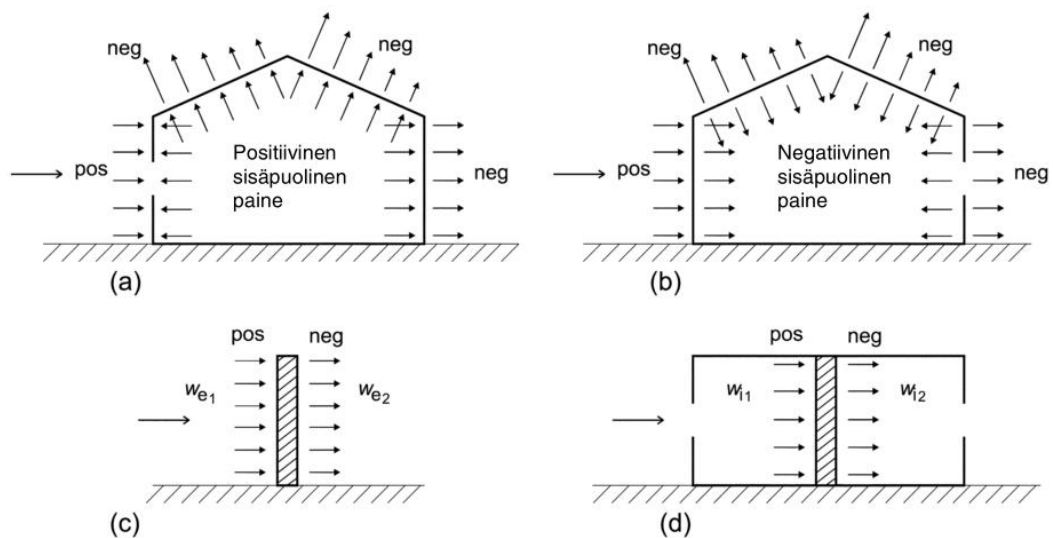
Kuva 5 Kuvaaja pinta-alan vaikutuksesta ulkopuoliseen paine kertoimeen

Taulukoista saatavien arvojen etumerkit, (+) tai (-), kuvastavat tuulesta syntyvän paineen suuntaa. (+)- merkki kertoo tuulen aiheuttavan pintaa kohti olevaa painetta ja (-)- merkki puolestaan kertoo tuulen aiheuttavan pinnasta pois päin olevaa imua. (EN 1991-1-4, 5.2, (3)).

Jos laskennan tarkoituksena on selvittää koko rakennukseen vaikuttava tuulivoima perustuksia tai tuulta vastaan jäykistäviä rakenteita varten, saadaan tuulikuormat eri vyöhykkeille laskettua kertomalla aiemmin määritetty tuulen nopeuspaine $q_p(z)$ kullekin vyöhykkeelle määritetyllä C_{pe} -kertoimella. Tämän jälkeen eri vyöhykkeiden

tuulensuuntaiset komponentit lasketaan yhteen etumerkit asianmukaisesti huomioituna ja kerrotaan rakennekertoimella $c_s c_d$. Tuulensuuntaisia komponentteja laskiessa on huomattava, että kattoihin kohdistuvat paine- tai imuvoimat oletetaan kohtisuoriksi pintaan nähden. Tämän johdosta on syytä laskea kaikkien tuulensuuntaisten vaakakomponenttien ennen koko rakennuksen kokonaistuulivoiman määrittämistä.

Eurokoodin mukaan myös sisäpuolista painetta w_i on pidettävä ulkopuolisen paineen w_e kanssa yhtäaikaisesti vaikuttavana. Sisäpuolisen painekertoimen C_{pi} avulla laskettavan sisäpuolisen paineen resultantti on kuitenkin kokonaistuulivoimaa tarkastellessa 0, sillä sen oletetaan vaikuttavan jokaiseen seinäpintaan tasaisesti. Tämä aiheuttaa sen, että vastakkaisen seinien sisäiset paineet kumoavat toisensa ja voimaresultantin arvoksi tulee siis nolla. C_{pi} :n määrittämisestä kerrotaan lisää tässä raportissa jäljempänä. Kuva 6 havainnollistaa rakennuksessa esiintyvien paineiden suuntaa.



Kuva 6 Rakennuksissa esiintyvien paineiden suunnat (EN 1991-1-4, kuva 5.1)

3.4.1 Kitkavoima F_{fr}

Kokonaistuulivoimaan on otettava huomioon myös kitkavoima F_{fr} , jota voi syntyä merkittävästi rakennuksen tuulensuuntaisille pinnoille rakennuksen ollessa pinta-alaltaan suuri korkeuteensa nähden. Kitkavoiman suuruuteen vaikuttaa myös ulkopinnan karheus, jonka perusteella eurokoodi antaa eri kitkakertoimia C_{fr} , eri tyyppisille pintamateriaaleille. Kitkakertoimet esitetään eurokoodin kohdassa 7.5. Eurokoodi määrittelee tilanteen, jolloin kitkavoimia ei tarvitse huomioida, näin:

Tuulesta syntyvän kitkan vaikutukset pintaan voidaan jättää huomiotta, kun kaikkien tuulen suuntaisten (tai lähes tuulen suuntaisten) pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien (tuulenpuoleisten ja suojanpuoleisten) ulkopintojen kokonaisala.

Jos kitkavoima tulee ottaa huomioon laskettavassa tapauksessa, sen vaikutuspinta-ala A_{fr} määritellään eurokoodissa näin:

Kitkakuormat asetetaan vaikuttamaan tuulen suuntaisille ulkopintojen osille, joiden etureuna on tuulenpuoleisesta räystäästä tai tuulenpuoleisista nurkista etäisyydellä, joka on pienempi arvoista $2b$ tai $4h$.

Lainauksessa esiintyvä kirjain b symboloi tuulta vasten kohtisuoran seinäosan leveyttä ja h koko rakennuksen korkeutta.

3.4.2 Kokonaistuulivoima pintapaineiden avulla

Pintapaineiden avulla laskettuna rakennuksen kokonaistuulivoimaksi $F_{w,k}$ saadaan

$$F_{w,k} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{pinnat}} w_e \cdot A_{ref} + F_{fr}$$

[3]*

jossa

$F_{w,k}$ rakennuksen kokonaistuulivoima

$c_s c_d$ rakennekerroin

w_e ulkopuolinen yksittäisen vyöhykkeen tuulenpaine, joka saadaan kaavasta $w_e = C_{pe} \cdot q_p(z)$

A_{ref} yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutuspinta-ala

F_{fr} kitkavoima

3.5 Tuulikuorman laskenta yksittäisille rakenneosille

Mikäli laskennan on tarkoitus tuottaa tuulikuorma yksittäiselle rakenneosalle, kuten esimerkiksi ulkoseinätolpalle tai ulkoverhouksen kiinnikkeelle, on eurokoodin mukaan ulkopuolisen painekertoimen lisäksi huomioitava sisäinen painekerroin C_{pi} . Tällöin rakenteelle lasketaan nettopainekerroin $C_{p,net}$, joka saadaan ulkoisen C_{pe} ja sisäisen painekertoimen C_{pi} erotuksesta, kun etumerkit otetaan huomioon asianmukaisesti. Tämä merkitsee sitä, että sisäpuolinen paine voi joko lisätä tai vähentää tuulikuormaa sen vaikutusvyöhykkeellä. (EN 1991-1-4, 5.1(1) ja 5.2(3)).

*kaava on johdettu standardin EN 1991-1-4 kaavoista 5.5 ja 5.7

3.5.1 Sisäpuolinen painekerroin

Sisäinen paine aiheutuu rakennuksen ulkopinnoissa olevien aukkojen ja ilmapuotojen takia. Tällöin tuuli tunkeutuu aukkojen kautta rakennuksen sisään tai sisältä ulos. Riippuen rakennuksen aukkosuhteesta sisäpuolinen paine voi olla joko (-)- tai (+)-merkkistä.

Sisäpuolisen painekertoimen C_{pi} laskenta esitetään eurokoodin kohdassa 7.2.9. Ensin on tarkistettava, onko rakennuksessa määräävää sivua. Ohjeen mukaan seinää tai kattoa pidetään määräävänä, kun kyseisellä sivulla olevien aukkojen pinta-ala on vähintään kaksinkertainen tarkasteltavan rakennuksen muilla sivuilla yhteensä olevien aukkojen ja ilmapuotojen alaan verrattuna. Mikäli rakennuksessa on määräävä sivu, sisäpuolinen painekerroin lasketaan kaavan 4 tai 5 avulla.

Seuraavat kaavat ja määritelmät esitetään eurokoodin kohdassa 7.2.9:

Kun määrävällä sivulla olevien aukkojen pinta-ala on kaksinkertainen muilla sivuilla yhteensä olevien aukkojen alaan verrattuna, niin:

$$C_{pi} = 0,75 \cdot C_{pe} \quad [4]^*$$

*kaava on standardista EN 1991-1-4, kaava 7.1

Kun määrävällä sivulla olevien aukkojen pinta-ala on vähintään kolminkertainen muilla sivuilla yhteensä olevien aukkojen alaan verrattuna, niin:

$$C_{pi} = 0,95 \cdot C_{pe} \quad [5]**$$

*kaava on standardista EN 1991-1-4, kaava 7.2

joissa C_{pe} on ulkopuolisen paineen kertoimen arvo määrävällä sivulla olevien aukkojen kohdalla.

*kaava on standardista 1991-1-4, kaava 7.1

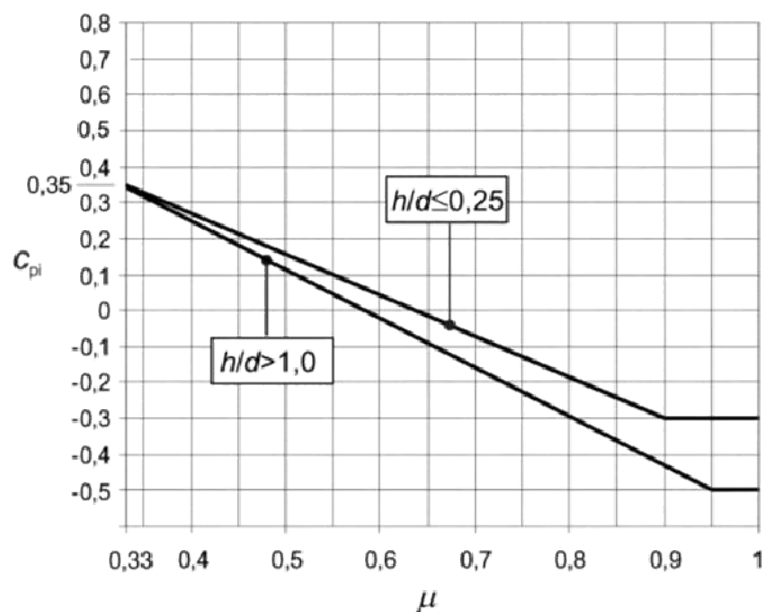
** kaava on standardista 1991-1-4, kaava 7.2

Jos rakennuksessa ei ole määräävää sivua, eli aukkojen oletetaan olevan likimain tasaisesti jakautuneita ympäri rakennusta, voidaan C_{pi} määrittää laskemalla aukkosuhde kaavalla 6. Kaavaan sijoitetaan niiden aukkojen pinta-alojen summa, jotka sijaitsevat vyöhykkeissä, joiden ulkopuolinen painekerroin on pienempi kuin nolla. Täten saatu summa jaetaan kaikkien aukkojen yhteispinta-alalla. Tulokseksi saadaan aukkosuhde μ , jonka perusteella voidaan katsoa C_{pi} kuvasta 7. Lisäksi on laskettava rakennuksen korkeuden suhde tuulensuuntaisen sivun pituuteen, jotta voidaan valita sisäpuolisen painekertoimen arvo oikealta käyrältä. Kun tuulikuormia tutkitaan useammasta kuin yhdestä tuulensuunnasta on sisäinen painekerroin muistettava laskea erikseen jokaiselle eri tuulensuunnalle. (EN 1991-1-4, 7.2.9(6)).

[6]*

$$\mu = \frac{\Sigma \text{niiden aukkojen pinta - ala, joiden kohdalla } c_{pe} < 0}{\Sigma \text{kaikkien aukkojen pinta - ala}}$$

jossa

 μ aukkosuhde

Kuva 7 Sisäpuolisten painekertoimien kuvaajat (EN 1991-1-4, kuva 7.13)

* kaava on standardista 1991-1-4, kaava 7.3

3.5.2 Nettopaine ja neliötuulikuorma

Kun C_{pe} ja C_{pi} on määritetty voidaan laskea nettopainekerroin $C_{p,net}$, joka siis saadaan lausekkeesta:

$$C_{p,net} = C_{pe} - C_{pi} \quad [7]$$

Tarkasteltavalle rakenteelle kohdistuva tuulikuorma voidaan nyt laskea kertomalla puuskanopeuspaine $q_p(z)$ nettopaine kertoimella $C_{p,net}$. Mikäli kyseinen rakenne ei sijaitse rakennuksen harjan korkeudella, voidaan se huomioida määrittäessä puuskanopeuspainetta. Tällöin korkeutena käytetään haluttua tuulikuorman tarkastelukorkeutta.

Yksittäiselle rakenneosalle kohdistuvaksi tuulikuormaksi $q_{w,k}$ saadaan

$$q_{w,k} = C_{p,net} \cdot q_p(z_e) \quad [8]$$

jossa

$q_{w,k}$	laskennassa käytettävä tuulen ominaiskuorma [kN/m^2]
$C_{p,net}$	tuulen nettopaine kerroin
$q_p(z_e)$	puuskanopeuspaine korkeudella z [m]

4 Laskentaohjelman esittely

4.1 Perustietoja ohjelmasta

Tämä opinnäytetyönä tehty tuulikuormien laskentaohjelma on tarkoitettu käytettäväksi tavanomaisten talonrakenteiden suunnittelussa. Sen avulla voidaan melko helposti määrittää rakennukseen kohdistuvat kokonaistuulivoimat sekä paikalliset pintapaineet. Tavoitteena oli kehittää käyttöominaisuuksiltaan mahdollisimman selkeä ja yksinkertainen ohjelma, jonka tulokset olisivat tiiviisti koottuna.

Ohjelma on Excel-pohjainen ja täten käyttää Excelin taulukkolaskentaominaisuuksia tuloksia laskiessaan ja vertaillessaan. Laskenta tapahtuu periaatteessa neljässä eri päävaiheessa, joista ensimmäisessä määritellään tarkasteltavan mitoitusilanteen lähtöarvot. Tämä on ainut laskentaan vaikuttava asia, jonka käyttäjä joutuu itse tekemään käytön aikana. Toisessa vaiheessa ohjelma laskee rakennukseen kohdistuvan kokonaistuulivoiman voimakertoimen C_f avulla. Kolmas vaihe määrittää tarkasteltavan rakennuksen ulkoiset painekertoimet ja niiden vyöhykkeet. Neljäs vaihe kokoaa suunnittelussa tarvittavat tulokset yhdelle välilehdelle tarkastelua tai tulostamista varten. Kaikki ohjelman tuottamat tulokset ovat eurokoodin mukaisia ominaiskuormia, eli lopullista rakennesuunnittelua tehtäessä niihin on muistettava käyttää tilanteen edellyttämiä varmuuskertoimia.

4.2 Käytön rajoitukset

Laskentaohjelma soveltuu pohjanmuodoltaan suorakaiteen tai lähes suorakaiteen muotoisten rakennusten tuulikuormien määrittämiseen. Jos rakennuksen muoto poikkeaa huomattavasti edellämainitusta, jää tulosten käyttö suunnittelijan harkinnan varaan. Kattomuodon vaihtoehtoina ovat tasa-, pulpetti-, kuvetaite- ja harjakatto. Muihin kattomuotoihin ohjelman tuloksia ei voida suoraan soveltaa.

Mikäli rakennusalueen maanpinnan keskimääräinen kaltevuus on enemmän kuin 3 astetta, eivät ohjelman antamat tulokset päde. Eurokoodin mukaan tätä suurempi

kaltevuus aiheuttaa tuulennopeuden modifioidun perusarvon v_m muutoksia (EN 1991-1-4, 4.3.1). Tätä laskentaohjelma ei kuitenkaan pysty huomioimaan, joten tulosten oikeellisuus rajoittuu tasaisille maastoalueille. Tuloksia voidaan käyttää ainoastaan eurokoodin ja Suomen kansallisen liitteen mukaisten rakennelaskelmien yhteydessä.

4.3 Alkuarvot

Alkuarvot syötetään ohjelman etusivulle. Ensimmäisenä valitaan pudotusvalikosta rakennuspaikan maastoluokka. Maastoluokkia voidaan valita eurokoodin mukaisesti 0:sta 4:ään.

Seuraavaksi syötetään rakennuksen geometriatiedot: korkeus, sivumitat ja tarvittaessa kattokaltevuus. Sivumitoissa on huomioitava, kumpi on tuulta vastaan kohtisuora ja kumpi tuulensuuntainen mitta. Suurin korkeusmitta, jolla ohjelma laskee on 100 metriä, sillä eurokoodi ei anna laskentaohjeita tämän korkeammille rakennuksille. Mikäli halutaan selvittää tuulenpaine yksittäiselle rakenneosalle, joka ei sijaitse harjakorkeudella, syötetään kenttään haluttu tarkastelukorkeus. Kattokaltevuus syötetään asteina ja se voi olla välillä -45 ja 75 astetta. Jos kaltevuus on välillä -5 ja 5 astetta, käsitellään rakennus tasakattoisena. Kaltevuuden määrittämiseen on ohjelmassa apulaskuri, johon voidaan syöttää harjan korkeus räystäältä ja sitä vastaava vaakamitta tai vaihtoehtoisesti kattokaltevuuksissa usein käytetty kaltevuuden suhde murtolukumuodossa (esim. 1/2,5). Laskuri antaa kattokaltevuuden asteina, joka voidaan syöttää lähtöarvotietoihin. Laskuri aukeaa 'LASKE KALTEVUUS'-painikkeesta.

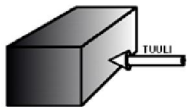
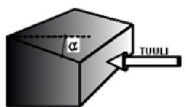
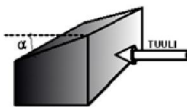
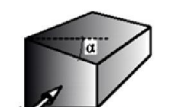
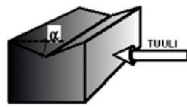
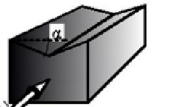
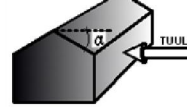
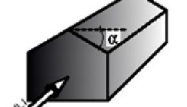
Tämän jälkeen syötetään rakennukseen syntyvän sisäisen paineen painekerroin. Jos halutaan selvittää kokonaistuulivoima $F_{w,k}$, voidaan arvoksi laittaa nolla. Jos määritetään kuormia yksittäisille rakenneosille, on sisäinen painekerroin määritettävä jokaiselle tuulensuunnalle erikseen. Tähän ohjelmassa on apuna erillinen laskuri, joka aukeaa 'LASKE PAINEKERROIN'-painikkeen alta. Laskuria voidaan käyttää mikäli rakennuksessa ei ole tässä raportissa aiemmin määriteltyä määräävää sivua (ks. kohta *Sisäpuolinen paine*). Siihen syötetään eri sivujen aukkopinta-alat tai vaihtoehtoisesti kaikkien ulkoseinien ilmanläpäisevyyden ollessa tasainen, voidaan syöttää seinäpinta-alat. Helpoimmillaan, jos rakennuksen kaikki ulkoseinät ovat tasakorkuisia ja

ilmanläpäisevyydeltään samanlaisia, riittää kun laskuriin syötetään seinien vaakamitat. Laskurin yhteydessä on havainnollistava kuva, jossa osoitetaan kirjaintunnuksin laskennassa tarvittavat seinät.

Ohjelma laskee sisäpuolisen painekertoimen C_{pi} eurokoodin mukaisesti verraten aukkosuhdetta μ korkeuden ja sivumitan suhdeluukuun h/d . Ohjelma käyttää h/d -arvona 0,25 tai 1,0, sen mukaan, kumpi on lähempänä rakennuksen oikeita, syötettyjä mittoja. Tämä johtuu siitä, että kyseisille arvoille on eurokoodissa annettu käyrät, joilla sisäpuolinen painekerroin voidaan selvittää. H/d -arvon ollessa 0,25:n ja 1,0:n välillä voidaan käyttää interpolointia, mutta tätä ohjelma ei tee. Erot ovat kuitenkin melko pieniä, aukkosuhteen ollessa muutenkin monissa tapauksissa arviointiin perustuvaa. Toki C_{pi} voidaan määrittää myös käsinlaskentana ja syöttää ohjelman lähtöarvotietoihin.

Seuraavaksi lähtötietoihin annetaan rakennekerroin $c_s c_d$. Kerroin määritetään eurokoodin kohdan 6 mukaisesti. Suositusarvona on 1,0, mutta ohjelmassa on taulukoitu joitakin yleisiä rakennusmuotojen $c_s c_d$ -kertoimia. Ne löytyvät painikkeen 'KATSO YLEISIMMÄT' alta. Taulukot perustuvat eurokoodin liitteen D kuviin D.1 ja D.2. Arvot on katsottu kuvista likimääräisesti, joten haluttaessa tarkempia arvoja voidaan tutkia em. kuvia tai kertoimen laskentaohjetta eurokoodin kohdasta 6.

Lähtöarvoihin valitaan tämän jälkeen kitkakertoimet seinä- ja kattopinnoille. Kitkakertoimien määritelmät löytyvät ohjelmasta 'KITKAKERTOIMIEN SELITYKSET'-painikkeen alta. Monissa mitoitustapauksissa kitkavoimaa ei tarvitse huomioida, mutta kertoimet kannattaa asettaa aina, sillä mikäli kitkavoima tulee huomioiduksi tarkasteltavassa tilanteessa, ohjelma pystyy määrittämään sen oikein. Ohjelma huomioi kitkan vaikutukset eurokoodin kohdan 5.3 (4) ja 7.5 mukaisesti. Nämä kohdat on selostettu tämän raportin luvussa *Kitkavoimat*.

RAKENNUSTEN TUULIKUORMAT			
Standardi EN 1991-1-4			
OHJE			
LÄHTÖTIEDOT			
ML	III Maastoluokka		
h	5 m Rakennuksen korkeus		
b	18 m Tuulta vasten kohtisuora leveys		
d	9 m Tuulensuuntainen leveys		
α	18,43° Kattokaltevuus		
C_{pi}	-0,03 Sisäpuolinen painekerroin		
C_{sCd}	1 Rakennekerroin		
C_{fr}	0,01 Seinään kohdistuvan kitkan vaikutuskerroin		
C_{fr}	0,03 Kattoon kohdistuvan kitkan vaikutuskerroin		
A	1 m ² Tuulen kuormittama pinta-ala		
Laske kaltevuus			
Laske painekerroin			
Katso yleisimmät			
Kitkakertoimien selitykset			
Laske kuormat	Laske kuormat	Laske kuormat	Laske kuormat
			
Tasakatto	Pulpettikatto	Pulpettikatto	Pulpettikatto
Laske kuormat	Laske kuormat	Laske kuormat	Laske kuormat
			
Kuvetaitekatto	Kuvetaitekatto	Harjakatto	Harjakatto

Kuva 8 Laskentaohjelman lähtötietosivu

Viimeinen ohjelmaan syötettävä lähtötieto on tuulen kuormittama pinta-ala. Syötetty arvo voi olla mikä tahansa positiivinen luku. Ohjelma kuitenkin muuttaa alan vastaamaan eurokoodin mukaisia kuormituspinta-aloja. Jos syötetty ala on pienempi tai yhtä suuri kuin 1 m², ohjelma tekee laskelmat käyttäen alana 1 m²:ä. Jos syötetty ala on suurempi tai yhtä suuri kuin 10 m², ohjelma käyttää alana 10 m²:ä. Jos taas syötetty ala on em. alojen välissä, ohjelma interpoloi pinta-alan koosta riippuvat ulkoisten painekertoimien muutokset kuvan 5 mukaisesti.

4.4 Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla

Ohjelma laskee kokonaistuulivoiman käyttäen pääasiassa RIL201-1-2008-kuormitusohjetta. Ohjeeseen on koottu tärkeimmät osat EN 1991-1-4 standardista sekä laskettu valmiiksi taulukoita ja käyrästä, joita standardissa ei ole. Ohjelma määrittää C_f -kertoimen RIL:n oppaasta saaduilla arvoilla, perustuen hoikkuuksiin 1, 3 ja 10 (RIL201-1-2008, taulukko 5.1, kuva 5.2S ja taulukko 5.2S). RIL:n taulukon 5.2S pohjalta on muodostettu yhtälöt sivusuhteen d/b muuttuessa. Näiden yhtälöiden ratkaisusta ohjelma valitsee tarkasteltavaa tapausta lähinnä olevan C_f -kertoimen.

Laskennassa tarvittava puuskanopeuspaine $q_p(z)$ lasketaan myös RIL:n ohjeesta löytyvillä, eri maastoluokkiin liittyvillä yhtälöillä (RIL-201-1-2008, Liite A). Yhtälöiden antamat arvot ovat yhtäpitäviä eurokoodin laskentatavan antamiin arvoihin, kun kyseessä on tasainen maasto ja käytetään Suomen kansallista liitettä.

Kokonaistuulivoiman laskenta suoritetaan metrin korkuisina kaistoina, joille ohjelma määrittää oman puuskanopeuspaineen. Lopullinen kokonaisvoima on näiden kaistojen tuulikuormien summa kerrottuna voimakertoimella C_f . Kokonaistuulivoiman vaikutusresultantin korkeuden R , ohjelma laskee puuskanopeuspaineen käyrän painopisteen avulla. Vaikutusresultantin korkeus on oleellinen tieto määritettäessä perustuksille tulevaa tuulen aiheuttamaa momenttia, varsinkin kun kyseessä on korkea rakennus.

Voimakertoimen avulla laskettavan kokonaistuulivoiman laskelmia voidaan tarkastella 'kokonaistuulivoima'-välilehdellä.

4.5 Paine kertoimien laskenta

Painekertoimet ja niiden vyöhykkeiden mitat ohjelma laskee eurokoodin mukaisesti. Pystyseinille määritetään mitat rakennuksen mittatietojen pohjalta. Tuulta vasten kohtisuora leveys sekä korkeus vaikuttavat laskettavaan suureeseen e , jolla sivumittoja

kerrotaan eurokoodin kuvan 7.5 osoittamalla tavalla. Paine kertoimet seinille määräytyvät kuormituspinta-alan mukaan, ja arvot vastaavat eurokoodin taulukkoa 7.1.

Myös kattopintojen osalta ohjelma laskee vyöhykkeiden vaakamitat sekä niiden paine kertoimet seinävyöhykkeiden tavoin. Eurokoodi esittää erityyppisille katoille erilaiset tavat laskea vyöhykkeiden koot sekä paine kertoimet, joita ohjelma käyttää laskennassa. Jos paine kertoimien laskennan välituloksia, paine kerrointaulukkoita tai vyöhykejakoperusteita halutaan tutkia, ne löytyvät ohjelman 'Paine kertoimet'-välilehdeltä.

Paine kertoimet

z= 5 m tarkastelukorkeus
 b= 18 m leveys kohtisuoraan tuulta vasten
 d= 9 m tuulensuuntainen leveys
 alpha= 18.43 ° kattokallisuus
 A= 1 m² tuulen kuormittama pinta-ala (1...10m²)
 (interpoloidaan EN 1991-1-4 kuva 7.2 [s.54] mukaan)
 Cpi= -0,03 Sisäinen paine kerroin
 käytettävä kuormitusala= 1 m² (1...10m²)

SEINÄT

e= 10 m min= b= 18
 2h= 10

Kaistojen leveydet

	e < d	e >= d	e >= 5d
A	2	2	9
B	0	7	
C	-1		

Tämä tapaus:

	leveys [m]	Ala [m ²]
A	2	10
B	7	36
C	0	0

Ulkoiset paine kertoimet kaistoille Cpe:

h/d=	0,585566	1	<= 0,25
A	-1,4	-1,4	-1,4
B	-1,1	-1,1	-1,1
C	-0,5	-0,5	-0,5
D	1	1	1
E	-0,7	-0,5	-0,3

Kuva 9 Näkymä paine kertoimien laskentavälilehdeltä

4.6 Kitkavoiman laskenta

Kitkavoimat huomioidaan laskennassa tämän raportin kohdassa *Kitkavoima* selostetulla tavalla. Käyttäjän tarvitsee ainoastaan valita lähtöarvoihin kitkakertoimet vastaamaan rakennuksen ulkopintojen karheutta.

Eurokoodin määrittelemä tilanne, jolloin kitkavoima on huomioitava, on selitetty hieman ympärilyöreästi (EN 1991-1-4, 5.3 (4). Määritelmässä puhutaan tuulen suuntaisista tai lähes tuulensuuntaisista pinnoista. Tämän johdosta myös ohjelma tekee laskelman perustuen rakennuksen vaakamittoihin, huomioimatta kattokaltevuuksista johtuvia pinta-alojen kasvua tai pienentymistä. Eli määritelmän täyttymistä tarkastellaan sillä oletuksella, että katto sekä tuulensuuntaiset seinät ovat tuulensuuntaisia pinta-aloja ja kohtisuoraan tuulta vasten olevat seinät ovat tuulenvastaisia pinta-aloja.

Jos kitkavoima tulee otettavaksi huomioon, ohjelma laskee kitkan vaikutuspinta-alat tarkasti huomioiden rakennuksen todellisen muodon. Oletuksena jälleen on, että katto sekä tuulensuuntaiset seinät ovat tuulensuuntaisia pinta-aloja ja kohtisuoraan tuulta vasten olevat seinät ovat tuulenvastaisia pinta-aloja.

Kitkavoima lisätään tulossivulla painekertoimien avulla laskettuun kokonaistuulivoimaan. Kuten aiemmin on todettu, kitkavoima saa monessa laskentatapauksessa arvon 0, mutta pitkänomaisissa ja matalissa rakennuksissa se voi olla merkittävä.

4.7 Laskennan tulokset

Tulokset tarkasteltavasta tapauksesta aukeavat lähtötietosivulta 'Laske kuormat'-painikkeen alta. Käyttäjä valitsee kuvien perusteella tutkittavana oleva tuulensuunnan ja rakennusmuodon.

Ohjelmaan aukeaa tulossivu, joka on muotoiltu asikirjatyylisiin, suoraan tulostettavaksi A4- kokoiselle paperille. Ensimmäiseksi tulossivulle voidaan tarvittaessa kirjoittaa

tarkasteltavan rakennuksen kohdetiedot. Tulosten alussa näkyvät myös käyttäjän määrittelemät lähtötiedot sekä tuulen kuormitus-suunta. Sivun yläreunaan voidaan lisätä yrityksen logo.

Varsinaiset laskennasta saatavat tulokset esitetään seuraavana. Ensin tulokset kertovat voimakertoimen avulla lasketun kokonaistuulivoiman sekä sen resultantin korkeuden maanpinnasta mitattuna. Voimakertoimen kautta laskettuna esitetään myös tuulenpaine neliometriä kohden sekä paineen vaikutuspinta-ala.

Seuraavana tuloksissa ovat pintapaineet sekä niiden vyöhykejako. Heti pintapainetulosten alussa näkyy tuulen puuskanopeuspaine, jota käytetään kyseisen tilanteen laskennassa. Tämän alla ovat seinien ja katon paineet vyöhykkeittäin. Kattopaineiden yhteydessä esitetään myös kattoon kohdistuva kokonaisvaakavoima, jota käytetään koko rakennuksen tuulivoiman laskennassa.

Sivun lopussa näkyy kitkavoiman arvo katolle ja seinille. Viimeisenä tulossivulla näytetään pintapaineiden avulla laskettu rakennuksen kokonaistuulivoima. Tähän kokonaisvoimaan ohjelma laskee rakennuksen tuulta vasten kohtisuorien seinien tuulikuormat, katon vaakasuuntaiset tuulikuormat tapauksessa, jossa tuuli on poikkisuuntainen harjaan nähden sekä katon ja seinien kitkavoimat. Ohjelma laskee katon kokonaisvaakakuorman vaarallisimman tilanteen mukaan, silloin kun lappeille on olemassa erimerkkisiä pintapaineita. Kaikkien laskentatulosten yhteydessä on tulkintaa helpottavaksi tarkoitettu kuva.

Microsoft Excel - Tuulikuorma v 1.3 [Compatibility Mode]

1 Tuulikuormalaskelma EN 1991-1-4

2 Kohde

3

4 Suunnittelija

5

6

ML	3
h	5 m
b	18 m
d	9 m
α	18,43 °
C_{pi}	-0,03

7

8

9

10

11

12

13

14

15 Voimakerroin

16

Kokonaistuulivoima $F_{w,k}$	43,53	kN
Tuulivoiman resultantin korkeus R	2,5	m
Tuulikuorma $q_{w,k}$	0,48	kN/m ²
Vaikutuspinta-ala A_{ref}	90,0	m ²

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30 Pintapaineet

31

32 Nopeuspaine q_p 0,353036689 kN/m²

33

34

35

36

Seinat			
Alue	$q_{w,k}$ [kN/m ²]	Leveys [m]	A_{ref} [m ²]
A	-0,48	2,0	
B	-0,38	7,0	
C	0,00	0,0	
D	0,36	18,0	63,0
E	-0,17	18,0	63,0

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623

624

625

626

627

628

629

630

631

632

633

634

635

636

637

638

639

640

641

642

643

644

645

646

647

648

649

650

651

652

653

654

655

656

657

658

659

660

661

662

663

664

665

666

667

668

669

670

671

672

673

674

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

771

772

773

774

775

776

777

778

779

780

781

782

783

784

785

786

787

788

789

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803

804

805

806

807

808

809

810

811

812

813

814

815

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

838

839

840

841

842

843

844

845

846

847

848

849

850

851

852

853

854

855

856

857

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

887

888

889

890

891

892

893

894

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

90

5 Pohdinta

5.1 Tuulikuormien mallintamisen hyödyt ja ongelmat

Tuulikuormat ovat yleisesti ottaen aika hankalia mallintaa todenmukaisesti. Varmaankin tämän takia eurokoodiin on otettu hyvin tarkkaa tietoa tuulen vaikutuksista rakennuksiin. Se antaa suunnittelijoille mahdollisuuden tietyissä tilanteissa mitoittaa tuulta vastaan jäykistäviä rakenteita kevyemmiksi, mutta huomioi myös yllättäviä paineiden huippuja. Tämä aiheuttaa kuitenkin niin paljon erilaisia tuulenpaineita ympäri rakennusta, että niitä on käytännön suunnittelussa vaikeaa, ellei jopa mahdotonta hyödyntää järkevästi. Ehkä juuri siitä syystä kattavia eurokoodinmukaisia esimerkkilaskelmia on ollut hankala löytää. Useimmiten kattojen tuulikuormat lasketaan hyvinkin yksinkertaistettujen periaatteiden mukaan, eivätkä tulokset edes välttämättä eroa paljoa tarkasti lasketuista arvoista. Tulosten yhteneväisyydet puolestaan eivät houkuta suunnittelijoita tutkimaan tuulikuormia tarkemmin.

Tuulikuormat olisi kuitenkin syytä selvittää tarkasti rakennesuunnittelua tehtäessä, jotta voidaan välttyä turhilta materiaali- ja työmenekeiltä rakennusvaiheessa ja toisaalta rakennusten turvallisuustaso saataisiin pidettyä määräysten mukaisena. Jos yksinkertaistuksia halutaan tehdä, ne voidaan tällöin tehdä tarkkojen kuormatietojen pohjalta todellisuutta paremmin vastaaviksi.

5.2 Laskentatulosten tulkinta

Mielenkiintoista eurokoodinmukaisessa tuulikuormalaskennassa on mielestäni sen antamat kaksi erilaista laskutapaa. Kuten ohjelmasta saatavista tuloksista huomataan, eri tavoilla saatavat kuormat saattavat poiketa huomattavasti toisistaan, vaikka todellisuudessa kuormat ovat täsmälleen samat lasketavasta huolimatta. Osittain tämä johtuu selvästi ohjelman laskentatavasta, joka laskee kokonaistuulivoiman C_f - kertoimen avulla käyttäen puuskanopeuspaineena metrin korkuisille kaistoille määritettyä painetta, kun taas painekertoimien avulla laskettava kokonaistuulivoima lasketaan käyttäen maksimipuuskanopeuspainetta. Tämä aiheuttaa suuriakin eroja korkeissa rakennuksissa, mutta kaikkia eroja se ei kuitenkaan selitä. Huomion arvoista

on myös, että mitä lähempänä rakennuksen koko ja muoto ovat yleisesti käytössä olevia kerrostalo-, halli- tai omakotitalorakennustyyppisiä, sitä lähempänä toisiaan ovat myös eri laskutavoilla saatavat kuormitukset.

Tärkein asia tuloksia tarkasteltaessa on se, että tiedetään mihin tarkoitukseen laskettua tuulikuormaa aiotaan käyttää. Käyttötarkoituksen perusteella voidaan valita eri tuloksista kulloinkin käytettävä tuulikuorma.

Lähteet

Eurokoodi help desk. 2011. Ajankohtaista- tiedote.

<http://www.eurocodes.fi/index.htm> [Luettu 1.4.2011]

Heinisuo Markku. 2007. TTY koulutusaineisto: Tuulikuormat (EN 1991-1-4).

www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=95839&lan=fi [Luettu 28.3.2011]

RIL 201-1-2008 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. 2008.

Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2005. Standardi SFS-EN 1991-1-4 Eurokoodi 1:

Rakenteiden kuormat, osa 1-4: Tuulikuormat.

Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Ympäristöministeriö. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4 Eurokoodi

1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-4: Tuulikuormat.

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=377177&lan=FI#a7>