WÄRTSILÄN KONEPAJA-ALUEEN YLEIS-SUUNNITELMA

Tuulisuusselvitys

31.3.2023

Laadunhallinta

Versio/muutokset	Versio 1	Muutos 1	Muutos 2	Muutos 3
Huomautukset		lopullinen versio		
Päiväys	7.12.2022	31.3.2023		
Laatija	Risto Kiviluoma	Risto Kiviluoma		
Allekirjoitus				
Tarkastanut				
Allekirjoitus				
Hyväksynyt				
Allekirjoitus				
Raportin numero				
Tiedostotunnus				

Wärtsilän konepaja-alueen yleissuunnitelma

Tuulisuusselvitys

31.3.2023

Tilaaja

Wärtsilä Finland Oy – Marine Solutions
Järvikatu 2-4
PL 244
651001 Vaasa

Yhdyshenkilö: Thomas Hollfast

Konsultti

WSP
Pasilan asema-aukio 1
00520 Helsinki

Puh. 0207 864 11
www.wsp.com/FI-fi

Rekisteröity osoite

WSP Finland Oy
FI08754165
Pasilan asema-aukio 1
00520 Helsinki

Konsultin yhdyshenkilö

Risto Kiviluoma

Sisällys

1 Johdanto 5
2 Tuulisuusselvitys 8
2.1 Tarkasteltava suunnitelma 8
2.2 Analyysimenetelmä ja määrittelyt 9
2.3 Tulokset 18
2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus 18
2.3.2 Numeerinen virtauslaskenta 23
2.3.3 Tuulisuus tarkastelupisteissä 27
3 Suunnitelmamuutosten vaikutus 35
4 Tulosten ohjeellinen tulkinta 38
Lähdeluettelo 41
Liite 1: Tuulisuuden määrittämisen yleisperiaate 42
Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta 49
Liite 3: Maaston rosoisuuden huomioon ottaminen 55
Liite 4: Maaston rosoisuuden muutosten analyysi 60
Liite 5: Virtauslaskennan tuloskartat 62

1 Johdanto

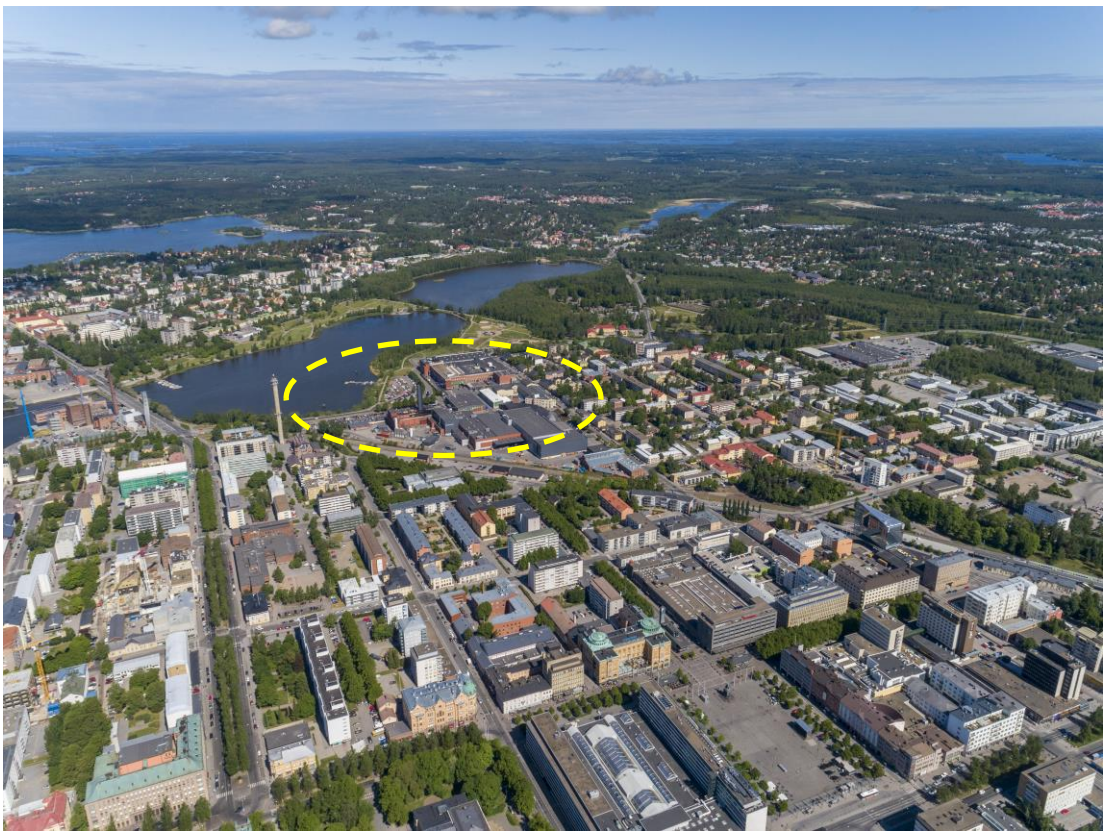
Tässä raportissa esitetään tuulisuusselvitys Vaasassa sijaitsevan Wärtsilän konepaja-alueen yleissuunnitelmalle (kuva 1). Tuulisuuden kannalta kohde sijaitsee merenlahtien äärellä ja sisältää korkeaa rakentamista. Korkeiden rakennusten osalta se poikkeaa Vaasan nykytilaisesta rakennuskannasta. Korkeaan rakentamisen liittyen yksittäiset kaupungit ovat laatineet omaa ohjeistusta tuulisuusvaikutusten selvittämisestä. Suomessa tuulisuus on mainittu ainakin Espoon korkean rakentamisen ohjeessa [1].

Tämä raportti on tarkoitettu toimimaan kaavakäsittelyn ja suunnittelun tueksi.

Tuulisuuden yleinen määritysperiaate ja tuulisuuteen liittyviä kriteerejä on käsitelty tarkemmin liitteissä 1 ja 2.

Kuva 1: Raportin kohde – Wärtsilän konepaja-alueen yleissuunnitelma. Havainnekuva Arkkitehtitoimisto Helamaa & Heiskanen Oy.

Kohteen alue nykytilassa (kuva 2) sisältää useampia suurikokoisia teollisuusrakennuksia, jotka osaltaan toimivat tuulensuojana viereisille asuinrakennuksille.



Kuva 2: Ilmakuvia kohdealueesta (kuvat Wärtsilä Oyj).

Nykyisessä kansainvälisessä käytännössä tuulisuusselvityksiä tehdään pääosin viidellä eri tarkkuustasolla:

1. ”työpöytätutkimuksella” (*Desk Study*) kokeneen tuulitekniikka-asiantuntija toimesta
2. työpöytätutkimuksella täydennettynä numeerisella virtauslaskennalla (CFD)
3. numeerisella virtauslaskennalla
4. tuulitunnelikokeilla
5. tuulitunnelikokeilla ja numeerisella virtauslaskennalla rinnakkain.

Tarkkuustasot eroavat toisistaan siinä, millä menetelmillä ja missä laajuudessa tarkastelupisteiden paikallinen tuulennopeus määritetään kohdealueen reunan korkeammalla vaikuttavasta referenssituulennopeudesta (kertoimet k_m ja k_g, vrt. liite 1). Samoin eroja on siinä, miten tarkastelupisteen tuulennopeuden hetkelliset huippuarvot, eli tuulen puuskanopeudet (kerroin k_g), pystytään määrittämään.

Kertoimia k_m ja k_g voidaan myös käydä mittaamassa paikan päällä ja vastaavista kohteista.

Tuulitunnelikokeita ja CFD analyysejä koskevat omat laatukriteerinsä, joiden ymmärtämien ja huomioon ottaminen vaatii tekijältään riittävää tuulitekniikka-asiantuntemusta.

Tuulitilastojen käsittely on kaikkien tarkkuustasojen analyyseissä periaatteeltaan sama. Samoin kohdealueen referenssituulennopeuksien laskenta tuulen suunnan sektoreittain tehdään maaston rosoisuuden muutoksen analyysiin vakiintuneilla menetelmillä, joita on käsitelty tarkemmin liitteessä 3.

Tämän raportin tuulisuuselvityksessä käytetty tarkkuustaso on 4. Konsultti on käyttänyt menetelmiä 1- 4 noin 40 kohteessa merenrantakaupungeissa Helsinki, Espoo, Oulu ja Turku. Nämä toimivat viiteaineistona esitetyssä tulosten ohjeellisessa tulkinnassa.

2 Tuulisuusselvitys

2.1 Tarkasteltava suunnitelma

Kohteen suunnitelma on esitetty kuvassa 3.

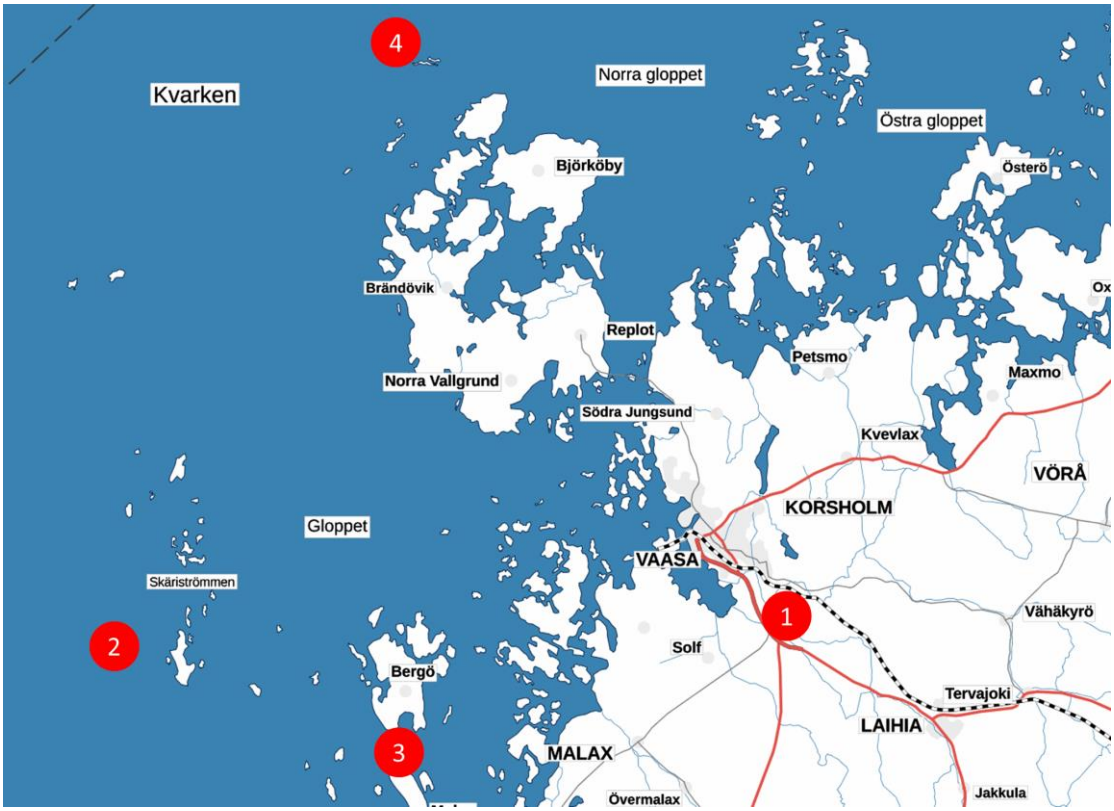
Kuva 3: Yleissuunnitelmaluonnos (kuva muokattu Arkkitehtitoimisto Helamaa & Heiskanen Oy aineistosta).

2.2 Analyysimenetelmä ja määrittelyt

Käytetty analyysimenetelmä perustuu numeeriseen virtauslaskentaan RANS-menetelmällä, jossa tuulen keskinopeudet määritetään periaatteessa tarkasti, ja jossa tuulen puuskanopeuksia on arvioitu käytetyn turbulenssimallin tulosten kautta (liite 2). Tulosten luotettavuutta ja suuruusluokkaa on arvioitu vertaamalla niitä Konsultin muiden kohteiden tuulitunnelikoetuloksiin.

Menetelmässä määritetään lähtötiedoksi kohdealueen perustuulisuus. Se lasketaan rosoisuuden muutosten analyysin perusteella paikallisten sääasemien tuulitilastoista. Tällä analyysissä otetaan huomioon tuulitilaston mittauspisteen ja kohdealueen sijaintierosta johtuvat kysymykset sekä tuulitilaston mittauspisteen mahdolliset tuulivarjostukset.

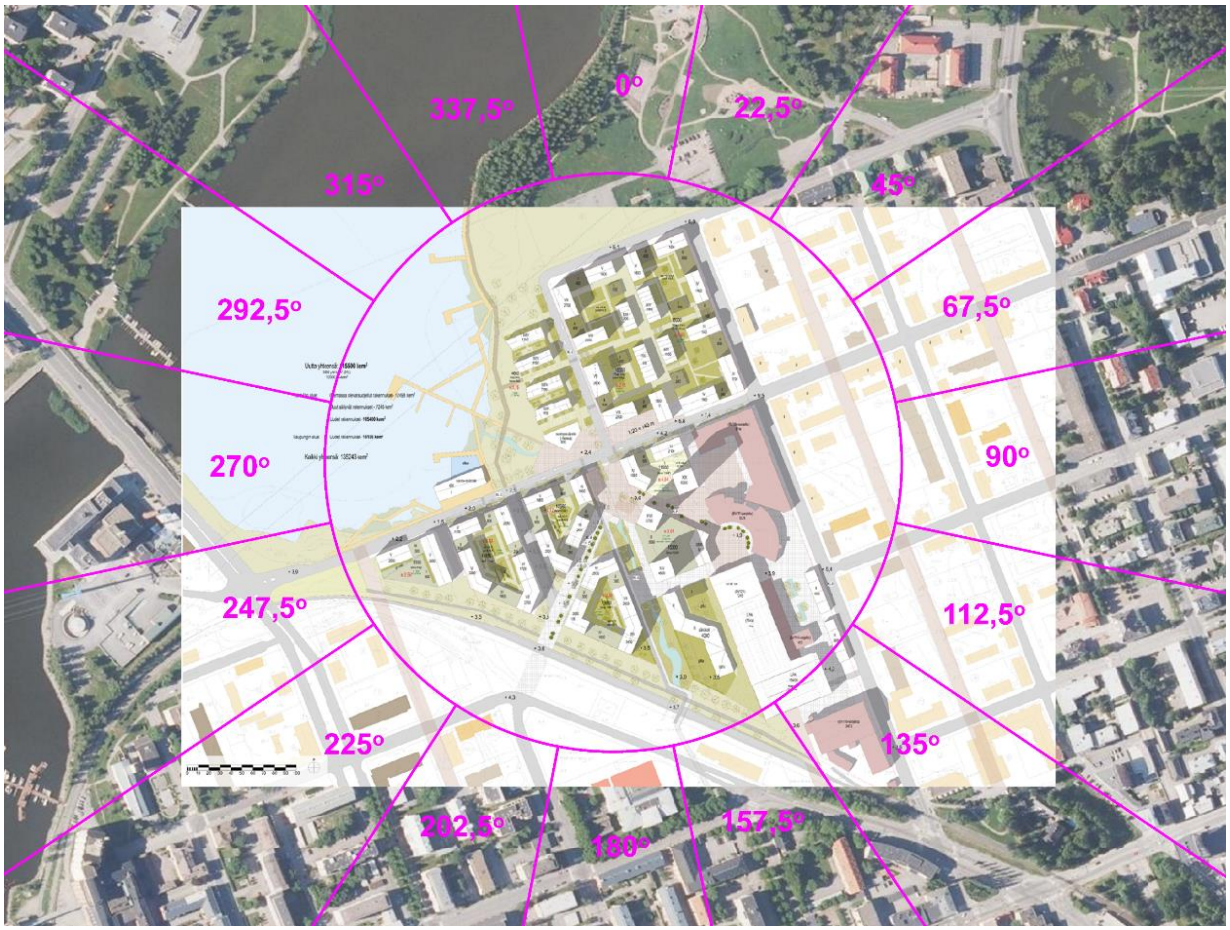
Käytetyt tuulitilastot on esitetty kuvassa 4. Vaasan lentokentän tulitilasto kattaa tarkastelukaudella mittaustulokset, jotka on tallennettu 20 min tai 30 min välein, ja jotka ovat olettavasti ilmailuliikenteen mittauksissa käytettäviä 1 min ja 2 min aikakeskiarvoja. Ilmatieteenlaitoksen tuulitilastot ovat tarkastelukaudella jatkuvasti mitattuja tavanomaisia 10 min aikakeskiarvoja.



1. Vaasan lentokentän ilmailuliikenteen mittaustulokset 2010…2021
2. Maalahti Strömmingsbådan 2010…2011 (Ilmatieteenlaitoksen avoin data)
3. Korsnäs Bredskäret 2012...2019 (Ilmatieteenlaitoksen avoin data)
4. Mustasaari Valassaaret 2007…2019 (Ilmatieteenlaitoksen avoin data)

Kuva 4: Analyysissä käytetyt tuulitilastot. Kuva muokattu Maanmittauslaitoksen aineistosta.

Tuulisuuden numeroarvojen määrittämistä varten tuulen suunnat on jaettu sektoreihin. Näiden suuntakulmat on esitetty kuvassa 5 (sektori 0º tarkoittaa pohjoistuulta, 90º itätuulta jne.). Maaston tyyppiä kohteen ympäristössä on havainnollistettu kuvissa 6 ja 7.

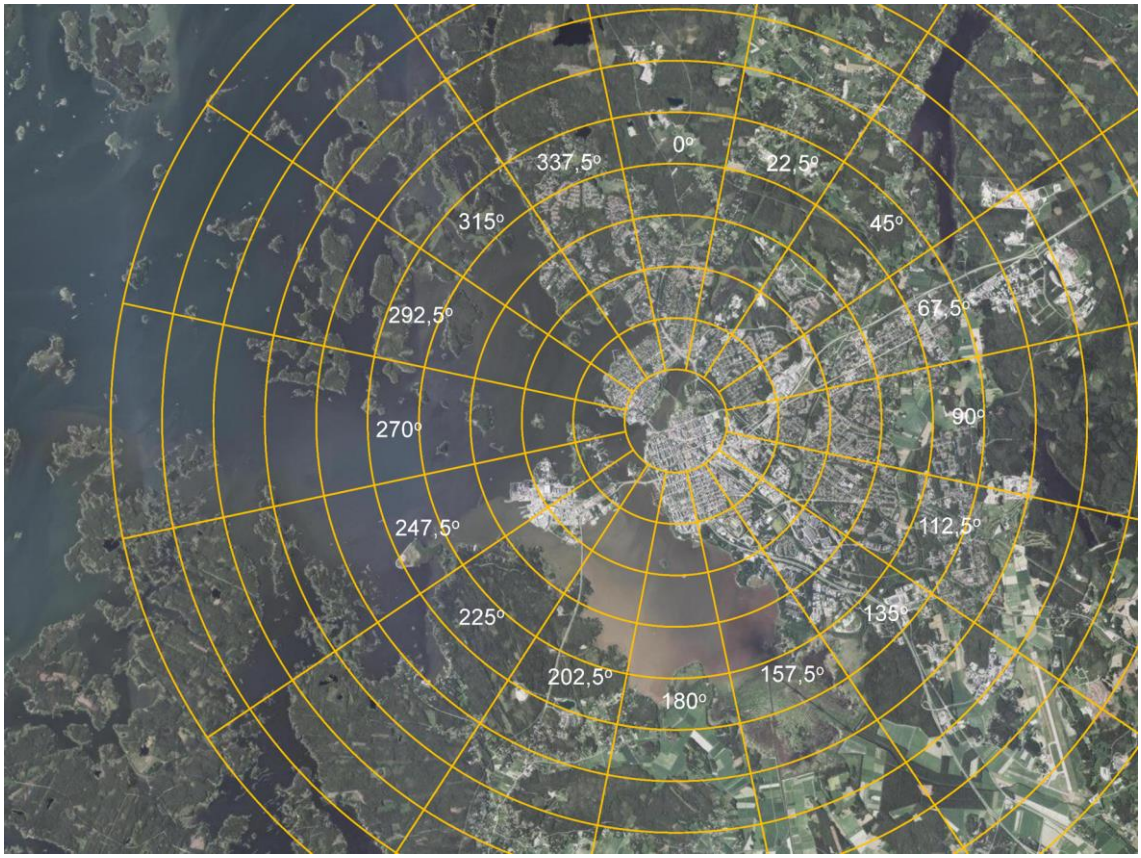


Kuva 5: Tuulensuuntien koordinaatisto (kuva muokattu Arkkitehtitoimisto Helamaa & Heiskanen Oy ja Maanmittauslaitoksen aineistoista).

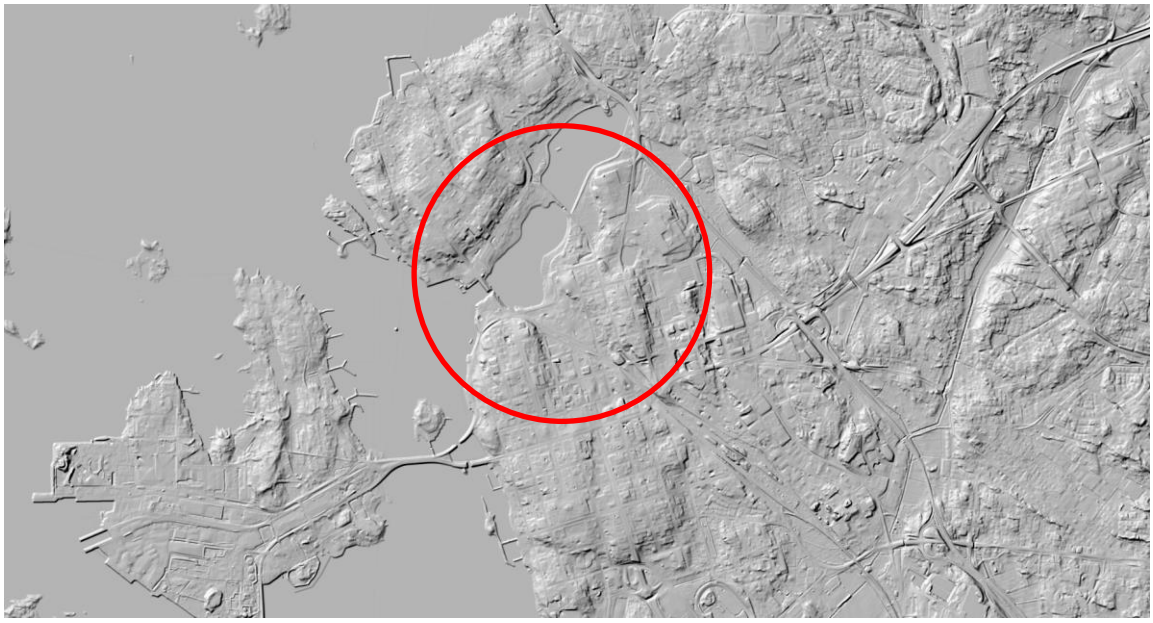
Tuulisuuden numeroarvojen laskentaan on valittu kuvan 8 mukaiset pisteet.

Tuulisuusselvityksessä on käytetty samoja tuulisuuskriteerejä (rajatuulennopeuksia katutasossa, toiminnallisia luokkia ja ylittävien tuulien esiintymisaikaa) kuin Konsultin aikaisemmissa tutkimuksissa. Nämä on esitetty taulukossa 1a ja liitteessä 1.

Taulukossa 1b on esitetty Lawson -kriteeristön mukainen luokittelu. Lawson -kriteeristön yhteydessä on huomattava, että sen numeroarvoille on esitetty useita eri versiota. Käytetty versio on Isossa-Britanniassa tällä hetkellä laajasti sovellettu *LDDC* [2].

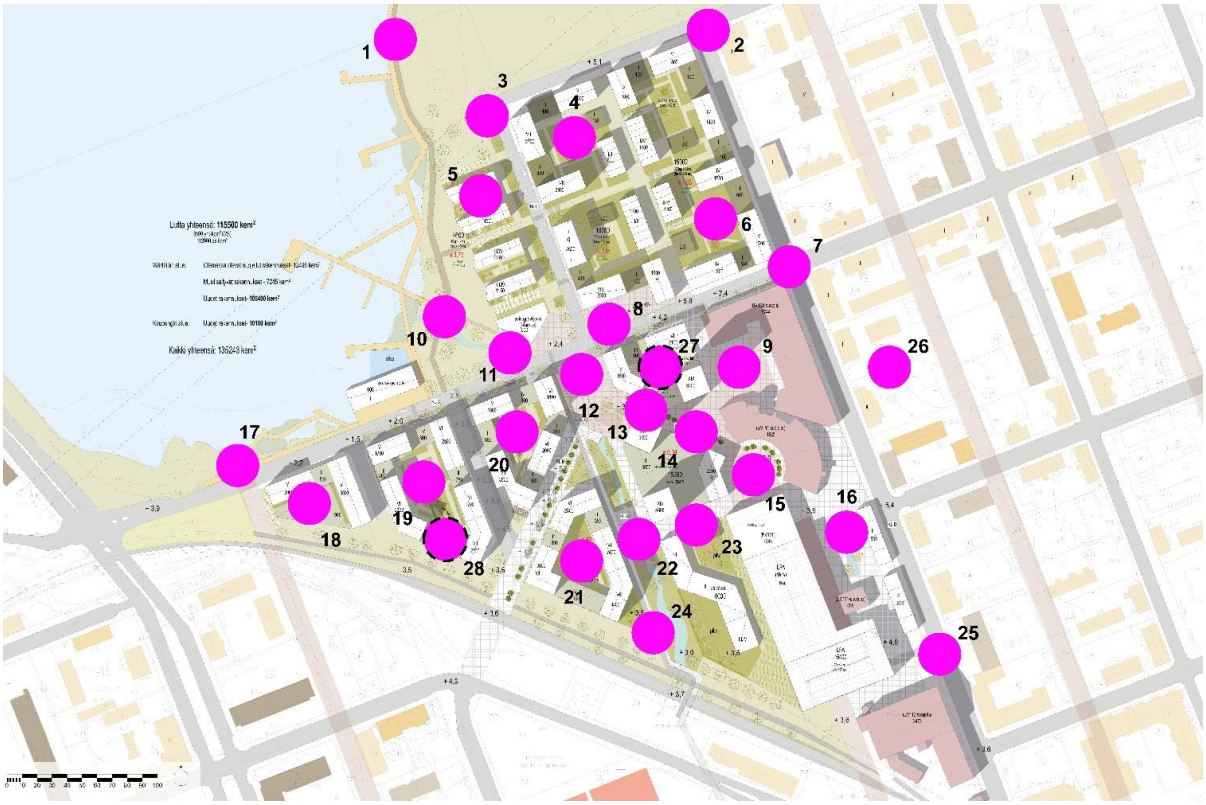


Kuva 6: Maaston tyyppi rosoisuuden muutosten analyysiin; ruudukon kehien väli = 1,0 km (kuva on muokattu Maanmittauslaitoksen kartta-aineistosta).

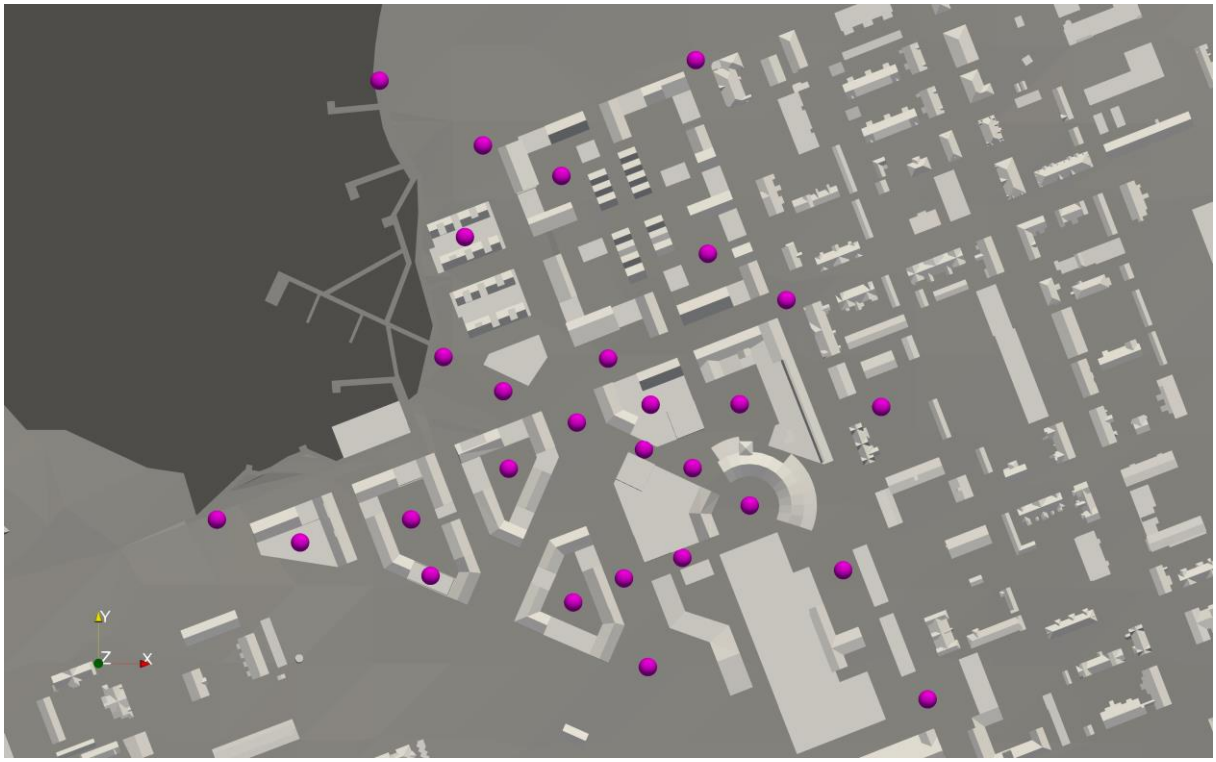


Kuva 7: Maaston korkeusvarjostus. Ympyrä, halkaisija = 2 km, kuvaa aluetta, joka on mallinnettu tarkasti virtauslaskennassa (kuva on muokattu Maanmittauslaitoksen kartta-aineistosta).

a)



b)



Kuva 8: a) Tuulisuuden numeroarvojen tarkastelupisteet. Pisteet 27 ja 28 sijaitsevat kattopihoilla. Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto Helamaa & Heiskanen Oy aineistosta; b) tarkastelupisteiden tarkka sijainti virtauslaskentamallissa.

Taulukko 1a: Konsultin Suomen kohteissa käyttämät tuulisuuskriteerit katutason tuulennopeuksille

Nimi	*Kuvaus*	*Vaikutus*
M tunnin keski-tuuli > 5 m/s	Tuulisuutta kuvaava yleinen kriteeri, joka soveltuu käytettäväksi, kun tuulen puuskaisuudella ei ole erityistä merkitystä. Kriteerillä voidaan myös kuvata uuden rakennuksen aiheuttamaa koko-naismuutosta tuulisuudessa, eli kuinka paljon tuulisuus muuttuu uuden rakennuksen johdosta. Jos tuulia esiintyy ≥ 5 % ajasta, on tuulisuudella oletettavasti merkitystä.	viihtyvyys
A puuskatuuli > 10 m/s (kesä-kausi)	Istuminen pitkiä aikoja; makaaminen; terassit ja kahvilat; ulkoil-mateatterit; uima-altaat. Toiminnot ovat epäviihtyisiä, kun tuulia esiintyy kerran kesäkau-della (huhtikuu-syyskuu) tai useammin, ≥ 2,2 h * (≥ 0,05 % kesä-kauden tunneista).	viihtyvyys
B puuskatuuli > 13 m/s (kesä-kausi)	Seisominen/istuminen paikoillaan lyhyitä aikoja; puistot; kauppa-keskukset; rakennusten ulko-ovet. Toiminnot ovat epäviihtyisiä, kun tuulia esiintyy kerran tai use-ammin kesäkaudella (huhtikuu-syyskuu), ≥ 2,2 h * (≥ 0,05 % ke-säkauden tunneista).	viihtyvyys
C puuskatuuli > 16 m/s (koko vuosi)	Kävely yleisesti; rakennuksiin sisälle meno ja niistä poistuminen. Toiminnot ovat epäviihtyisiä tai vaarallisia, kun tuulia esiintyy kerran vuodessa tai useammin ≥ 2,2 h * (≥ 0,025 % ajasta).	esteettö-myys, turval-lisuus
D puuskatuuli > 23 m/s (koko vuosi)	Vaarallisen kova tuuli toiminnosta riippumatta. Tuulisuus on ei-hyväksyttävä, kun tuulia esiintyy kerran vuo-dessa tai useammin ≥ 2,2 h * (≥ 0,025 % ajasta).	turvallisuus

** sellaisten keskituulien osuus ajasta, joissa tuulennopeus voi puuskissa ylittää raja-arvon. Taulukon tuulennopeuden raja-arvot on annettu katutasossa, eli 1,5…2,0 m korkeudessa tarkastelupisteen alla olevasta maanpinnasta lukien.*

Taulukko 1b: Lawson (LDDC) kriteeristö. Kriiteeristö määrittelee luokan, joihin tarkastelupiste kuuluu tuulisuuden kannalta

Nimi	*Tunnusväri*	*Kuvaus*	*Vaikutus*
GEM **4 m/s** < 5 %	**sininen**	Istuminen pitkiä aikoja. Erityistä viihtyisyyttä edellyttävät toiminnot. Jos tuulia esiintyy < 5 % ajasta, tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan. Sinisellä värillä esitetyt pisteet soveltuvat pitkäaikaiseen paikoillaan oloon, joka Suomen sääoloissa voi tulla kyseeseen erityisesti kesäkaudella. Luokka vastaa tältä osin taulukon 1a A-kriteeriä (”A-kriteeri täytyy”, eli tuulisuus on raja-arvoa pienempää).	viihtyvyys
GEM **6 m/s** < 5 %	**vaaleansininen**	Seisominen tai istuminen lyhyitä aikoja. Esim. linja-autopysäkit ja rakennusten ulko-ovet Jos tuulia esiintyy < 5 % ajasta, tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan. Vaalean sinisellä värillä esitetyt alueet soveltuvat lyhytaikaiseen paikoillaan oloon, joka Suomen sääoloissa voi tulla kyseeseen erityisesti kesäkaudella. Luokka vastaa tältä osin taulukon 1a B-kriteeriä (”B-kriteeri täytyy”, eli tuulisuus on raja-arvoa pienempää). Rakennusten ulko-ovien osalta koko vuoden tuulisuudella on merkitystä.	viihtyvyys
GEM **8 m/s** < 5 %	**vihreä**	Kävely Jos tuulia esiintyy < 5 % ajasta, tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan. Luokka vastaa taulukon 1a C-kriteeriä (”C-kriteeri täytyy”, eli tuulisuus on raja-arvoa pienempää)	viihtyvyys
GEM **10 m/s** < 5 %	**keltainen**	Tavoitteelliseen kävelyyn, juoksuun ja pyöräilyyn soveltuva. Jos tuulia esiintyy < 5 % ajasta, tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan. Keltaisella värillä esitetyt pisteet soveltuvat tavoitteelliseen kävelyyn. Luokka vastaa tältä osin Taulukon 1a D kriteeriä (”D-kriteeri täytyy”, eli tuulisuus on raja-arvoa pienempää)	viihtyvyys
GEM **> 10 m/s** > 5 %	**punainen**	ei hyväksyttävä, useimmat jalankulkijan toiminnot ovat epäviihtyisiä. Jos tuulia esiintyy > 5 % ajasta, tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan. Alueen tuulisuus on liiallista jalankulkijan toimintoja ajatellen.	viihtyvyys

GEM = määräävämpi jalankulkijan korkeudella (1,5 m) vaikuttavista tuulennopeuksista v_k ja $v_g/1,85$, missä v_k = tunnin keskinopeus ja v_g = 3 s. puuskanopeus.

Nimi	*Tunnusväri*	*Kuvaus*	*Vaikutus*
GEM **> 15 m/s** > 0.025 %	**violetti**	ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta yleisillä alueilla. Tuuli voi olla vaarallista toiminnoista ja henkilöstä riippuen. Jos tuulia esiintyy useammin kun kerran vuodessa tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan.	turvallisuus
GEM **> 20 m/s** > 0.025 %	**violetti**	ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta. Tuuli on vaarallisen voimakasta paikasta, toiminnosta ja henkilöstä riippumatta. Jos tuulia esiintyy useammin kun kerran vuodessa tarkastelupiste kuuluu tähän luokkaan.	turvallisuus

GEM = määräävämpi jalankulkijan korkeudella (1,5 m) vaikuttavista tuulennopeuksista v_m ja $v_g/1,85$, missä v_m = tunnin keskinopeus ja v_g = 3 s. puuskanopeus.

Numeerinen virtauslaskenta on tehty kuvan 9 mukaisella verkotuksella, jossa laskentakoppien määrä on n. 400 miljoonaa, ja jossa laskenta-tilavuuden koko on tuulensuuntaiselta mitaltaan 3,2 km ja 5,0 km, ja korkeus 500 m. Pintojen vieressä laskentakopin seinämän mitta on maksimissaan 0,25 m (alimpaan 1,5 m mahtuu vähintään 6 koppikerrosta).

Tarkasti mallinnettu lähialuemalli on kiekon muotoinen, ja sen halkaisija on 2,0 km. Sen geometria on muokattu kohteen visualisointimallista ja Vaasan kaupungin kaupunkimallista. Tavanomaisista konsulttikäytännöistä poiketen myös maaston korkeuserot on mallinnettu. Tulokset on projisoitu 1,5 m korkeuteen maaston (ja kattopihojen) pinnasta.

Merenpinnan rosoisuus on mallinnettu muuta maapintaa sileämpänä. Otaksumat ovat:

- tulovirtauksen tuuli ja turbulenssimallin korkeusprofiilit z_0 = 0,03…0,3 m tuulen suunnasta riippuen. Maanpinta lähialuemallin ulkopuolella vastaavasti
- lähialuemallin maapinta z_0 = 0,03 m
- lähialuemallin merenpinta z_0 = 0,001 m
- rakennusten pinnat z_0 = 0,01 m

Käytetty tuulen keskinopeus 10 m korkeudessa on 10 m/s.

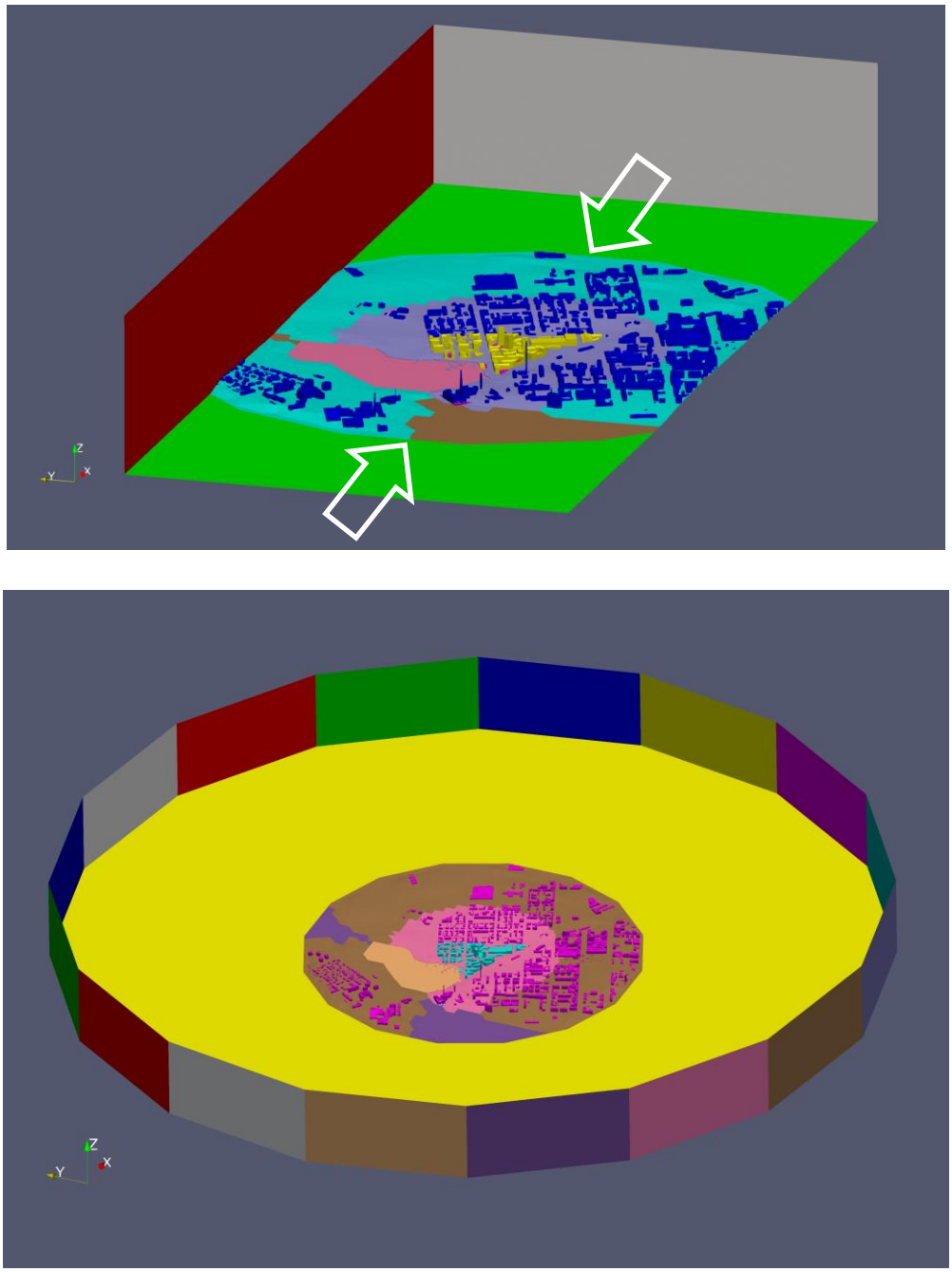
Analyysin turbulenssimallina on käytetty *Realisable k-ε* epsilon –mallia kansainvälisten konsulttikäytäntöjen mukaisesti. Turbulenssimallin ratkaistavat suureet ovat:

- *k* = turbulenssin kineettinen energia; kuvaa ”turbulenssin määrää” (pinnat ”generoivat” turbulenssia)
- ε = dissipaatioparametri, joka kuvaa ”turbulenssin häviämistä”, eli pienempien pyörteiden liike-energian muuttumista lämmöksi ilman viskositeetin johdosta.

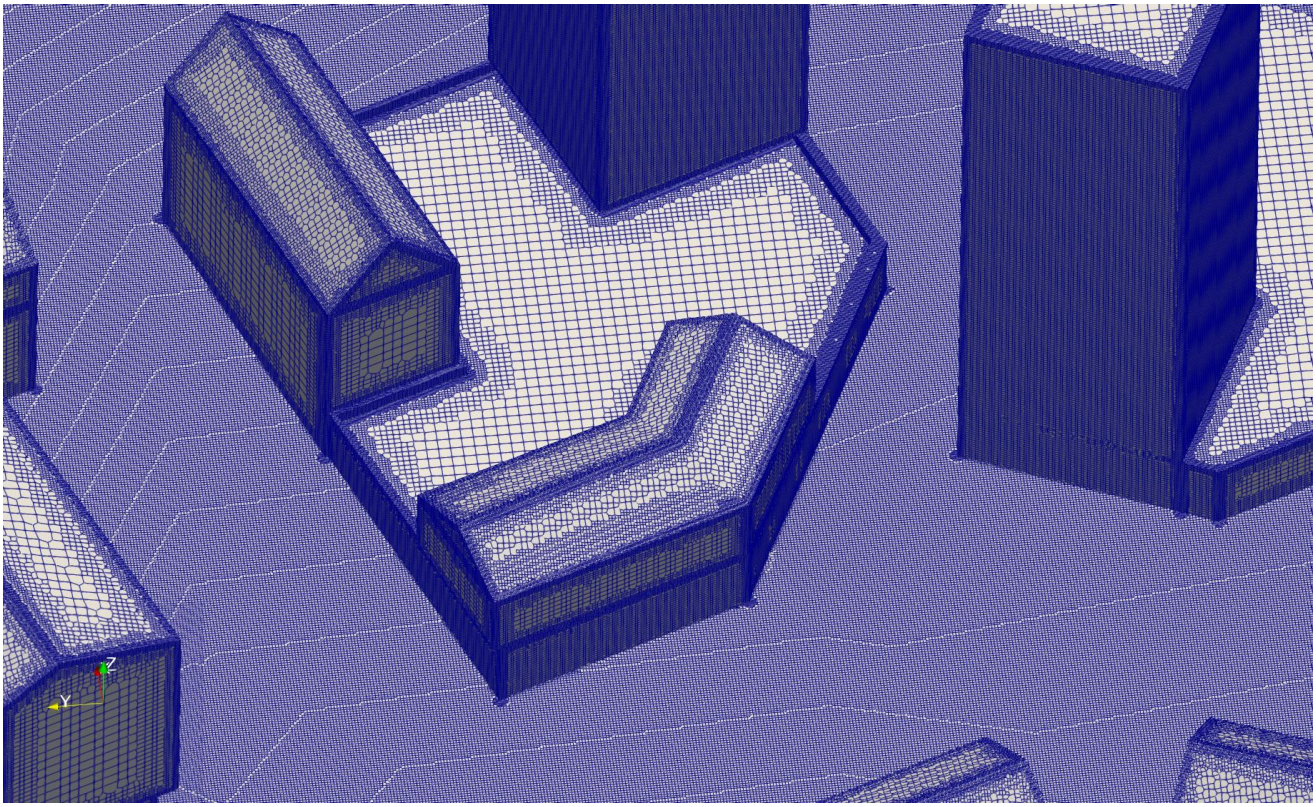
Laskenta on tehty OpenFOAM version 10 (www.openfoam.org) *simpleFoam* ratkaisijalla, jolla on ratkaistu koonpuristumattoman turbulentin virtauksen vakaan tilan ratkaisu, eli tuulen keskinopeus RANS-menetelmällä (vrt. liite 2). Iteratiivinen ratkaisu on lopetettu, kun tulokset eivät enää oleellisesti muutu jäännösvirheiden ollessa suuruusluokaltaan 10^{-4}…10^{-7}.

Lähialuemallissa ei ole otettu huomioon puustoa. Lähialuemallin ulkopuolella puuston vaikutus tulee otetuksi huomioon maaston rosoisuusparametrin kautta.

Mallinnuksen tarkkuustaso vastaa tuulitunnelikoetta, jossa maaston korkeuserot on mallinnettu, ja jossa puustoa ja pensaita ei ole erikseen mallinnettu. Lähialuemalli on hieman tavanomaista laajempi, tyypillisen säteen minimin ollessa tuulen puolella 10*H*, missä *H* on kohdealueen korkeimman rakennuksen korkeus.



Kuva 9a: Numeerisessa virtauslaskennassa käytetty verkotus – laskentatilavuudet. Laatikkomaisella tilavuudella on analysoitu tuulensuunnat 90º ja 270º (jossa tuulensuunta on laskentamallin globaalin x-akselin suunnassa) ja sylinterimäisellä loput.



Kuva 9b: Numeerisessa virtauslaskennassa käytetty verkotus – rakennusten pintaverkotus näytettynä.

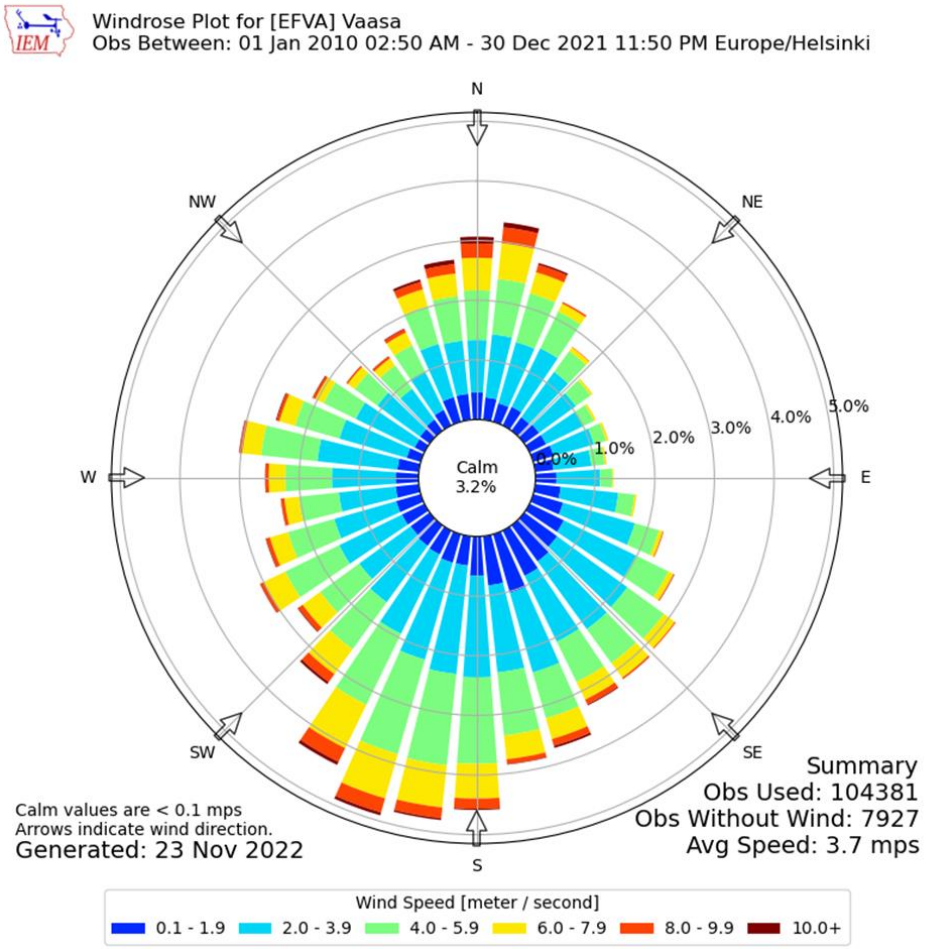
2.3 Tulokset

2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus

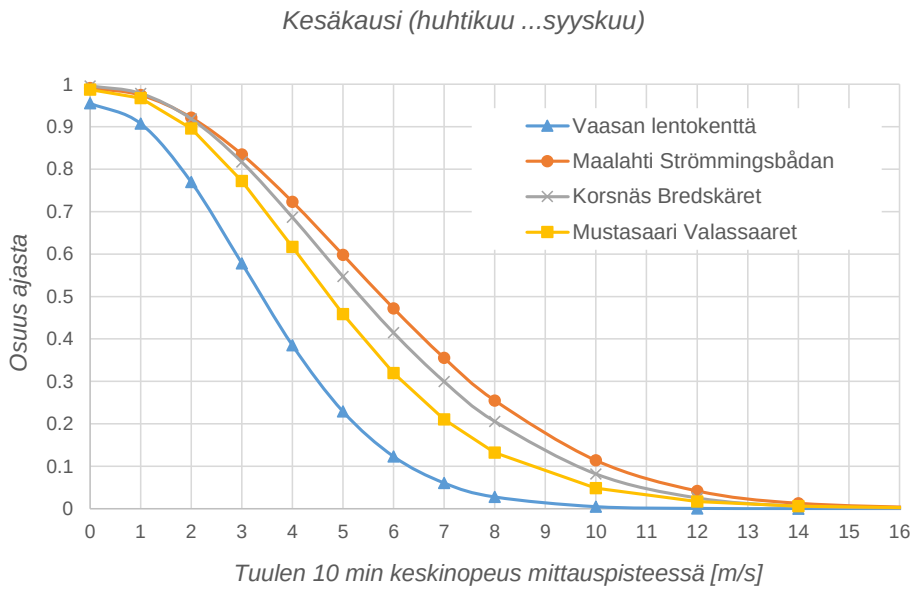
Vaasan lentokentän tuulitilastosta laadittu tuuliruusu on esitetty kuvassa 10. Analysoitujen tuulitilastojen muokkaamattomia tuloksia on havainnollistettu kuvassa 11. Tulosten mukaan tilastot antavat siinä määrin poikkeavan lähtötiedon tuulisuusselvityksille, että tulokset on oikaistava meteorologisten tuulimittausten standardisuosituksista (tasainen avoin maasto, 10 m korkeus) poikkeavien maastoolosuhteiden ja mittauskorkeuden vaikutuksen osalta.

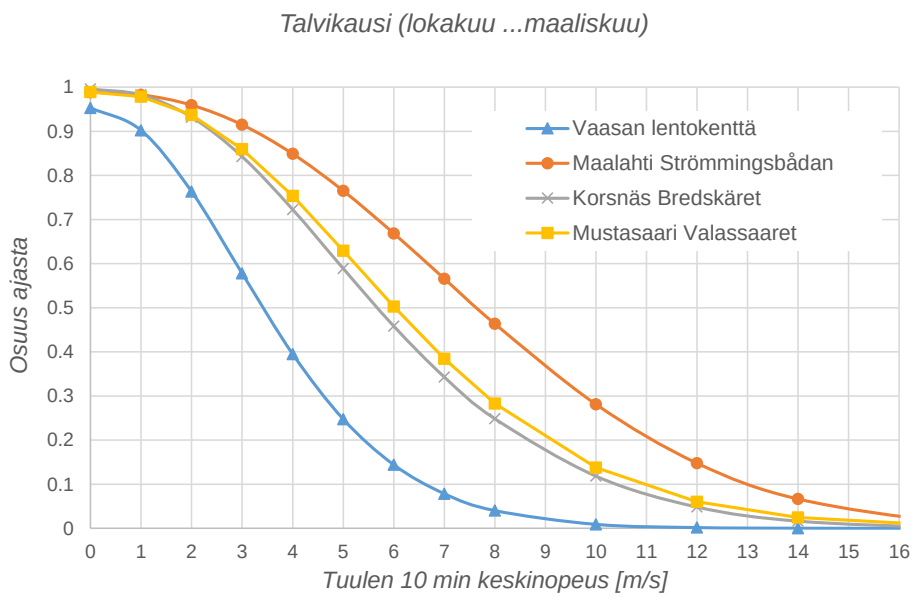
Merisääasemien mittaustulokset näyttävät selvän eron kesä- ja tavikauden tuulisuudessa, kun taas Vaasaan lentokentän tuloksissa erot ovat vähäiset. Tähän vaikuttaa olettavasti erityisesti meren jäätyminen talvikaudella, ja siitä seuraava vähäinen kitka ja turbulenssi (pieni rosoisuus), mikä kasvattaa tuulen keskinopeuksia lähellä maanpintaa laajoilla jää-alueilla.

Oikaistut tuulitilastot ja niitä vastaavat Weibull-jakaman parametrit on esitetty kuvissa 12 ja 13. Näitä voidaan käyttää paitsi kohteen, myös muiden Vaasa alueiden tuulisuusselvitysten lähtötietona.

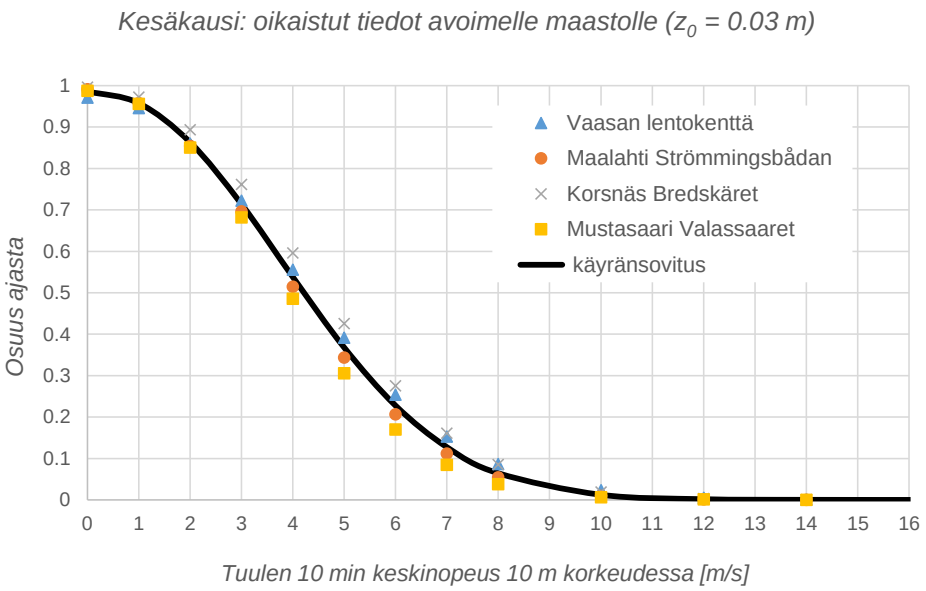


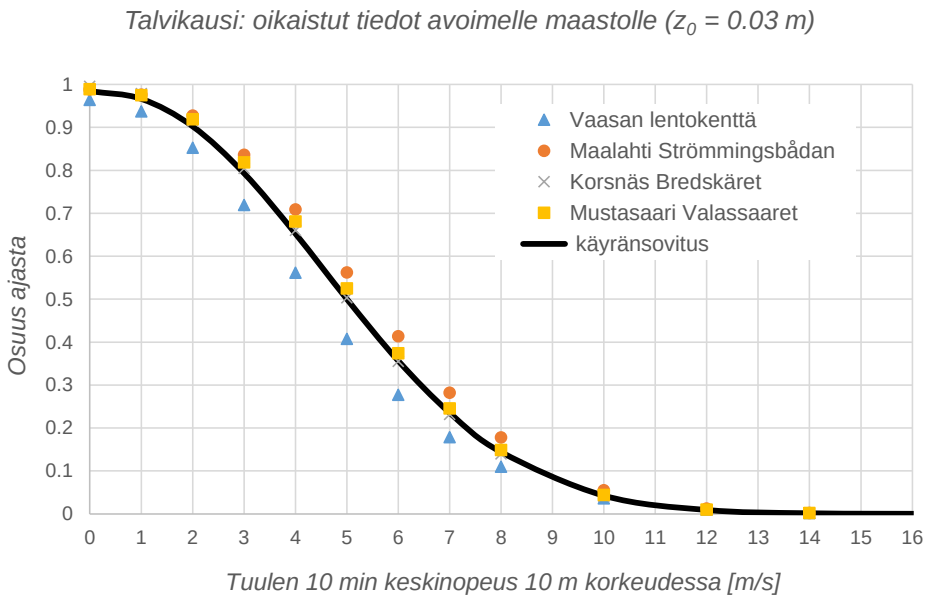
Kuva 10: Tuuliruusu Vaasan lentokentän mittauspisteessä (vuodet 2010…2021).



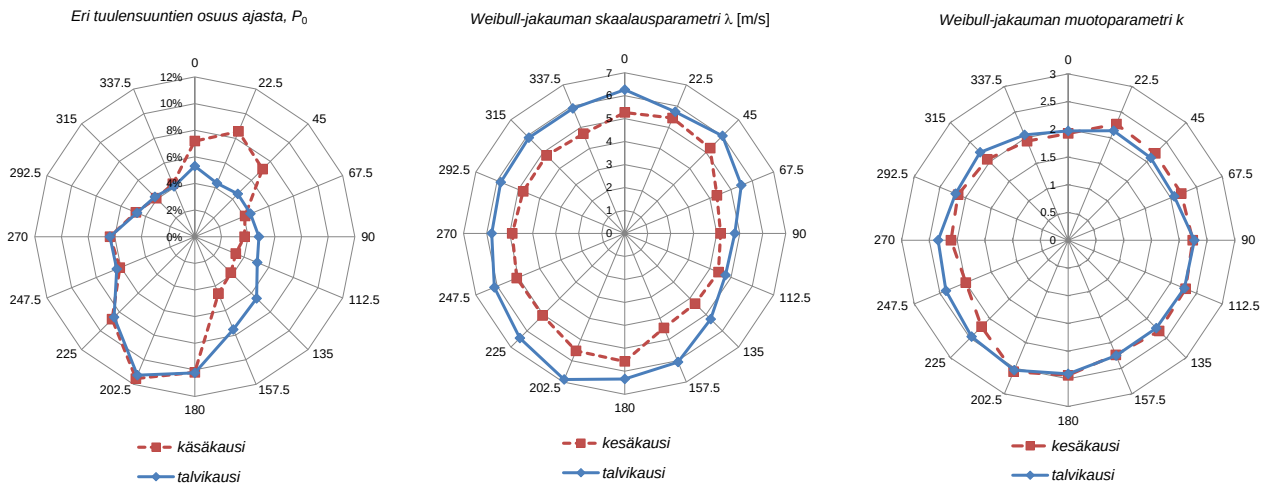


Kuva 11: Tuulien toistuvuus tuulitilastojen mittauspisteissä.





Kuva 12: Tuulien toistuvuus Vaasan seudulla teoreettiseen avoimeen maastoon oikaistuissa tilastoissa.

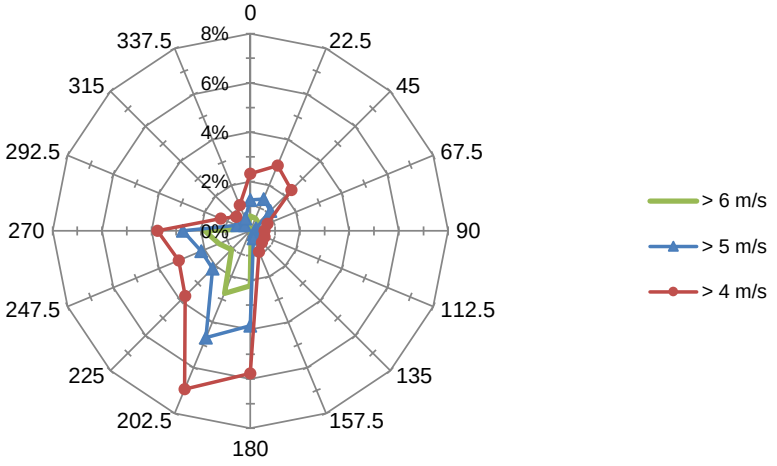


Kuva 13: Avoimeen maastoon (z_0 = 0,03 m) oikaistun tuulitilaston Weibull-jakaumien parametrit.

Kohdealueen perustuulisuus on määritetty 15 m korkeudessa. Tuloksia on havainnollistettu kuvissa 14 ja 15. Tulosten perustana oleva maaston rosoisuuden muutosten analyysi on esitetty liitteessä 4.

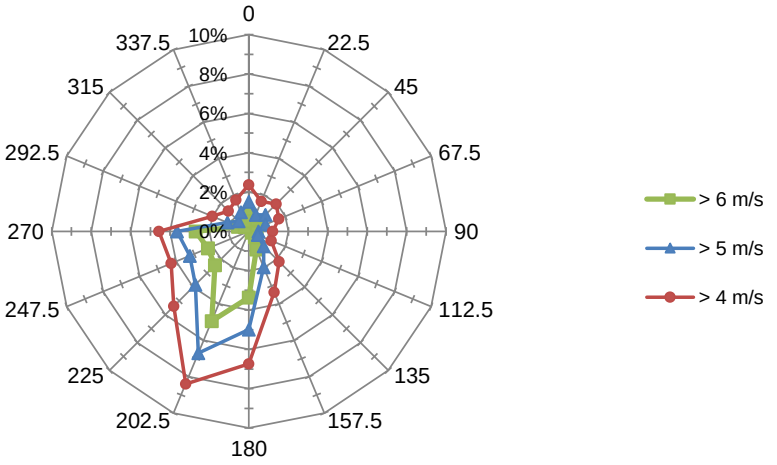
Kesäkausi: keskituulien esiintyminen kohdealueessa (% ajasta; 15 m korkeus)

kesäkausi = huhtikuu…syyskuu

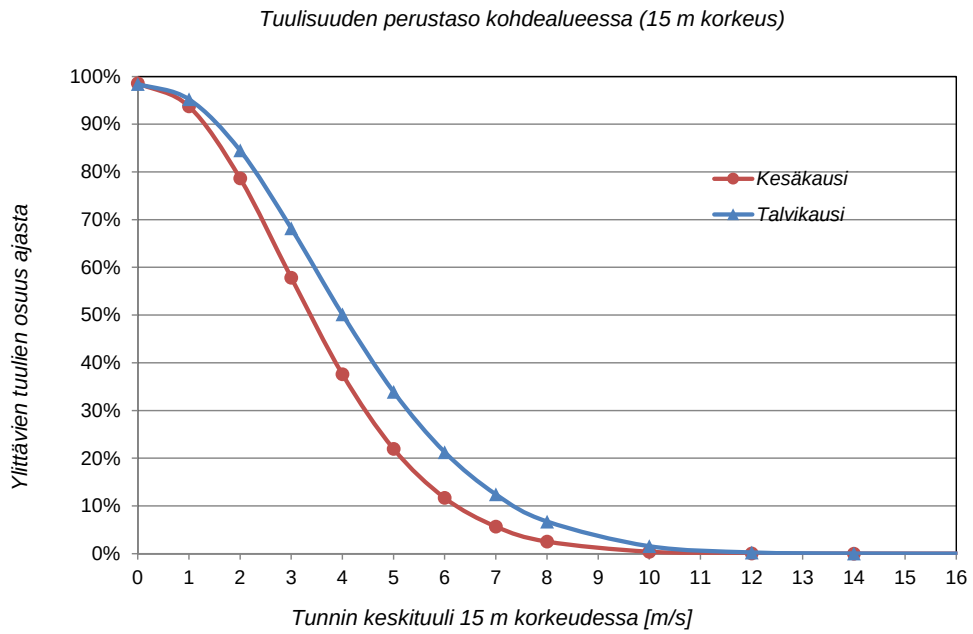


Talvikausi: keskituulien esiintyminen (% ajasta; 15 m korkeus)

talvikausi = lokakuu…maaliskuu



Kuva 14: Perustuulisuus kohdealueessa tuulen suunnittain (tuulennopeudet ovat tunnin keskituulia 15 m korkeudessa).



Kuva 15: Perustuulisuus kohdealueessa summana kaikista tuulensuunnista.

2.3.2 Numeerinen virtauslaskenta

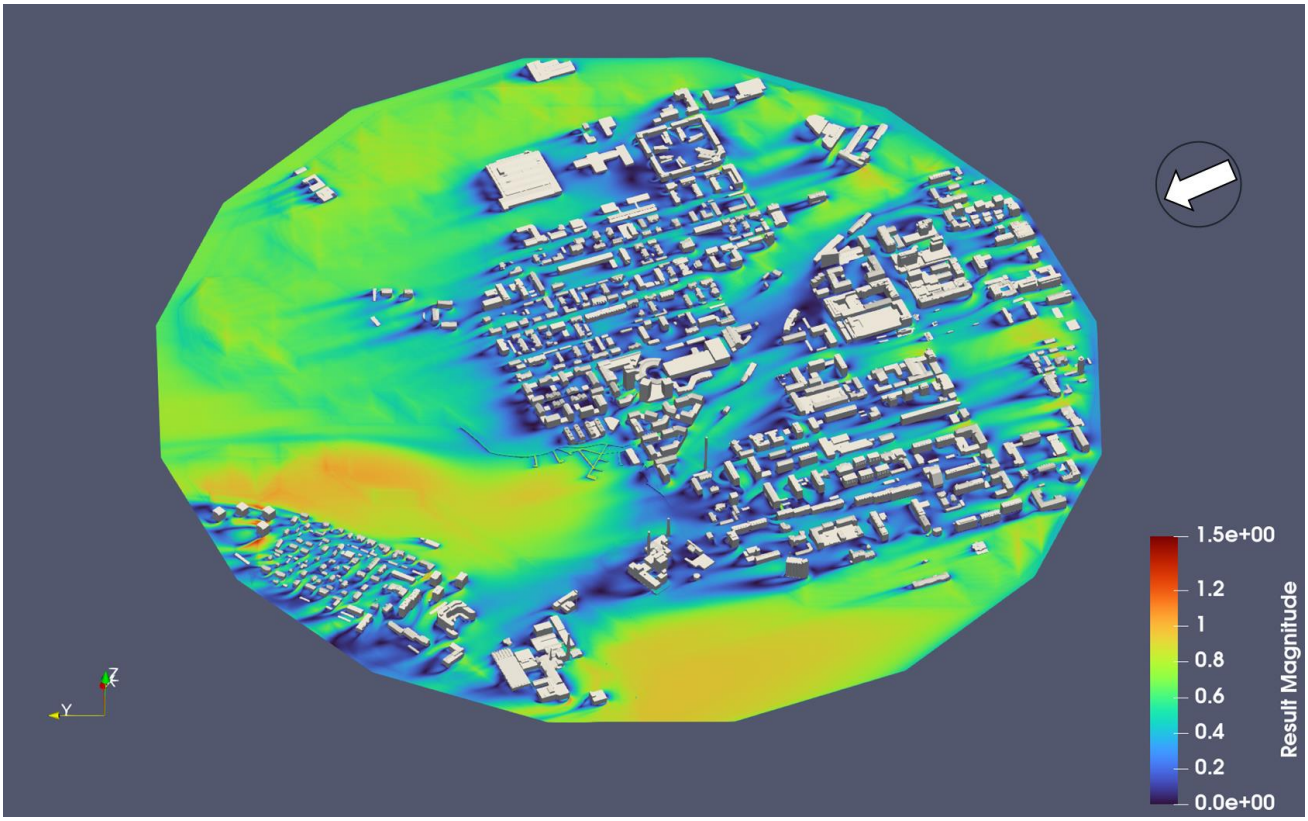
Numeerisen virtauslaskennan tuloksista koostetut värikartat on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 5. Tulokset on esitetty suureille:

- k_m suhteellinen tuulen keskinopeus; jalankulkijan tasossa (1,5 m korkeudella alla olevan pinnan suhteen) vaikuttavan tuulen keskinopeuden suhde kaukana kohteesta vaikuttavan tulovirtauksen keskinopeuteen 15 m korkeudessa
- k_g suhteellinen tuulen puuskanopeus; jalankulkijan tasossa vaikuttavan tuulen puuskanopeuden suhde kaukana kohteesta vaikuttavan tulovirtauksen keskinopeuteen 15 m korkeudessa. Tuulen puuskanopeus on laskettu huippuarvokertoimella g = 3,5 (jolloin tulokset vastaavat likimain 1…3 s. tuulennopeuden huippuarvoja)

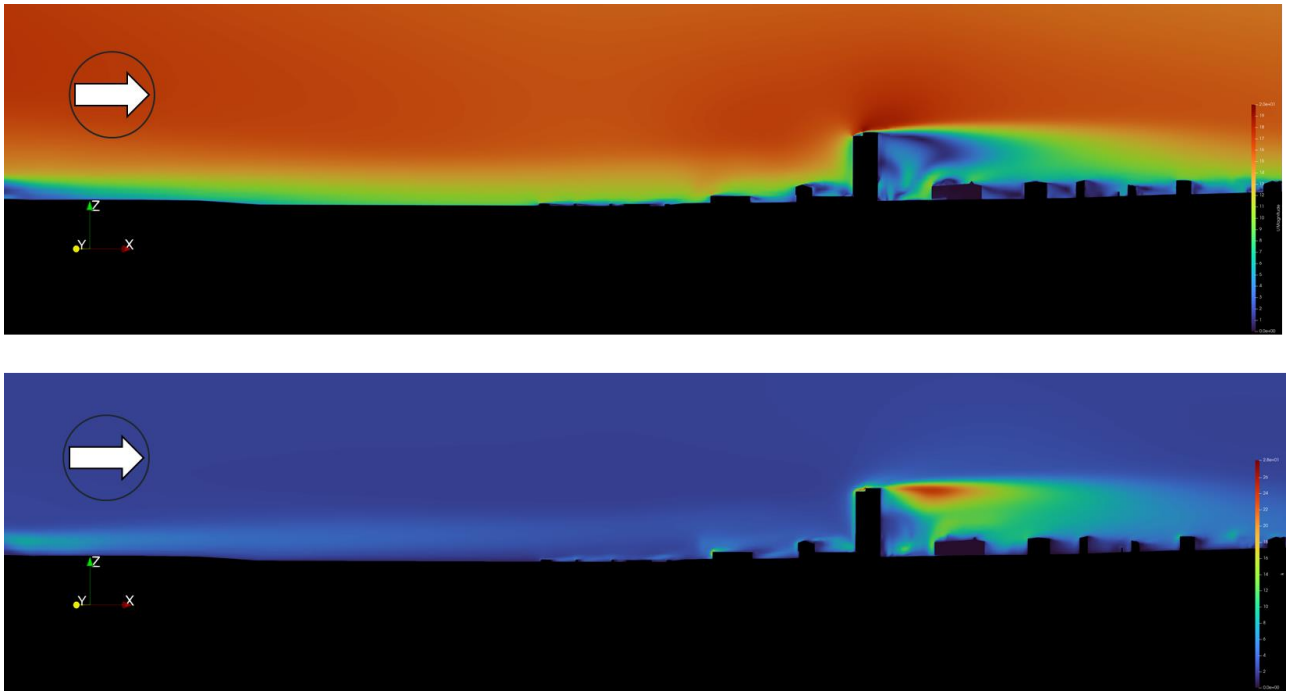
Tyypillinen virtauslaskentatulos on esitetty kuvassa 16. Kuvassa 17 on havainnollistettu RANS-laskennan tuloksia eri korkeuksilla sekä rakennusten ja maan pinnalla. Kuvan mukaisesti RANS-laskennassa rakennuksen taakse syntyy ”tuulensuoja”, jossa tuulen keskinopeudet ovat alhaiset, mutta turbulenssi ja tuulen puuskanopeudet vastaavasti suuret.

Kuvassa 18 on esitetty tyypillinen tulos rakennusten paikallisesta vaikutuksesta katutason tuulennopeuksiin.

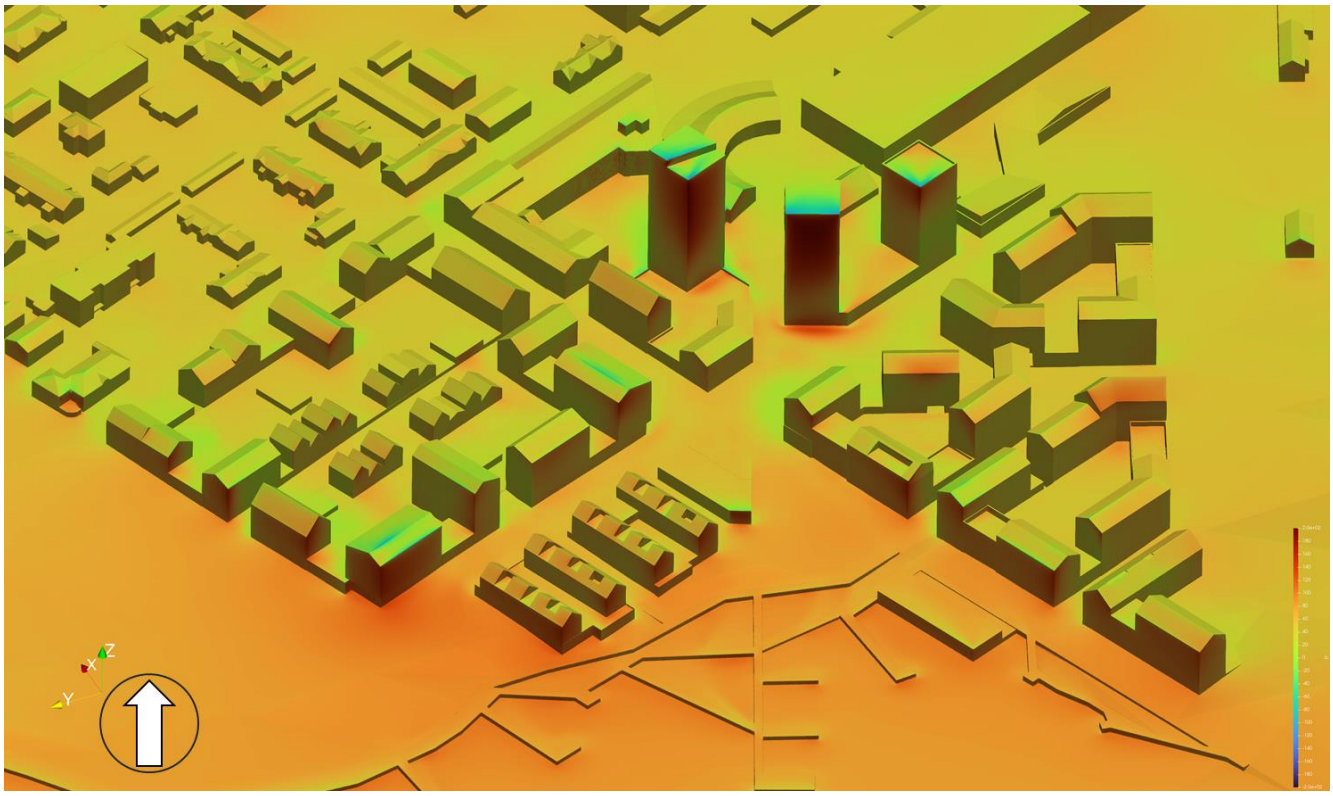
Tuulisuuden numeroarvojen lähtötiedoiksi tuotetut tarkastelupisteiden kertoimet k_m ja k_g on esitetty taulukossa 2.



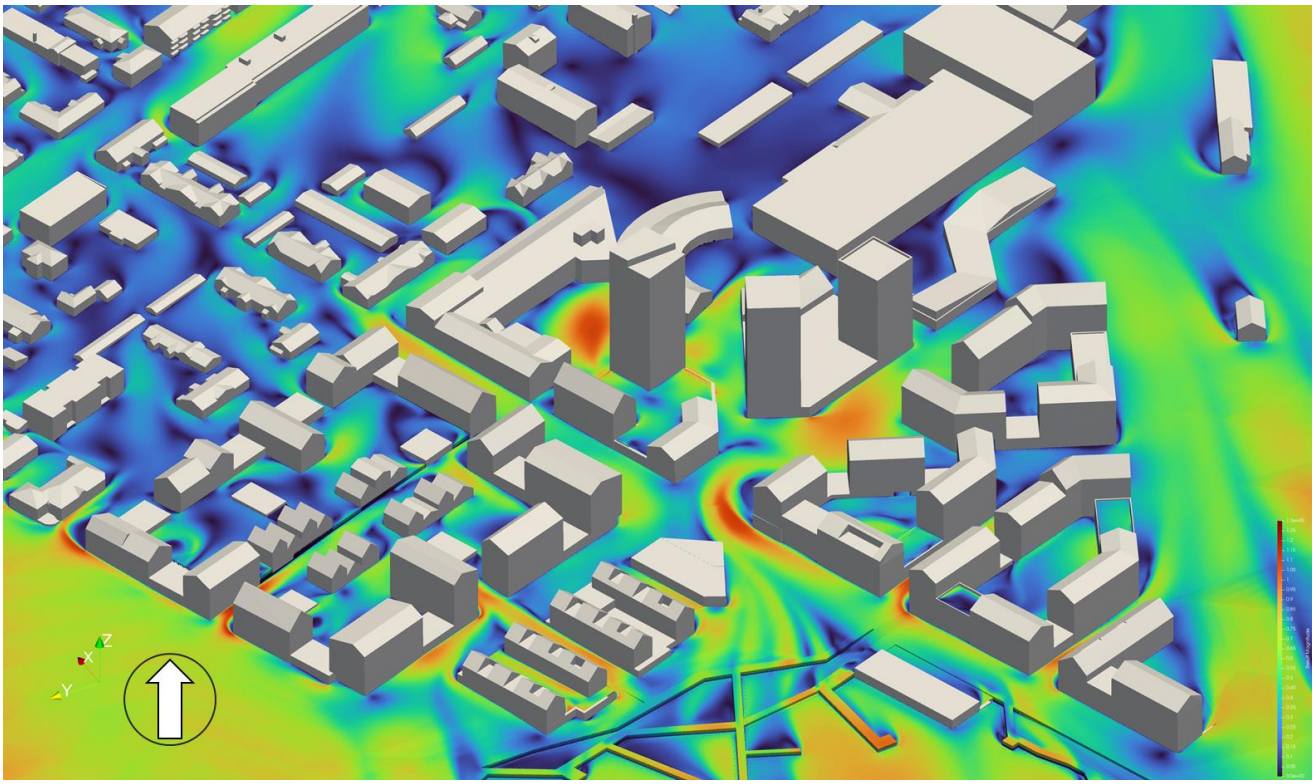
Kuva 16: Tyypillinen koko lähialueen laskentatulos suhteelliselle tuulen keskinopeudelle k_m. Tuulen suuntakulma 157,5°.



Kuva 17a: RANS-.laskennan tulosten ja periaatteen havainnollistaminen pystyleikkauksessa: tuulen keskinopeus (ylempi kuva) ja turbulenssin kineettinen energia (alempi kuva).



Kuva 17b: RANS-.laskennan tulosten ja periaatteen havainnollistaminen: tuulenpaine pinnoilla.



Kuva 18: Esimerkki rakennusten vaikutuksesta katutason tuulen keskinopeuteen: kerroin k_m väriasteikolla sininen…punainen = 0…1,3.

Taulukko 2: Suhteelliset tuulennopeudet (kertoimet k_m ja k_g) tarkastelupisteissä

Suhteellinen tuulen keskinopeus k_m

	Tuulen suuntakulma [°]																	
piste	0	22.5	§	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	*keskim.*	*maks.*
1	0.84	0.93	0.90	0.84	0.83	0.35	0.67	0.53	0.74	0.54	0.85	0.97	0.89	0.75	0.74	0.89	0.77	0.97
2	0.66	0.73	0.54	0.39	0.45	0.68	0.45	0.36	0.43	0.20	0.16	0.39	0.66	0.66	0.75	0.81	0.52	0.81
3	0.91	1.00	0.85	0.61	0.16	0.21	0.59	0.47	0.42	0.61	0.70	0.73	0.40	0.38	0.46	0.77	0.58	1.00
4	0.29	0.46	0.47	0.36	0.15	0.62	0.27	0.22	0.42	0.30	0.41	0.37	0.50	0.39	0.71	0.66	0.41	0.71
5	0.36	0.64	0.19	0.23	0.08	0.30	0.37	0.30	0.69	0.43	0.36	0.63	0.53	0.52	0.64	0.45	0.42	0.69
6	0.49	0.60	0.34	0.30	0.25	0.62	0.25	0.20	0.22	0.26	0.17	0.26	0.16	0.46	0.18	0.30	0.32	0.62
7	0.75	0.56	0.22	0.35	0.55	0.51	0.40	0.32	0.74	0.44	0.28	0.55	0.49	0.55	0.40	0.68	0.49	0.75
8	0.39	0.58	0.47	0.33	0.24	0.35	0.32	0.26	0.40	0.32	0.51	0.99	0.49	0.56	0.64	0.17	0.44	0.99
9	0.26	0.42	0.32	0.38	0.45	0.32	0.36	0.29	0.52	0.45	0.15	0.17	0.51	0.86	0.88	0.27	0.41	0.88
10	0.22	0.37	0.22	0.27	0.33	0.16	0.55	0.44	0.40	0.38	0.44	0.48	0.35	0.54	0.52	0.48	0.38	0.55
11	0.27	0.36	0.32	0.41	0.37	0.21	0.54	0.43	0.37	0.23	0.28	0.55	0.41	0.53	0.57	0.54	0.40	0.57
12	0.18	0.51	0.33	0.37	0.68	0.51	0.52	0.41	0.77	0.58	0.34	0.27	0.21	0.26	0.81	0.75	0.47	0.81
13	0.59	0.51	0.43	0.53	0.93	1.05	0.87	0.70	0.27	0.14	0.67	0.82	0.73	0.58	0.64	0.50	0.62	1.05
14	0.43	0.71	0.48	0.23	0.29	0.31	0.22	0.17	0.43	0.29	0.41	0.44	0.43	0.57	0.82	0.76	0.44	0.82
15	0.32	0.36	0.18	0.22	0.19	0.18	0.10	0.08	0.48	0.23	0.16	0.17	0.27	0.26	0.30	0.45	0.25	0.48
16	0.43	0.59	0.23	0.20	0.20	0.31	0.28	0.23	0.51	0.42	0.28	0.26	0.23	0.18	0.29	0.44	0.32	0.59
17	0.85	0.78	0.57	0.57	0.22	0.22	0.71	0.57	0.67	0.61	0.44	0.60	0.32	0.34	0.48	0.72	0.54	0.85
18	0.30	0.37	0.28	0.14	0.21	0.51	0.42	0.34	0.43	0.24	0.36	0.26	0.16	0.32	0.32	0.25	0.31	0.51
19	0.44	0.45	0.32	0.27	0.28	0.30	0.60	0.48	0.45	0.22	0.44	0.44	0.31	0.20	0.36	0.41	0.37	0.60
20	0.53	0.45	0.16	0.22	0.23	0.21	0.37	0.30	0.20	0.22	0.27	0.31	0.44	0.44	0.47	0.44	0.33	0.53
21	0.18	0.37	0.12	0.30	0.48	0.18	0.43	0.35	0.55	0.46	0.34	0.57	0.63	0.29	0.28	0.19	0.36	0.63
22	0.66	0.68	0.35	0.64	0.62	0.90	0.62	0.50	0.71	0.44	0.32	0.58	0.56	0.46	0.96	0.73	0.61	0.96
23	0.46	0.60	0.52	0.42	0.38	0.46	0.41	0.33	0.69	0.56	0.12	0.32	0.42	0.33	0.49	0.30	0.43	0.69
24	0.67	0.53	0.39	0.34	0.38	0.45	0.42	0.33	0.57	0.50	0.48	0.63	0.16	0.14	0.51	0.71	0.45	0.71
25	0.44	0.63	0.31	0.30	0.32	0.65	0.38	0.30	0.60	0.65	0.42	0.26	0.15	0.28	0.31	0.61	0.41	0.65
26	0.21	0.35	0.44	0.31	0.40	0.35	0.32	0.26	0.44	0.32	0.20	0.16	0.23	0.39	0.17	0.17	0.29	0.44
27	0.90	0.76	0.67	0.60	0.82	0.58	0.63	0.51	0.46	0.32	0.25	0.31	0.41	0.44	0.26	0.29	0.51	0.90
28	0.54	0.51	0.28	0.20	0.22	0.30	0.56	0.45	0.45	0.29	0.36	0.38	0.30	0.42	0.37	0.44	0.38	0.56

Suhteellinen tuulen puuskanopeus k_g

	Tuulen suuntakulma [°]																	
piste	0	22.5	§	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	*keskim.*	*maks.*
1	1.32	1.45	1.37	1.28	1.36	0.81	1.44	1.15	1.30	1.11	1.32	1.44	1.25	1.15	1.10	1.24	1.26	1.45
2	1.08	1.26	0.96	0.80	0.97	1.12	0.89	0.71	0.71	0.50	0.41	0.76	0.88	0.96	1.11	1.22	0.90	1.26
3	1.38	1.52	1.21	1.01	0.38	0.46	0.99	0.79	0.79	1.12	1.27	1.11	0.78	0.80	0.84	1.23	0.98	1.52
4	0.77	1.20	0.97	0.79	0.41	1.28	0.64	0.51	0.94	0.73	0.72	0.82	1.01	1.15	1.35	1.20	0.91	1.35
5	0.68	1.44	0.54	0.57	0.21	0.69	0.75	0.60	1.16	0.78	0.86	1.11	0.93	1.05	1.07	0.83	0.83	1.44
6	1.06	1.41	0.61	0.53	0.64	1.28	0.60	0.48	0.49	0.73	0.42	0.65	0.41	0.91	0.48	0.71	0.71	1.41
7	1.16	1.26	0.51	0.74	0.88	0.82	0.74	0.59	1.13	0.72	0.51	0.86	0.72	0.87	0.66	1.06	0.83	1.26
8	0.81	1.38	1.06	0.70	0.57	0.82	0.96	0.77	0.77	0.61	0.85	1.55	0.84	0.93	0.96	0.44	0.88	1.55
9	0.72	1.23	0.78	0.85	0.94	0.81	0.69	0.55	0.94	0.97	0.37	0.39	0.97	1.59	1.66	0.67	0.88	1.66
10	0.51	0.97	0.64	0.66	0.65	0.32	1.40	1.12	0.87	0.76	0.90	0.91	0.69	0.95	0.92	0.96	0.83	1.40
11	0.74	1.05	0.77	0.81	0.74	0.54	1.48	1.19	0.84	0.63	0.56	0.95	0.67	0.83	0.89	1.00	0.86	1.48
12	0.42	1.29	0.78	0.81	1.11	0.99	0.89	0.71	1.22	0.99	0.52	0.49	0.54	0.53	1.20	1.24	0.86	1.29
13	1.49	1.27	0.80	1.01	1.54	1.75	1.57	1.26	0.71	0.39	1.03	1.49	1.46	1.29	1.21	1.01	1.21	1.75
14	1.13	1.64	1.27	0.61	0.69	0.73	0.54	0.43	0.93	0.84	0.89	1.06	0.97	1.24	1.46	1.33	0.99	1.64
15	0.74	1.06	0.49	0.61	0.55	0.31	0.29	0.23	0.93	0.57	0.41	0.46	0.63	0.76	0.87	0.94	0.62	1.06
16	0.71	1.13	0.64	0.60	0.61	0.71	0.68	0.54	0.97	1.04	0.62	0.61	0.67	0.53	0.66	0.82	0.72	1.13
17	1.38	1.27	0.92	0.90	0.56	0.54	1.19	0.95	1.11	1.13	0.86	1.02	0.57	0.76	0.97	1.21	0.96	1.38
18	0.66	1.05	0.68	0.38	0.58	1.00	1.08	0.86	0.99	0.67	0.74	0.67	0.47	0.65	0.53	0.60	0.73	1.08
19	1.05	1.34	0.59	0.65	0.56	0.81	1.77	1.42	0.86	0.49	0.79	0.73	0.60	0.43	0.65	0.82	0.85	1.77
20	1.06	1.26	0.28	0.50	0.40	0.54	1.10	0.88	0.50	0.51	0.50	0.67	0.81	0.89	0.82	0.81	0.72	1.26
21	0.52	0.96	0.28	0.64	0.78	0.53	0.93	0.74	1.02	0.90	0.65	1.06	1.15	0.70	0.64	0.55	0.75	1.15
22	1.18	1.34	0.70	1.27	1.17	1.49	1.00	0.80	1.15	0.86	0.58	1.04	0.94	0.84	1.49	1.21	1.07	1.49
23	0.85	1.52	1.31	1.23	1.08	1.03	0.99	0.79	1.46	1.16	0.29	0.67	0.73	0.67	0.73	0.61	0.94	1.52
24	1.09	1.09	0.91	0.82	0.93	0.89	0.83	0.66	1.03	0.91	0.78	1.00	0.46	0.24	0.89	1.08	0.85	1.09
25	0.93	1.23	0.69	0.67	0.71	1.21	0.70	0.56	1.19	1.10	0.72	0.51	0.42	0.67	0.57	0.98	0.80	1.23
26	0.53	1.04	0.97	0.76	0.88	0.83	0.78	0.63	1.06	0.88	0.52	0.48	0.68	0.87	0.51	0.49	0.75	1.06
27	1.83	1.55	1.23	1.20	1.53	1.54	1.17	0.94	0.99	0.91	0.68	0.79	0.90	1.05	0.77	0.80	1.12	1.83
28	1.41	1.42	0.77	0.57	0.54	0.81	1.51	1.21	1.34	0.80	1.00	0.96	0.68	0.95	0.86	1.19	1.00	1.51

2.3.3 Tuulisuus tarkastelupisteissä

Tuulisuuden numeroarvot on esitetty kuvissa 19…23 (Konsultin kriteerit) ja 24…25 (Lawson LDDC -kriteerit).

Liitteen 1 mukaisesti Konsultin tuulen puuskanopeuteen perustuvat kriteerit (A, B, C, D) kuvaavat todellisten tuulen puuskanopeuksien (> 10 m/s, > 13 m/s, > 16 m/s ja > 23 m/s) esiintymistä katutasossa. Näitä vastaavien tuulien vaikutusta voidaan kuvata liitteen 1 taulukolla L1.1, jonka mukaisesti tuulen puuskanopeuden ollessa:

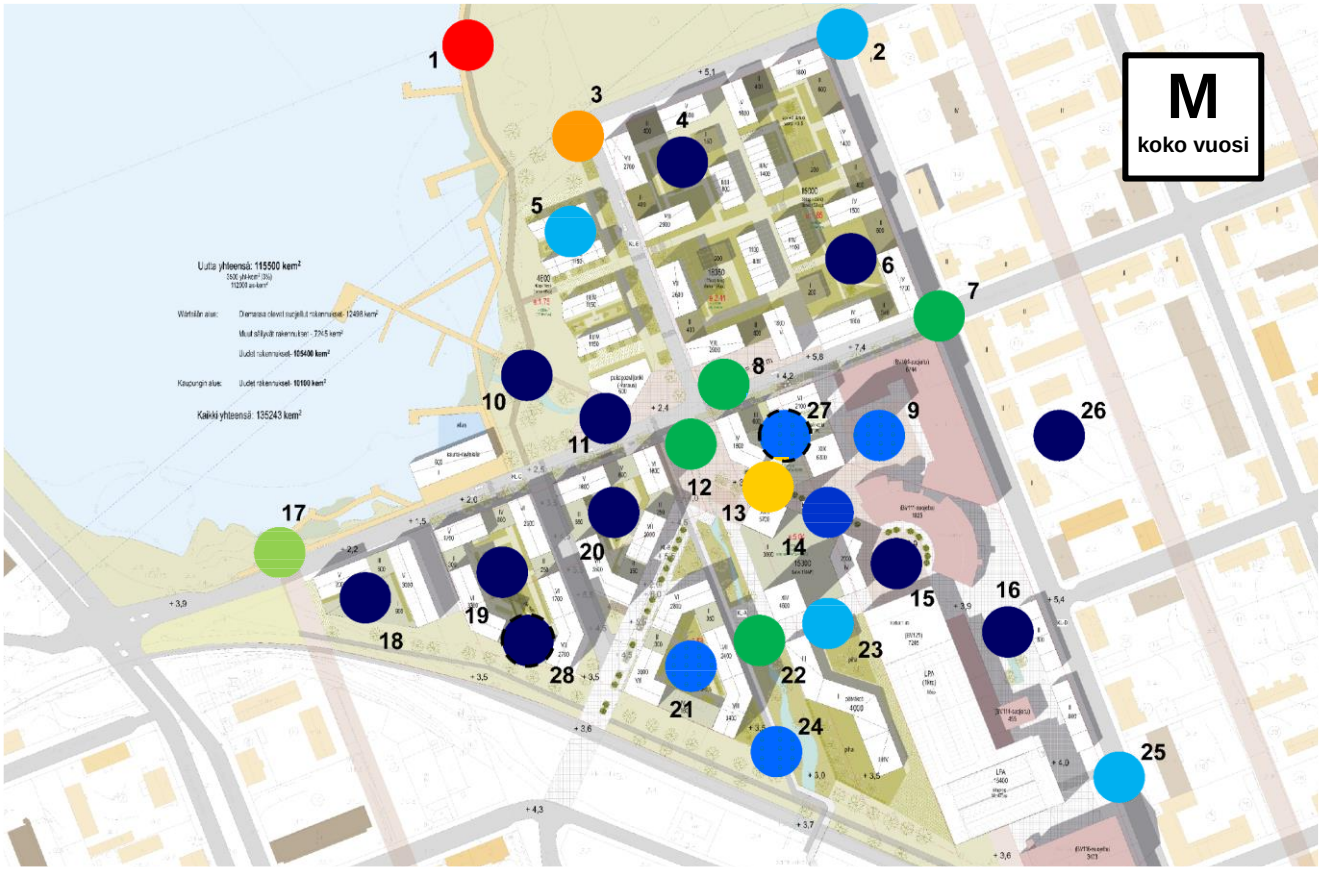
10 m/s *tuulen tuntee keholla, hyväksyttävän tuulen raja*

13 m/s *kävely on epäsäännöllistä, hiukset lepattavat suorina, sateenvarjoa on vaikea käyttää*

16 m/s *kävelyä on vaikea hallita, tuulen melu on epäviihtyisää, vartalolla on nojattava tuulta vastaan*

23 m/s *ihmiset kaatuvat tuulen vaikutuksessa.*

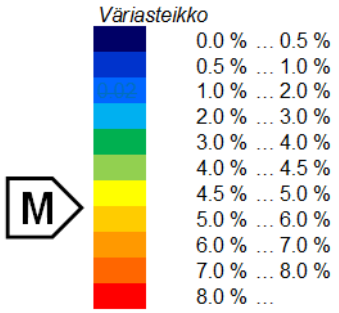
Näitä tuloksia voidaan tulkita paitsi käytetyn kriteerin (raja-arvona ”kerran kesässä” ja ”kerran vuodessa”) pohjalta, myös suoraan esiintymisajan perusteella. Tällöin voidaan esimerkiksi verrata objektiivisesti suunnitteluratkaisujen vaikutusta, ja arvioida kuinka monta tuntia vuodessa pihaa tai terassia ei voida käyttää kovan tuulen johdosta.



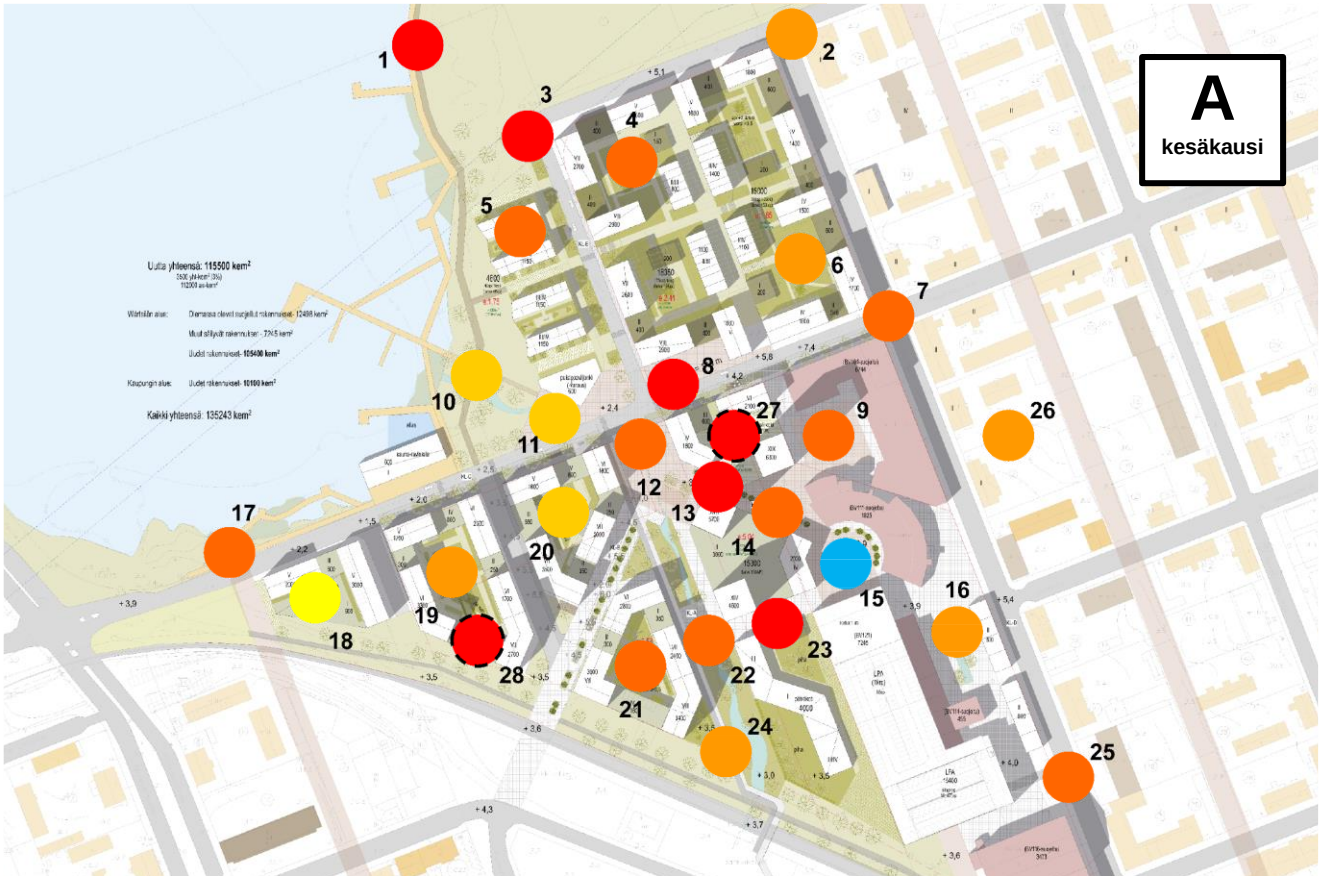
Tunnin keskituuli > ***5*** *m/s*

Piste	M % ajasta	Koko vuosi h/vuosi	h/kk	h/vk	Kesäkausi % ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	13.0 %	1140	95	22	9.7 %	425.4	70.9	16.4
2	2.2 %	189	16	4	1.5 %	64.2	10.7	2.5
3	6.3 %	549	46	11	4.7 %	203.8	34.0	7.8
4	0.4 %	39	3	1	0.2 %	9.9	1.6	0.4
5	2.5 %	222	19	4	1.7 %	73.2	12.2	2.8
6	0.1 %	5	0	0	0.0 %	1.5	0.2	0.1
7	3.1 %	275	23	5	2.1 %	93.9	15.7	3.6
8	3.0 %	265	22	5	2.3 %	100.8	16.8	3.9
9	1.4 %	122	10	2	0.7 %	30.6	5.1	1.2
10	0.2 %	15	1	0	0.1 %	3.5	0.6	0.1
11	0.4 %	33	3	1	0.2 %	9.9	1.6	0.4
12	3.4 %	302	25	6	2.1 %	93.8	15.6	3.6
13	5.3 %	468	39	9	3.4 %	147.7	24.6	5.7
14	0.8 %	66	6	1	0.4 %	19.7	3.3	0.8
15	0.1 %	8	1	0	0.0 %	1.3	0.2	0.0
16	0.3 %	24	2	0	0.1 %	4.3	0.7	0.2
17	4.3 %	381	32	7	2.7 %	120.1	20.0	4.6
18	0.0 %	2	0	0	0.0 %	0.2	0.0	0.0
19	0.1 %	10	1	0	0.0 %	1.8	0.3	0.1
20	0.1 %	12	1	0	0.1 %	3.2	0.5	0.1
21	1.8 %	153	13	3	1.1 %	47.0	7.8	1.8
22	3.8 %	332	28	6	2.4 %	106.1	17.7	4.1
23	2.2 %	189	16	4	1.2 %	52.5	8.7	2.0
24	1.9 %	163	14	3	1.0 %	43.3	7.2	1.7
25	2.3 %	203	17	4	1.2 %	51.2	8.5	2.0
26	0.0 %	3	0	0	0.0 %	0.3	0.0	0.0
27	1.7 %	145	12	3	1.3 %	57.4	9.6	2.2
28	0.1 %	10	1	0	0.0 %	1.8	0.3	0.1

** kesäkauden tunnit = 100 %*



Kuva 19: Tunnin keskituulien (> 5 m/s) esiintyminen tarkastelupisteissä (M-kriteeri).



Puuskatuuli > ***10*** *m/s*

Piste	Koko vuosi % ajasta	Koko vuosi h/vuosi	Koko vuosi h/kk	Koko vuosi h/vk	A Kesäkausi % ajasta*	A Kesäkausi h	A Kesäkausi h/kk	A Kesäkausi h/vk
1	5.1 %	448	37.4	8.6	3.03 %	132.7	22.1	5.1
2	0.3 %	25	2.0	0.5	0.15 %	6.7	1.1	0.3
3	2.2 %	192	16.0	3.7	1.17 %	51.2	8.5	2.0
4	0.5 %	47	3.9	0.9	0.27 %	12.0	2.0	0.5
5	1.2 %	104	8.7	2.0	0.76 %	33.1	5.5	1.3
6	0.2 %	19	1.6	0.4	0.18 %	7.9	1.3	0.3
7	0.6 %	54	4.5	1.0	0.33 %	14.5	2.4	0.6
8	1.7 %	147	12.3	2.8	1.24 %	54.2	9.0	2.1
9	1.1 %	94	7.8	1.8	0.47 %	20.5	3.4	0.8
10	0.2 %	19	1.6	0.4	0.06 %	2.4	0.4	0.1
11	0.3 %	24	2.0	0.5	0.08 %	3.7	0.6	0.1
12	1.1 %	95	7.9	1.8	0.52 %	22.9	3.8	0.9
13	4.0 %	351	29.3	6.8	2.71 %	118.9	19.8	4.6
14	1.4 %	126	10.5	2.4	0.98 %	43.1	7.2	1.7
15	0.1 %	7	0.6	0.1	0.02 %	1.1	0.2	0.0
16	0.5 %	47	3.9	0.9	0.14 %	6.0	1.0	0.2
17	1.7 %	147	12.3	2.8	0.79 %	34.4	5.7	1.3
18	0.1 %	12	1.0	0.2	0.05 %	2.2	0.4	0.1
19	0.7 %	63	5.3	1.2	0.21 %	9.4	1.6	0.4
20	0.1 %	12	1.0	0.2	0.09 %	3.8	0.6	0.1
21	1.1 %	100	8.3	1.9	0.66 %	28.7	4.8	1.1
22	1.3 %	114	9.5	2.2	0.69 %	30.4	5.1	1.2
23	3.0 %	264	22.0	5.1	1.89 %	82.8	13.8	3.2
24	0.5 %	48	4.0	0.9	0.22 %	9.7	1.6	0.4
25	1.2 %	109	9.1	2.1	0.53 %	23.2	3.9	0.9
26	0.3 %	30	2.5	0.6	0.12 %	5.1	0.9	0.2
27	2.0 %	171	14.3	3.3	1.46 %	64.0	10.7	2.5
28	2.1 %	180	15.0	3.5	1.26 %	55.4	9.2	2.1

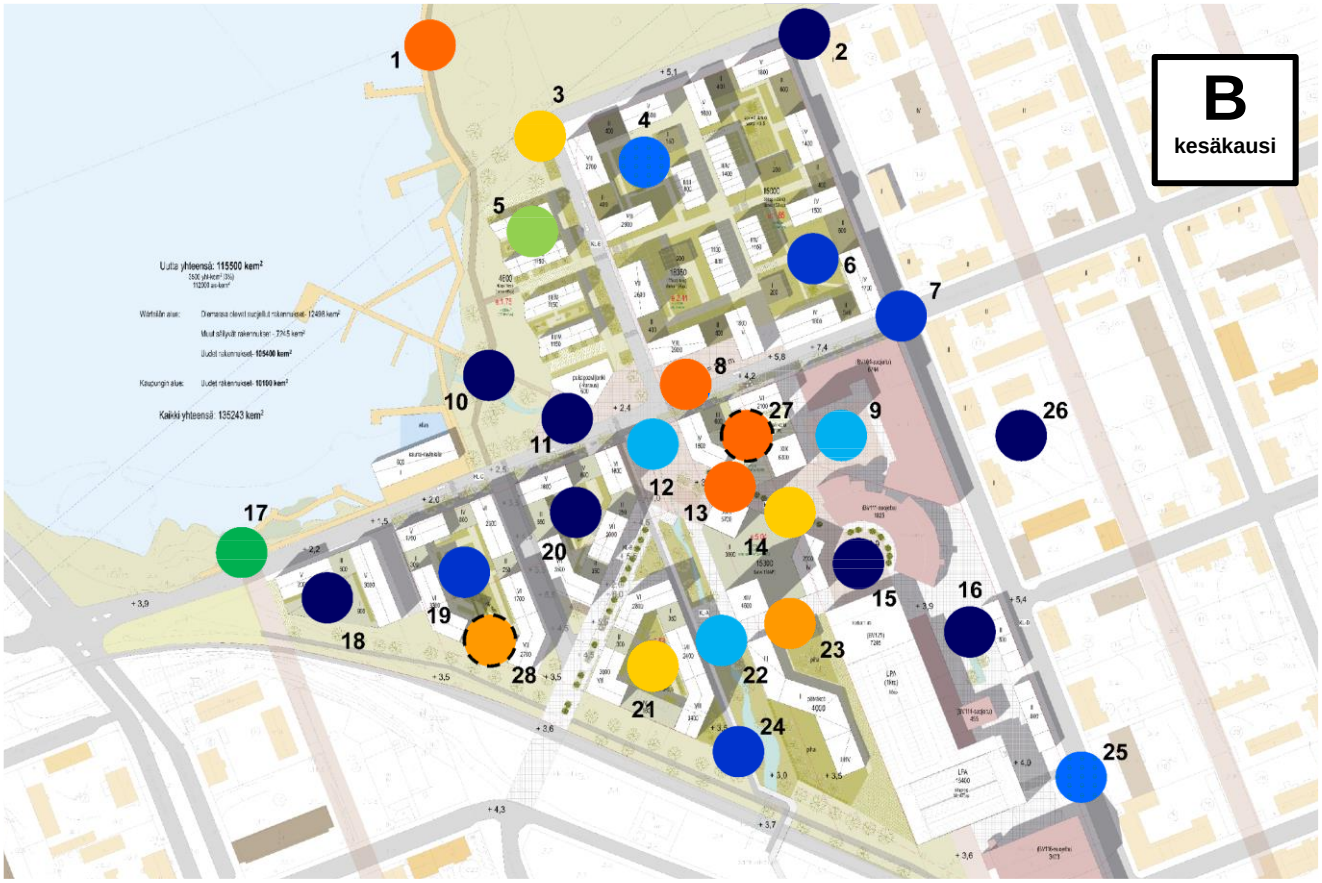
** kesäkauden tunnit = 100 %*

Väriasteikko

A

0.000 % ... 0.005 %
0.005 % ... 0.010 %
0.010 % ... 0.020 %
0.020 % ... 0.030 %
0.030 % ... 0.040 %
0.040 % ... 0.045 %
0.045 % ... 0.050 %
0.050 % ... 0.100 %
0.100 % ... 0.250 %
0.250 % ... 1.000 %
1.000 % ...

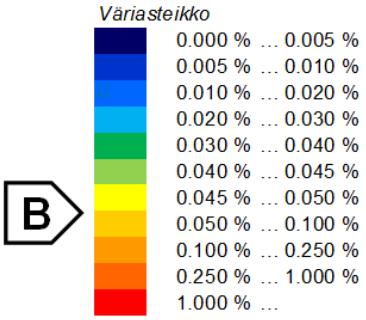
Kuva 20: Puuskatuulien > 10 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (A-kriteeri).



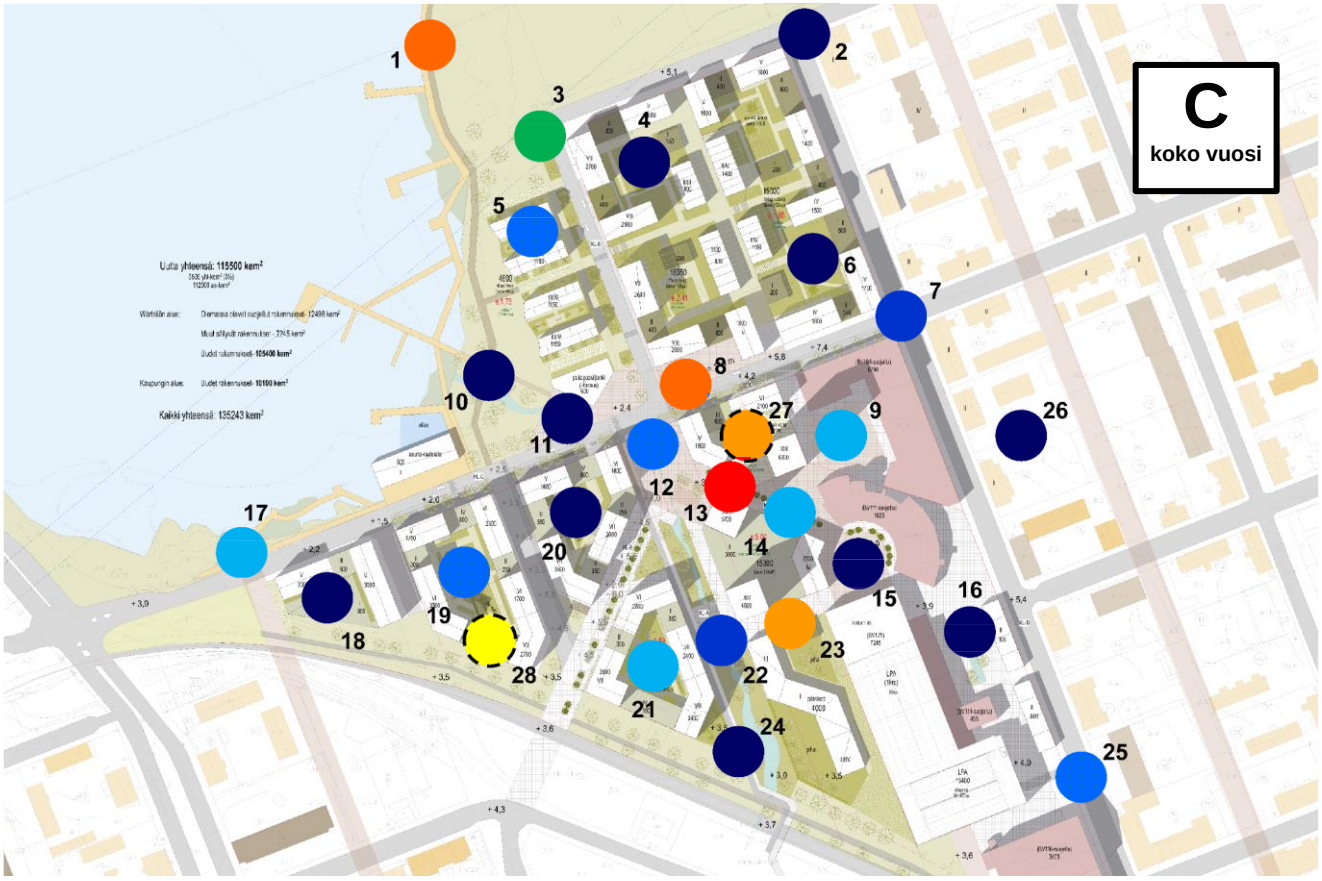
Puuskatuuli > ***13*** *m/s*

Piste	Koko vuosi % ajasta	Koko vuosi h/vuosi	Koko vuosi h/kk	Koko vuosi h/vk	B Kesäkausi % ajasta*	B Kesäkausi h	B Kesäkausi h/kk	B Kesäkausi h/vk
1	0.8 %	74	6.2	1.4	0.42 %	18.5	3.1	0.7
2	0.0 %	1	0.1	0.0	0.00 %	0.2	0.0	0.0
3	0.2 %	19	1.6	0.4	0.07 %	3.3	0.5	0.1
4	0.0 %	3	0.2	0.1	0.01 %	0.6	0.1	0.0
5	0.1 %	8	0.7	0.2	0.04 %	1.9	0.3	0.1
6	0.0 %	1	0.1	0.0	0.01 %	0.3	0.0	0.0
7	0.0 %	3	0.3	0.1	0.01 %	0.4	0.1	0.0
8	0.5 %	43	3.5	0.8	0.33 %	14.4	2.4	0.6
9	0.1 %	8	0.7	0.2	0.03 %	1.1	0.2	0.0
10	0.0 %	0	0.0	0.0	0.00 %	0.1	0.0	0.0
11	0.0 %	1	0.1	0.0	0.00 %	0.1	0.0	0.0
12	0.1 %	8	0.6	0.1	0.02 %	1.0	0.2	0.0
13	1.1 %	92	7.7	1.8	0.67 %	29.5	4.9	1.1
14	0.1 %	10	0.9	0.2	0.08 %	3.3	0.5	0.1
15	0.0 %	0	0.0	0.0	0.00 %	0.0	0.0	0.0
16	0.0 %	3	0.2	0.1	0.00 %	0.0	0.0	0.0
17	0.2 %	14	1.1	0.3	0.04 %	1.7	0.3	0.1
18	0.0 %	0	0.0	0.0	0.00 %	0.0	0.0	0.0
19	0.1 %	6	0.5	0.1	0.01 %	0.3	0.0	0.0
20	0.0 %	0	0.0	0.0	0.00 %	0.1	0.0	0.0
21	0.1 %	11	0.9	0.2	0.07 %	3.1	0.5	0.1
22	0.1 %	7	0.6	0.1	0.03 %	1.3	0.2	0.0
23	0.5 %	45	3.8	0.9	0.21 %	9.4	1.6	0.4
24	0.0 %	2	0.2	0.0	0.01 %	0.3	0.1	0.0
25	0.1 %	10	0.8	0.2	0.02 %	0.8	0.1	0.0
26	0.0 %	1	0.1	0.0	0.00 %	0.1	0.0	0.0
27	0.4 %	34	2.8	0.7	0.27 %	11.7	1.9	0.4
28	0.3 %	23	1.9	0.4	0.11 %	4.7	0.8	0.2

** kesäkauden tunnit = 100 %*



Kuva 21: Puuskatuulien > 13 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (B-kriteeri).



Puuskatuuli > ***16*** *m/s*

Piste	C % ajasta	Koko vuosi h/vuosi	h/kk	h/vk	Kesäkausi % ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0.100 %	8.8	0.7	0.2	0.052 %	2.3	0.38	0.09
2	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
3	0.012 %	1.1	0.1	0.0	0.003 %	0.1	0.02	0.00
4	0.001 %	0.1	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
5	0.003 %	0.3	0.0	0.0	0.001 %	0.1	0.01	0.00
6	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
7	0.001 %	0.1	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
8	0.108 %	9.4	0.8	0.2	0.072 %	3.1	0.52	0.12
9	0.006 %	0.5	0.0	0.0	0.001 %	0.0	0.01	0.00
10	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
11	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
12	0.004 %	0.3	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
13	0.221 %	19.3	1.6	0.4	0.131 %	5.7	0.96	0.22
14	0.006 %	0.6	0.0	0.0	0.003 %	0.1	0.02	0.01
15	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
16	0.001 %	0.1	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
17	0.009 %	0.8	0.1	0.0	0.001 %	0.1	0.01	0.00
18	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
19	0.004 %	0.4	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
20	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
21	0.010 %	0.8	0.1	0.0	0.005 %	0.2	0.03	0.01
22	0.002 %	0.2	0.0	0.0	0.001 %	0.0	0.00	0.00
23	0.057 %	5.0	0.4	0.1	0.014 %	0.6	0.10	0.02
24	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
25	0.004 %	0.4	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
26	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
27	0.086 %	7.5	0.6	0.1	0.045 %	2.0	0.33	0.08
28	0.022 %	1.9	0.2	0.0	0.004 %	0.2	0.03	0.01

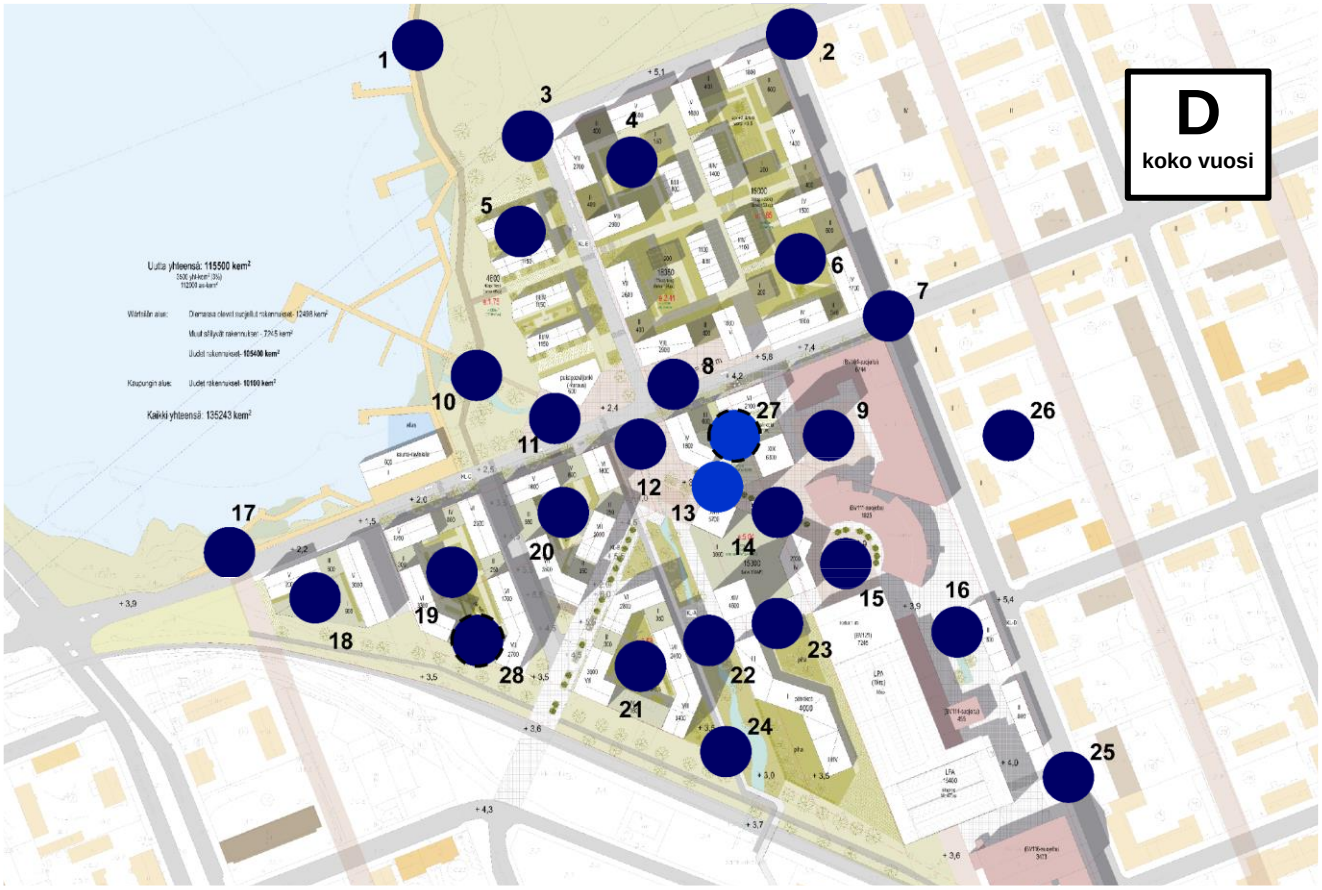
** kesäkauden tunnit = 100 %*

Väriasteikko

C

- 0.000 % … 0.001 %
- 0.001 % … 0.003 %
- 0.003 % … 0.005 %
- 0.005 % … 0.010 %
- 0.010 % … 0.015 %
- 0.015 % … 0.020 %
- 0.020 % … 0.025 %
- 0.025 % … 0.050 %
- 0.050 % … 0.100 %
- 0.100 % … 0.200 %
- 0.200 % …

Kuva 22: Puuskatuulien > 16 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (C-kriteeri).



Puuskatuuli > ***23*** *m/s*

Piste	D % ajasta	Koko vuosi h/vuosi	h/kk	h/vk	Kesäkausi % ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0.0002 %	0.0	0.0	0.0	0.0002 %	0.0	0.0	0.0
2	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
3	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
4	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
5	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
6	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
7	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
8	0.0007 %	0.1	0.0	0.0	0.0006 %	0.0	0.0	0.0
9	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
10	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
11	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
12	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
13	0.0015 %	0.1	0.0	0.0	0.0008 %	0.0	0.0	0.0
14	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
15	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
16	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
17	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
18	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
19	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
20	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
21	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
22	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
23	0.0001 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
24	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
25	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
26	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0
27	0.0013 %	0.1	0.0	0.0	0.0003 %	0.0	0.0	0.0
28	0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	0.0	0.0	0.0

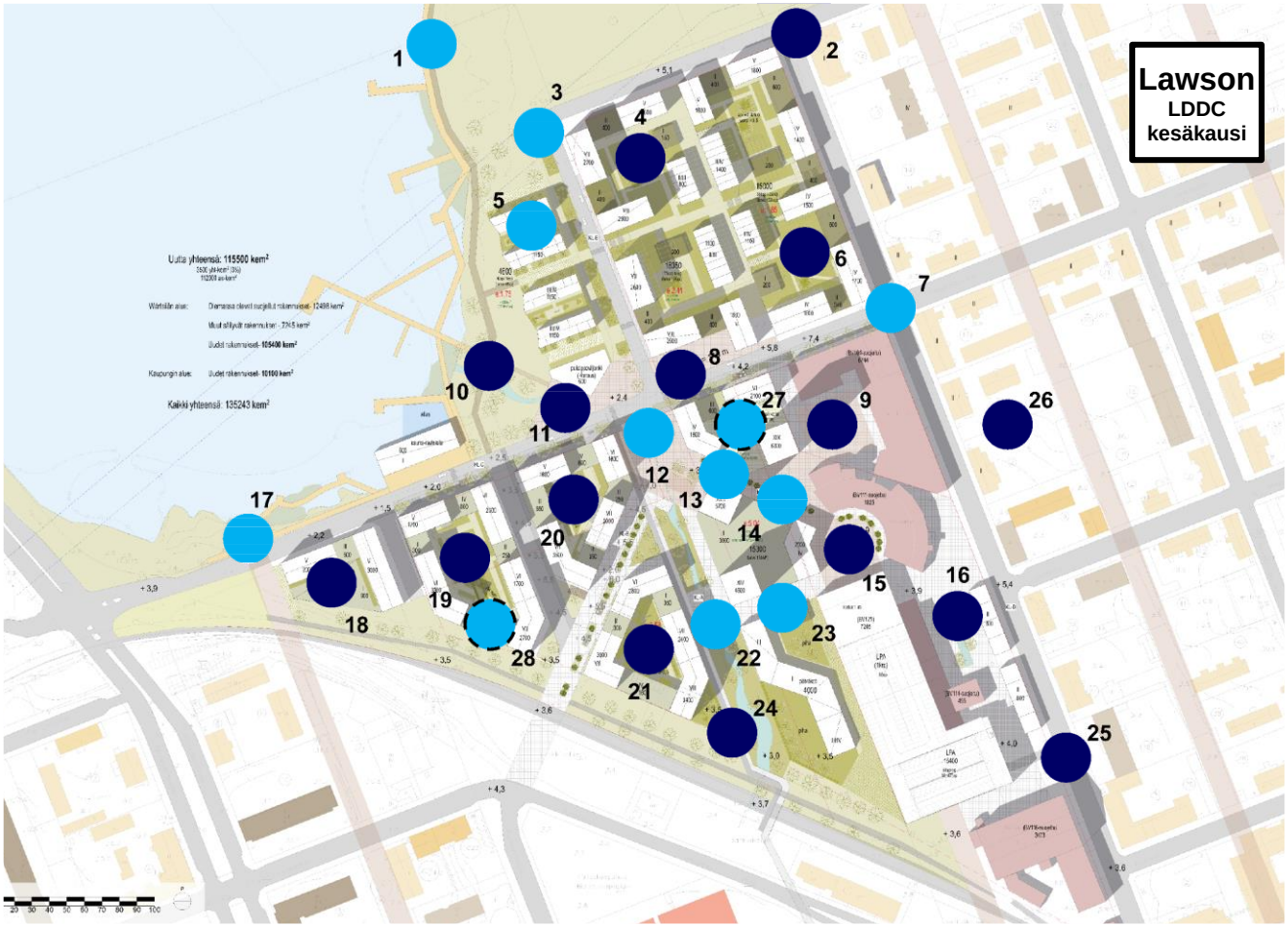
** kesäkauden tunnit = 100 %*

Väriasteikko

D

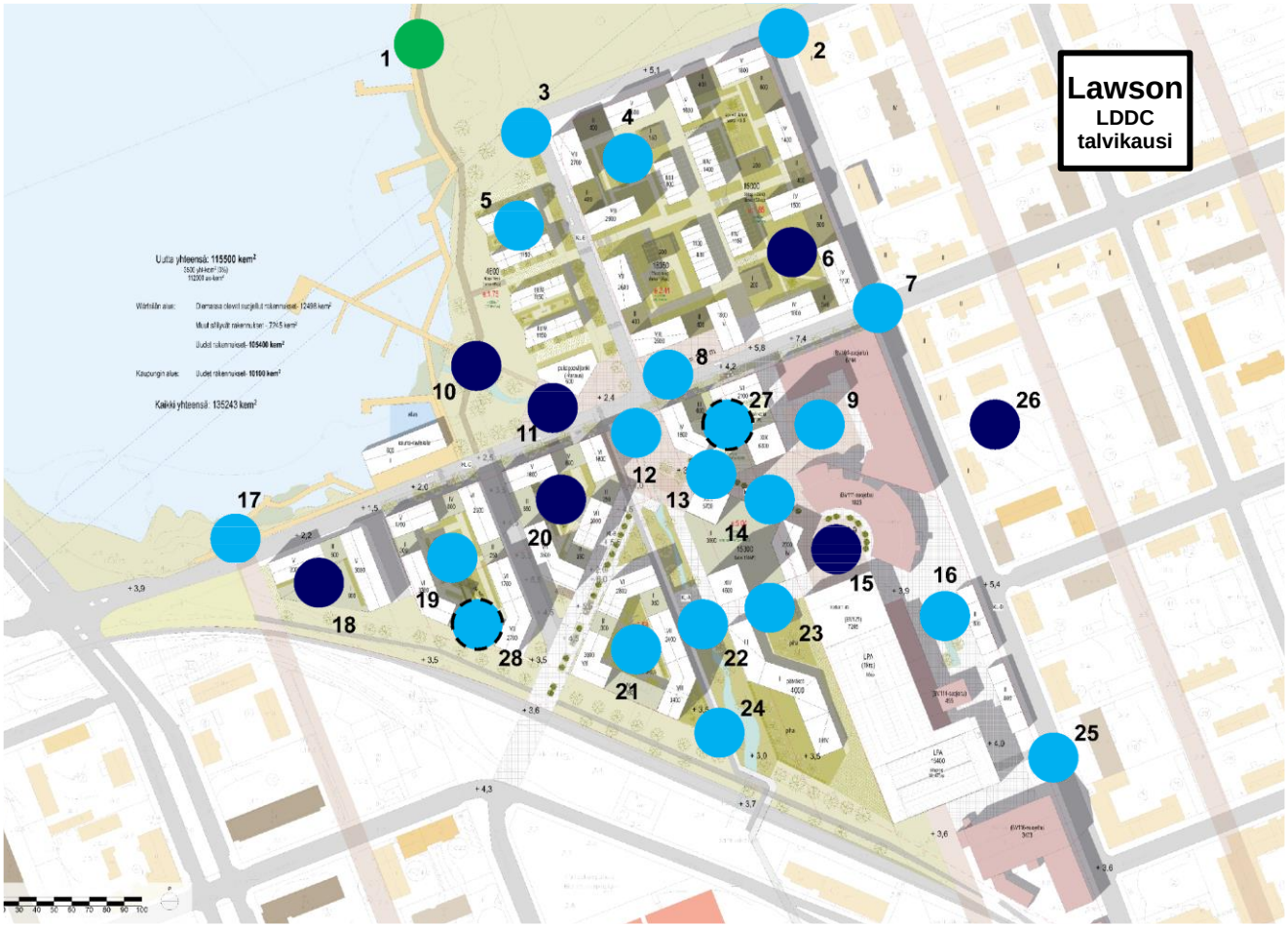
0.000 % ... 0.001 %
0.001 % ... 0.003 %
0.003 % ... 0.005 %
0.005 % ... 0.010 %
0.010 % ... 0.015 %
0.015 % ... 0.020 %
0.020 % ... 0.025 %
0.025 % ... 0.050 %
0.050 % ... 0.100 %
0.100 % ... 0.200 %
0.200 % ...

Kuva 23: Puuskatuulien > 23 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (D-kriteeri).



	Tarkastelupisteen soveltuvuus tuulisuuden kannalta
	GEM < 4 m/s < 5 % Istuminen pitkiä aikoja
	GEM < 6 m/s < 5 % Lyhytaikainen paikoillaan olo
	GEM < 8 m/s < 5 % Kävely
	GEM < 10 m/s < 5 % Tavoitteellinen kävely
	GEM > 10 m/s > 5 % Useimmat jalankulkijan toiminnot epäviihtyisä
	GEM > 15 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta yleisillä alueilla
	GEM > 20 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta.

Kuva 24: Lawson LDDC -kriteeri, kesäkausi.



	Tarkastelupisteen soveltuvuus tuulisuuden kannalta
	GEM < 4 m/s < 5 % Istuminen pitkiä aikoja
	GEM < 6 m/s < 5 % Lyhytaikainen paikoillaan olo
	GEM < 8 m/s < 5 % Kävely
	GEM < 10 m/s < 5 % Tavoitteellinen kävely
	GEM > 10 m/s > 5 % Useimmat jalankulkijan toiminnot epäviihtyisä
	GEM > 15 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta yleisillä alueilla
	GEM > 20 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta.

Kuva 25: Lawson LDDC -kriteeri, talvikausi.

3 Suunnitelmamuutosten vaikutus

Kohteen tuulisuuden kannalta avomeren suunnalta läheisen merenlahden yli puhaltavat tuulet (270° ja 292,5°) ovat erityisen kiinnostuksen kohteena. Rannassa sijaitsevien rakennusten vaikutusta korkean rakentamisen aiheuttamaan tuulisuuslisään on tutkittu virtauslaskennan avulla siten, että rannasta on poistettu rakennuksia. Tarkastelu on tehty tuulen suuntakulmalla 292,5°. Virtausten kulkua suunnitelmassa ja muutetussa suunnitelmassa on havainnollistettu virtaviivojen avulla kuvassa 26.

Erot tarkastelupisteiden suhteellisissa tuulenopeuksissa on esitetty taulukossa 3. Tulosten perusteella vaikutukset korkean rakentamisen tuulisuuslisään ovat vähäiset. Merkittävin ero on tarkastelupisteessä 12, jossa muutetussa suunnitelmissa tuuli pääsee kanavoitumaan suoraan kyseiselle aukiolle.

Taulukko 3: Kertoimet k_m ja k_g tarkastelupisteissä a) suunnitelma ja b) muutettu suunnitelma

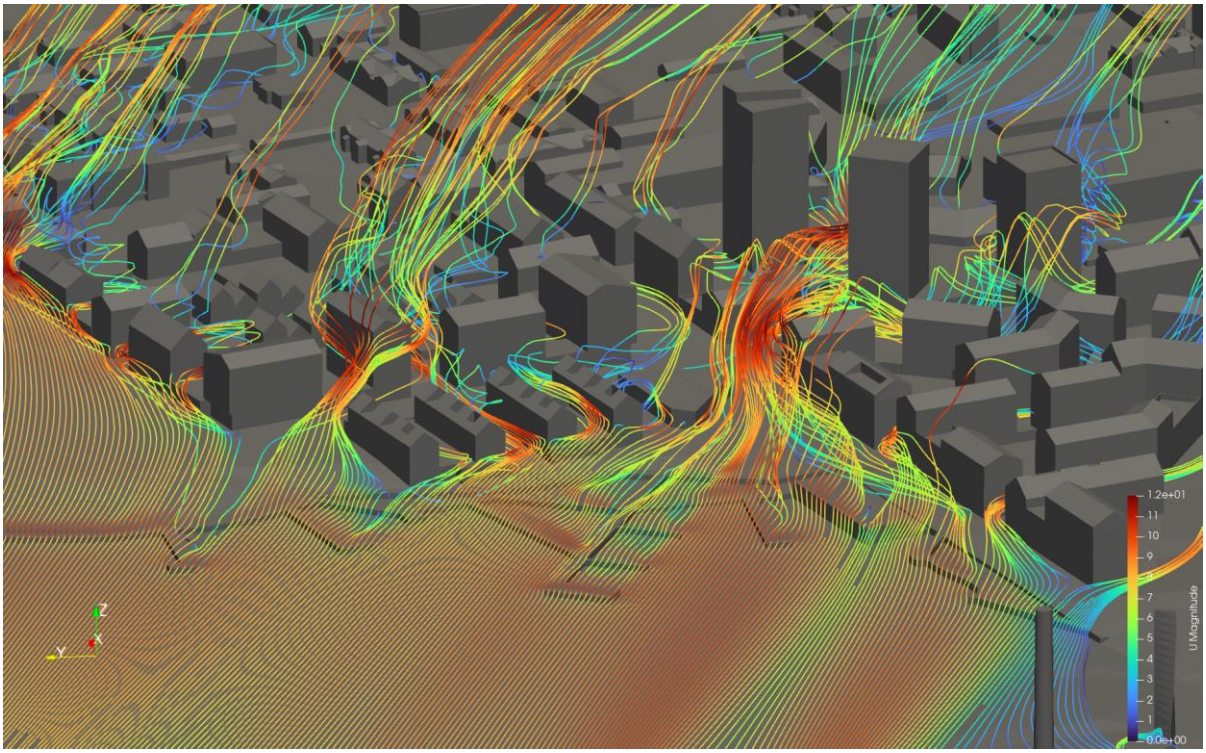
k_m (292,5°)

piste	a)	*b)*
1	0.75	0.77
2	0.66	0.68
3	0.38	0.37
4	0.39	0.34
5	0.52	0.66
6	0.46	0.36
7	0.55	0.34
8	0.56	0.21
9	0.86	0.76
10	0.54	0.47
11	0.53	0.50
12	0.26	0.76
13	0.58	0.70
14	0.57	0.57
15	0.26	0.23
16	0.18	0.13
17	0.34	0.31
18	0.32	0.30
19	0.20	0.16
20	0.44	0.34
21	0.29	0.27
22	0.46	0.62
23	0.33	0.43
24	0.14	0.13
25	0.28	0.33
26	0.39	0.45
27	**0.44**	**0.41**
28	0.42	0.36

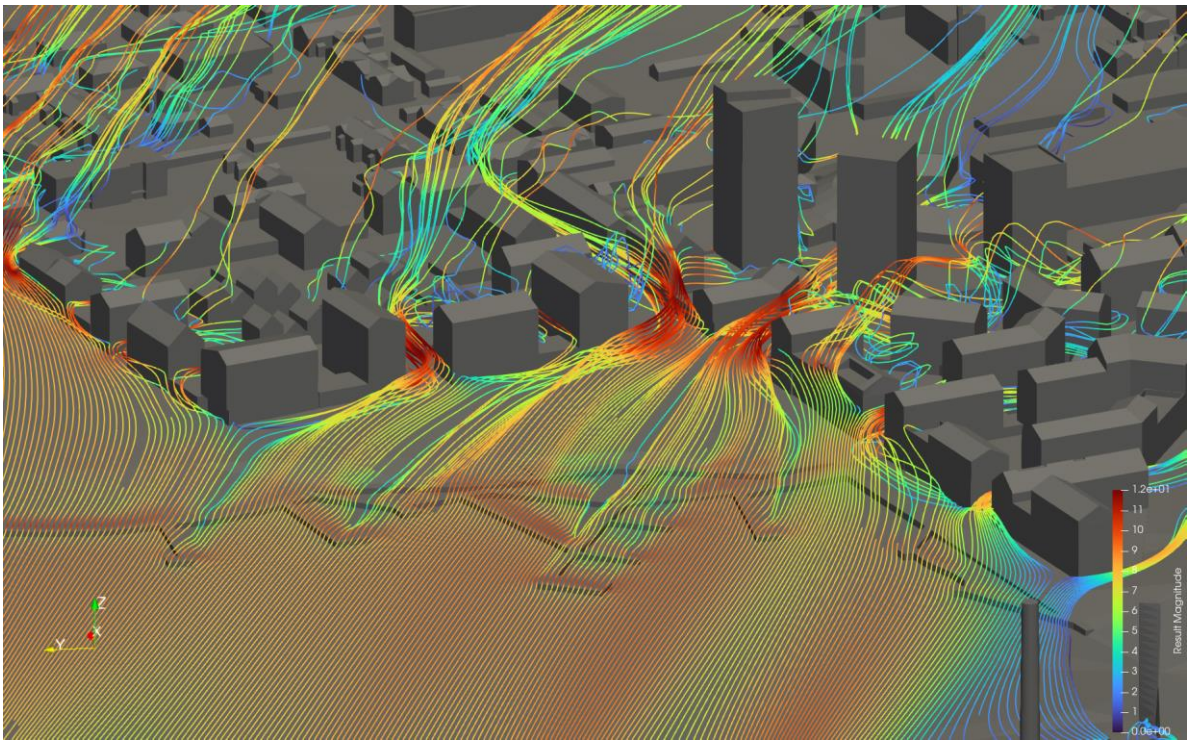
k_g (292,5°)

piste	a)	b)
1	1.15	1.16
2	0.96	0.95
3	0.80	0.75
4	1.15	0.97
5	1.05	1.05
6	0.91	0.74
7	0.87	0.61
8	0.93	0.49
9	1.59	1.39
10	0.95	0.87
11	0.83	0.78
12	0.53	1.04
13	1.29	1.21
14	1.24	1.09
15	0.76	0.70
16	0.53	0.40
17	0.76	0.66
18	0.65	0.60
19	0.43	0.33
20	0.89	0.77
21	0.70	0.59
22	0.84	1.01
23	0.67	0.71
24	0.24	0.39
25	0.67	0.71
26	0.87	0.86
27	1.05	0.77
28	0.95	0.77

a)

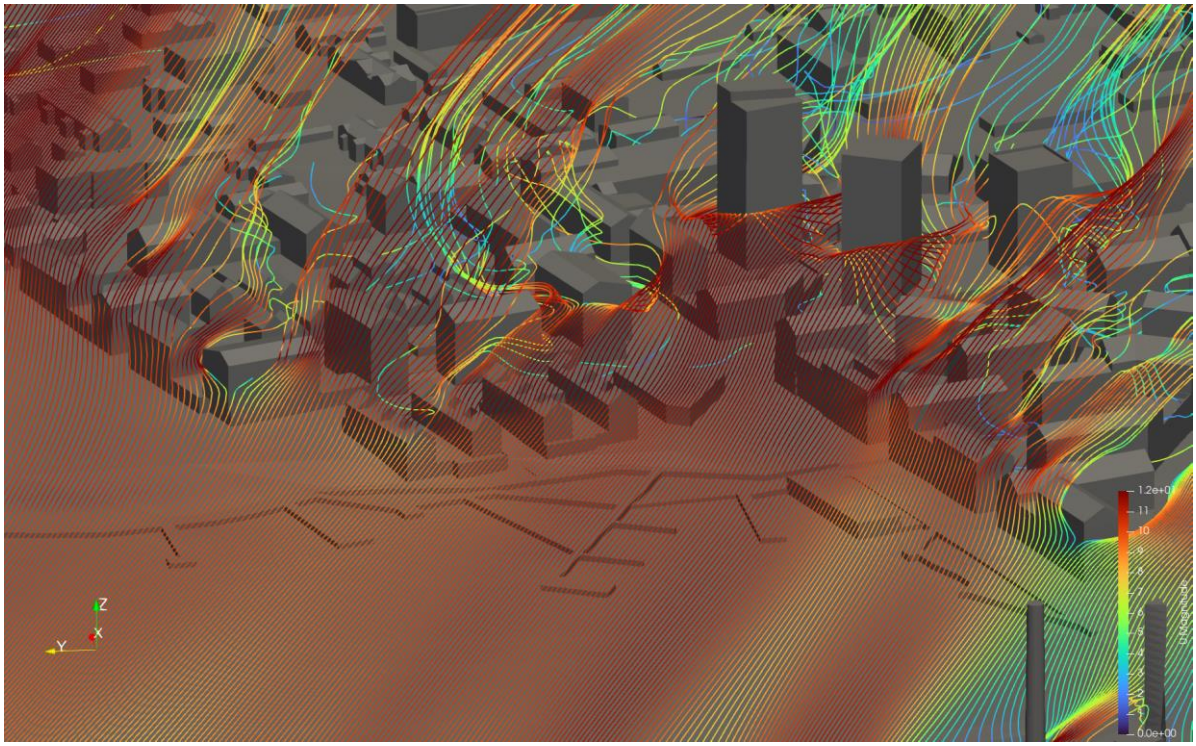


b)

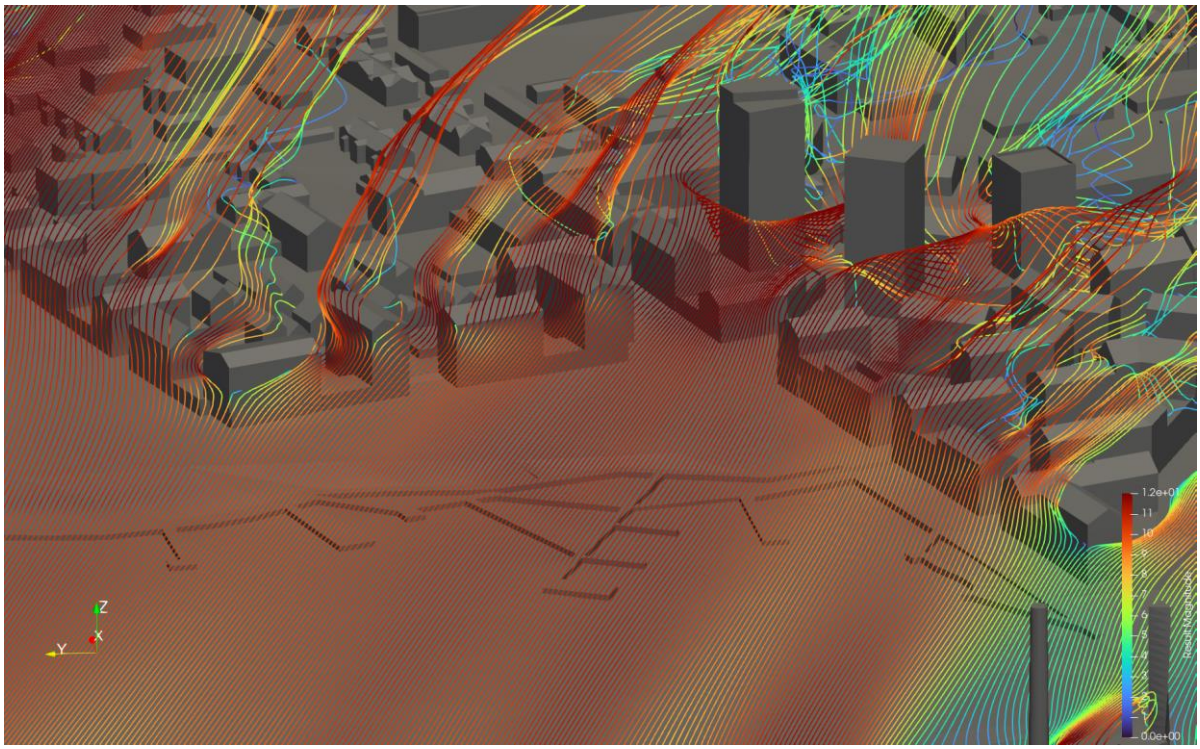


Kuva 26a: Virtausten kulku a) suunnitelmassa ja b) muutetussa suunnitelmassa (tuulen suunta 292,5°). Virtauslaskennalla tuotettuja virtaviivoja, joiden lähtöpisteet ovat 1,5 m korkeudella merenlahden päällä.

a)



b)

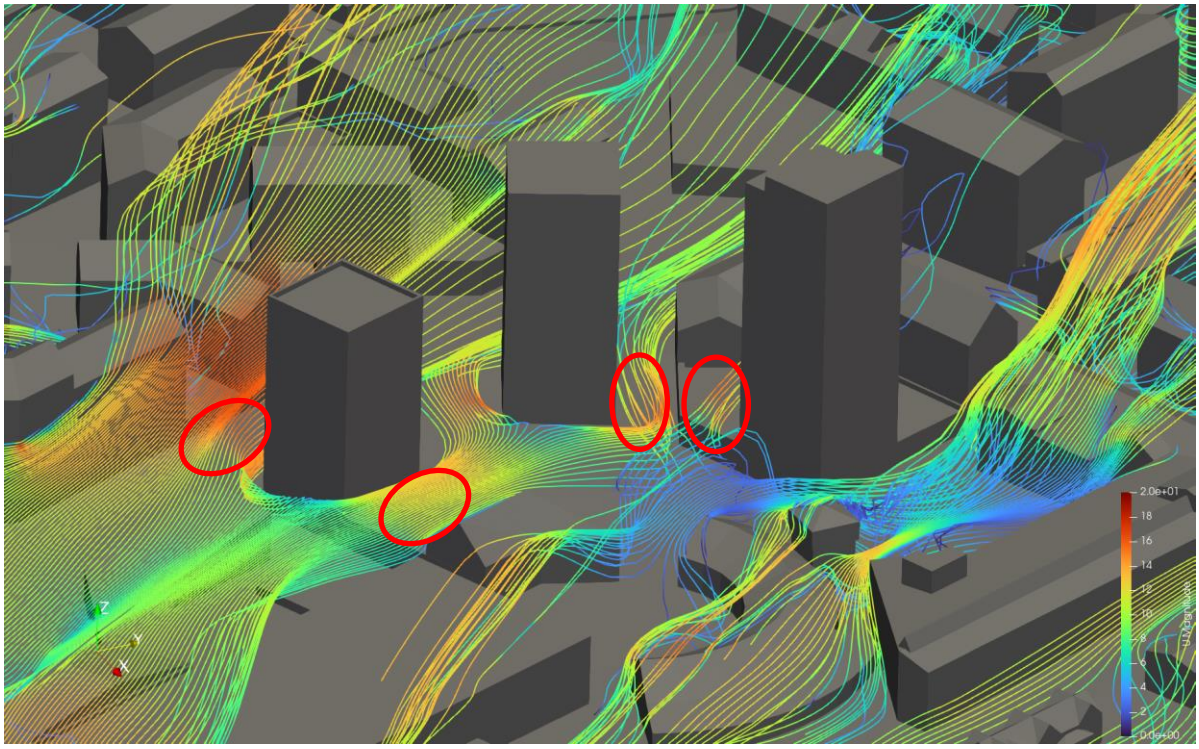


Kuva 26b: Virtausten kulku a) suunnitelmassa ja b) muutetussa suunnitelmassa (tuulen suunta 292,5°). Virtauslaskennalla tuotettuja virtaviivoja, joiden lähtöpisteet ovat 10 m korkeudella merenlahden päällä.

4 Tulosten ohjeellinen tulkinta

- Kohdealueen perustuulisuus on tuulien toistuvuuden suhteen lähellä pääkaupunkiseudun rannikon olosuhteita, jossa tuulisuusselvityksiä on tehty kattavasti. Esim. yli 7 m/s keskituulien esiintyminen kesäkaudella on Vaasan lentokentän tuulitilaston mittauspisteessä prosenttiyksikön tarkkuudella sama, kuin Helsinki-Vantaan lentokentän mittauspisteessä. Molempien lentokenttien etäisyys avomerestä on n. 20 km
- Vaasa seudun tuulissa painottuvat etelätuulet 180° ja 202,5°. Kesäkaudella painottuvat myös pohjoistuulet. Kohteen perustuulisuuden kannalta kuitenkin länsituuli 270° on oleellinen, koska siitä avautuu eniten avoin sektori avomerelle
- saarten, rakennusten ja metsien johdosta kohdealue on suhteellisen hyvin tuulensuojassa eri tuulensuunnista. Tästä seuraa, että kohdealueelle puhaltava tuuli on valmiiksi turbulenttia ja puuskaista, ja että tuulen puuskanopeutta painottavat tuulisuuskriteerit ovat pääsääntöisesti määräävämpiä, kuin keskinopeuden kriteerit
- tarkastelupisteessä 1, joka sijaitsee avoimella rantapenkereellä, jalankulkutason tuulen keskinopeuksien toistuvuus on suuri: yli 5 m/s keskituulia (M-kriteeri) esiintyy 13 % ajasta. Tämä on yli kaksinkertainen arvo muihin tarkastelupisteisiin nähden. Tulokseen vaikuttaa rantapenkereen korkeus, joka virtauslaskentamallissa on 1,8 m merenpinnan yläpuolella. Rantapenger lisää tarkastelupisteen tuulennopeutta länsituulen yhteydessä
- ranta-alueiden tarkastelupisteet 10 ja 11 ovat yllättävänkin vähätuulisia. Tulokseen vaikuttaa mallinnetun pitkän laiturirakenteen tuottama rosoisuus merenlahden päällä, mikä lieventää tuulia avoimissa sektoreissa 270°, 292,5° ja 315°. Tulos kuvastaa pienten yksityiskohtien (korkeus > 0,5 m) mallintamisen merkitystä tuloksiin ja samalla yleistä tapaa, jolla tuulennopeuksia voidaan lieventää esim. aukioilla ja kattopihoilla. Pintaan karheutta ja ilmavirtaukseen kitkaa tuovat rakenteet siirtävät virtauksia ylemmäs ja pois jalankulkijan tasosta
- kohteen suunnitelma noudattaa yleistä tuulisuuden suunnitteluohjetta, jossa rakennusten korkeus kasvaa tasaisesti rannasta sisämaahan päin
- kohteen korkea rakentaminen lisää tuulisuutta vierustassaan pääasiassa tuulensuunnan sektoreissa 292,5° ja 315° sekä mantereen puoleisissa tuulissa 112,5° ja 135°. Tuulisuus ei kuitenkaan ole numeroarvoina sen suurempaa, kuin merenlahtien rannassa. Tämän tyyppinen tilanne esiintyy esim. Helsingin Vuosaaren Cirrus-tornitalon juuressa, joka sijaitsee n. 0,7 km päässä merenrannasta siten, että väliin jää matalampia rakennuksia. Cirruksen vierusta tiedetään kaupunkilaisten kommenttien ja tuulisuusselvitysten perusteella tuuliseksi. Korkeasta rakentamisesta seuraavan tuulisuuslisän voidaan kuvata olevan muiden rakennusten tuottaman tuulensuojan paikallista heikentymistä
- tuulisuuden numeroarvot ja tulosten tulkinta vastaavat pitkälti Konsultin pääkaupunkiseudun rantakaupunginosien kohteiden tuloksia. Suurinta viihtyisyyttä (A-kriteeri; puuskatuuli > 10 m/s harvemmin kuin kerran kesäkaudella) on vaikea saavuttaa, mutta B-kriteeri (puuskatuuli > 13 m/s harvemmin kuin kerran kesäkaudella) on saavutettavissa. Suunnitelmassa matalampien rakennusten pihoilla B-kriteeri myös täyttyy (eli tuulisuus on lievää). Lawson LDDC -kriteeri on näiltä osin lievempi, ja sen mukaan kesäkaudella voidaan saavuttaa suurinta viihtyvyyttä vastaava kriteeri useammassa pisteessä
- kävelyä vaikeaksi tekeviä puuskatuulia (> 16 m/s, C-kriteeri) voi esiintyä korkeiden rakennusten vierustassa ja rantapenkereellä useammin, kuin kerran vuodessa. Nämä esiintyvät talvikauden myrskyissä, jolloin jalankulku, pyöräily ja pihalla oleskelu on joka tapauksessa epäviihtyisää

- kohteessa vaarallisen kovia puuskatuulia (> 23 m/s) esiintyy harvemmin, kuin kerran vuodessa. Vuotuisissa myrskyissä toistuvia vaarallisen kovia puuskatuulia käytetään yleisesti kriteerinä, jolloin korjaavia suunnitteluratkaisuja ja kaavamääräyksiä tulisi käyttää. Kohteessa näitä ei ole tarve ehdottaa
- korkeiden rakennuksen sisäänkäynnit tulisi suojata sisennyksillä tai katoksilla yleisten suunnitteluohjeiden mukaisesti
- talvikauden mahdollinen liukkaus ja tuulenpuuskat huomioon ottaen riittävä valaistus ja kaiteet käsijohteineen ovat eduksi parantamaan jalankulun turvallisuutta erityisesti kaltevien pintojen yhteydessä
- kohteen suunnitelmalla ei ole merkittäviä tuulisuusvaikutuksia suunnittelualueen ulkopuolisten alueiden tuulisuuteen. Kohteen rakennukset toimivat näille tuulensuojana. Tältä osin epäedullisin tilanne on, jos kohdealueen rakennukset on purettu ilman, että uusia on rakennettu tilalle
- tuulisuussuunnitelulla on kohteessa merkitystä erityisesti korkeiden rakennusten vierustassa. Tuulisuussuunnittelu voidaan tehdä viihtyisyysnäkökulmasta ottaen huomioon myös muut suunnittelutavoitteet. Kattopihan kaiteiden korkeudella voidaan vaikuttaa tuulisuutteen erityisesti kaakkoistuulen (135°) osalta (kuva 27). Kaakkoistuulet muodostavat noin neljäsosan kattopihan tarkastelupisteen numero 27 tuulisuuden numeroarvoista



Kuva 27: Virtausten kulku kaakkoistuulen (135°) yhteydessä. Kattopihan kaiteiden korkeudella voidaan vaikuttaa paitsi kattopihojen, myös jonkin verran katutason tuulennopeuksiin (kyseiset kohdat ympyröity). Kuva esittää virtauslaskennalla tuotettuja virtaviivoja, joiden lähtöpisteet ovat 5 m korkeudella maanpinnasta.

- tuulisuusselvitys on Konsultin aikaisemmista selvityksistä poiketen tehty kokonaan numeerisen virtauslaskennan avulla. Käytetty tapa tuulen puuskanopeuksien määrityksessä (kertoimet k_g) ei ole yleisesti käytössä tai kansainvälinen standardi, ja on mahdollinen ainoastaan k-ε ja k-ω -tyypin turbulenssimalleja käytettäessä. Tulosten perusteella menetelmässä laskentaa, eli iteratiivista ratkaisua, on jatkettava normaalia noin 50 % pitempään, koska turbulenssiparametrit lähellä pintoja muuttuvat tuulennopeuksia kauemmin ennen tasapainotilan (vakaa tilan) löytymistä. Laskennan ennenaikaisen keskeyttämisen vaikutus k_g kertoimiin on suuruusluokaltaan ±20 %. Virtauslaskennalla määritetyt kertoimet k_m ja k_g on tarkastettu olevan siinä määrin lähellä Konsultin muista kohteista määrittämiä tuulitunnelikoepohjaisia tuloksia, että virtauslaskentatuloksia on käytetty muokkaamattomina. Toisin sanoen, työpöytämenetelmä ei tässä tapauksessa olettavasti antaisi luotettavampia tuloksia
- työpöytämenetelmää ja mittauksia todellisista kohteista voidaan tarvittaessa hyödyntää esim. puiden ja istutusten vaikutuksen analyysissä
- tärkeä tuulisuuden numerovoihin ja niiden luotettavuuteen vaikuttava tekijä kohteessa on paikallisten tulostilastojen tulosten oikaisu vastaamaan teoreettisia laskentaotaksumia. Ilman oikaisua, esim. yli 7 m/s keskituulia esiintyy talvikaudella Vaasan lentokentän mittauspisteessä 8 % ajasta ja Maalahden mittauspisteessä 57 % ajasta. Oikaistu tulos (z_0 = 0,03 m, muuttumaton n. 50 km matkalla tuulen puolella) on 24 %. Konsultin käyttämä tapa tuulisuustulosten tulkinnassa on verrata numeroarvoja muiden tunnettujen lähistön alueiden ja kohteiden arvoihin. Tässä tavassa on suositeltavaa käyttää samaa oikaistua, esim. tämän selvityksen kuvan 13 mukaista, tuulitilastoa eri analyyseissä.

Lähdeluettelo

1. Espoon korkean rakentamisen periaatteet. Espoon kaupunkisuunnittelukeskuksen julkaisuja 10/2012.99 s. + liitteet.
2. Lawson, T., 2001. Building aerodynamics, Imperial College Press. s. 304.

Liite 1: Tuulisuuden määrittämisen yleisperiaate

Tuulisuus voidaan määrittää objektiivisesti laskemalla tietyn tuulennopeuden raja-arvon ylittävien katutason tuulien keskimääräinen kesto (esim. % ajasta). Esim. tuulen keskinopeus > 5 m/s katutasossa ≥ 5 % ajasta on toisinaan käytetty nyrkkisääntö olosuhteelle, jossa tuulisuudella on merkitystä. Katutaso tarkoittaa tuulisuusmalleissa korkeutta 1,5…2,0 m jalankulkutason yläpuolella.

Katutason tuulisuus riippuu alueen perustuulisuuden tasosta sekä rakennusten, maastonmuotojen, aukeiden, vesialueiden, puiden, pensaiden, aitojen yms. paikallisten tekijöiden vaikutuksesta. Kaavoituksen yhteydessä tuulisuus on kiinnostuksen kohteena useimmiten juuri rakennetussa ympäristössä, jossa rakennusten paikallinen merkitys on suuri. Rakennukset antavat yleisesti tuulensuojaa; tuulisuus ja pakkasen purevuus on kaupunkien keskustan rakennusten keskellä yleisesti pienempää kuin meren rannalla tai aukeilla keskustan ympärillä. Rakennusten sijoittelusta ja erityisesti korkeasta rakentamisesta voi kuitenkin seurata, että tuulensuoja on paikallisesti normaalia pienempi, ja katutason tuulenpuuskat tulevat yllätyksenä muuten suojaisassa ympäristössä.

Perustuulisuus saadaan määritettyä meteorologisten tuulitilastojen avulla ottaen huomioon maaston rosoisuuden erot tuulitilaston mittauspisteen ja kohdealueen sijainnin välillä tuulen suunnittain. Meteorologiset tuulitilastot mitataan yleisimmin avoimessa maastossa n. 10 m korkeudella maapinnasta, ja mittaukset tilastoidaan 10 min keskinopeuksina. Tuulen puuskanopeus on keskinopeutta suurempi, ja tarkoittaa säätiedotuksissa tuulennopeuden 3 s huippuarvoa. Tällaiset hetkelliset tuulenpuuskat aiheuttavat suurimman osan tuulisuuden epämiellyttävistä tai vaarallisista vaikutuksista.

Tuulen keskinopeus 10 m korkeudessa on avoimessa tasaisessa maastossa likimain 1,5-kertainen katutason keskinopeuteen nähden. Tällöin 5 m/s katutason keskituuli vastaa noin 7,5 m/s keskituulta 10 m korkeudessa. Näitä esiintyy Suomessa meren rannikolla tyypillisesti 5...8 % ajasta, eli tuulisuudella on yleisesti merkitystä merenrantarakentamisessa.

Kun tuulisuus selvitetään tarkemmin kohteen eri tarkastelupisteissä, edellä mainittu suhde on määritettävä tarkemmin; esimerkiksi tuulitunnelikokeilla pienoismallia apuna käyttäen tai mittauksilla luonnossa todellisesta kohteesta. Tällöin tarkastelupisteen suhteellinen keskituuli (k_m) ja suhteellisen puuskatuuli (k_g) voidaan esittää tuulen suunnittain kaavoilla

$$k_m = v_m/v_{ref}$$

$$k_g = v_g/v_{ref}$$

missä v_m = katutason keskituuli; k_g = katutason puuskatuuli, ja v_{ref} = normeerauksessa käytetty tuulennopeus (v_{ref} voi olla esimerkiksi kohdealueen perustuulisuutta kuvaava tuulen keskinopeus korkeammalla maanpinnasta tai suoraan paikallisesta sääasemesta mitattu tuulen keskinopeus).

Suhteellinen keskituuli (k_m) ja suhteellinen puuskatuuli (k_g) voidaan olettaa olevan tuulen suunnasta ja tarkastelupisteestä riippuvia vakioita. Katutasossa puuskaisuuden osuus on suhteellisesti suurempi kuin tuulitilastojen mittauskorkeudella. Kun v_{ref} = keskituuli 10 m korkeudessa avoimessa maastossa, ovat kertoimet kaupunkiympäristössä suuruusluokkaa k_m = 0,1….1,2 ja k_g = 0,2…2,5. Suurimpia kertoimia mitataan yleisesti ympäristöään selvästi korkeampien rakennusten juuressa, kattopihoilla, kansilla ja silloilla. Erityisesti k_g voi tietyillä tuulensuunnilla olla suuri, tarkoittaen että katutasossa voi esiintyä tuulisella säällä kovia puuskatuulia. Katutason puuskatuulien vaikutuksia on kuvattu taulukossa L1.1.

Taulukko L1.1: Katutason puuskatuulen vaikutuksen kuvaus kaupunkiolosuhteissa

3 s puuskatuuli [m/s]	*Vaikutus*
5…8	tuuli nostaa pölyä, kuivaa maata ja irtonaisia papereita, hiukset menevät sekaisin
8…11	tuulen tuntee keholla, hyväksyttävän tuulen raja
11…14	kävely on epäsäännöllistä, hiukset lepattavat suorina, sateenvarjoa on vaikea käyttää
14…17	kävelyä on vaikea hallita, tuulen melu on epäviihtyisää, vartalolla on nojattava tuulta vastaan
17…21	tasapainon säilyttämisessä on suuria vaikeuksia, vartalo siirtyy tuulen mukana, vanhuksille vaarallinen tuuli
21…24	ihmiset kaatuvat tuulen vaikutuksessa
24…28	seisominen ilman tukea on mahdotonta, kiinnipitäminen on välttämätöntä
> 28	hyvin epätodennäköisesti koskaan koettavissa

Perustuulisuuden osalta tärkeä yksittäinen tekijä on kohdealueen etäisyys merenrannasta ja avomerestä suhteessa korkeimpien rakennusten korkeuteen. Rannikon läheisyydessä mereltä päin puhaltavilla tuulilla on tavanomaisesti suurin merkitys tuulisuuden numeroarvoihin. Tuulen ollessa meren suunnalta merialueiden kovat tuulennopeudet vaikuttavat lähes vaimentumattomina mantereen päällä tietystä korkeudesta ylöspäin, missä korkeus on verrannollinen etäisyyteen merenrannasta (tämä korkeus on likimain x/12,5, missä x = kohteen etäisyys merenrannasta). Korkeat rakennukset voivat rannikon läheisyydessä kääntää näitä vaimentumattomia tuulia katutasoon, jolloin korkeasta rakentamisesta aiheutuva lisä tuulisuuteen voi olla erityisen merkittävä. Paitsi rakennuksen korkeus, myös julkisivun leveys (tornin hoikkuus) vaikuttaa syntyvään tuulisuuden lisään, samoin kuin viereisten muiden korkeiden rakennusten yhteisvaikutus.

Tavanomainen tuulisuustarkasteluissa hyödynnettävä tuulitilasto on tyypiltään tuuliruusu (kuva L1.1), joka esittää säähavaintoaseman mittauspisteen eri keskituulien esiintymisen prosentteina ajasta.

Tuuliruusu esittää tuulennopeuksien esiintymisen rajallisella määrällä tuulennopeusalueita. Kuvasta L1.1 ei voida esimerkiksi tarkasti päätellä aikaa, jossa tuulen keskinopeus ylittäisi 21 m/s. Tuulisuuden laskennallista määrittämistä varten jatkuva esitysmuoto on käytännöllisempi; ja useasti käytetty otaksuma on, että tuulen keskinopeuksien esiintyminen kullakin tarkasteltavalla tuulen suunnalla ja tarkastelujaksolla noudattaa Weibull-todennäköisyystiheysjakaumaa

$$p(v_m) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{v_m}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(v_m/\lambda)^k}$$

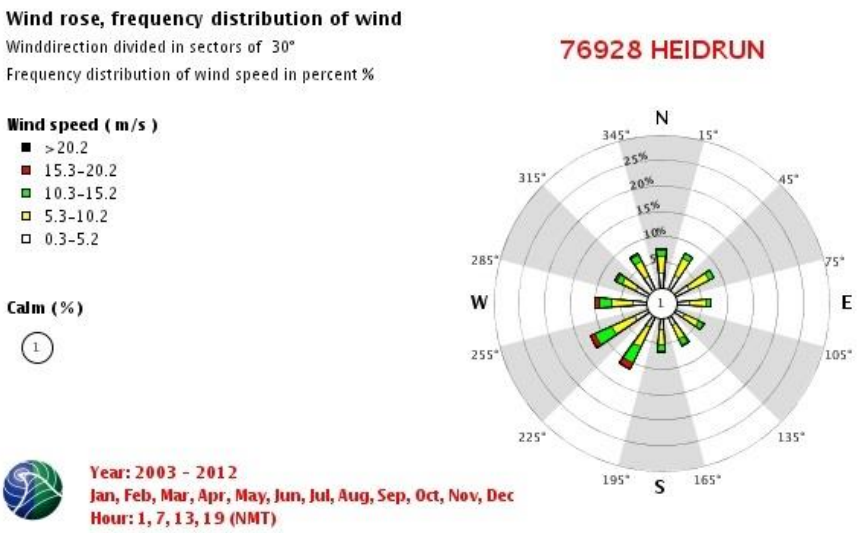
missä k = muotoparametri ja λ = skaalausparametri. Kumulatiivinen jakauma ($v \leq v_m$) on tällöin

$$P(v_m) = 1 - e^{-(v_m/\lambda)^k}$$

Tuulen keskinopeuden v_m ylittävien tuulien osuus tarkasteltavalla tuulen suunnan sektorilla saadaan lausekkeesta

$$P(v_m) = P_0 e^{-(v_m / \lambda)^k}$$

missä P_0 = tuulen suunnan sektoriin liittyvien osuus kaikista tuulista. Weibull-jakauman parametrit *k* ja λ saadaan käyränsovituksella tuuliruusun arvoihin tai tuulitietoja toimittava organisaatio voi niitä määrittää valmiiksi. Käyränsovituksesta aiheutuva virhe on käytännössä pieni tavanomaisella tuulennopeusalueella, jolla tuulitilasto sisältää mittaustuloksia; toisin sanoen Weibull-jakauma sopii hyvin sääasemien mitattujen keskituulinen kuvaamiseen, ja siten tuulisuuden analyysiin. Äärimmäisen kovien tuulien, esim. rakennesuunnittelussa useasti käytettävien 50 v toistumisvälin myrskytuulien, analyysissä tulokset ovat herkkiä parametrin *k* arvolle, ja näitä analysoidaankin paremmin ns. ääriarvojakaumien avulla. Näissä otetaan tavanomaisesti lisäksi huomioon erilaisia varmuus- ja luotettavuusmarginaaleja liittyen mm. tuulitilastoihin ja sään ääri-ilmiöiden pitkän aikavälin muutoksiin. Periaatteessa tuulisuustarkasteluissakin voitaisiin varautua tuulisuusolosuhteiden pitkän aikavälin muutoksiin. On kuitenkin huomioitava, että nämä tapahtuvat määritelmänsä mukaisesti hitaasti, jolloin ihmiset tottuvat muutokseen, ja myös kaupunkirakenne ja puuston korkeus yms. tekijät voivat muuttua merkittävästi n. 50 v tarkasteluvälillä.



Kuva L1.1: Esimerkki meteorologisen havaintoaseman mittaustuloksista laaditusta tuuliruususta (Heidrun, Norja).

Kun kohdealueen perustuulisuus on selvitetty, tuulisuuden numeroarvo eri pisteissä riippuu kaupunkiympäristössä erityisesti kohteen ja sen lähiympäristön rakennuksista, puustosta ja jalankulkutason korkeusasemasta; eli kertoimista k_m ja k_g tarkastelupisteittäin ja tuulen suunnittain. Uutta rakennuskantaa suunniteltaessa paikallisten tekijöiden tarkka huomioon ottaminen edellyttää käytännössä tuulitunnelikokeiden suorittamista kohdealueen pienoismallia apuna käyttäen tai virtauslaskentaa. Alueen nykytilan tuulisuutta voidaan selvittää myös paikan päällä katselmuksilla ja niiden yhteydessä tehtävillä katutason tuulennopeuden mittauksilla.

Tuulisuus määritetään tietyissä suunnitelman kannalta mielenkiintoisissa pisteissä. Tällaisesta yksityiskohtaisesta tarkastelusta käytetään nimeä tuulisuuskartoitus.

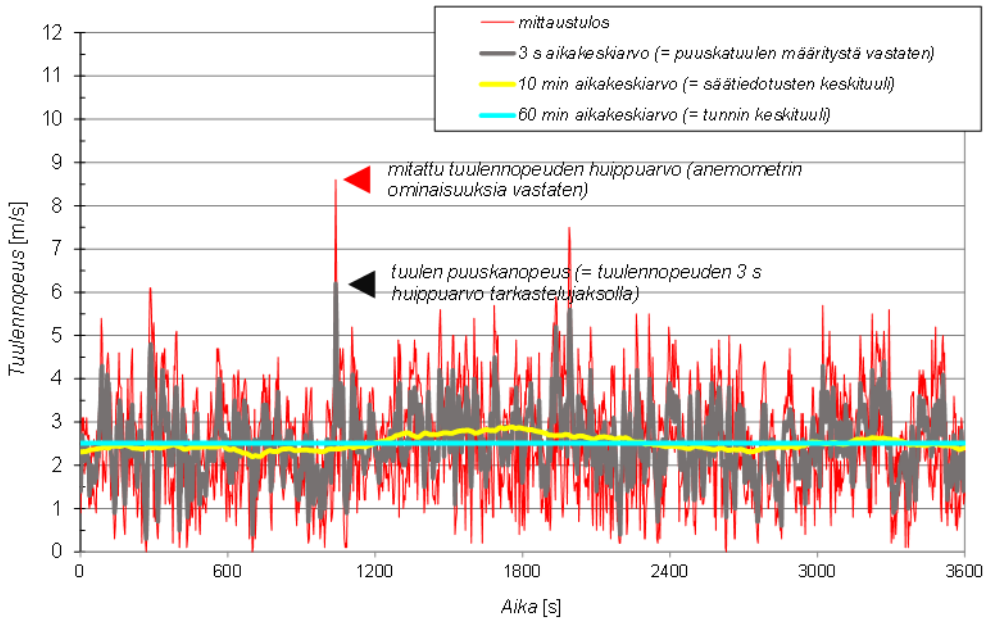
Kaupungeissa, joissa tuulisuudella on erityistä merkitystä, kriteerejä voidaan esittää kaupunginosa- ja aluekohtaisesti. Esimerkkinä tästä on tuuliseksi tunnettu Wellingtonin kaupunki Uudessa-Seelannissa, jossa kaupunki on määritellyt keskustan julkisille alueille standardin, kuinka paljon uusi rakennus saa lisätä tuulisuutta. Tällöin suunnittelussa on selvitettävä sekä nykytilan tuulisuus, että tuulisuus uuden rakennuksen vaikutuksessa.

Tuulisuuden hyväksytty taso voidaan esittää tuulisuuskriteerinä, joka koostuu tyypillisesti

- tuulennopeuden raja-arvosta (katutason keskituuli tai puuskatuuli)
- ylittävien tuulennopeuksien sallitusta keskimääräisestä kestosta raja-arvoa vastaten
- ihmisen toimintaa kuvaavasta luokasta (paikoillaan olo, kävely jne.)
- kuvauksesta siitä miten kriteerin täyttämättä jääminen vaikuttaa (tuulisuus epäviihtyisää tai vaarallista).

Tuulisuuskriteereitä ovat esittäneen kansainvälisesti eri tutkimuslaitokset ja yksittäiset tutkijat. Niitä voidaan laatia tuulitunnelikokeiden avulla, tekemällä tuulennopeuden mittauksia todellisessa kohteessa ja haastattelemalla ihmisiä. Tuulisuuskriteereissä voi siten erottua maakohtaisia eroja, esim. ihmisten tottumus tuulen vaikutuksiin, sateet, valoisa aika vuorokaudessa ja lämpötilan vaikutus.

Tuulisuuskriteereitä voidaan esittää tuulen keskinopeudelle ja tuulen puuskanopeudelle, tai näiden välimaastoon sijoittuville laskennallisille tuulennopeusarvoille. Eri tuulennopeuksien yhteyksiä on havainnollistettu kuvassa L1.2.



Kuva L1.2: Esimerkki tuulennopeuden vaihtelusta mittauspisteessä (mitattu 4 m korkeudella): tuulen puuskanopeus = 6,2 m/s; 10 min keskinopeus 2,0…3,0 m/s ja tunnin keskinopeus = 2,4 m/s (Eduskuntatalon lisärakennuksen piha, koillistuuli, ultraääniä-anemometri. Kuvan lähde WSP).

Kuvan L1.2 mukaisesti luonnon tuuli on aina turbulenttista, ja hetkellinen tuulennopeus heilahtelee voimakkaasti keskiarvon (tuulen keskinopeuden) molemmin puolin. Tuulisuuskriteerissä käytettävä tuulennopeus, ja tuulennopeuden huippuarvo yleisesti, voidaan yleisesti esittää muodossa

$$v_g = v_m + g\sigma_v$$

missä g = huippuarvokerroin ja σ_v = tuulennopeuden keskihajonta (määritettynä hetkellisistä tuulennopeuden lukemista tarkastelujakson aikana). Tuulen keskinopeutta vastaa tällöin huippuarvokerroin g = 0. Samasta tuulensuunnasta puhaltavassa kovassa tuulessa tuulennopeuden keskihajonnan suhde tuulen keskinopeuteen on mittauspisteessä likimain vakio. Keskihajonta määritetään tuulimittarin hetkellisistä mittauslukemista yleensä 1 h ajanjaksolla. Keskihajonnan ja keskituulen suhdetta kutsutaan turbulenssin intensiteetiksi:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m}$$

Esimerkiksi kuvan L1.2 tapauksessa I_v = 0,41, ja määritettyä 3 s puuskanopeuden huippuarvoa vastaa huippuarvokerroin g = 3,6. Vastaavasti suorien mittaustulosten huippuarvo vastaa noin 0,1 s puuskanopeutta, ja sitä vastaa tuloksissa huippuarvokerroin g = 5,8.

Tuulisuudelle ei Suomessa, kuten ei muissakaan maissa, ole toistaiseksi olemassa viranomaisohjeita. Suunnittelussa voidaan käyttää tutkijoiden esittämiä suosituksia. Suunnittelukäyttöön vakiintuneet suositukset vaihtelevat maittain. Suomen oloissa esim. tuulen ja pakkasen yhteisvaikutus (pakkasen purevuus) ja siihen liittyvä kasvojen paleltumisriski on oma kysymyksensä. Viileässä säässä tuulisuus myös huomataan helpommin mm. kasvojen viilennysvaikutuksen johdosta. Toisen Suomen olojen erityispiirteen muodostavat talvikelien ajoittainen liukkaus ja hiekoitushiekan pöllyäminen keväällä.

Rakentamisen tuulisuusvaikutuksia ja tuulisuuden numeroarvoja voidaan verrata kaupungin tai kaupunginosan nykytilaan, edellyttäen että nykytilan arvot on määritetty tai tuulisuusvaikutuksia on tiedossa kokemusperäisesti. Tällöin tulee otetuksi huomioon paikallisia tekijöitä, kuten asukkaiden tottumus tuulen vaikutuksiin sekä paikallistieto tuulisista ja tuulettomista kohdista.

Liiallista tuulisuutta esiintyy tyypillisesti tietyissä ongelmapisteissä korkeiden rakennusten vieressä ja kattoterasseilla; avoimilla alueilla ja korkealla sijaitsevilla siltakansilla ja jalankuluväylillä; sekä hyvää viihtyvyyttä edellyttävissä paikoissa (puistot, aukiot, urheilukentät ja katukahvilat jne.). Näille voidaan etsiä korjaavia suunnitteluratkaisuja.

Kaavoituksessa ja rakennustarkastuksessa voidaan edellyttää ongelmallisimpien pisteiden tuulisuusolosuhteiden korjaamista. Konsultin aikaisemmissa kohteissa on ehdotettu kaavatasoiseksi tuulisuuden raja-arvoksi puuskatuulen > 23 m/s esiintymistä korkeintaan kerran vuodessa katutasossa.

Suomen perustuulisuuden tasosta johtuen tämä kriteeri ei täyty (eli tuulisuus olisi liiallista) pääosin ainoastaan korkeiden rakennusten vierustan ongelmapisteissä sekä korotettujen jalankulkutasojen yhteydessä.

Konsultin aikaisemmissa selvityksissä käyttämiä toiminnallisia luokkia ovat:

- A istuminen pitkiä aikoja; makaaminen; terassit ja kahvilat; ulkoilmateatterit; uima-altaat. Kesäkausi (huhtikuu-syyskuu)
- B seisominen/istuminen paikoillaan lyhyitä aikoja; puistot; kauppakeskukset; rakennusten ulko-ovet. Kesäkausi (huhtikuu-syyskuu)
- C kävely yleisesti; rakennuksiin sisälle meno ja niistä poistuminen. Koko vuosi
- D vaarallisen tuulen kriteeri; tavoitteellinen kävely; nopea kävely; parkkipaikat. Koko vuosi.

Näihin liittyviä hyväksymisluokkia ovat esim.:

- epäviihtyisä
- vaarallinen, ei hyväksyttävä. Tuulisuudeltaan ongelmallinen piste tulisi korjata jatkosuunnittelussa.

Raja-arvot perustuvat W. H. Melbournen 1970-luvulla esittämään malliin, joka perustuu kerran vuodessa esiintyvään puuskatuuleen. Puuskatuuli v_g on laskettu tuulitunnelikokeessa käyttäen virtausnopeuden vaakakomponentin keskihajonnalle kerrointa g = 3,5. Tämä vastaa likimain taulukon L1.1 mukaista 3 s puuskatuulta.

Mallissa todennäköisyyden raja-arvo ”kerran vuodessa” vastaan likimain vuotuista ylitystodennäköisyyttä

P = 0,025 % (= 2,2 tuntia vuodessa).

Tuulisuuskriteerit ovat:

A: v_g > 10 m/s; P_A ≥ 0,05 % * (epäviihtyisä)

B: v_g > 13 m/s; P_B ≥ 0,05 % * (epäviihtyisä)

C: v_g > 16 m/s; P_C ≥ 0,025 % (epäviihtyisä)

D: v_g > 23 m/s; P_D ≥ 0,025 % (vaarallinen)

* raja-arvo tarkoittaa 2,2 tuntia kesäkautta kohden, joka vastaa 0,05 % kesäkauden tunneista (= 0,025 % koko vuoden tunneista).

Edellä esitetyt puuskatuulien ylitystodennäköisyydet tarkoittavat sellaisten keskituulien osuutta ajasta, joissa tuulennopeus voi tuulenpuuskissa tilastollisesti (eli huippuarvokertoimella g = 3,5 laskettuna) ylittää raja-arvon. Todellinen hetkellisten tuulennopeuksien ylitysten kesto on huomattavasti pienempi (vrt. kuva L1.2); joitain sekunteja 10 min tarkastelujaksolla.

Jos tarkastelu rajoitetaan vain tiettyyn osaan vuorokautta, kuten alkuperäisessä Melbournen kriteerissä ”valoisaan aikaan” (12 h vuorokaudessa), voidaan kriteerin P-arvoja suurentaa vastaavasti; jakamalla ne tarkasteltavien tuntien osuudella vuorokauden kaikista tunneista.

Kun kriteeri ”ei täyty”, tarkoittaa se, että tuulisuutta esiintyy siinä määrin (”liian monta tuntia tarkastelujaksolla”), että kriteerin mukainen toiminto on epäviihtyisää (luokat A, B, C), tai vaarallista (luokka D) tarkastelupisteessä. Tuulen puuskanopeuteen perustuvat mallit kuvaavat tarkasti esimeriksi virtauksen paikallisen turbulenssin ja korkean rakentamisen aiheuttamia vaikutuksia tarkastelupisteessä.

Melbournen ja Konsultin ehdottama D-kriteeri rakennusten tuulisuusvaikutuksen tarkasteluun on yleisesti ”tiukemmasta päästä”, koska se ottaa tuulen puuskaisuuden täysimääräisesti huomioon. Esimerkiksi mainittu Wellingtonin keskustan standardin turvallisuutta koskeva määräys on kuitenkin tiukempi siten, että v_g > 20 m/s (laskettuna huippuarvokertoimella g = 3,7) ei tulisi uuden rakennuksen johdosta ylittyä missään julkisen alueen pisteessä useammin kuin kerran vuodessa.

Isossa-Britanniassa konsulttiselvityksissä laajasti käytetty Lawson-kriteeristö perustuu tuulen keskinopeuden (Boforien) raja-arvojen esiintymiseen, mutta se ottaa myös huomioon tuulen puuskien vaikutuksen. Puuskien vaikutus saadaan laskemalla 3 s. puuskanopeuden perusteella ekvivalentti keskinopeus (GEM *Gust Equivalent Mean*) jakamalla luvulla 1,85 tai 2,0, missä suurempaa jakajaa voidaan käyttää ”rannikolla, jossa ihmiset ovat tottuneet tuuleen”). Kriteeri tarkastetaan tällöin määräävän vaikutuksen mukaan joka keskinopeuden tai ekvivalentin keskinopeuden mukaan.

Sovellettavissa olevia keskituuleen perustuvia malleja on esim. tanskalisen FORCE Technologyn malli, joka perustuu 1 h keskituuleen:

A: v_h > 5 m/s; P_M ≤ 0,1 % (hyväksyttävä)

B: v_h > 5 m/s; P_M ≤ 6 % (hyväksyttävä)

C: v_h > 5 m/s; P_M ≤ 23 % (hyväksyttävä)

D: $v_h > 5$ m/s; $P_M \leq 43$ % (hyväksyttävä).

Pelkästään keskituuleen perustuvat mallit eivät kuvaa kovin tarkasti esimerkiksi rakennusten paikallisia vaikutuksia, ja saattavat yliarvioida esimerkiksi puuston, pensaiden ja aitojen suojaavaa vaikutusta. FORCEn mallia tulisikin tulkita siten, että se soveltuu tyypilliseen tanskalaiseen rakennuskantaan, maastoon ja ilmastoon.

Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta

Katutason tuulisuutta alettiin tutkia tarkemmin maailmanlaajuisesti 1970-luvun alkupuolella tuulitunnelikokeiden avulla. Tärkeimpänä kysymyksenä oli käytännössä havaittu tuulisuuden kasvu ja vaarallisen kovat tuulenpuuskat korkeiden rakennusten vierustassa. Korkeiden rakennusten tuulisuutta lisäävä vaikutus on huomattu yhtä varhain kun niitä on alettu rakentaa; yhtenä varhaisimmista esimerkkinä 22-kerroksinen Flatiron rakennus New Yorkissa, joka valmistui vuonna 1902.

Tuulitunnelikokeiden käytön myötä alettiin esittää myös kriteerejä tuulisuuden sallitulle tasolle, toisin sanoen tuulisuuskriteerit perustuvat useimmiten tuulitunnekoetulosten käyttöön.

Tuulitunnelikokeet ovat säilyneet toistaiseksi luotettavimpana työkaluna uuden asuinalueen tai rakennuksen ympäristöön liittyvän tuulisuuden analyysissä. Numeerinen virtauslaskenta (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) kehittyy kuitenkin koko ajan, ja sillä on saatu asiantuntijakäytössä enenevissä määrin käyttökelpoisia tuloksia. Se soveltuu hyvin mm. suunnitelmavaihtoehtojen välisten erojen tarkasteluihin ja tulosten visualisointiin. Periaatteessa voitaisiin kehittää myös CFD-laskennan tuloksiin perustuvia tuulisuuskriteereitä, mikä parantaisi käytettävyyttä edelleen. CFD analyysissä tyypillisesti turbulenssimallin avoimet parametrit kalibroidaan tuottamaan otaksuttu tulos testiprobleemalle, ja toisaalta voidaan kehittää uusia malleja, jos tulos ei ole tyydyttävä. Tämän lisäksi verkotuksen ja muiden laskentaparametrien on oltava tarkoitukseen soveltuvia.

Paikalliset tuulennopeudet (suhteessa kohdealueen reunalla vaikuttavaan tuulennopeuteen) määritetään luotettavimmin rajakerros-tyyppisessä tuulitunnelissa, jossa virtaukseen luodaan luonnon tuulta vastaava tuulennopeuden korkeusprofiili ja turbulenssi (kuva L2.1). Tämä tehdään useimmiten asentamalla karhennuspalikoita tuulitunnelin sisälle lattiaan n. 10…20 m matkalle virtauksen yläpuolelle, sekä käyttämällä virtauksen sisääntulossa pyörteisyyttä aiheuttavia kiiloja. Alueen pienoismallin avulla otetaan huomioon paikalliset tekijät. Pienoismallin mittakaava määräytyy tuulitunnelin mittatilan koon ja tarkasteltavien rakennusten korkeuden mukaan ja on tyypillisesti 1:1000…1:250.

Kuva L2.1: Tuulitunnelikoe Helsingin Jätkäsaaren osayleiskaavavaiheen kaupunkirakennemallin tuulisuuden selvittämiseksi (kuva WSP)

Pienoismalli voi joissain tapauksissa olla suoraan kohteen kaavoituksen esittelymalli tai se voidaan tehdä erikseen tuulitunnelikoetta varten. Puut ja pensaat ovat yleensä esittelymalleissa jollain tarkkuudella mukana. Ne eivät kuitenkaan hidasta tuulta katutasossa yhtä voimakkaasti kuin todellisuudessa, joten tulokset ovat tältä osin konservatiivisia. Jos pienoismalli tehdään pelkästään tuulitunnelikoetta varten, voidaan puita ja pensaita mallintaa tarkemminkin.

Tuulitunnelikokeessa mitataan paikallisia virtausnopeuksia jalankulkijan korkeudella (1,5..2,0 m katutasosta täydessä mittakaavassa, eli 2…5 mm tavanomaisessa pienoismallissa). Mittaukseen käytetään joko kuumalanka-anemometria, jolloin mittaukset tehdään pienoismallin päältä (vrt. kuva L2.1); tai pienoismallin läpi porattuja paineantureita. Mittauksia tehdään tietyissä suunnitelman kannalta mielenkiintoisissa pisteissä eri tuulen suunnilla. Yksittäistä mittaustulosta on havainnollistettu kuvassa L2.2. Tuloksista erotellaan virtauksen keskinopeus v_m ja nopeuden keskihajonta σ_v. Kuten luonnon tuulen tapauksessa, virtausnopeuden huippuarvo σ_v tietyllä tarkastelujaksolla voidaan esittää muodossa

$$v_g = v_m + g\sigma_v$$

missä g = huippuarvokerroin. Huippuarvoon vaikuttaa sen määritysaika. Huippuarvokerroin on lisäksi tilastollinen suure, eli huippuaro voi vaihdella tarkastelujaksosta toiseen liittyen ilmiön luonnolliseen satunnaisuuteen. Luonnon tuulessa huippuarvokerroin on suuruusluokaltaan g = 3,5 kun tarkastellaan n. 1…3 sekunnin tavanomaisia huippuarvoja (eli puuskatuulia) ja v_m määritellään 10 min tai tunnin aikakeskiarvona. Virtausnopeuden keskihajonta esitetään useimmiten turbulenssin intensiteetin I_v avulla muodossa

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m}$$

jolloin huippuarvo saadaan lausekkeesta

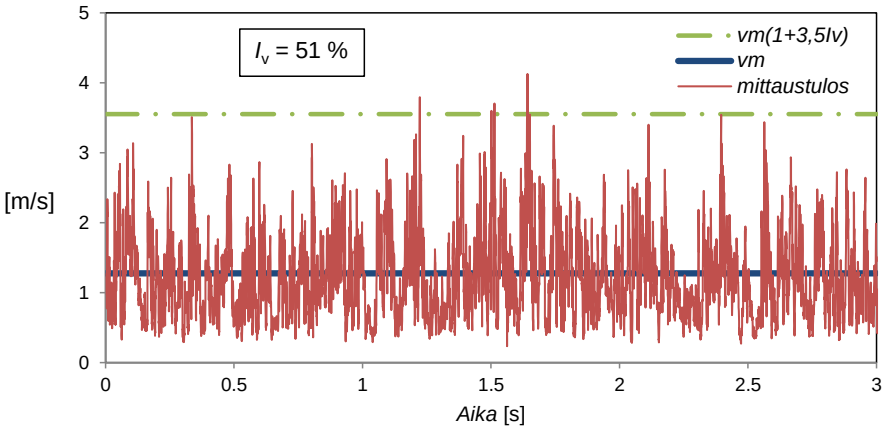
$$v_g = v_m(1 + gI_v)$$

Turbulenssin intensiteetti on dimensioton luku, ja se esitetäänkin useasti prosenteissa. Katutasossa mitattuna rakennusten vaikutuksessa I_v on suuruusluokkaa 50 % (vrt. kuva L2.2). Tuulisuustarkasteluissa sovellettava huippuarvokerroin g on yleensä annettu tarkasteltavassa tuulisuuskriteerissä, joten sitä ei ole tarvetta määrittää mittausten yhteydessä.

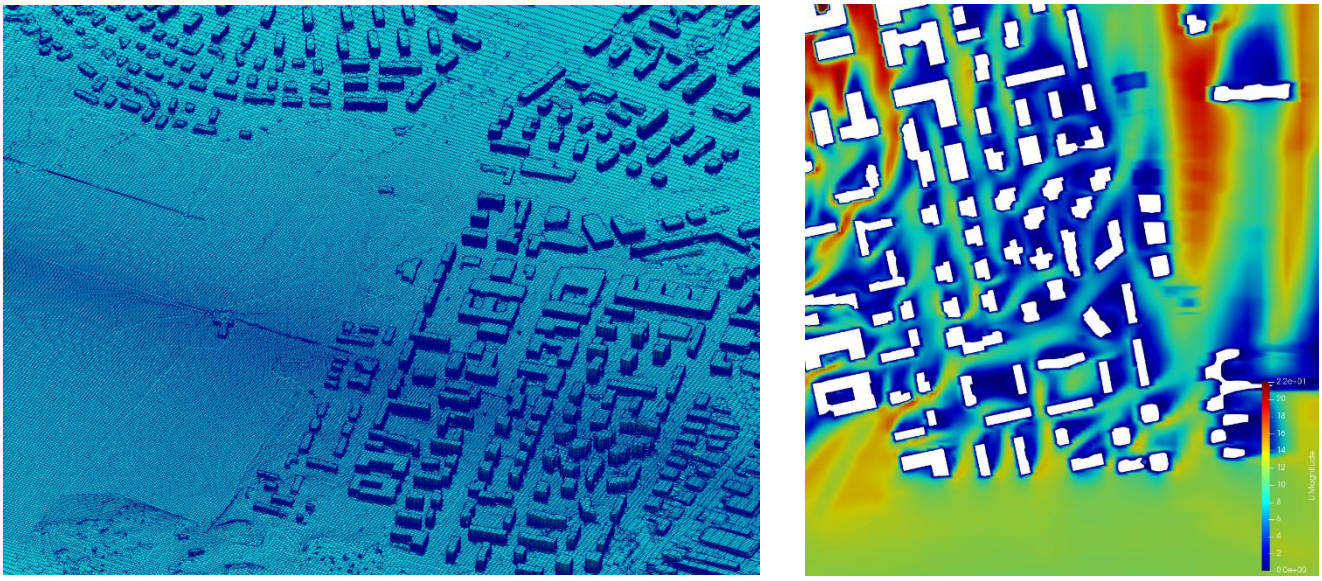
Tuulisuuskartoituksiin soveltuva numeerinen virtauslaskenta voidaan tehdä kahdella vaihtoehtoisella menetelmällä: suurten pyörteiden simuloinnilla (LES, *Large Eddy Simulation*) tai ajasta riippumattomalla RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) -menetelmällä. Ensin mainittu on laskenta-ajaltaan huomattavasti pitempi siten, että RANS on tällä hetkellä käytetyin menetelmä. RANS-menetelmä soveltuu virtauksen keskinopeuden määrittämiseen (kuvan L2.2 yhtenäinen viiva). Konsulttikäytössä RANS-simulointeja tehdään tällä hetkellä rutiininomaiesti usean kymmenen miljoonan laskentakopin verkotuksilla (kuva L2.3).

LES-menetelmällä voidaan simuloida turbulenssin suurempia pyörteitä, jolloin kuvan L2.2 mukainen virtausnopeuden vaihtelu saadaan jollain tarkkuudella ”tasoitettuna” otetuksi huomioon, mutta on selvää että esimerkiksi kuvan L2.1 mukainen laaja kaupunkirakenne on käytännössä mahdotonta simu-

loida tarkasti, kun tavoitteena on erityisesti katutason tuulien selvitys. Supertietokonelaskenta, avoimien virtauslaskentaohjelmien kehittyminen (jolloin jokaisesta laskentaytimestä ei tarvitse ”maksaa lisää lisenssimaksua”) ja laskentaytimien määrän kasvu jopa useaan tuhanteen, pitää kuitenkin LES-laskennan mahdollisena tutkijakäytössä.



Kuva L2.2: Esimerkki tuulitunnelikokeessa mitatusta katutason virtausnopeudesta (kuva WSP).



Kuva L2.3: Periaatekuva numeerisen virtauslaskennan verkotuksesta (ainoastaan rakennusten ja maan pinnat näytettynä) ja tulosten värikartoista (kuva WSP).

Numeerisen virtauslaskennan ja tuulitunnelikoetulosten tulosten tulkinnan tärkeä ero on käytännössä se, että virtausnopeuden hetkelliset huippuarvot (tuulen puuskien eli turbulenssin vaikutus) jäävät joko kokonaan ottamatta huomioon tai tulevat otetuksi huomioon likimääräisesti. Tämän virheen merkitys on mahdollisesti vähäinen, jos itse tuulisuuskriteeri perustuu tuulen keskinopeuteen – ja vastaavasti merkittävä, jos kriteeri perustuu tuulen puuskanopeuteen.

RANS-laskennassa yleisesti käytetyt k-ε ja k-ω –tyypin turbulenssimallit sisältävät ratkaistavana parametrina turbulenssin kineettistä energiaa kuvaavan termin k. Turbulenssin kineettinen energia on globaalissa karteesisessa xyz-koordinaatistossa esitettynä

$$k = ½ (<v_x'^2> + < v_y'^2> + < v_z'^2>) \equiv ½ (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)$$

missä v_x', v_y' ja v_z' ovat heilahtelunopeuden komponentteja ja symboleilla < > on merkitty aikakeskiarvoa. Tässä tuulennopeuden komponentit on esitetty aikakeskiarvon ja ajasta riippuva heilahtelunopeuden summana

$$v_x = v_{x0} + v_x'$$

$$v_y = v_{y0} + v_y'$$

$$v_z = v_{z0} + v_z'$$

RANS-laskennan tuloksena saadaan komponentit v_{x0}, v_{y0} ja v_{z0} sekä näistä laskettu tuulennopeus

$$U = (v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2)^{½}$$

Mainituissa turbulenssimalleissa turbulenssi on oletettu suunnasta riippumattomaksi (isotrooppiseksi), jolloin $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$. Tällöin voidaan merkitä $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = UI$, missä I turbulenssimallia vastaava turbulenssin intensiteetti, ja

$$k = (3/2)(UI)^2$$

Laskennan tuloksena saatavan turbulenssin kineettisen energian k perusteella voidaan siten arvioida turbulenssin intensiteettiä ja edelleen tuulen puuskanopeuksia. Kyseessä on kuitenkin ainoastaan approksimaatio, koska luonnon tuulen turbulenssi ei ole isotrooppista lähellä maanpintaa. Lisäksi tuulennopeuden kokeellisessa mittauksissa ja puuskanopeuden määrittelyssä (esim. 3 s.) nopeimmat heilahtelut (”korkean taajuusalueen pienimmät pyörteet”) tulevat suodatetuksi pois. RANS-laskenta ei tuota tietoa turbulenssin mittakaavasta tai taajuussisällöstä (spektraalitiheydestä), joilla luonnon tuulen (tai rajakerros-tuulitunnelikokeen) turbulenssi yleisesti tilastollisesti ja kokeellisesti kuvataan.

Kaupunkiympäristön tuulisuuskartoituksissa otaksumana on tyypillisesti, että tarkastelupisteen vierustan rakennukset tuottavat pääosan kiinnostuksen kohteena olevasta turbulenssista. Tämä voi lieventää edellä mainittuja RANS-laskenen teoreettisten rajoitteiden vaikutusta siten, että sillä saadaan vertailukelpoisi tuloksia tuulitunnelikokeiden kanssa.

Jos tuulen keskinopeus on lähellä nollaa, vaikuttavat heilahtelunopeuden neliölliset termit suhteellisesti merkittävästi tuulennopeuden todelliseen aika-keskiarvoon. Turbulentin tuulen tuulennopeuden tarkka aikakeskiarvo on

$$U_{eff} = <(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{½}>$$

joka RANS laskennassa saadaan yhteydestä

$$U_{eff} = <[(v_{x0}^2 + 2v_{x0}v_x' + v_x'^2) + (v_{y0}^2 + 2v_{y0}v_y' + v_y'^2) + (v_{z0}^2 + 2v_{z0}v_z' + v_z'^2)]^{½}> = (U^2 + 2k)^{½}$$

Turbulenssimalleja k-ε ja k-ω soveltavan RANS-laskennan mukaiset tulokset suhteellisille tuulennopeuksille ovat

$$k_m = U_{eff}/v_{ref}$$

$$k_g = k_m + gI_{ref}$$

missä on merkitty

$$I_{ref} = [(2/3)k)]^{½} / v_{ref}$$

Tuulitunnelikokeessa on rajallinen määrä mitattavia pisteitä (tyypillisesti suuruusluokaltaan 50), joissa tuulisuuden numeroarvo määritetään tarkasti. Numeerisessa laskennassa tarkastelupisteiden sijainti ja määrä voidaan valita vapaasti; ja virtauksen kulkua kohdealueessa voidaan visualisoida graafisesti.

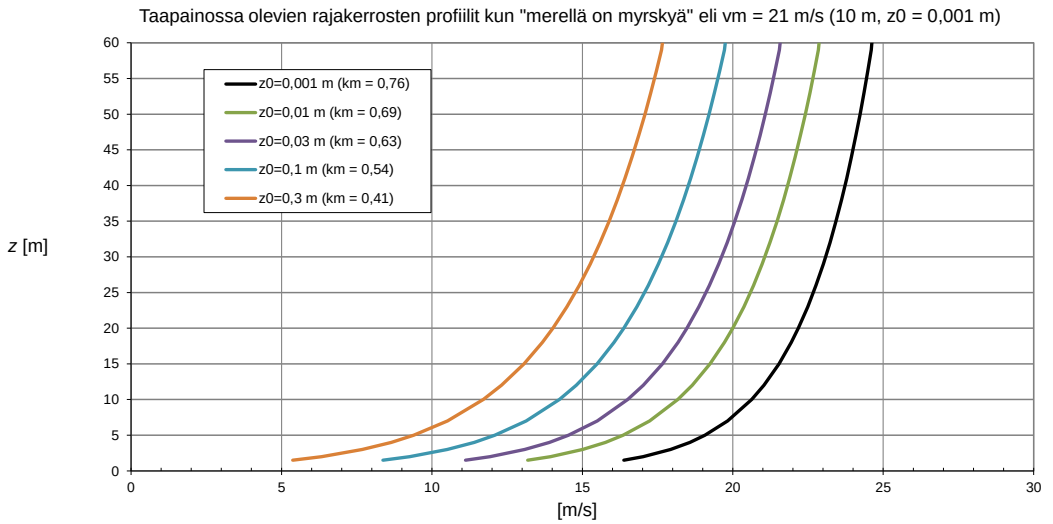
Tuulitunnelikokeessa paikallisia virtauksia voidaan tarkastella ja visualisoida esim. savun avulla. Virtausnopeuden mittausten lisäksi tuulisuuden tarkasteluja on tehty tuulitunneleissa myös hiekka-eroosiokokeilla, jossa pienoismallin ripotellut hiekanjyväset puhaltuvat pois tuulisemmista kohdista, ja lopputulos antaa likimääräisesti visuaalisen kokonaiskuvan tuulisista kohdista kyseisellä tuulensuunnalla.

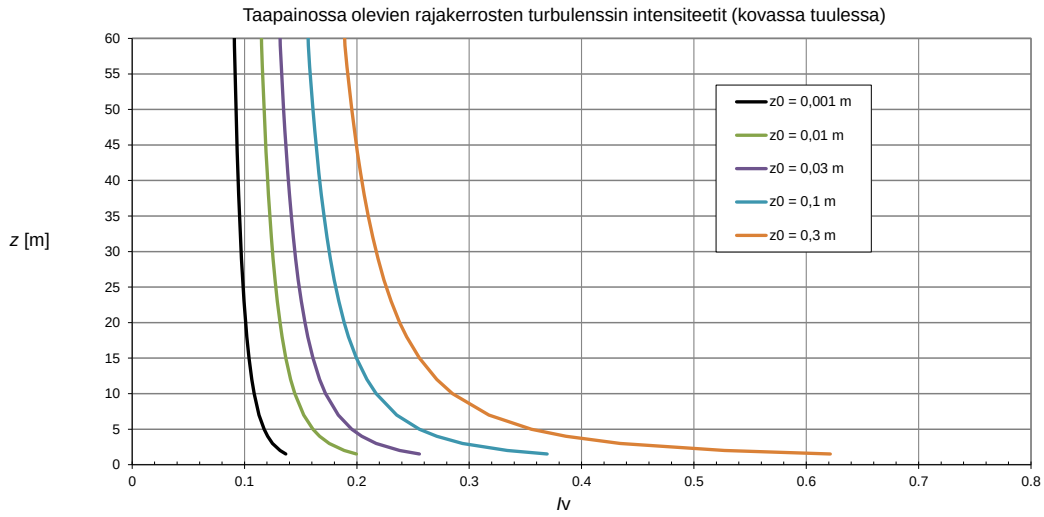
Tuulitunnelikokeen pisteet valitaan suunnitelman kannalta oleellisiin pisteisiin, esimerkiksi pihan oleskelupaikalle, rakennuksen sisääntulon kohdalle tai kävelysillalle. Muilta osin pisteet valitaan yleensä sellaisiin kohtiin, jossa tiedetään esiintyvän suuria tuulen puuskanopeuksia; kuten rakennuksen kulmien kohdelle, rakennusten väliin tai laajojen julkisivupintojen viereen. Vaikka tuulisuuden numeroarvot olisivat näissä suuria, voi lähistöllä olla pisteitä, jotka ovat esimerkiksi puiden ja pensaiden suojassa, ja jossa tuulisuus on vähäistä.

Tuulitunnelikoe tai numeerinen virtauslaskentatulos ei sellaisenaan ole tuulisuuskartoitus, vaan tuulisuuskartoituksen tekemiseksi tarvitaan lisäksi tulosten yhdistäminen paikallisiin tuulitilastoihin, ottaen huomioon tuulitilaston mittauspisteen ja kohteen välinen sijaintiero. Tämä edellyttää maaston rosoisuuden muutosten analyysiä ja sitä varten laadittujen laskentamallien käyttöä. Tavanomaisesti tuulen suunnat käydään läpi 10° …30° välein.

Tuulitunnelikokeet ja CFD-analyysit käyttävät samaa metodiikkaa tulovirtauksen turbulenssiparametrien määrittämisessä, jossa kaukana tarkastelualueesta tuulen keskinopeuden korkeusprofiili ja intensiteetti otaksutaan ”vakiomaastoluokkiin” maaston rosoisuuden analyysin perusteella. Näitä on havainnollistettu kuvassa L2.4. Todellisessa maastossa tulovirtauksen turbulenssi ei yleensä ole täysin tasapainossa, jolloin korkeusprofiilit eivät tarkasti vastaa kuvan logaritmisia yhteyksiä. Tällöin myös kertoimien k_m ja k_g referenssituulennopeuden korkeuden valinta (z_{ref}) voi vaikuttaa hienokseltaan tuulisuukartoitusten tuloksiin.

Rajakerros-tuulitunnelit ovat suurikokoisia. Tuulitunnelikokeita tekevät rutiininomaisesti kymmenkunta tuulitunnelilaboratoriota mm. Kanadassa, USA:ssa, Isossa-Britanniassa, Australiassa, Tanskassa, Ranskassa, Japanissa ja Kiinassa. Suomessa kokeita on suoritettu Espoon Otaniemessä sijainneessa rajakerrostuulitunnelissa vuoteen 2016 asti; tämä tuulitunneli on sittemmin purettu.





Kuva L2.4: Tuulen keskinopeuden ja turbulenssin intensiteetin korkeusprofiilit tasapainossa olevassa rajakerroksessa usein käytetyissä vakiomaastoluokissa. Lisätietona on annettu vastaavat k_m kertoimet (z_{ref} = 15 m).

Liite 3: Maaston rosoisuuden huomioon ottaminen

Jotta teoreettiset tuulennopeuden ja turbulenssin korkeusprofiilit olisivat voimassa myös korkeampien rakenteiden (korkeat rakennukset, korkeat sillat, mastot, tuulimyllyt yms.) korkeuksilla, on maaston oltava tuulen puolella tasaista, rosoisuuden on oltava muuttumaton pitkällä matkalla (suuruusluokaltaan ≥ 50 km) ja maaston tulee olla vapaa yksittäisistä virtaukseen vaikuttavista suuremmista esteistä. Tällöin rajakerroksen korkeus ja tuulen muut ominaisuudet eivät enää merkittävästi muutu matkan kasvaessa, eli rajakerros on tasapainotilassa maaston suhteen.

Täysin tasapainossa olevia rajakerroksia esiintyy vain harvoin todellisten rakenteiden suunnittelussa, ja tarkemmassa analyysissä rakennuspaikan tuuli- ja turbulenssiolosuhteet selvitetään analysoimalla maaston rosoisuuden muutokset tuulen puolella. Analyysi perustuu yleisesti maan ja ilmavirtauksen välistä kitkaa kuvaavaan rosoisuusparametrin (z_0) muutoksiin tuulen puolella. Teoreettisissa malleissa rosoisuusparametrin avulla voidaan mm. kuvata tuulen keskinopeuden korkeusriippuvuus ja tuulennopeuden väliset erot eri maastotyypeissä (maastoluokissa).

Tuulen keskinopeuden korkeusriippuvuus oletetaan meteorologisissa tarkeasteluissa lähellä maanpintaa vaikuttavassa ns. pintakerroksessa logaritmiseksi yhteydestä

$$v_m = \frac{u^*}{k}\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right)\right] \qquad \text{(L3.1)}$$

missä v_m = tuulen keskinopeus; u^* = kitkanopeus; k = von Kármánin vakio (= 0,4); z = korkeus; d = nollatason siirtymä ja Ψ = kokeellisesti määritettävissä oleva funktio, joka kuvaa erityisesti ilman tasapainotilan eli stabiiliuden (yleisesti lämpötilakerrostumien) vaikutusta tuulennopeuteen. Kitkanopeus u^* on tarkoitettu määritettäväksi lähellä maanpintaa, ja se on verrannollinen ilmanvirtauksen ja maan väliseen kitkaan. Tavanomaisia maaston rosoisuusparametreja ja nollatason siirtymiä on esitetty taulukossa L3.1.

*Taulukko L3.1 Yleisesti käytettyjä maaston rosoisuusparametreja**

z_0 [m]	*d* [m]	*kuvaus*
0,0001… 0,0002	-	vesialueet yleisesti, jäätynyt merenpinta
0,001	-	meri vuosittaisissa myrskyssä, sisämaan järvet äärimmäisissä myrskyissä, lumen peittämä maaseutumaasto, aavikot
0,003	-	rosoinen meri 50 v toistumisvälin myrskyissä, tasaiset alueet matalalla kasvillisuudella, lentokenttien kiitorata-alueet
0,01	-	avoimet heinäkentät (pellot), yksittäisiä puita
0,03	-	avoin maasto yleisesti, puita, pensaita ja rakennuksia harvassa
0,1	0…2	pienten kaupunkien laitamat, kylät, rakennuksia, puita ja pensaita sisältävä maaseutu
0,3	5…10	pienet kaupungit, suurten kaupunkien laitamat, puinen maasto
0,7	15…25	kaupunkien keskustat, metsät
2	> 15	metsäisät epäsäännölliset vuoristoalueet

* tarkat numeroarvot vaihtelevat hieman lähteestä toiseen

Kovemmissa myrskyissä, kuten rakennesuunnittelussa käytettävissä ≥ 50 v toistumisvälin myrskyissä, lämpötilakerrostumien vaikutus on pieni (ilman tasapainotila on neutraali), ja funktio Ψ voidaan jättää ottamatta huomioon (Ψ = 0) [L3.1]. Logaritminen yhteys on tällöin sama, kun tasaisen pinnan yli kulkevan virtauksen turbulentissa rajakerroksessa vaikuttava teoreettinen yhteys (ns. seinämävirtaus). Kitkanopeus u^* voidaan määrittää tuulennopeuden mittauksilla esim. 10 m korkeudella avoimessa maastossa (d = 0), jolloin

$$u^* = \frac{kV_{10}}{\ln\left(\frac{z_{10}}{z_0}\right)} \qquad \text{(L3.2)}$$

missä v_{10} = 10 m korkeudessa mitattu tuulen keskinopeus ja z_{10} = 10 m. Kitkanopeus on vakio likimain korkeusalueella z = 10…30 m, joten sen määrityksessä voidaan käyttää 10 m sijaan muutakin mittauskorkeutta. Tutkimuskäytössä voidaan tuloksista erotella ne mittaustulokset, jossa ilman tasapainotilan voidaan olettaa neutraali (Ψ = 0), vakaa ja epävakaa.

Pintakerroksen korkeus on n. 10 % ilmakehän rajakerroksen korkeudesta h_G [L3.1]. Meteorologisissa tarkasteluissa h_G oletetaan tyypillisesti riippuvaksi tuulen nopeudesta ja Coriolisvoimasta yhteydestä [L3.1]

$$h_G = C\frac{u*}{f} \qquad \text{(L3.3)}$$

missä C = vakio ja Coriolisparametri f on

$$f = 2\Omega \sin(\Phi) \qquad \text{(L3.4)}$$

missä Ω = maapallon pyörimisen kulmataajuus ja Φ = kohteen leveysaste. Vakion C arvot vaihtelevat kirjallisuudessa likimain alueella 0,15…0,3. Suomen etelärannikolla f = 0,00013 rad/s. Rajakerroksen korkeus on Suomessa kovimmissa myrkyissä 2 km luokkaa, jolloin kaavan (L3.1) logaritminen yhteys on voimassa on n. 200 m asti. Tuulen turbulenssin ominaisuudet muuttavat mittakaavaansa rajakerroksen korkeuden muuttuessa, joten kaikkein voimakkaimpien myrskyjen ominaisuuksista on vain vähän mitattua tutkimustietoa.

Kun rajakerroksen korkeudella (h_G) vaikuttava lähes kitkaton virtaus (esim. geostrofinen tuuli G) oletetaan muuttumattomaksi laajalla alueella, voidaan määrittää teoreettinen yhteys eri maastotyypeissä vallitseville tuulennopeuksille.

Jos tuulen korkeusriippuvuus oletettaisiin eksponenttimuotoiseksi vanhempien suunnitteluohjeiden mukaisesti, saataisiin yhteys yksinkertaisesti olettamalla rajakerroksen korkeudet eri maastoluokissa.

Logaritmisen yhteyden tapauksessa, koska tämä pätee vain pintakerroksessa, on otaksuttava tai mitattava tuulennopeuden korkeusriippuvuus myös rajakerroksen ylemmissä osissa. Näissä Coriolisvoima on oleellinen tekijä, jonka johdosta mm. virtauksen suunta kääntyy ilmanpaineen tasa-arvokäyrien suuntaiseksi. Kun otaksutaan, että rajakerroksen ylemmissä osissa tuulennopeudet ovat neutraalissa ilmakehässä verrannollinen tuulennopeuteen lähellä maapinta, voidaan dimensionanalyysissä nopeusmitaksi valita u^* ja yhteys olettaa riippuvaksi dimensiottomasta tulosta fz/u^*. Kun kaavan (L3.3) yhteys on voimassa, voidaan yhteys otaksua vaihtoehtoisesti riippuvaksi myös dimensiottomat tulosta z/h_G. Reunaehtona tallaisille yhteyksille toimivat tyypillisesti dv_m/dz = 0 kun z on suuri, ja että tietyllä korkeusalueella tämän ja kaavan (L3.1) logaritmisen yhteyden tulee antaa yhtenevät tulokset [L3.2]. Geostrofisen tuulen suunta poikkeaa maan pinnalla vaikuttavan tuulen suunnasta kitkan vaikutuksen johdosta, ja G voidaan esittää komponenttiansa avulla muodossa [L3.1]

$$G = \sqrt{G_X^2 + G_Y^2} \qquad \text{(L3.5)}$$

missä

$$G_X = \frac{u^*}{k}\left[\ln\left(\frac{u^*}{fz_0}\right) - A\right] \qquad \text{(L3.6)}$$

ja

$$G_Y = \frac{u^*}{k}B \qquad \text{(L3.7)}$$

missä A ja B ovat kokeellisia vakiota; ja G_X tarkoittaa maan pinnan tasolla vaikuttavan tuulen suuntaista komponenttia. Esimeriksi Suomen tuuliatlaksen [L3.2] laadinnassa tätä on sovellettu vakioiden arvoilla A = 1,8 ja B = 4,5. Näitä vakiota ei kuitenkaan voida pitää täysin universaaleina, ja esim. lähteessä [L3.3] on määritetty vakioita tarkemmin neutraalin tasapainotilan tuulten mittauksien perusteella Tanskassa, ja saatu A = 0,5 ja B = 3,5, sekä mainittu joidenkin tutkijoiden suosittelevan arvoja A = 0 ja B = 5 koville tuulille. Suomen rakennesuunnittelussa sovellettavan perustuulennopeuden (v_{10} = 21 m/s, z_0 = 0,05 m) mainitusta vakioista A ja B johtuvat erot geostrofiseen tuulennopeuteen (silloin kuin sitä arvioidaan lähellä maanpintaa tehdyistä tuulennopeuden mittauksista) ovat suurimmillaan n. 15 %.

Kokeellisesti geostrofinen tuuli voidaan määrittää esimerkiksi säähavaintopallojen tai ilmanpaineen tasa-arvokäyrien avulla.

Kun kitkanopeus maastotyypissä z_{01} tunnettaan, voidaan kitkanopeus toisessa maastotyypissä z_0 laskea iteratiivisesti kaavan (L3.5) avulla asettamalla G samaksi kummassakin. Tulos on ainoastaan vähäisesti riippuva parametreista f, A ja B, ja voidaan esittää likimääräisesti kaavalla [L3.1]

$$\frac{u^*(z_0)}{u^*(z_{01})} = \left(\frac{z_0}{z_{01}}\right)^{0,0706} \qquad \text{(L3.8)}$$

Kaavat (L3.1) ja (L3.8) ovat myös Eurokoodin [L3.4] maastoluokkien perustana. Esimerkiksi jos kaavalla L3.5 määritetään myrskyisällä merellä (z_0 = 0,003 m) mitatun tuulennopeuden suhdetta esikaupunkialueen (z_0 = 0,3 m) tuulennopeuteen, on vakioiden A ja B vaikutus n. 4 % ja kaavan (L3.8) käytön vaikutus n. 3 %.

Edellä esitetty on menettely on suositteleva tapa eri maastoluokissa valitsevien tuulennopeuksien määrittämiseen, koska lähellä maanpintaa tehtävät tavanomaisten sääasemien mittaustulokset ovat herkkiä erilaisille tuulivarjostustekijöille ja maaston rosoisuuden muutoksille eri tuulensuunnilla.

Konsultin käyttämä malli tuuli- ja turbulenssiparametreille sekä maaston rosoisuuden muutoksen analyysille vastaa tuulitekniikka-asiantuntijoiden laajasti käyttämään ESDU-ohjesarjan (www.esdu.com) malleihin, jotka puolestaan perustuvat eri tutkijoiden malleihin ja mittauksiin. Tuulen keskinopeus neutraalille ilmakehälle (Ψ =0, $v_{10} \geq$ 10 m/s) on Deaves-Harris mallin mukainen

$$v_h = \frac{u^*}{k}\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + a_1\frac{z}{h_G} + a_2\left(\frac{z}{h_G}\right)^2 + a_3\left(\frac{z}{h_G}\right)^3 + a_4\left(\frac{z}{h_G}\right)^4\right] \qquad \text{(L3.9)}$$

missä v_h = tuulen keskinopeus tunnin aikakeskiarvona; h_G määritetään arvolla C = 1/6; a_1 = 23/4; a_2 = -15/8; a_3 = -4/3; ja a_4 = 1/4 [L3.5]. Geostrofinen tuulennopeus saadaan tässä mallissa asettamalla z = z_G, jolloin tulos on

$$G = \frac{u^*}{k}\left[\ln\left(\frac{u^*}{fz_0}\right) + 1\right] \qquad \text{(L3.10)}$$

Tämä vastaa likimain kaavan (L3.5) tulosta vakioiden arvoilla A = 0 ja B = 5.

Tasapainossa olevien rajakerrosten välimaastossa on tuuli- ja turbulenssiparametrit arvioitava kokeellista tai laskennallisista rosoisuuden muutosten analyysimalleista, joiden yleistä periaatetta on havainnollistettu kuvassa L3.1. Suomen oloissa teoreettisesti tasapainossa esiintyviä rajakerroksia (jossa rosoisuus oli muuttumaton n. 50 km matkalla) esiintyy erityisesti avomerellä, jolloin analyysin perustana voidaan käyttää avomerisääasemien tuulimittaustietoja, jossa myös tuulennopeudet ovat tyypillisesti suurimpia.

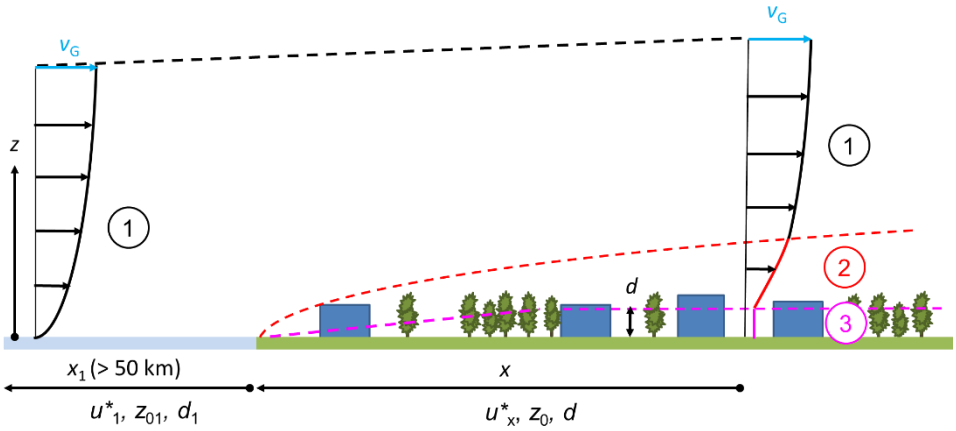
Jos maastotyyppi ei sovi sellaisenaan mihinkään tavanmaiseen maastoluokkaan, eli sille ei voida luotettavasti otaksua tiettyä rosoisuusparametria. Suomessa näin on esimerkiksi meren ja järvien saariston osalta, koska yksittäisen esteen, kuten saaren, virtaukseen aiheuttama kitka on suurempi, kuin tasaisesti jakaantuneiden esteiden.

Tehollinen rosoisuusparametri voidaan tällöin laskea esimerkiksi saarten tai muiden yksittäisten esteiden pinta-alaosuuden perusteella tuulensuunnittain. Tarkasteltava etäisyys on n. 50 km tuulen puolella lähellä vaikuttavan rosoisuuden vaikutuksen ollessa merkittävämpi tarkastelupisteen korkeudesta riippuen.

Menettelyä sovelletaan tyypillisesti mm. tuulivoimatarkasteluissa ja numeerisissa virtauslaskennassa, kuten Suomen Tuuliatlaksen [L3.3] yhteydessä tehdyissä ilmastosimulaatiossa. Konsultin käyttämä menettely on eri pinta-alaosuuksilla painotettujen kitkakertoimien C_S summaaminen tietyllä korkeudella z_B, jossa yksittäisten esteiden tuottamat häiriöt virtaukseen voidaan olettaa sekoittuneeksi päävirtaukseen. Korkeutena on käytetty z_B = 60 m ohjeen [L3.6] mukaisesti. Pinnan kitkakerroin on määritelmänsä mukaisesti

$$C_S = \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z_B}{z_0}\right)}\right]^2 \qquad \text{(L3.11)}$$

Tarkemmassa analyysissä vesialueiden rosoisuuteen vaikuttaa aallokko ja jääpeite, samoin kuin sisämaan peltoalueiden rosoisuuteen vaikuttaa lumipeite.



Kuva L3.1: Maaston rosoisuuden muutosanalyysin yleinen periaate. Kerroksessa 1 tuulennopeudet ovat korkeuden funktiona samat (kun otetaan huomioon nollatason siirtymän muutos d_1 -> d). Kerroksessa 2 tuulennopeus on likimain logaritminen vastaten rosoisuusmittaa z_0 ja paikallista kitkanopeutta u^*_x. Jos tarkastelupiste x on kaukana rosoisuuden muutoksesta (x > 50 km) $u^*_x = u^*$, ja tuulennopeuden uusi korkeusjakauma vastaa kokonaan z_0 ja *u** mukaista.

Liitteen lähteet:

L3.1 Simiu, E & Scanlan, R. H., Wind effects on structures: Fundamentals and application to design, 3rd Edit., John Wiley & Sons, New York 1986, 688 p.

L3.2 Tennekes, H. The logarithmic wind profile, *Journal of the Atmospheric Science*, (1972)30, pp. 234…238.

L3.3 Tammelin, B. *et al*, Production of the Finnish Wind Atlas, *Wind Energy* (2011)

L3.4 SFS-EN 1991-1-4:2005 Eurocode1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: tuulikuormat. 255 s. & Kansallinen liite NA SFS-EN1991-1-4 (15.10.2007).

L3.5 He *et al*, On standardization of offshore surface wind speeds, *Journal of Applied Meteorology and climatology,* 2016(55), pp. 1107…1121.

L3.6 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, 2008, WMO-No. 8

Liite 4: Maaston rosoisuuden muutosten analyysi

Rosoisuuden 1. muutos

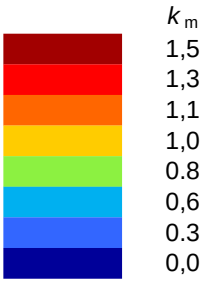
		Tuulen suuntakulma																	
Symboli	*Yks.*	**0**	**22.5**	**45**	**67.5**	**90**	**112.5**	**135**	**157.5**	**180**	**202.5**	**225**	**247.5**	**270**	**292.5**	**315**	**337.5**	*Kommentti*	*Viite*
v_{mr}	m/s	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{0r})	Tuulitilastot
k		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	toistumisvälin kerroin	Eurokoodi
v_{ref}	m/s	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	1 v toistumisvälin tuuli	
u^*_r	m/s	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{0r}	
z_{0r}	m	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	rosoisuusmitta (roughness length) keskituulen perusarvoon liittyen	
z_{01}	m	0.0001	0.0001	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	kohdealueen ympäristössä	
Iv(z =10 m)		0.10	0.10	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	turbulenssin intensiteetti	
Iv(z =15 m)		0.09	0.09	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09		
Iv(z =42 m)		0.07	0.07	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07		
Iv(z =70 m)		0.06	0.06	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06		
vm(z =10 m)	m/s	22	22	12	12	12	12	12	12	12	12	22	22	22	22	22	22	10 min keskituuli	
vm(z =15 m)	m/s	22	22	13	13	13	13	13	13	13	13	22	22	22	22	22	22		
vm(z =42 m)	m/s	24	24	17	17	17	17	17	17	17	17	24	24	24	24	24	24		
vm(z =70 m)	m/s	26	26	18	18	18	18	18	18	18	18	26	26	26	26	26	26		
vh(z =10 m)	m/s	21	21	11	11	11	11	11	11	11	11	21	21	21	21	21	21	tunnin keskituuli	
vh(z =15 m)	m/s	22	22	12	12	12	12	12	12	12	12	22	22	22	22	22	22		
vh(z =42 m)	m/s	24	24	15	15	15	15	15	15	15	15	24	24	24	24	24	24		
vh(z =70 m)	m/s	25	25	17	17	17	17	17	17	17	17	25	25	25	25	25	25		
v(z =10 m)	m/s	28	28	21	21	21	21	21	21	21	21	28	28	28	28	28	28	puuskatuuli g = 3,5	
v(z =15 m)	m/s	29	29	23	23	23	23	23	23	23	23	29	29	29	29	29	29		
v(z =42 m)	m/s	30	30	27	27	27	27	27	27	27	27	30	30	30	30	30	30		
v(z =70 m)	m/s	30	30	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	30	30	30	30		
z_{02}	m	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.01	0.3	0.3	0.3	kohdealueen mukaan	
x	m	30000	34000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	40000	38000	40000	21000	36000	28000	etäisyys muutoskohtaan	
Iv(z =10 m)		0.35	0.35	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.22	0.16	0.28	0.28	0.28	turbulenssin intensiteetti	
Iv(z =15 m)		0.32	0.32	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.21	0.15	0.26	0.26	0.26		
Iv(z =42 m)		0.26	0.26	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.18	0.18	0.13	0.22	0.22	0.22		
Iv(z =70 m)		0.23	0.23	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.16	0.11	0.19	0.19	0.19		
vm(z =10 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	17	12	12	12	10 min keskituuli	
vm(z =15 m)	m/s	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	15	15	18	13	13	13		
vm(z =42 m)	m/s	15	15	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18	21	17	17	17		
vm(z =70 m)	m/s	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	20	20	23	18	18	18		
vh(z =10 m)	m/s	9	9	11	11	11	11	11	11	11	11	13	13	16	11	11	11	tunnin keskituuli	
vh(z =15 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	17	12	12	12		
vh(z =42 m)	m/s	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	17	17	20	15	15	15		
vh(z =70 m)	m/s	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	19	19	22	17	17	17		
v(z =10 m)	m/s	20	20	21	21	21	21	21	21	21	21	23	23	25	21	21	21	puuskatuuli g = 3,5	
v(z =15 m)	m/s	21	21	23	23	23	23	23	23	23	23	24	24	27	23	23	23		
v(z =42 m)	m/s	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	28	28	29	27	27	27		
v(z =70 m)	m/s	28	28	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	30	29	29	29		
Maaston rosoisuuden muutoksen (z_{01} - > z_{02}) vaikutus ESDU85020 mukaisesti																		Kohteessa	
Iv(z =10 m)		0.35	0.35	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.22	0.16	0.27	0.28	0.28		
Iv(z =15 m)		0.32	0.32	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.21	0.15	0.25	0.26	0.26		
Iv(z =42 m)		0.26	0.26	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.18	0.18	0.13	0.21	0.22	0.21		
Iv(z =70 m)		0.23	0.23	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.16	0.11	0.19	0.19	0.19		
10 min keskituuli																			
vm(z =10 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	17	12	12	12		
vm(z =15 m)	m/s	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	15	15	18	13	13	13		
vm(z =42 m)	m/s	15	15	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18	21	17	17	17		
vm(z =70 m)	m/s	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	20	20	23	19	18	19		
Tunnin keskituuli																			
vh(z =10 m)	m/s	9	9	11	11	11	11	11	11	11	11	13	13	17	11	11	11		
vh(z =15 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	18	12	12	12		
vh(z =42 m)	m/s	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	17	17	20	16	15	16		
vh(z =70 m)	m/s	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	19	19	22	18	17	17		
Puuskatuuli																		puuskatuuli (1s, g=3,5)	
v(z =10 m)	m/s	20	19	21	21	21	21	21	21	21	21	23	23	26	21	21	21		
v(z =15 m)	m/s	21	21	23	23	23	23	23	23	23	23	24	24	27	23	23	23		
v(z =42 m)	m/s	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	28	28	29	27	27	27		
v(z =70 m)	m/s	29	28	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	29	29	29		

Rosoisuuden 2. muutos

		Tuulen suuntakulma																	
Symboli	*Yks.*	**0**	**22.5**	**45**	**67.5**	**90**	**112.5**	**135**	**157.5**	**180**	**202.5**	**225**	**247.5**	**270**	**292.5**	**315**	**337.5**	*Kommentti*	*Viite*
v_{mr}	m/s	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{0r})	Tuulitilastot
k		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	toistumisvälin kerroin	Eurokoodi
v_{ref}	m/s	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	1 v toistumisvälin tuuli	
u^*_r	m/s	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{0r}	
z_{0r}	m	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	rosoisuusmitta (roughness length) keskituulen perusarvoon liittyen	
z_{01}	m	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.00997	0.3	0.3	0.3	kohdealueen ympäristössä	
Iv(z =10 m)		0.35	0.35	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.22	0.16	0.27	0.28	0.28	turbulenssin intensiteetti	
Iv(z =15 m)		0.32	0.32	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.21	0.15	0.25	0.26	0.26		
Iv(z =42 m)		0.26	0.26	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.18	0.18	0.13	0.21	0.22	0.21		
Iv(z =70 m)		0.23	0.23	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.16	0.11	0.19	0.19	0.19		
vm(z =10 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	17	12	12	12	10 min keskituuli	
vm(z =15 m)	m/s	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	15	15	18	13	13	13		
vm(z =42 m)	m/s	15	15	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18	21	17	17	17		
vm(z =70 m)	m/s	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	20	20	23	19	18	19		
vh(z =10 m)	m/s	9	9	11	11	11	11	11	11	11	11	13	13	17	11	11	11	tunnin keskituuli	
vh(z =15 m)	m/s	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	18	12	12	12		
vh(z =42 m)	m/s	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	17	17	20	16	15	16		
vh(z =70 m)	m/s	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	19	19	22	18	17	17		
v(z =10 m)	m/s	20	19	21	21	21	21	21	21	21	21	23	23	26	21	21	21	puuskatuuli g = 3,5	
v(z =15 m)	m/s	21	21	23	23	23	23	23	23	23	23	24	24	27	23	23	23		
v(z =42 m)	m/s	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	28	28	29	27	27	27		
v(z =70 m)	m/s	29	28	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	29	29	29		
z_{02}	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.01	0.001	0.1	0.001	0.001	0.3	0.7	0.3	kohdealueen mukaan	
x	m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	2500	2000	2700	600	900	5000	700	5000	etäisyys muutoskohtaan	
Iv(z =10 m)		0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.16	0.12	0.22	0.12	0.12	0.28	0.35	0.28	turbulenssin intensiteetti	
Iv(z =15 m)		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.15	0.12	0.21	0.12	0.12	0.26	0.32	0.26		
Iv(z =42 m)		0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.13	0.10	0.18	0.10	0.10	0.22	0.26	0.22		
Iv(z =70 m)		0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.11	0.08	0.16	0.08	0.08	0.19	0.23	0.19		
vm(z =10 m)	m/s	12	12	12	12	12	12	12	12	17	20	14	20	20	12	10	12	10 min keskituuli	
vm(z =15 m)	m/s	13	13	13	13	13	13	13	13	18	21	15	21	21	13	11	13		
vm(z =42 m)	m/s	17	17	17	17	17	17	17	17	21	23	18	23	23	17	15	17		
vm(z =70 m)	m/s	18	18	18	18	18	18	18	18	23	24	20	24	24	18	17	18		
vh(z =10 m)	m/s	11	11	11	11	11	11	11	11	16	19	13	19	19	11	9	11	tunnin keskituuli	
vh(z =15 m)	m/s	12	12	12	12	12	12	12	12	17	20	14	20	20	12	10	12		
vh(z =42 m)	m/s	15	15	15	15	15	15	15	15	20	22	17	22	22	15	14	15		
vh(z =70 m)	m/s	17	17	17	17	17	17	17	17	22	24	19	24	24	17	16	17		
v(z =10 m)	m/s	21	21	21	21	21	21	21	21	25	27	23	27	27	21	20	21	puuskatuuli g = 3,5	
v(z =15 m)	m/s	23	23	23	23	23	23	23	23	27	28	24	28	28	23	21	23		
v(z =42 m)	m/s	27	27	27	27	27	27	27	27	29	30	28	30	30	27	26	27		
v(z =70 m)	m/s	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	30	30	30	29	28	29		
Maaston rosoisuuden muutoksen (z_{01} - > z_{02}) vaikutus ESDU85020 mukaisesti																		Kohteessa	
Iv(z =10 m)		0.28	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.19	0.18	0.22	0.17	0.13	0.27	0.32	0.28		
Iv(z =15 m)		0.26	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.18	0.17	0.21	0.17	0.13	0.25	0.29	0.26		
Iv(z =42 m)		0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.17	0.16	0.18	0.16	0.12	0.21	0.23	0.21		
Iv(z =70 m)		0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.15	0.16	0.15	0.11	0.19	0.21	0.19		
10 min keskituuli																			
vm(z =10 m)	m/s	12	12	12	12	12	12	12	12	15	15	14	16	18	12	11	12		
vm(z =15 m)	m/s	13	13	13	13	13	13	13	13	16	17	15	17	19	13	12	13		
vm(z =42 m)	m/s	16	16	17	17	17	17	17	17	19	19	18	19	21	17	16	17		
vm(z =70 m)	m/s	18	18	18	18	18	18	18	18	20	21	20	21	23	19	18	19		
Tunnin keskituuli																			
vh(z =10 m)	m/s	11	10	11	11	11	11	11	11	14	15	13	15	18	11	9	11		
vh(z =15 m)	m/s	12	12	12	12	12	12	12	12	15	16	14	16	18	12	11	12		
vh(z =42 m)	m/s	15	15	15	15	15	15	15	15	17	18	17	18	20	16	15	16		
vh(z =70 m)	m/s	17	17	17	17	17	17	17	17	19	20	19	20	22	18	17	17		
Puuskatuuli																		puuskatuuli (1s, g=3,5)	
v(z =10 m)	m/s	21	21	21	21	21	21	21	21	23	24	23	24	26	21	20	21		
v(z =15 m)	m/s	23	23	23	23	23	23	23	23	25	25	24	25	27	23	22	23		
v(z =42 m)	m/s	27	27	27	27	27	27	27	27	28	28	28	28	29	27	27	27		
v(z =70 m)	m/s	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30	29	30	30	29	29	29		

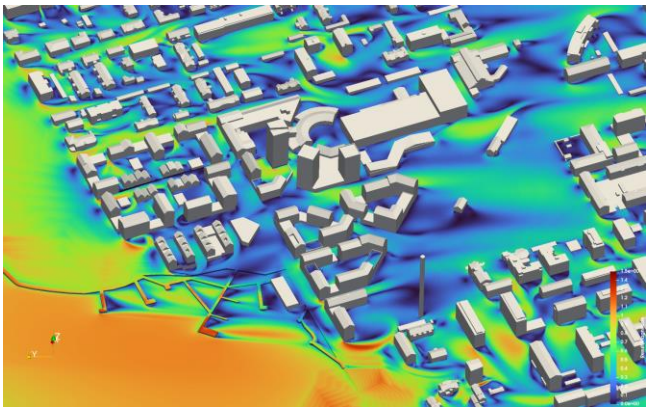
Liite 5: Virtauslaskennan tuloskartat

Suhteellinen keskituuli k_m (tuulen keskinopeus 1,5 m korkeudella alla olevasta pinnasta suhteessa 15 m korkeudella vaikuttavaan tulovirtauksen keskinopeuteen). Väriasteikko (sininen…punainen) = 0…1,5:

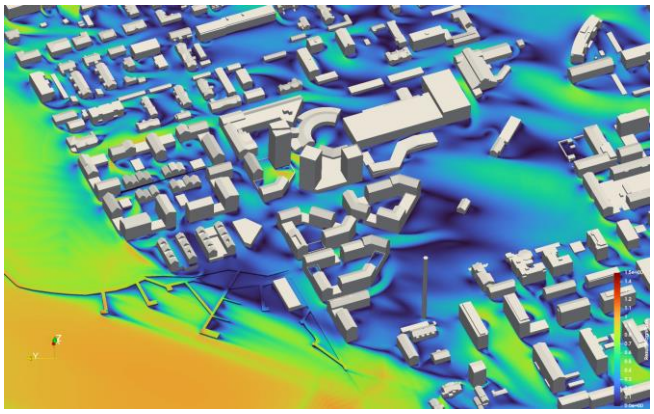


Väriasteikko on valittu siten, että punainen väri ennakoi rakennuksista aiheutuvaa paikallista tuulisuuslisää kyseisellä tuulensuunnalla. Oranssi väri kuvaa tavanomaista tulosta tasaisella laajalla aukealla alueella (esim. veden tai jään päällä). Sininen väri kuvaa tavanomaista tulosta rakennusten tuulensuojassa, jossa tuulen keskinopeudet ovat alhaisia, mutta jossa tuulen puuskia voi edelleen esiintyä.

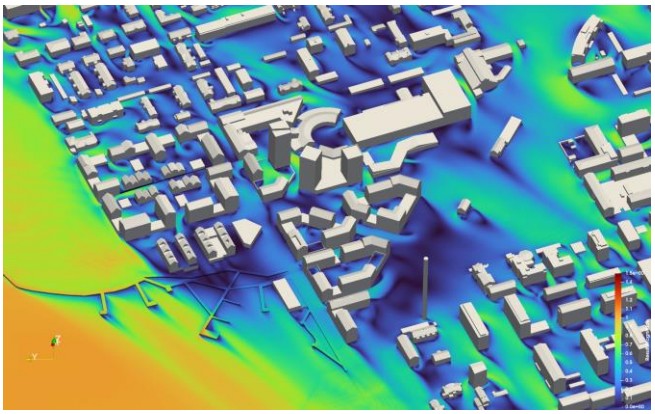
0º



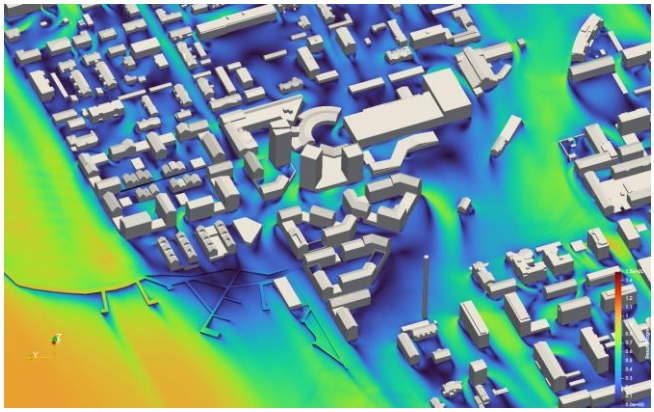
22,5º



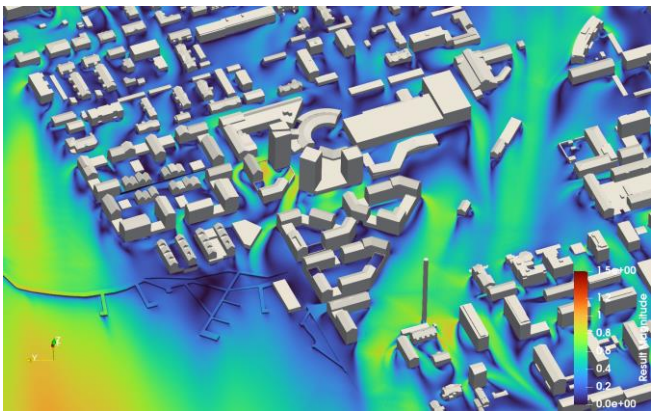
45º



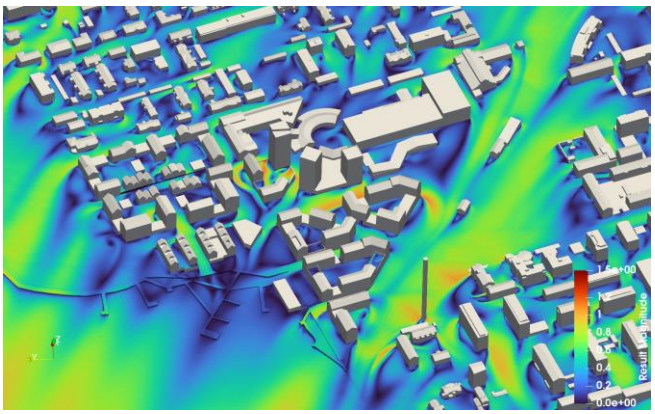
67,5º



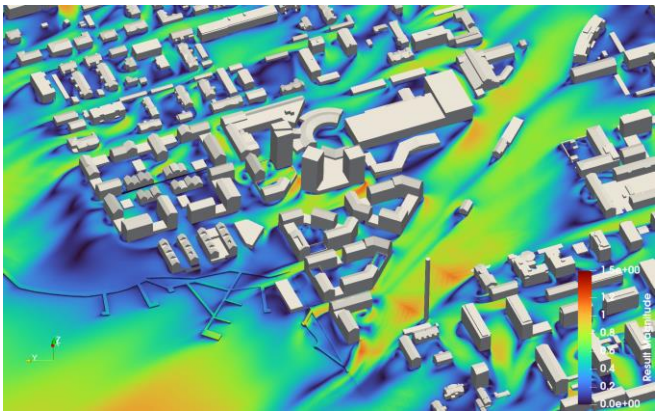
90º



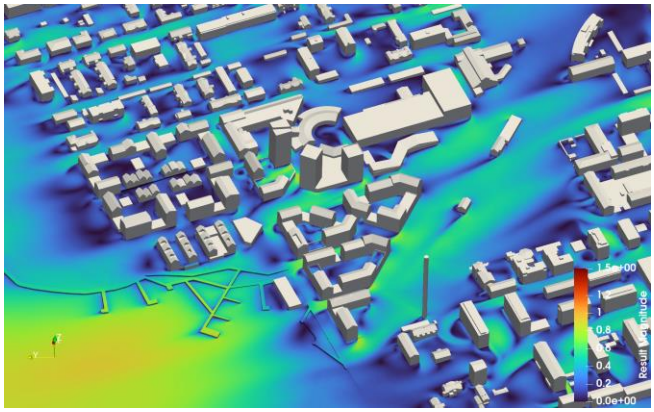
112,5º



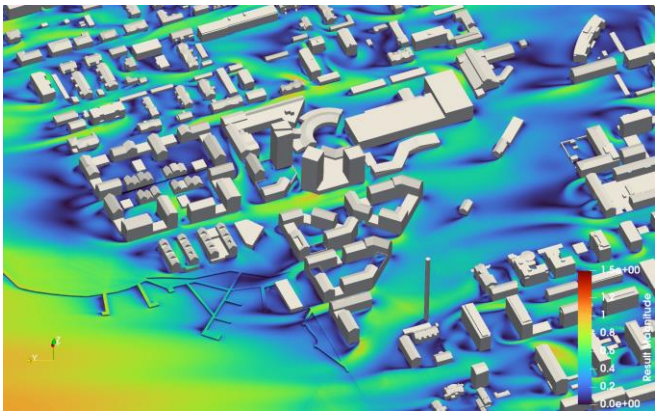
135º



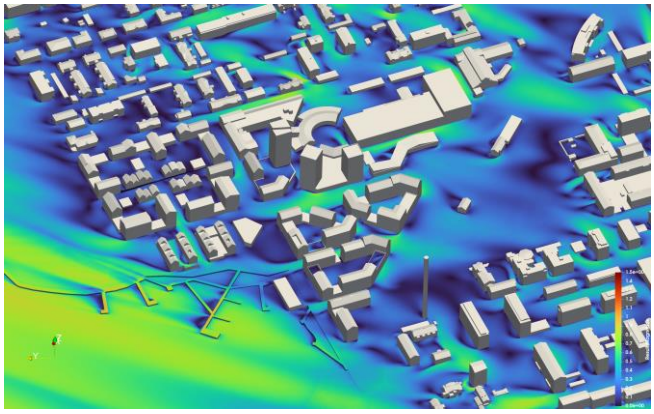
157,5º



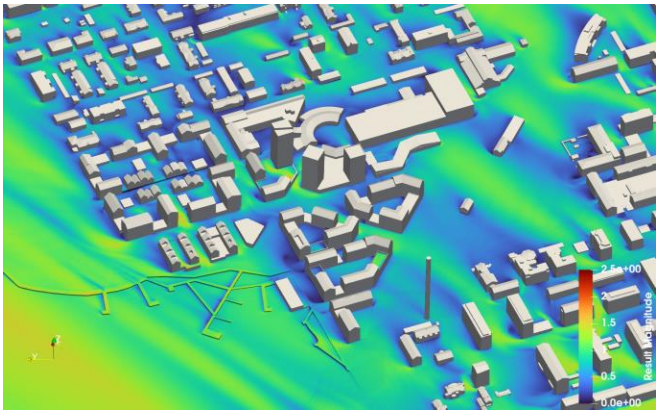
180º



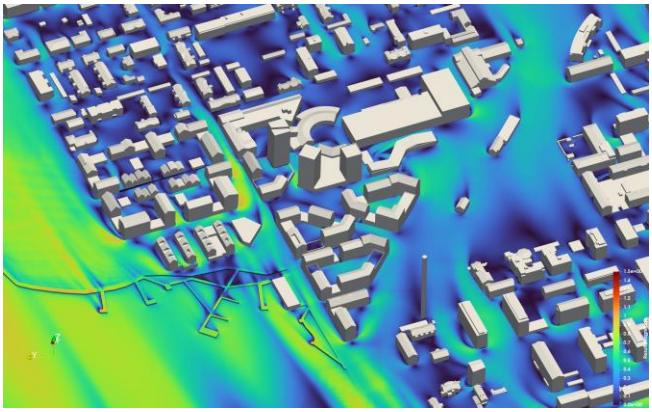
202,5º



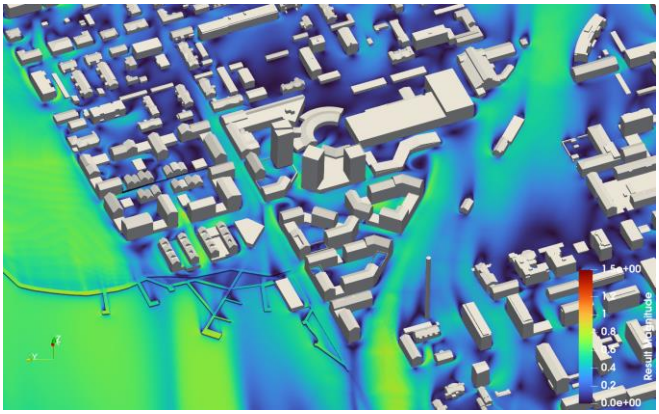
225º



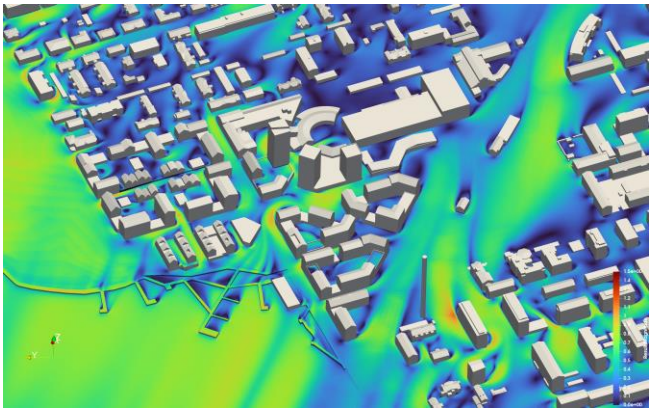
247,5º



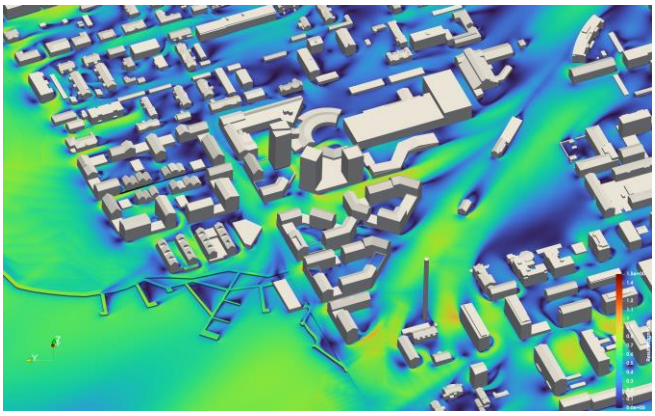
270º



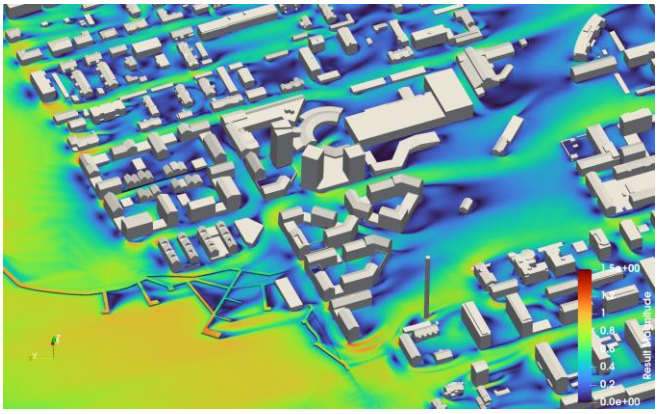
292,5º



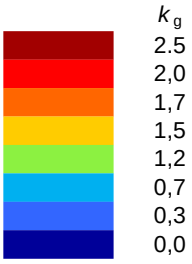
315º



337,5º

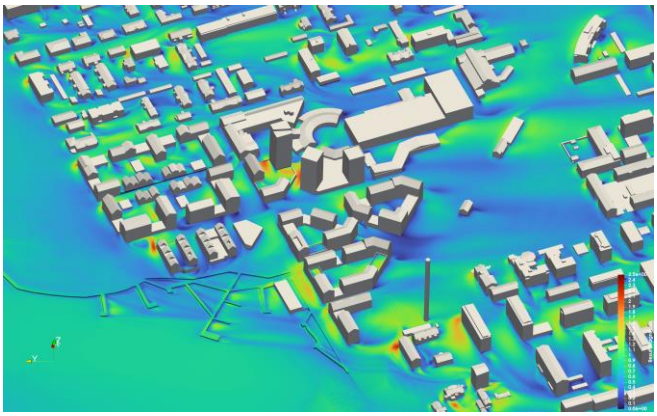


Suhteellinen tuulen puuskanopeus k_g (tuulen puuskanopeus 1,5 m korkeudella alla olevasta pinnasta suhteessa 15 m korkeudella vaikuttavaan tulovirtauksen keskinopeuteen; arvioituna turbulenssin kineettisen energian kautta). Väriasteikko (sininen…punainen) = 0…2,5:

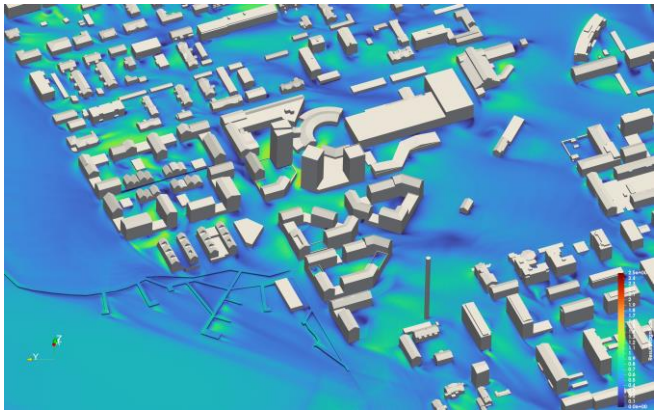


Väriasteikko on valittu siten, että punainen väri ennakoi rakennuksista aiheutuvaa paikallista tuulisuuslisää tuulen puuskanopeuksissa kyseisellä tuulensuunnalla. Jos esimeriksi tarkastelupisteessä k_g = 2,0 ja tulovirtauksen keskinopeus 15 m korkeudessa = 10 m/s, voi tuulen puuskanopeus tarkastelupisteessä olla 20 m/s.

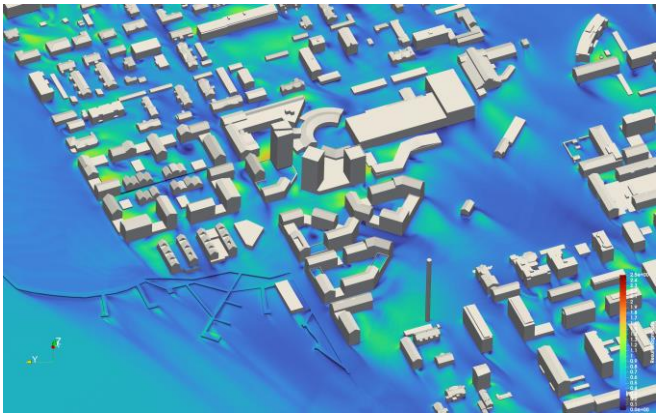
0º



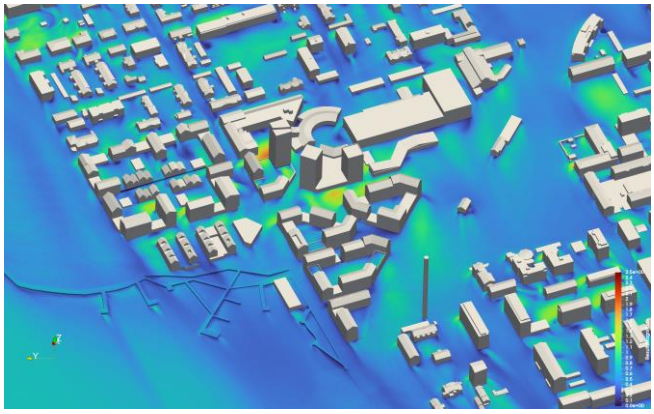
22,5º



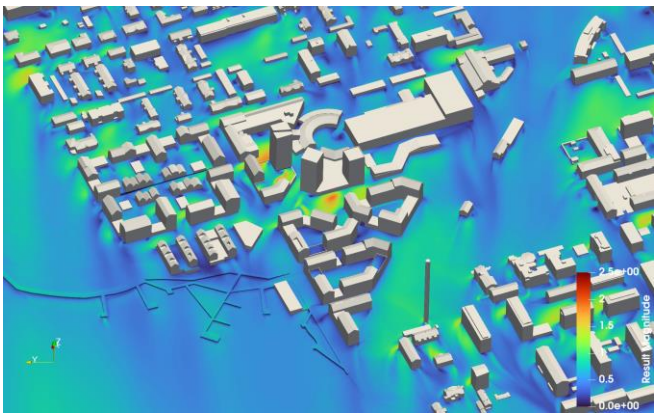
45º



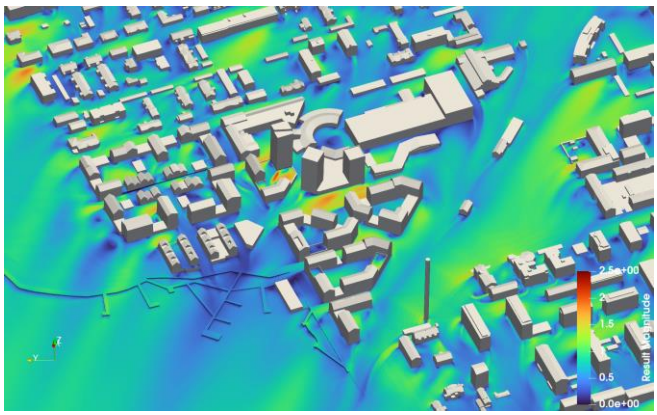
67,5º



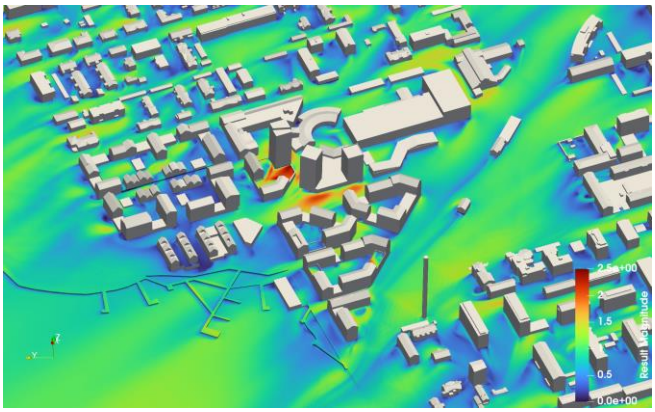
90º



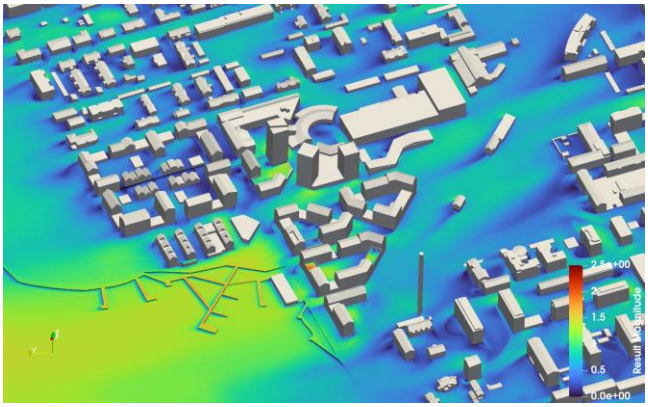
112,5º



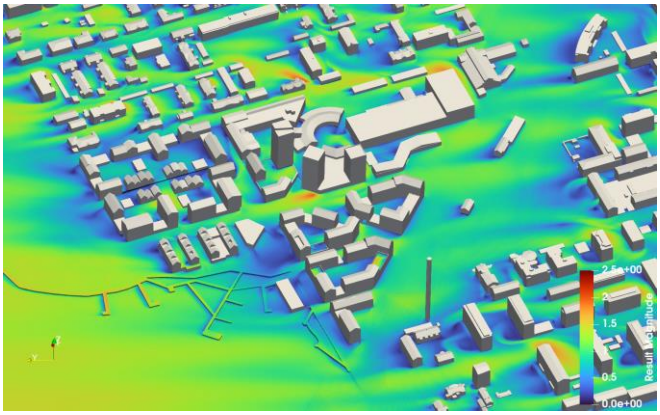
135º



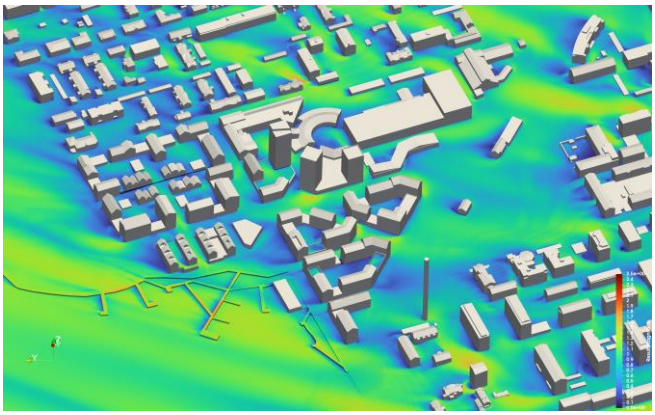
157,5º



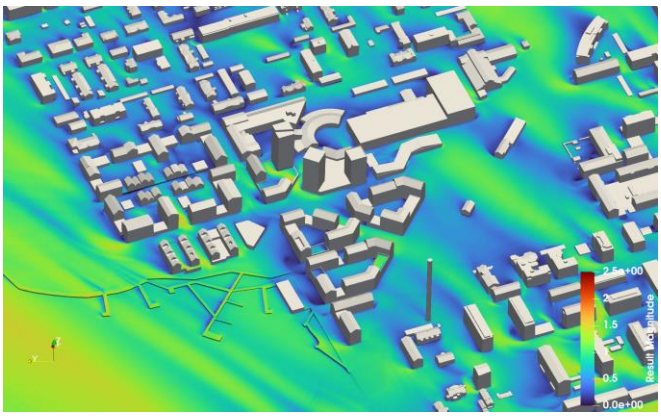
180º



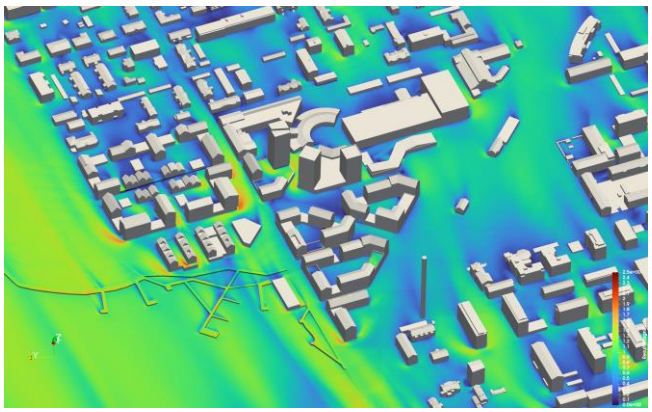
202,5º



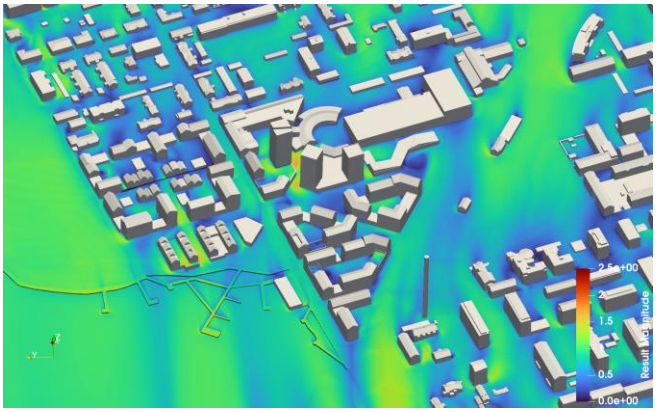
225º



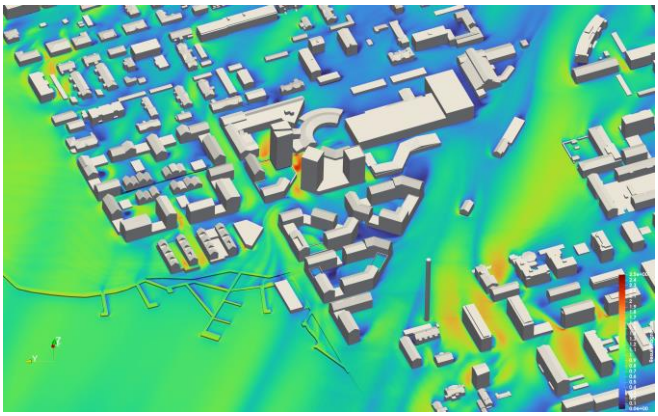
247,5º



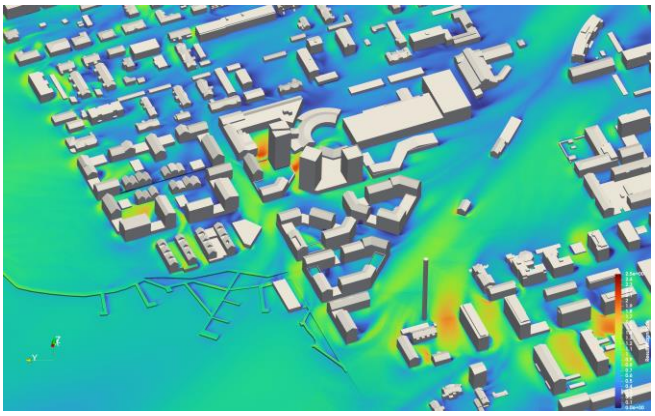
270º



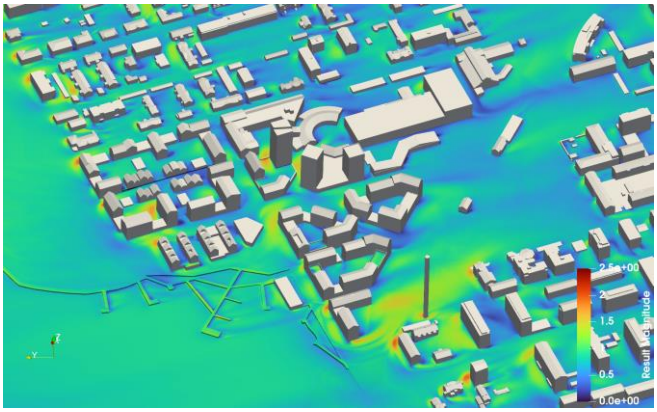
292,5º



315º



337,5º



WSP Finland Oy
WSP
Pasilan asema-aukio 1
00520 Helsinki
Puh: 0207 864 11
www.wsp.com/FI-fi