



TIILISMÄENRINNE

Tuulisuusselvitys

31.5.2024

Laadunhallinta

Versio/muutokset	Versio 1	Muutos 1	Muutos 2	Muutos 3
Huomautukset		saavutettava versio	päivitetty viimeimpien suunnitelmien mukaiseksi, saavutettava versio	päivitetty viimeimpien suunnitelmien mukaiseksi, saavutettava versio
Päiväys	25.8.2021	14.12.2021	12.6.2022	31.5.2024
Laatija	Risto Kiviluoma	Risto Kiviluoma	Risto Kiviluoma	Risto Kiviluoma
Allekirjoitus				
Tarkastanut				
Allekirjoitus				
Hyväksynyt				
Allekirjoitus				
Raportin numero				
Tiedostotunnus				

Tiilismäenrinne

Tuulisuusselvitys

31.5.2024

Tilaaja

Lujatalo Oy

Sokerilinnantie 11 B
02600 Espoo
www.luja.fi

Yhdyshenkilö: Vesa Sairomaa

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

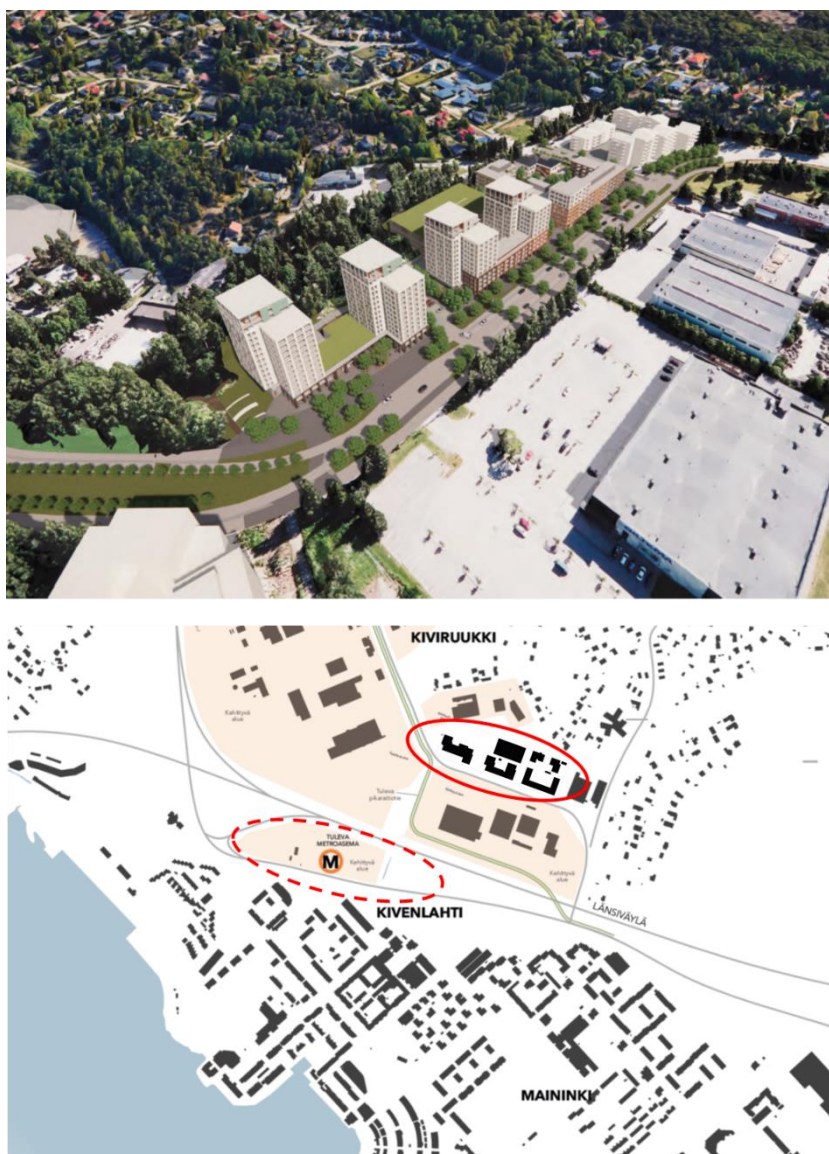
Sisällys

1 Johdanto	5
2 Tuulisuusselvitys	7
2.1 Tarkasteltava suunnitelma	7
2.2 Analyysimenetelmä ja määrittelyt	10
2.3 Tulokset	16
2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus	16
2.3.2 Tuulisuus tarkastelupisteissä	19
3 Tuulisuustulosten ohjeellinen tulkinta	27
4 Tuulennopeuden ääriarvot	30
Lähdeluettelo	33
Liite 1: Tuulisuuden määrittämisen yleisperiaate	34
Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta	41
Liite 3: Maaston rosoisuuden huomioon ottaminen	47
Liite 4: Maaston rosoisuuden muutosten analyysi	52

1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään tuulisuusselvitys Espoon Kivenlahdessa sijaitsevaan Tiilismäenrinne -uudisrakennuskohteen viitesuunnitelmaan (kuva 1). Kohde sisältää 12, 13, 14 ja 15 -kerroksiset asuinrakennukset; matalampia rakennuksia; ja parkkihallin. Tuulisuusselvitys on laadittu kaavamuu-
toskäsittelyä varten.

Tuulisuus on mainittu Espoon korkean rakentamisen periaatteissa [1]. Sen mukaan yli 12-kerroksisen rakennuksen rakennuslupahakemuksen yhteydessä tulisi Espoossa esittää tuulitarkastelu, jonka perusteella voidaan arvioida vaikutukset lähialueen mikroilmastoon. Rakennuslupavaiheen lisäselvitysten tarvetta analysoidaan tässä raportissa erikseen.



Kuva 1: Raportin kohde – Tiilismäenrinne. Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto HVM Oy ja L Arkkitehdit Oy aineistoista.

Kohde sijaitsee Kivenlahden metrokeskuksesta n. 0,5 km koilliseen siten, että väliin jää Länsiväylän aukea alue ja kehitettävä kortteli. Konsultti on aikaisemmin laatinut Kivenlahden metrokeskuksen kaavoitusvaiheen tuulisuusselvityksen [1]. Sen mukaan Kivenlahden ranta-alueet ovat suhteellisen tuulisia johtuen siitä, että viereinen merenlahti jää vallitsevien tuulien puolelle etelän-lounaan suunnissa.

Kohteen tuulisuus riippuu pitkälti viereisten kehitettävien alueiden rakennusmassojen toteutumisesta etelän-lännen suunnilla. Muista suunnista kohde on kukkulaisten ja metsäisten alueiden suojaama. Tuulisuusvaikutusten kannalta kohde sisältää nykytilassa ympäristöään selvästi korkeampaa rakentamista etelän ja lännen väliltä puhaltavien tuulien tarkastelussa.

Tuulisuuden vaikutuksia yleisesti, määrittämenetelmiä ja tuulisuuskriteereitä on käsitelty tarkemmin liitteissä 1 ja 2.

Tuulisuusvaikutusten osalta tarkastelu perustuu nykyiseen ilmastoon ja jatkuvien tuulilastojen analyysiin. Rakennesuunnittelussa käytettävät tuulennopeudet perustuvat yleisesti tuulennopeuden ääriarvojen (vuotuisten maksimituulien) tilastolliseen analyysiin, jossa otetaan huomioon noin 50 vuoden tarkastelujakso. Myöhempiä suunnitteluvaiheita varten tässä raportissa on esitetty tuulennopeuden ääriarvot ja vastaavat tuulen puuskanopeuspaineet vastaten 50 vuoden toistumisväliä. Sekä tuulisuusvaikutusten että tuulennopeuden ääriarvojen määrittämisen perustana käytettävä maaston rosoisuuden muutosten analyysi on esitetty tarkemmin liitteessä 3.

2 Tuulisuusselvitys

2.1 Tarkasteltava suunnitelma

Kohteen suunnitelmaa on havainnollistettu kuvissa 2...4. Rakennukset ovat pääasiallisesti asuinrakennuksia. Katutasossa Ruukintien vierustassa voi sijaita liiketiloja. Suunnitelmaan kuuluu päiväkotikoti, joka sijaitsee erillisessä matalammassa rakennuksessa alueen koillisnurkassa.



Kuva 2: Asemapiirustus. Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto HMT Oy aineistosta.



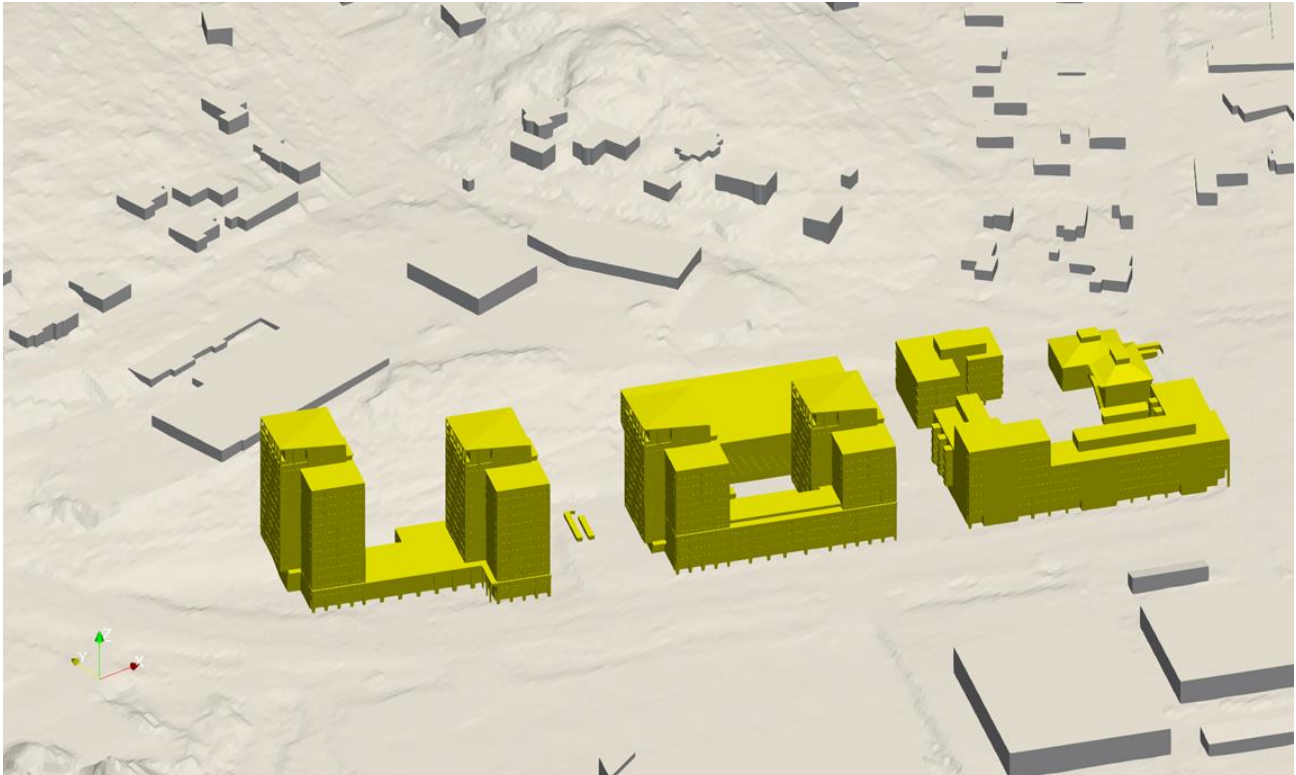
MERKINNÄT

-  ISTUTETTAVA LEHTI- JA HAVUPUU
-  PENSASISTUTUS
-  PERENNAISTUTUS/ NIITTY/ NURMI

-  KIVEYSALUE
-  ASFALTTI
-  TURVA-ALUSTA
-  KIVITUHKA

-  NURMIKIVEYS
-  SEULANPÄÄKIVEYS

Kuva 3: Pihasuunnitelma. Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto HMY Oy aineistosta.



Kuva 4: Viitesuunnitelman rakennusmassat sovitettuna nykyiseen maasto- ja kaupunkimalliin. Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto HMT Oy tietomallista sekä Maanmittauslaitoksen ja Espoon kaupungin aineistoista.

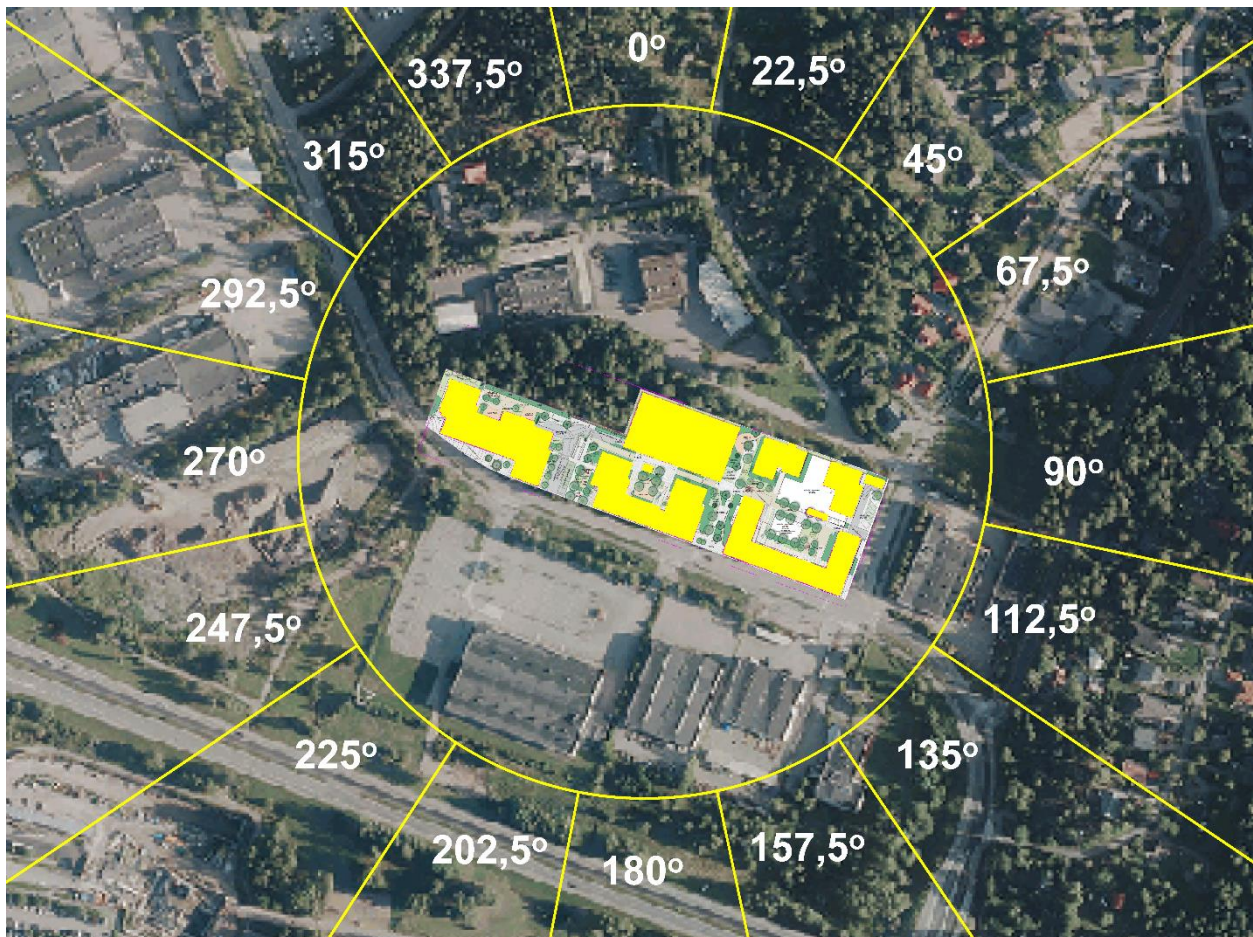
2.2 Analyysimenetelmä ja määrittelyt

Tuulisuuden laskenta/arviointi on tehty [3] yhteydessä kehitetyllä menetelmällä, joka perustuu suunnitelmaerojen vaikutusten laskentaan, kun käytössä on viitekohteiden tuulitunnelikoetuloksia. Menetelmässä määritetään lähtötiedoksi kohdealueen perustuulisuus. Se lasketaan rosoisuuden muutosten analyysin perusteella paikallisen sääaseman tuulitilastosta. Tällä analyysissä otetaan huomioon tuulitilaston mittauspisteen ja kohdealueen sijaintierosta johtuvat kysymykset sekä tuulitilaston mittauspisteen mahdolliset tuulivarjostukset.

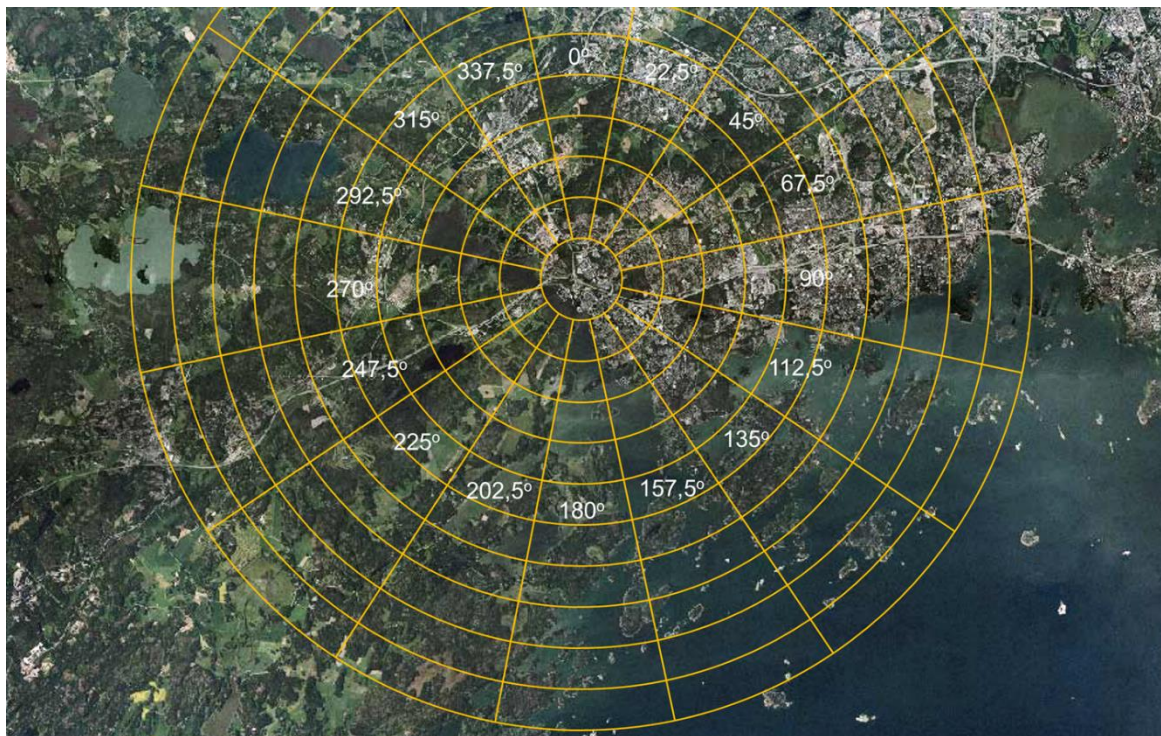
Käytetty tuulitilasto on Ilmatieteenlaitoksen Harmajan sääaseman tulokset 20 v ajalta (vuodet 2001...2020).

Menetelmä sijoittuu tarkkuudeltaan suunnittelukohteen tuulitunnelikokeen tai virtauslaskennan avulla tehdyn tuulisuuskartoituksen ja asiantuntijalausunnon välille. Vastaavista menetelmistä käytetään nimitystä ”työpöytä-tutkimus” (*desk study*).

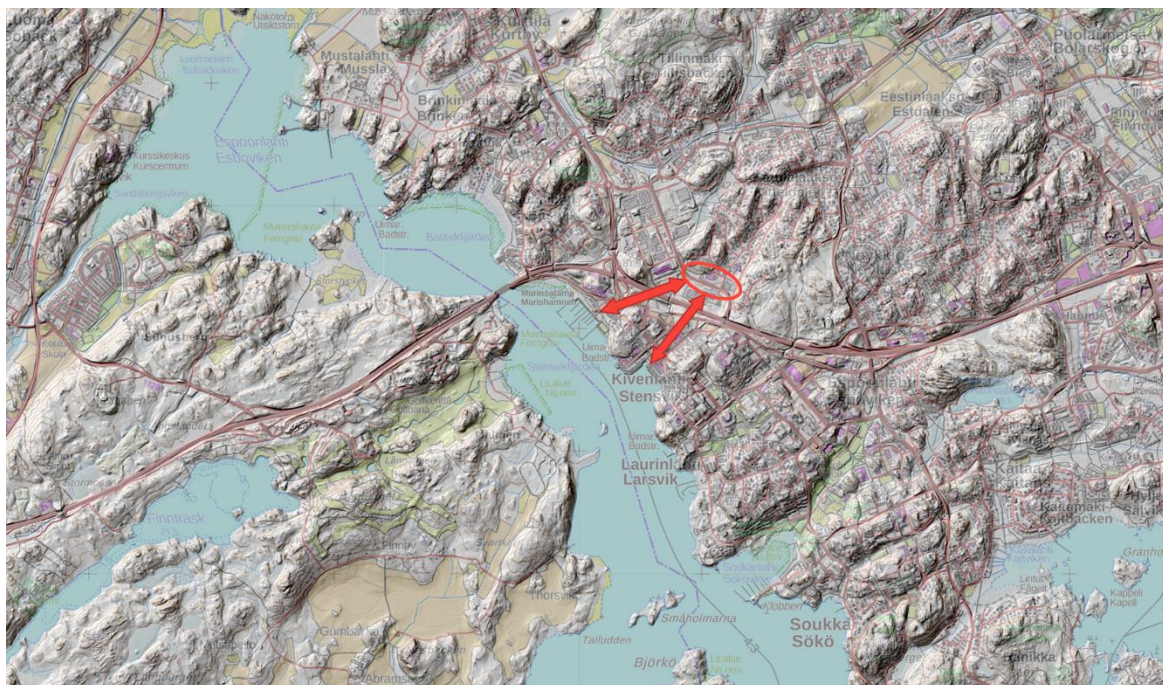
Tuulisuuden numeroarvojen määrittämistä varten tuulen suunnat on jaettu sektoreihin. Näiden suuntakulmat on esitetty kuvassa 5 (sektori 0° tarkoittaa pohjoistuulta, 90° itätuulta jne.). Maaston tyyppiä kohteen ympäristössä on havainnollistettu kuvissa 5...8.



Kuva 5: Tuulensuuntien koordinaatisto (kuva muokattu Espoon kaupungin ja Arkkitehtitoimisto HMY Oy aineistoista).



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



Kuva 7: Maaston korkeusvarjostus ja merenlahtien tuulille avoimet sektorit (kuva on muokattu Maanmittauslaitoksen kartta-aineistosta). Kohde sijaitsee lähimmillään n. 0,8 km rantaviivasta.



Kuva 8: Kohdealue ja sen ympäristö nykytilassa (kuvat Espoon kaupungin aineistosta).

Tuulisuuden numeroarvojen laskentaan on valittu kuvan 9 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 lisäksi esitetty kansainvälisissä kohteissa useasti käytetty 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 [4].



Kuva 9: Tuulisuuden tarkastelupisteet: Kuva muokattu Arkkitehtitoimisto HMT Oy aineistosta.

Taulukko 1a: Konsultin Suomen kohteissa käyttämät tuulisuuskriteerit katutasen 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 kokonaismuutosta 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, $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,05$ % 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), $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,05$ % 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 $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,025$ % 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 $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,025$ % 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. Kriteeristö määrittelee luokan, joihin tarkastelupiste kuuluu tuulisuuden kannalta

Nimi	Tunnusväri	Kuvaus	Vaikutus
GEM 4 m/s < 5 %	sininen	Istuminen pitkiä aikoja. Eryistä 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 > 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

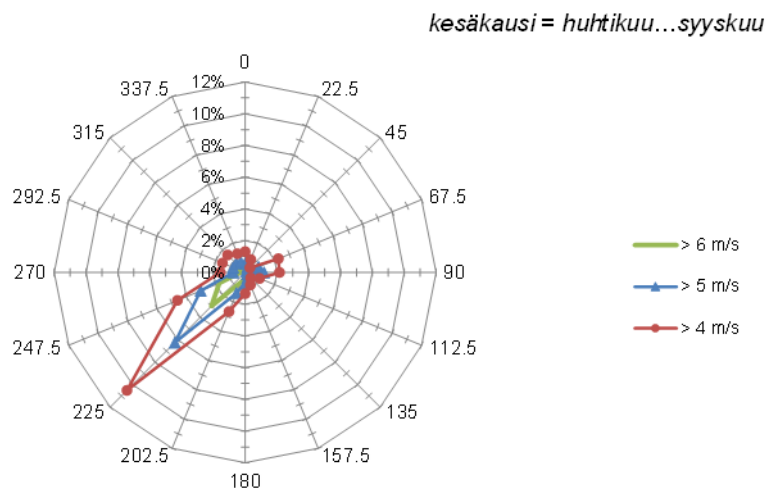
GEM = määräävämpi jalankulkijan korkeudella (1,5 m) vaikuttavista tuulennopeuksista v_k ja $v_g/1,85$, missä v_k = tunnin keskinopeus ja $v_g = 3$ s. puuskanopeus.

2.3 Tulokset

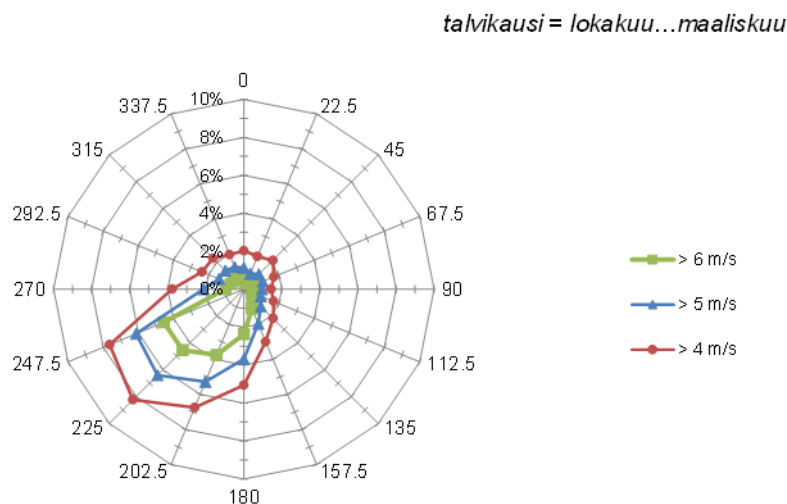
2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus

Kohdealueen perustuulisuus on määritetty 15 m korkeudessa (tämä korkeus vastaa tuulitilaston mitauspisteen korkeutta). Tuloksia on havainnollistettu kuvissa 10 ja 11. Tulosten perustana oleva maaston rosoisuuden muutosten analyysi on esitetty liitteessä 4.

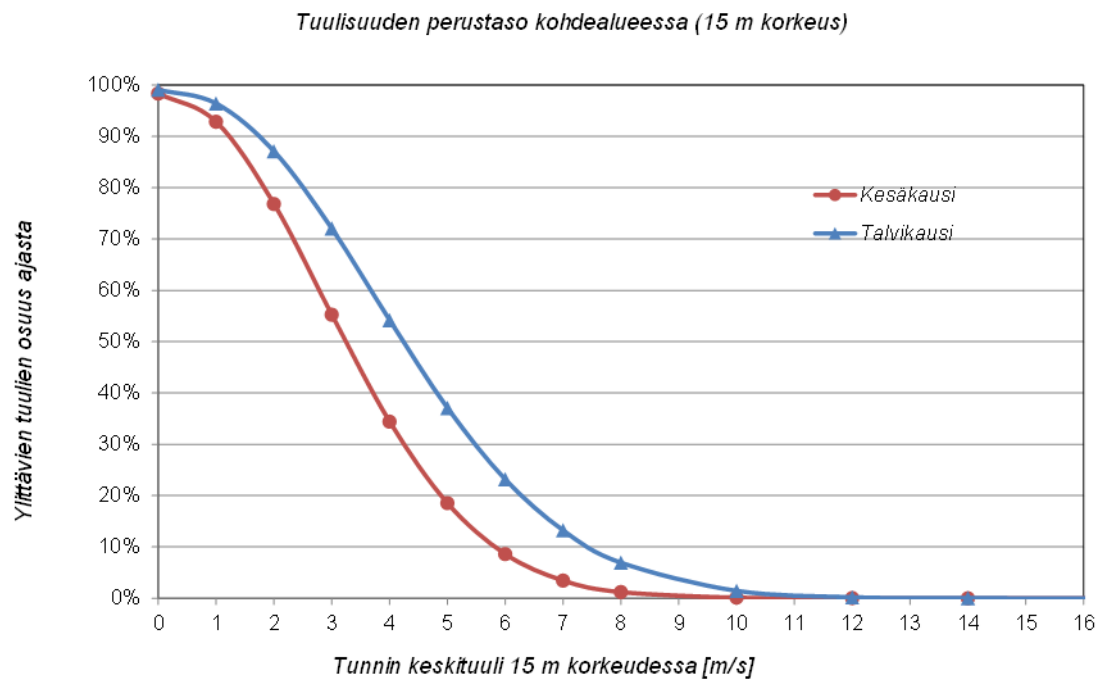
Kesäkausi: keskituulien esiintyminen kohdealueessa (% ajasta; 15 m korkeus)



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

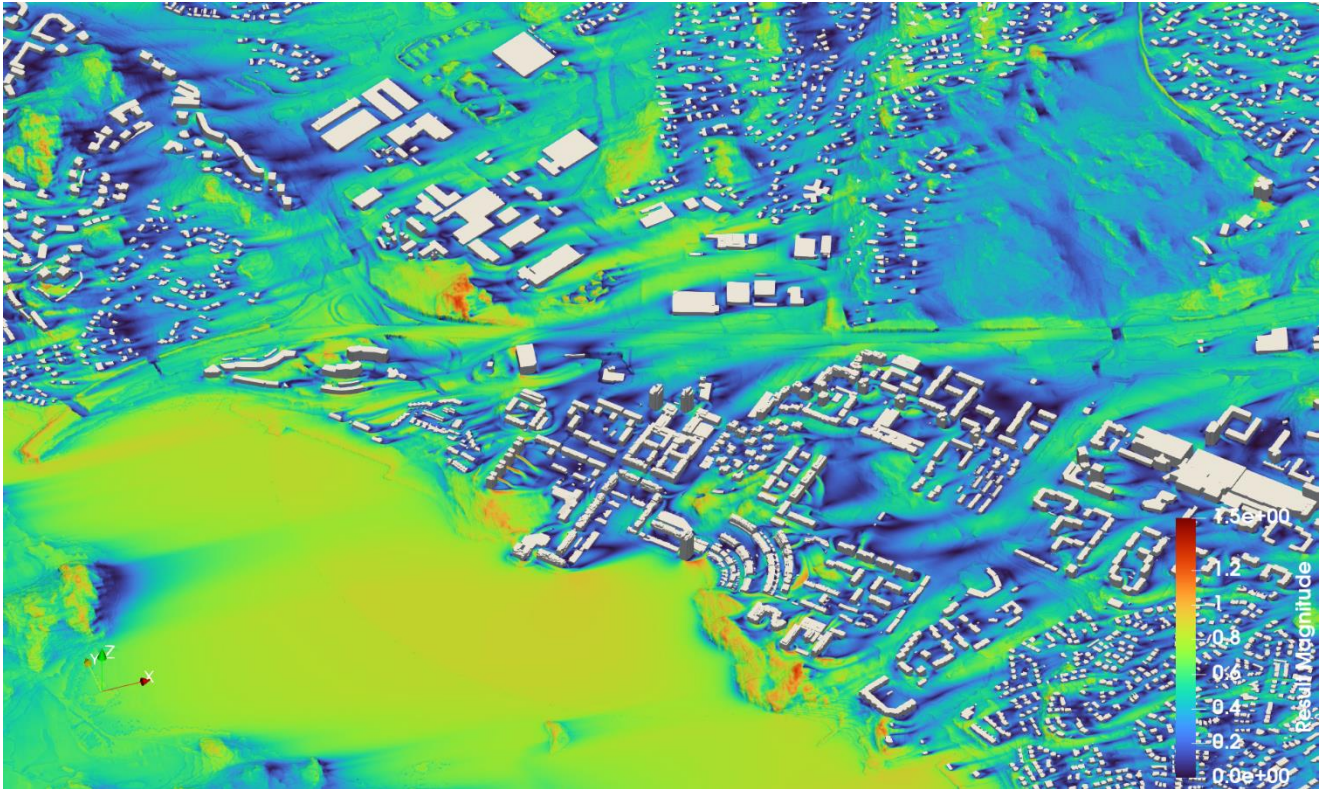


Kuva 10: Perustuulisuus kohdealueessa tuulen suunnittain (tuulennopeudet ovat tunnin keskituulia 15 m korkeudessa).



Kuva 11: Perustuulisuus kohdealueessa summana kaikista tuulensuunnista.

Nykytilassa kovat tuulen ovat kohdealueen jalankulkijan tasossa mahdollisia pääasiassa vain etelän-lännen suunnista, jossa on noin 400 m levyinen rakentamaton ja puuton aukea (kuvat 12 ja 13). Tuulennopeudet aukealla jäävät kuitenkin lievemiksi kuin Kivenlahden ranta-alueilla. Muista suunnista kohdealue on rakennusten ja kukkulaisen metsäalueiden suojaama.



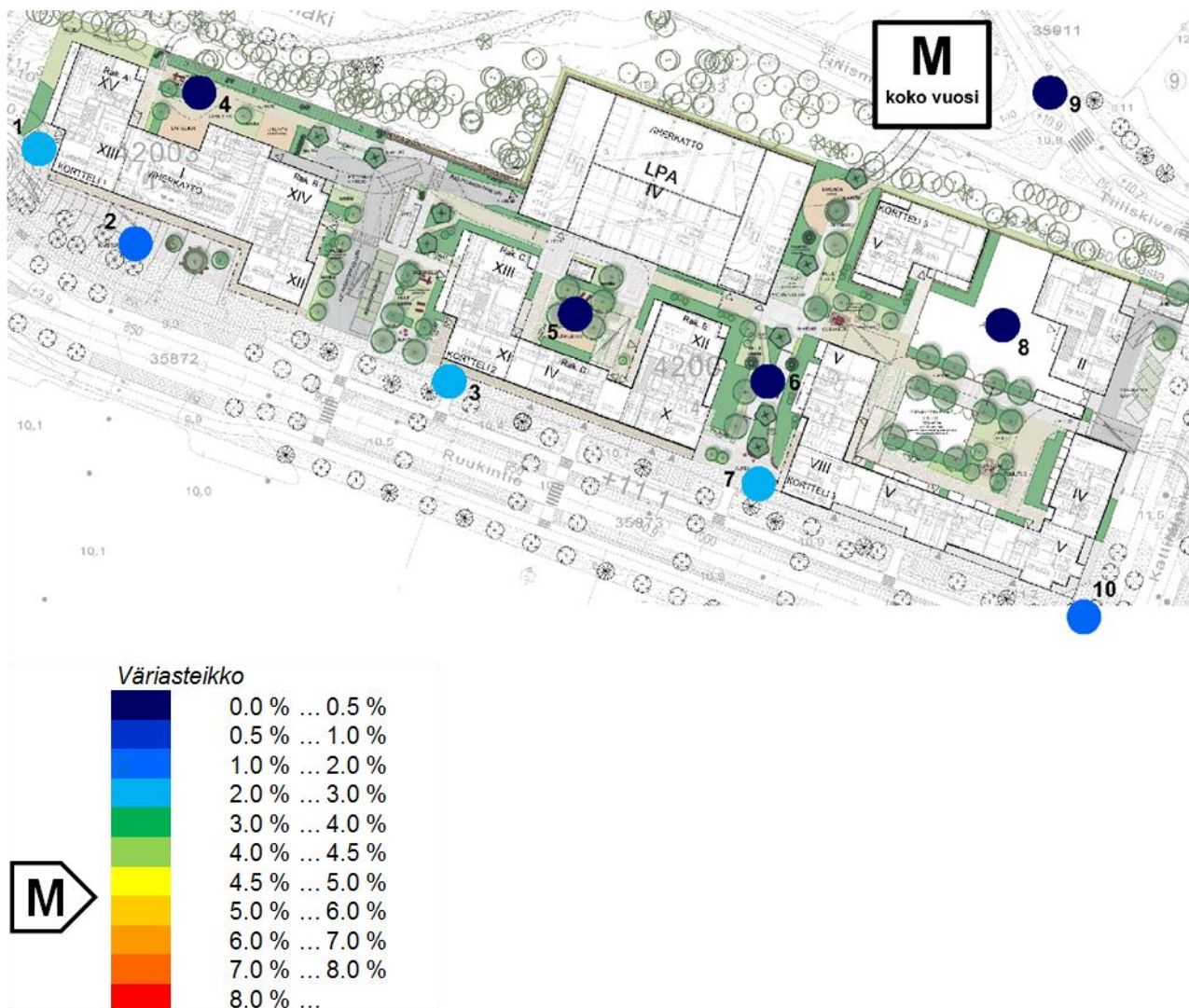
Kuva 12: Virtauslaskentatulokset jalankulkutason suhteelliselle tuulen keskinopeudelle (k_m , liite 1) Kivenlahden alueen nykytilassa länsituulen yhteydessä. Kuva WSP.



Kuva 13: Kohdealueen viereinen rakentamaton aukea lännen suunnasta katsottuna (kuva WSP 26.5.2024).

2.3.2 Tuulisuus tarkastelupisteissä

Laskennalliset tuulisuuden numeroarvot tarkastelupisteissä on esitetty kuvissa 14 ja 15.

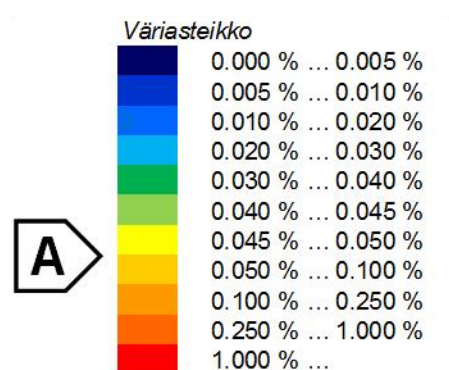


Tunnin keskituuli > 5 m/s

M Koko vuosi						Kesäkausi				
Piste		% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk		% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1		2.1 %	183	15	4		0.7 %	30.9	5.1	1.2
2		1.8 %	160	13	3		0.4 %	16.9	2.8	0.7
3		3.0 %	261	22	5		0.6 %	26.3	4.4	1.0
4		0.0 %	3	0	0		0.0 %	0.5	0.1	0.0
5		0.0 %	0	0	0		0.0 %	0.0	0.0	0.0
6		0.5 %	41	3	1		0.1 %	2.9	0.5	0.1
7		2.8 %	245	20	5		0.6 %	27.6	4.6	1.1
8		0.0 %	0	0	0		0.0 %	0.0	0.0	0.0
9		0.4 %	38	3	1		0.1 %	2.6	0.4	0.1
10		1.3 %	114	9	2		0.3 %	15.1	2.5	0.6

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 14a: Tunnin keskituulien (> 5 m/s) esiintyminen tarkastelupisteissä (M-kriteeri).

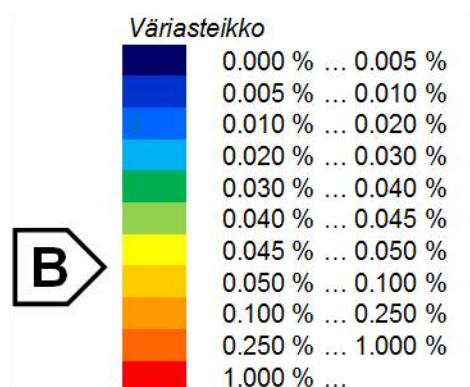


Puuskatuuli > 10 m/s

Piste	Koko vuosi				A Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	3.5 %	303	25.3	5.8	1.34 %	58.8	9.8	2.3
2	1.4 %	121	10.1	2.3	0.28 %	12.3	2.1	0.5
3	2.7 %	234	19.5	4.5	0.57 %	25.0	4.2	1.0
4	0.3 %	26	2.1	0.5	0.09 %	4.1	0.7	0.2
5	0.0 %	1	0.1	0.0	0.00 %	0.2	0.0	0.0
6	1.0 %	84	7.0	1.6	0.19 %	8.3	1.4	0.3
7	2.8 %	243	20.3	4.7	0.74 %	32.3	5.4	1.2
8	0.0 %	0	0.0	0.0	0.00 %	0.0	0.0	0.0
9	0.5 %	46	3.8	0.9	0.05 %	2.4	0.4	0.1
10	0.9 %	80	6.7	1.5	0.21 %	9.4	1.6	0.4

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 14b: Puuskatuulien > 10 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (A-kriteeri).



Puuskatuuli > 13 m/s

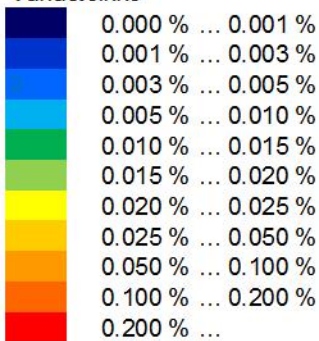
Piste	Koko vuosi					B Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk		% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0.6 %	54	4.5	1.0		0.12 %	5.3	0.9	0.2
2	0.1 %	8	0.7	0.2		0.01 %	0.4	0.1	0.0
3	0.3 %	25	2.1	0.5		0.02 %	1.0	0.2	0.0
4	0.0 %	1	0.1	0.0		0.00 %	0.1	0.0	0.0
5	0.0 %	0	0.0	0.0		0.00 %	0.0	0.0	0.0
6	0.1 %	7	0.6	0.1		0.00 %	0.2	0.0	0.0
7	0.3 %	27	2.2	0.5		0.05 %	2.2	0.4	0.1
8	0.0 %	0	0.0	0.0		0.00 %	0.0	0.0	0.0
9	0.0 %	1	0.1	0.0		0.00 %	0.0	0.0	0.0
10	0.1 %	8	0.6	0.1		0.01 %	0.4	0.1	0.0

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 14c: Puuskatuulien > 13 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (B-kriteeri).



Väriasteikko

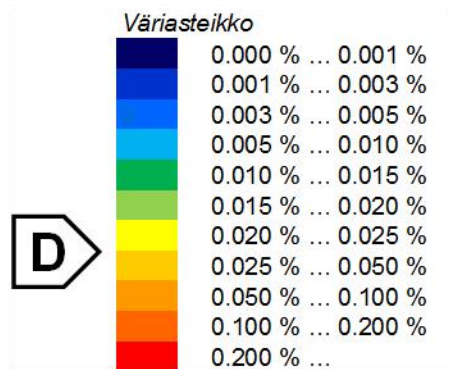


Puuskatuuli > 16 m/s

Piste	C Koko vuosi				Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0.080 %	7.0	0.6	0.1	0.008 %	0.3	0.06	0.01
2	0.003 %	0.3	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
3	0.018 %	1.5	0.1	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
4	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
5	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
6	0.002 %	0.2	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
7	0.020 %	1.8	0.1	0.0	0.002 %	0.1	0.02	0.00
8	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
9	0.000 %	0.0	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00
10	0.004 %	0.4	0.0	0.0	0.000 %	0.0	0.00	0.00

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 14d: Puuskatuulien > 16 m/s esiintyminen tarkastelupisteissä (C-kriteeri).



Puuskatuuli > 23 m/s		D Koko vuosi				Kesäkausi			
Piste		% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1		0.0001 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	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		0.0000 %	0.0	0.0	0.0	0.0000 %	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

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 14e: 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 epävihtyisiä
	GEM > 15 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta yleisillä alueilla
	GEM > 20 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta.

Kuva 15a: Lawson LDDC -kriteeristö, 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 epävihtyisiä
	GEM > 15 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta yleisillä alueilla
	GEM > 20 m/s > 0,025 % ei hyväksyttävä turvallisuuden kannalta.

Kuva 15b: Lawson LDDC -kriteeristö, talvikausi.

3 Tuulisuustulosten ohjeellinen tulkinta

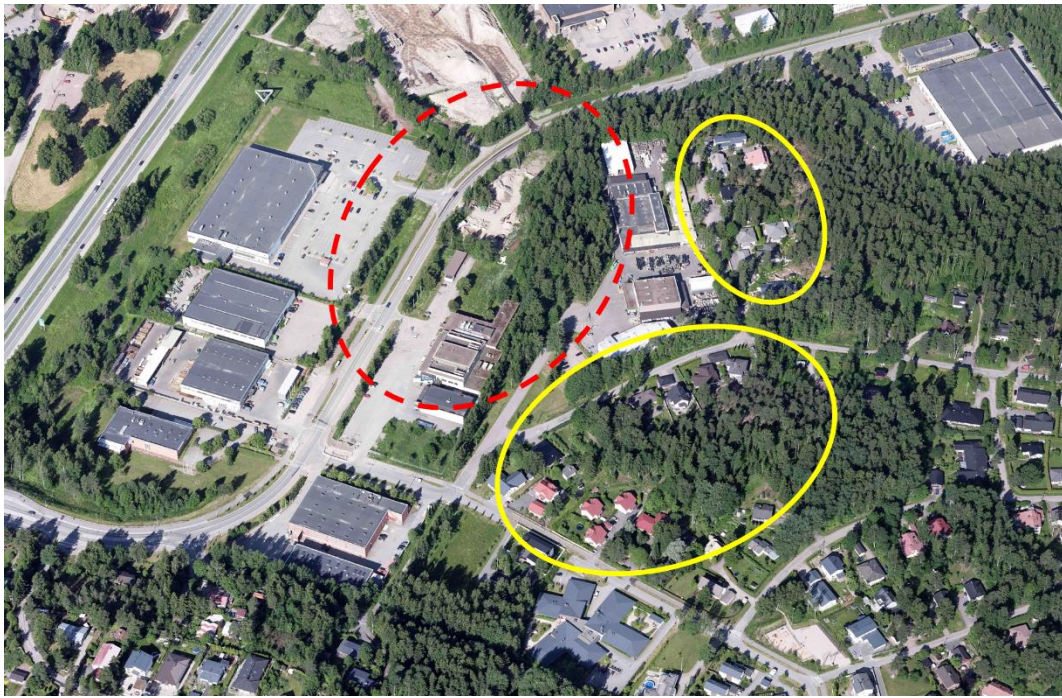
- Kohdealueen perustuulisuus jää Konsultin aikaisemmin tutkimaan Kivenlahden metrokeskusta [1] hieman lievemmäksi, johtuen n. 0,8 km levyisestä rakennetusta alueesta merenlahden suunnalla
- pohjoisen ja idän välillä kohde on suojattu metsäalueilla. Muista suunnista kohteen vieressä on uudelleen kehitettäviä alueita. Tuulisuuden suhteen huonoin tilanne esiintyy, jos näillä olevia rakennuksia on purettu ja uusien rakentaminen viivästyy. Kun nämä alueet on rakennettu, kohteen tuulisuus lievenee. Tässä raportissa esitetyt tuulisuuden numeroarvot koskevat alueen nykytilaa kohde rakennettuna
- tuulelle avoimeksi jää pääosin ainoastaan sektori 247,5° (kuva 16) Tästä ja kohteen rakennusten massoittelusta johtuen tuulisimmat kohdat sijoittuvat 15-kerroksisen rakennuksen viereen (tarkastelupiste 1)



Kuva 16: Tuulisuuden suhteen avoin tuulensuunnan sektori 247,5°. Kuva muokattu Espoon kaupungin aineistoon.

- kohteen rakennusten massoittelu on omiaan vähentämään tuulisuusvaikutuksia kohteen vierustan pientalotonteilla. Kohteen 15-kerroksisten rakennusten korkean rakentamisen tuulisuutta lisäävä vaikutus voi teoreettisesti ulottua n. 100 m etäisyydelle. Tuulisuudelle herkäät alueet jäävät tämän ulkopuolelle (kuva 17)
- kohteen vaikutukset ympäristön tuulisuuteen ovat vähäisiä. Tuulisuusvaikutusten kannalta kohteen omien piha-alueiden tuulisuus Ruukintien puolella on oleellisempi kysymys. Vaikka ympäristön tulevat rakennukset toimitusvälineinä toimisivatkin tuulensuojana, koskee tuulensuojavaikutus pääasiassa ainoastaan tuulen keskinopeuksia (vrt. liite 2). Puuskatuulien vaikutusta voidaan yleisesti lieventää piha- ja katualueiden puilla, pensaila ja rakenteilla. Kohteen suunnitelmat (kuva 3) sisältävät näitä, ja ne ovat eduksi parantamaan viihtyisyyttä tuulisuuden suhteen

- Lawson -kriteerien GEM määrittely painottaa tuulen puuskanopeuksia Konsultin kriteereitä lievemmin, ja se vastaa n. 30 % turbulenssin intensiteettiä. Konsultin puuskanopeuksien kriteerit tarkoittavat käytännössä, että tuulennopeuden 3 s. tilastollinen huippuavo voi esiintyä ainakin kerran 1 h jaksolla tuulen keskinopeuden määrittäysaikaa vastaten. Lawson -kriteerien GEM määrittely voidaan tulkita niin, että huippuarvo ei välttämättä osu samalle hetkelle, kun jalankulkija (tai pyöräilijä) on tarkastelupisteessä



Kuva 17: Kohteen vierustan pientalot (yhtenäinen viiva) nykytilassa ja kohteen korkean rakentamisen mahdollisesti aiheuttaman tuulisuudslisän likimääräinen vaikutus-alue (katkoviiva).

- tuulisuuden numeroarvot vastaavat tavanomaisia Espoon rantakaupunginosien tuloksia:
 - o vaarallisen kovia puuskatuulia (23 m/s) esiintyy selvästi harvemmin, kuin kerran vuodessa. Kaavakäsittelyä varten ei ole tarve esittää tarkempia selvityksiä
 - o kävelyä vaikeaksi tekeviä puuskatulia (16 m/s) saattaa esiintyä 15-kerroksisen rakennuksen juuressa (tarkastelupiste 1) talvikauden myrskyissä riippuen ympäristön rakennusmassojen toteutumisesta. Näitä esiintyy harvemmin kuin Kivenlahden rantaviivalla
 - o piha-alueiden viihtyisyys kesäkaudella on tyypillinen; A-kriteeri ei täyty kaikkialla, mutta B voi täytyä pihasuunnitelman vihersuunnittelusta riippuen. Tarkastelupisteen 5 pihan oleskelupiste on kauttaaltaan rakennusten suojaama, ja vähätuulinen. Samoin päiväkodin piha (tarkastelupiste 8) on vähätuulinen
 - o tuulisuus on voimakkaampaa siellä, missä tuulen puolella on aukeaa tilaa. Vastaavasti metsän ja puuston suojassa voi olla lähes tuulettomia kohtia

-
- tulosten perusteella kohteeseen liittyvät tuulisuusvaikutukset ovat vähäisiä, ja rakennuslupakäsittelyä varten ei ole tarvetta esittää lisäselvitysten laatimista.

4 Tuulennopeuden ääriarvot

Konsultti on analysoinut sääasemien mittaustuloksiin perustuvia tuulennopeuden ääriarvoja pääkaupunkiseudun korkean rakentamisen ja sillansuunnittelun kohteissa suunnitteluohjeita tarkemmin, mm. Kalasataman keskuksen ja Kruunuvuorensillan rakenneteknisten tuulitiunnelikokeiden yhteydessä. Konsultin suosittelema arvo avomerellä Helsingin ja Espoon edustalla vaikuttavaksi tuuleksi on ollut:

- $v_m = 31$ m/s keskituuli, 10 min, 10 m korkeus, meri-maastoluokka, $z_0 = 0,003$ m, 50 v toistumisväli
- $v_m = 23$ m/s keskituuli, 10 min, 10 m korkeus, meri-maastoluokka, $z_0 = 0,003$ m, 1 v toistumisväli, eli vuotuinen maksimituuli (korkeiden rakennusten huojuntatarkastelut).

Tässä vuotuinen maksimituuli on laskettu tilastollisella kertoimella 50 v toistumisvälin tuulesta kertoi-men arvon ollessa 0,75. Menettelyllä varmistetaan riittävä varmuustaso suunnitteluohjeiden tarkoitta-man tuulennopeuden suhteen. Tämän hetkisten tilastojen mukainen vuotuinen tuulennopeuden mak-simi on hieman pienempi, n. 21 m/s.

Arvoissa on mukana:

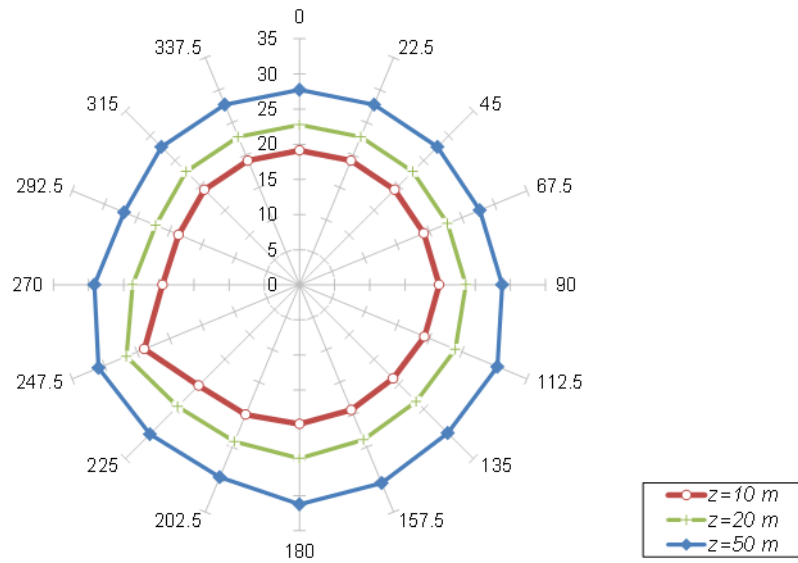
- 90 % luotettavuusvälitarkastelu tilastointiajan rajallisuuden suhteen
- 5 % lisä tuulilastojen systemaattisten virheiden (huurteen kertyminen mekaanisten mittareiden propelleihin ja ei-jatkuva rekisteröinti) suhteen
- 5 % lisä ilmaston muuttumisesta aiheutuvien ääri-ilmiöiden kasvun huomioon ottamiseksi.

Tulos on lähellä Eurokoodin kansallisen liitteen [5] arvoja, ja se kumpaa käytetään, ei vaikuta oleelli-sesti tuloksiin.

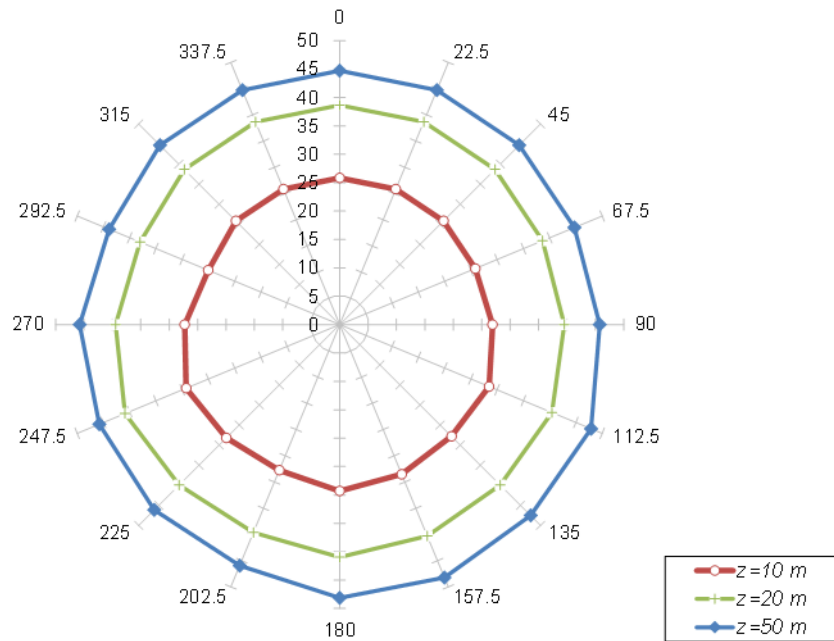
Kohteen paikalliset tuulennopeudet on laskettu maaston rosoisuuden muutosanalyysin avulla tuulen suunnittain (liite 4). Analyysissä tarvittava meren rosoisuusmitta (z_0) vaihtelee tarkkaan ottaen aallo- kon korkeuden ja jäätilanteen mukaan. Tältä osin analyysin otaksumat ($z_0 = 0,003$ m, avoin meri 50 v. myrskyssä) ovat hieman konservatiivisemmat, kuin Konsultin tuulisuusselvityksissä käyttämät ($z_0 = 0,001$ m, avomeri vuotuisessa myrskyssä).

Tuulennopeuden ääriarvot on esitetty kuvassa 18. Vastaavat tuulen puuskanopeuspaineet on esitetty kuvassa 19. Muiden kuin 50 v. toistumisvälin tuulien kuormat voidaan tarvittaessa laskea taulukon 2 kertoimilla.

Tuulen 10 min keskinopeudet kohdealueella: 50 v. toistumisväli

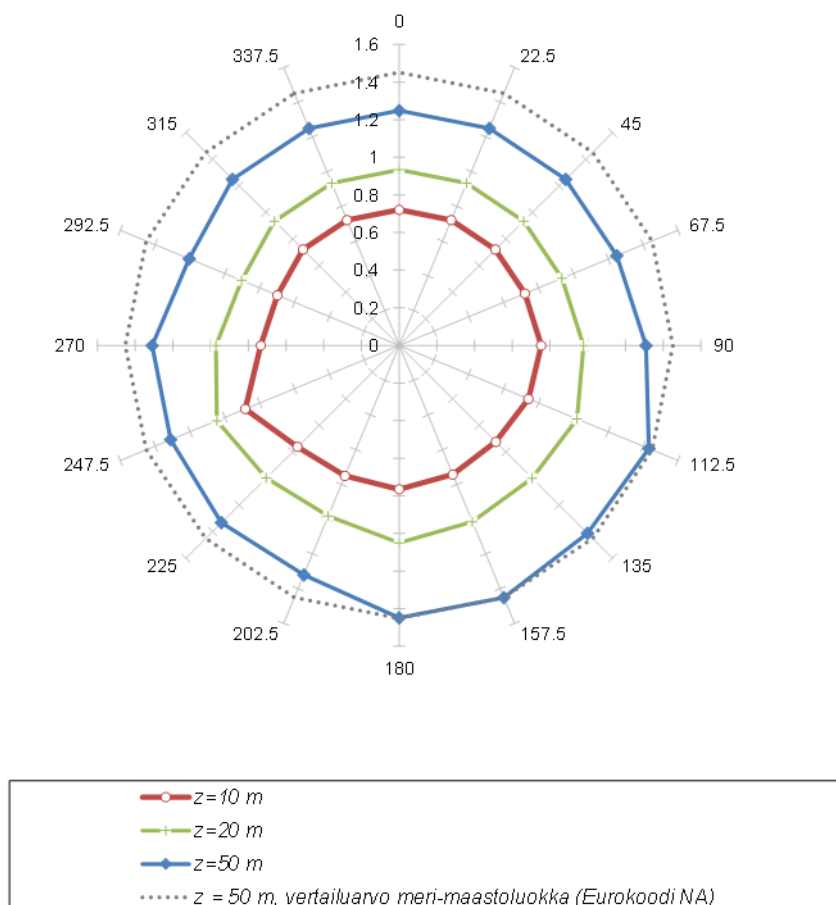


Tuulen 1 s puuskanopeudet kohdealueella: 50 v. toistumisväli



Kuva 18: Tuulennopeuden ääriarvot kohdealueella (ilman rakennusten paikallisia vaikutuksia): 50 vuoden toistumisvälin tuuli.

Tuulen puuskanopeuspaineet kohdealueella: vuotuinen maksimi, ilman tiheys 1,25 kg/m³



Kuva 19: Tuulen 1 s. puuskanopeuspaineet kohdealueella (ilman rakennusten paikallisia vaikutuksia): 50 vuoden toistumisvälin tuuli.

Taulukko 2: Tuulen puuskanopeuspaineen kerroin (k_p) eri toistumisvälin (T) tuulille

T [v]	k_p	Huom.
1	0,56	Vuotuinen maksimituuli (BS-6399-2:1997)
5	0,73	
10	0,81	
15	0,86	
20	0,90	
25	0,92	Eurokoodin tavanomainen arvo (tuulikuorman ominaisarvo)
30	0,94	
50	1,00	
100	1,08	
120	1,10	
200	1,16	

Lähdeluettelo

1. Espoon korkean rakentamisen periaatteet. Espoon kaupunkisuunnittelukeskuksen julkaisuja 10/2012.99 s. + liitteet.
2. Sito Oy: Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto: Jätkäsaaren kaavoitus, tuulisuuden sekä pakkasen ja tuulen yhteisvaikutuksen kartoitus, tutkimusraportti versio C, WSP Finland Oy, 2007, s. 79.
3. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto: Jätkäsaaren ja Hernesaaren asemakaavoitus, Tuulisuuden laskenta- ja luokitusohje. WSP Finland Oy, 18.10.2013, 78 s.
4. Lawson, T., 2001. Building aerodynamics, Imperial College Press. s. 304.
5. SFS-EN 1991-1-4:2005 Eurocode1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: tuulikuormat. 255 s. & Kansallinen liite NA SFS-EN1991-1-4.

Liite 1: Tuulisuuden määrittämisen yleisperiaate

Tuulisuus voidaan määrittää objektiivisesti laskemalla tietyn tuulennopeuden raja-arvon ylittävien katutasen 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.

Katutasen 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 katutasen 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 katutasen keskinopeuteen nähden. Tällöin 5 m/s katutasen 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 = katutasen keskituuli; k_g = katutasen 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 $k_m = 0,1 \dots 1,2$ ja $k_g = 0,2 \dots 2,5$. Suurimpia kertoimia mitataan yleisesti ympäristöään selvästi korkeampien rakennusten juuressa, katotpihoilla, kansilla ja silloilla. Erityisesti k_g voi tietyillä tuulensuunnilla olla suuri, tarkoittaen että katutasossa voi esiintyä tuulisella säällä kovia puuskatuulia. Katutasen 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 tietyistä 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 tuuliruuus (kuva L1.1), joka esittää säähavaintoaseman mittauspisteen eri keskituulien esiintymisen prosentteina ajasta.

Tuuliruuus 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-todennäköisyystiheysjakamaa

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

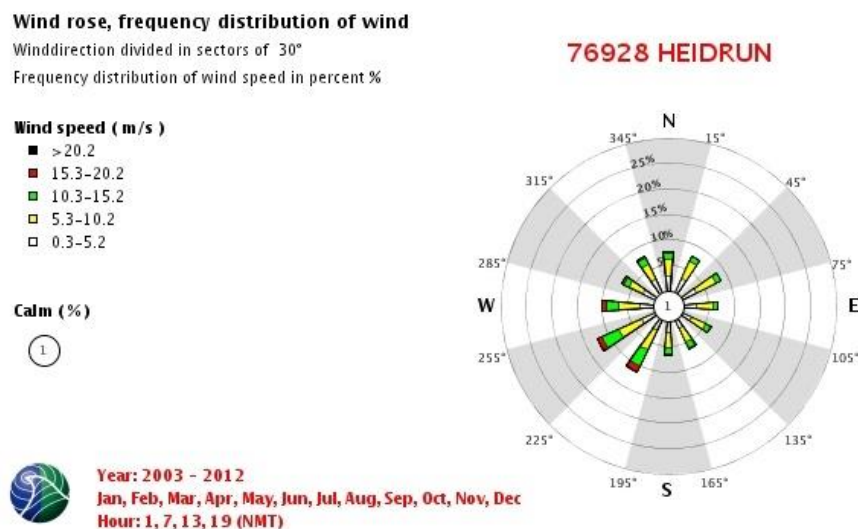
missä k = muotoparametri ja λ = skaalausparametri. Kumulatiivinen jakauma ($v \leq v_m$) on tällöin

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

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 tuuliriuusun arvoihin tai tuulitietoja toimittava organisaatio voi niitä määrittää valmiiksi. Käyränsovituksesta aiheutuva virhe on käytännössä pieni tavanomaisella tuulen nopeusalueella, 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. ääriarvoja-kaumien 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 tuuliriuususta (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. Alueen nykytilan tuulisuutta voidaan selvittää myös paikan päällä katselmuksilla ja niiden yhteydessä tehtävillä katutasen tuulennopeuden mittauksilla.

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

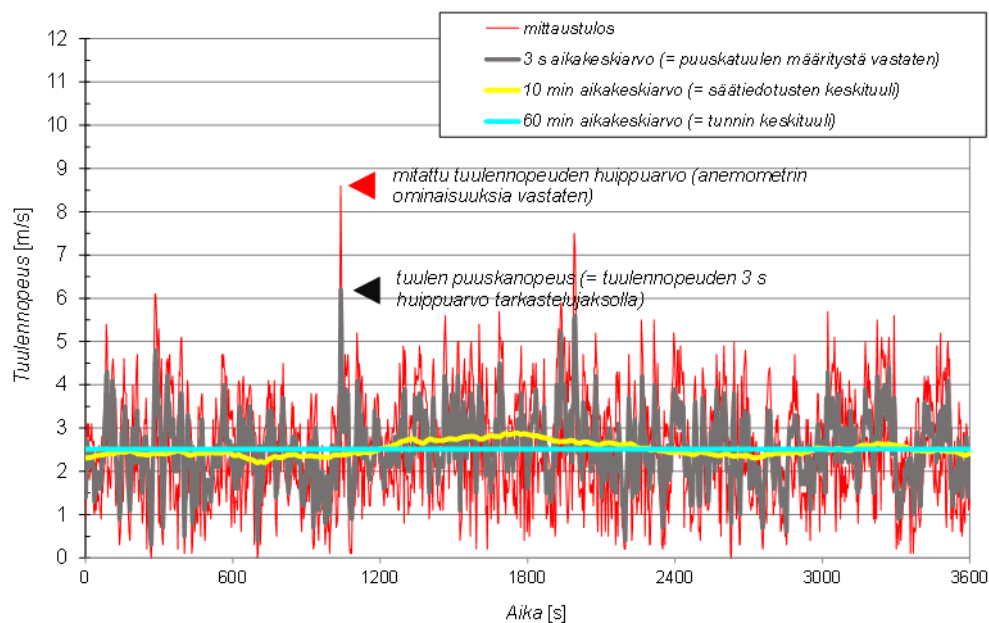
Kaupungeissa, joissa tuulisuudella on erityistä merkitystä, kriteerejä voidaan esittää kaupunginosa- ja aluekohtaisesti. Esimerkkinä tästä on tuuliseksi tunnettu Wellingtonin kaupunki Uudessa-Seelannissa, jossa kaupunki on määritellyt keskustan julkisille alueille standardin, kuinka paljon uusi rakennus 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 kestoista 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 haastatteleamalla 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 turbulентista, ja hetkellinen tuulennopeus heilahtelee voimakkaasti keskiarvon (tuulen keskinopeuden) molemmiin 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 mittauksien 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 puhtaus) ja siihen liittyvä kasvojen paleltumisriski on oma kysymyksensä. Viileässä säässä tuulisuus myös huomataan helpommin mm. kasvojen viilennysvaikutuksen johdosta.

Rakentamisen tuulisuusvaikutuksia ja tuulisuuden numeroarvoja voidaan verrata kaupungin tai kaupunginosan nykytilaan, edellyttäen että nykytilan arvot on määritetty tai tuulisuusvaikutuksia on tiedossa kokemukseräisesti. 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 hyväksymisloukkia 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

$$P = 0,025 \% (= 2,2 \text{ tuntia vuodessa}).$$

Tuulisuuskriteerit ovat:

- A: $v_g > 10 \text{ m/s}$; $P_A \geq 0,05 \%$ * (epäviihtyisä)
- B: $v_g > 13 \text{ m/s}$; $P_B \geq 0,05 \%$ * (epäviihtyisä)
- C: $v_g > 16 \text{ m/s}$; $P_C \geq 0,025 \%$ (epäviihtyisä)
- D: $v_g > 23 \text{ m/s}$; $P_D \geq 0,025 \%$ (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 esimerkiksi 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 $v_g > 20 \text{ m/s}$ (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 (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: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_M \leq 0,1 \%$ (hyväksyttävä)
- B: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_M \leq 6 \%$ (hyväksyttävä)
- C: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_M \leq 23 \%$ (hyväksyttävä)

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

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

Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta

Katutasen 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 esimerkkeinä 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.

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 katusotasosta täydessä mittakaavassa, eli 2...5 mm tavanomaisessa pienoismallissa). Mittaukseen käytetään joko kuimalanka-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 määrittäysaika. Huippuarvokerroin on lisäksi tilastollinen suure, eli huippuarvo voi vaihdella tarkastelujaksosta toiseen liittyen ilmiön luonnolliseen satunnaisuuteen. Luonnon tuulella 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

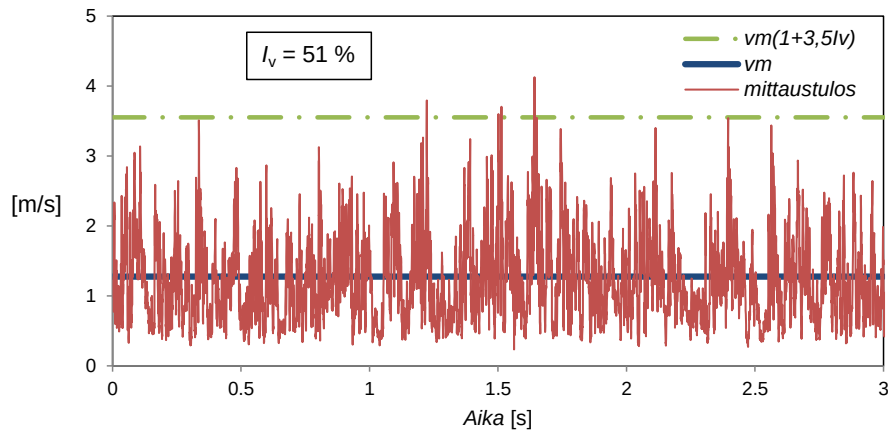
$$v_g = v_m(1 + gI_v)$$

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.

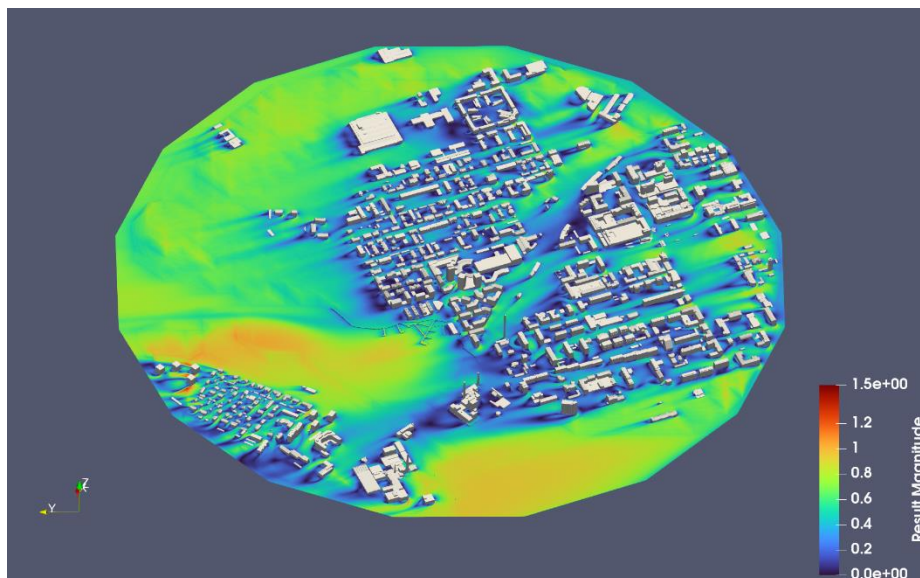
Tuulisuuskartoituksiin soveltuva numeerinen virtauslaskenta voidaan tehdä useammalla analyysimenetelmällä, joista ajasta rippumaton RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) ja suurten pyörteiden simulointi (LES, *Large Eddy Simulation*) ovat käytetyimpiä. Jälkimmäinen on laskenta-ajaltaan huomattavasti 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 rutiininomaisesti usean kymmenen miljoonan laskentakopin verkotuksia käyttäen. Tietokoneklustereita hyödyntämällä voidaan simulointeja tehdä huomattavasti suuremmillekin malleille (kuva L2.3), jolloin myös laskenta-aika lähenee pienemmillä malleilla tehtyjä LES-simulointeja.

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 simuloida tarkasti, kun tavoitteena on erityisesti katutaso tuulien selvitys. Supertietokonelaskenta, avoi-

mien virtauslaskentaohjelmien kehittyminen (jolloin jokaisesta laskentaytimeistä 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: Esimerkki kaupunkirakenteen tuulisuusselvityksen virtauslaskentamallista ja tuloksesta yksittäiselle tuulensuunnalle (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 esitettyinä

$$k = \frac{1}{2} (\langle v_x'^2 \rangle + \langle v_y'^2 \rangle + \langle v_z'^2 \rangle) \equiv \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)$$

missä v_x' , v_y' ja v_z' ovat heilahtelunopeuden komponentteja ja symboleilla $\langle \rangle$ 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

$$U = (v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2)^{1/2}$$

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 kokeellisissa 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. Laatikkomaisissa rakennuksissa virtauksen irtoaminen tapahtuu säännöllisesti rakennuksen tuulenpuoleisista kulmista. Nämä voivat lieventää edellä mainittuja RANS-laskenen teoreettisten rajoitteiden vaikutusta siten, että sillä saadaan vertailukelpoisia 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

$$U_{eff} = \langle (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \rangle$$

joka RANS laskennassa saadaan yhteydestä

$$U_{eff} = \langle [(v_{x0}^2 + 2v_{x0}v_x' + v_x'^2) + (v_{y0}^2 + 2v_{y0}v_y' + v_y'^2) + (v_{z0}^2 + 2v_{z0}v_z' + v_z'^2)]^{1/2} \rangle = (U^2 + 2k)^{1/2}$$

Turbulenssimalleja $k-\epsilon$ ja $k-\omega$ soveltavan RANS-laskennan mukaiset tulokset suhteellisille tuulennopeuksille ovat

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

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

missä on merkitty

$$l_{ref} = [(2/3)k]^{1/2} / v_{ref}$$

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. Vir-

tausnopeuden mittausten lisäksi tuulisuuden tarkasteluja on tehty tuulitunneleissa myös hiekka-eroosiokokeilla, jossa pienoismallin ripotellut hiekanjyvät 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 kohdalle, 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 virtauslaskentatulokset 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 $10^\circ \dots 30^\circ$ välein.

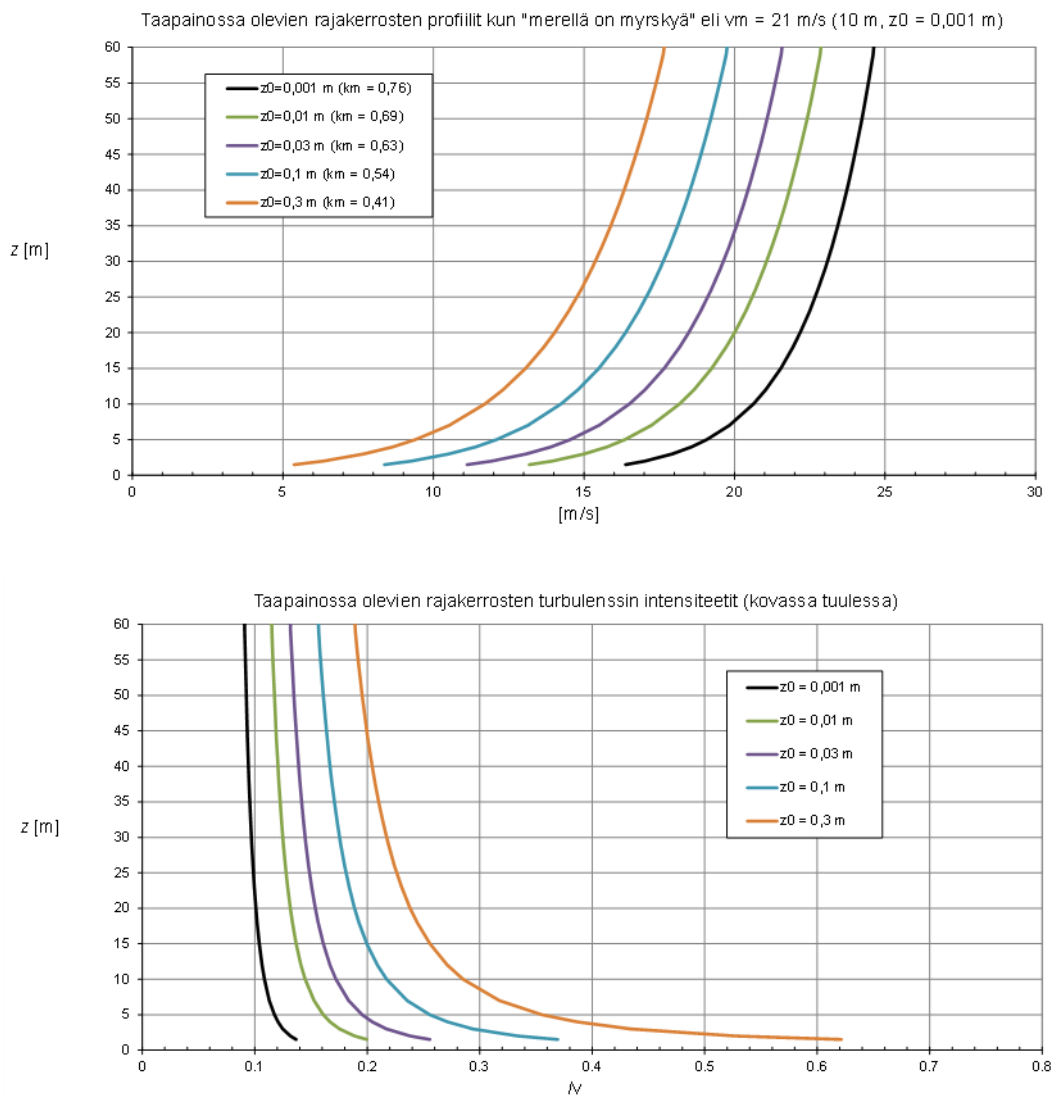
Tuulitunnelikokeet ja CFD-analyysit käyttävät samaa metodiikkaa tulovirtauksen turbulenssiparametrien määrittämisessä, jossa kaukana tarkastelualueesta tuulen keskinopeuden korkeusprofiili ja intensiteetti otaksutaan ”vakioimaastoluokkiin” maaston rosoisuuden analyysin perusteella. Näitä on havainnollistettu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

Tuulitunnelikokeisiin nähden virtauslaskennassa joudutaan yleisesti tekemään useita teoreettisia analyysiotaksumia ja valintoja, joiden vaikutus jalankulkijan tason tuulennopeuksiin on merkittävä, ja joiden kalibroinnista todellisen kaupunkiympäristön tuulisuusselvitysten tarpeisiin on vain vähän tai ei ollenkaan julkaistua tutkimustietoa. Näitä otaksumia on viime vuosina pyritty yhtenäistämään ja ohjeistamaan kaupunkiympäristön tuulisuusselvitysten tarpeisiin, esimerkkinä Japanin arkkitehtiiliiton suositus [L2.1].

Osaan analyysiotaksumista liittyy luonnollista hajontaa. Esimerkiksi luonnon tuulen turbulenssin intensiteetti (I_v , kuva L2.4) voi vaihdella merkittävästi erityisesti pienemmillä tuulennopeuksilla. Suomen oloissa esimerkiksi lumipeite ja meren jäätyminen vaikuttaa merkittävästi vastaavien pintojen ja ilmavirran väliseen kitkaan. Tämän mahdollinen vaikutus jalankulkijan tason tuuliin voidaan olettaa vähäiseksi, jos tarkastelupiste on rakennusten keskellä, ja vastaavasti merkittäväksi, kun tarkastelupiste on avoimilla alueella tai sen reunalla.

Lähteessä [L2.2] on verrattu RANS ja LES laskentojen tuloksia kahdella eri tuulitunnelikotekniikalla mitattuihin, sekä todellisen rakennuksen vierestä (8 pisteestä) mitattuihin tuloksiin. Käytetyt virtauslaskenta- ja tuulitunnelimallit ovat periaatteeltaan konsulttikäyttöön soveltuvia. Suhteelliset tuulen puuskanopeudet on RANS-laskennassa tulkittu edellä esitettyä vastaavasti, eli turbulenssin kineettisen energian k avulla. Tulosten mukaan pisteissä, jossa tuulen keskinopeus on ollut suuri (ja jotka ovat erityisen kiinnostuksen kohteena tuulisuusselvityksissä) vastaavuus kaikkien tarkasteltujen menetelmien välillä on ollut hyvä. Muissa pisteissä tulosten suuruusluokka vaikuttaa samalta, mutta tuulennopeuksien maksimit eivät kuitenkaan tyypillisesti osu samoihin kohtiin. Tällöin vertailussa todellisen rakennuksen vierestä pistemäisesti mitattuihin syntyy jopa 30...80 % eroja. Tämä vastaa myös Konsultin tuloksia RANS laskennan ja tuulitunnelikokeiden tulosten vertailussa.



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

Liitteen lähteet:

- L2.1 Yoshihide Tominaga & Akashi Mochida & Ryuichiro Yoshie & Hiroto Kataoka & Tsuyoshi Nozu & Masaru Yoshikawa: AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 1749–1761.
- L2.2 Vita, G, Shu, Z, Jesson, M, Quinn, A, Hemida, H, Sterling, M & Baker, C 2020, 'On the assessment of pedestrian distress in urban winds'. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 203 104200.

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 ilmapirtauksen 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

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

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 ilmapirtauksen 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, jäänyt 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	pienien 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 ($\Psi = 0$) [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

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

missä $v_{10} = 10$ m korkeudessa mitattu tuulen keskinopeus ja $z_{10} = 10$ m. Kitkanopeus on vakio likimain korkeusalueella $z = 10 \dots 30$ m, joten sen määrittämisessä voidaan käyttää 10 m sijaan muutakin mittauskorkeutta. Tutkimuskäytössä voidaan tuloksista erotella ne mittaustulokset, jossa ilman tasapainotilan voidaan olettaa neutraali ($\Psi = 0$), 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]

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

missä C = vakio ja Coriolisparametri f on

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

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 myrskyissä 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. geostrofien 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 maapintaa, voidaan dimensionaalilyyissä 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 tällaisille 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]

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

missä

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

ja

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

missä A ja B ovat kokeellisia vakioita; 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 vakioita 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 geostrofisen tuuli voidaan määrittää esimerkiksi säähavaintopallojen tai ilmanpaineen tasa-arvokäyrien avulla.

Kun kitkanopeus maastotyyppissä z_{01} tunnettaaan, voidaan kitkanopeus toisessa maastotyyppissä 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]

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

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 esikau-punkialueen ($z_0 = 0,3$ 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 ($\Psi = 0$, $v_{10} \geq 10$ m/s) on Deaves-Harris mallin mukainen

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

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]. Geostrofisen tuulennopeus saadaan tässä mallissa asettamalla $z = z_G$, jolloin tulos on

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

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

Tasapainossa olevien rajakerrosten välimaastossa on tuuli- ja turbulenssiparametrit arvioitava ko-keellista 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 avomerisääsämien tuulimittaustietoja, jossa myös tuulennopeudet ovat tyypillisesti suurimpia.

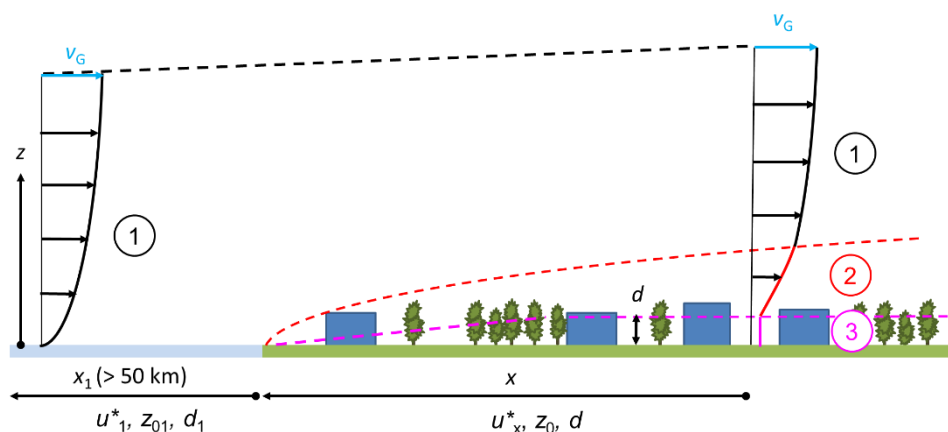
Jos maastotyyppi ei sovi sellaisenaan mihinkään tavanmaiseen maastoluokkaan, eli sille ei voida luottavasti otaksua tiettyä rosoisuusparametria. Suomessa näin on esimerkiksi meren ja järvien saariston osalta, koska yksittäisen esteen, kuten saaren, virtaukseen aiheuttama kitka on suurempi, kuin tasaisesti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

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

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

Tuulisuustarkastelut

Rosoisuuden muutos 1

		Tuulen suunta-alue																Kohde-alue	Viite
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		
V_{ref}	m/s	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{0i})	Tuulilähtö
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	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	1 v toistumisvälin tuuli	
U_{fr}	m/s	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{0i}	
z_{0i}	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	rosaisuusmitta (roughness length) keskituulen perusarvoon liittyen	
z_{0i}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.003	0.003	0.001	0.001	0.300	0.200	0.200	0.300	0.300	0.300	0.300	kohdealueen ympäristössä	
$lv(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.14	0.14	0.12	0.12	0.28	0.25	0.25	0.28	0.28	0.28	0.28	turbulenssin intensiteetti	
$lv(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.13	0.13	0.12	0.12	0.26	0.24	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26		
$lv(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.13	0.13	0.11	0.11	0.25	0.23	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.17	0.10	0.10	0.09	0.09	0.21	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	15	20	20	21	21	12	13	13	12	12	12	12	10 min keskituuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	16	21	21	22	22	14	15	15	14	14	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	17	22	22	23	23	15	16	16	15	15	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	20	24	24	25	25	18	19	19	18	18	18	18		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	14	19	19	20	20	11	12	12	11	11	11	11	tunnin keskituuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	15	20	20	21	21	13	13	13	13	13	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	16	21	21	22	22	14	14	14	14	14	14	14		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	19	23	23	24	24	17	18	18	17	17	17	17		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	24	28	28	29	29	22	23	23	22	22	22	22	puuskatuuli $g=3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	26	29	29	30	30	24	25	25	24	24	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	27	30	30	31	31	25	26	26	25	25	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	30	32	32	32	32	29	30	30	29	29	29	29		
z_{0i}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.100	0.100	0.100	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	kohdealueen mukaan	
x		100000	100000	100000	100000	7000	5000	5000	3000	7000	800	800	2500	600	12000	100000	100000	etäisyys muutostyöhön	
$lv(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.22	0.22	0.22	0.12	0.12	0.12	0.15	0.12	0.20	0.28	turbulenssin intensiteetti	
$lv(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.21	0.21	0.21	0.12	0.12	0.12	0.15	0.12	0.19	0.26		
$lv(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.11	0.11	0.11	0.14	0.11	0.18	0.25		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.17	0.17	0.17	0.17	0.09	0.09	0.09	0.12	0.09	0.15	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	12	15	15	15	15	21	21	18	21	16	12	12	10 min keskituuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	16	16	16	16	22	22	20	22	17	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	15	17	17	17	17	23	23	20	23	18	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	18	20	20	20	20	25	25	23	25	21	18	18		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	11	14	14	14	14	20	20	17	20	15	11	11	tunnin keskituuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	13	15	15	15	15	21	21	19	21	16	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	16	16	16	16	22	22	19	22	17	14	14		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	17	19	19	19	19	24	24	22	24	20	17	17		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	22	24	24	24	24	29	29	27	29	25	22	22	puuskatuuli $g=3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	24	26	26	26	26	30	30	28	30	27	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	25	27	27	27	27	31	31	29	31	28	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	29	30	30	30	30	32	32	31	32	30	29	29		
Maaston rosoisuuden muutoksen ($z_{0i} > z_{0j}$) vaikutus ESDU85020 mukaisesti																			Kohteessa
$lv(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.20	0.20	0.19	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.28	0.28		
$lv(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19	0.19	0.26	0.26		
$lv(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.19	0.18	0.25	0.25		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.15	0.15	0.13	0.15	0.17	0.17	0.16	0.18	0.16	0.21	0.21		
10 min keskituuli																			
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	13	16	16	17	16	16	16	16	16	16	12	12		
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	17	17	18	18	17	17	17	17	17	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	15	18	18	19	19	18	18	18	17	18	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	19	22	22	23	22	20	21	20	20	20	18	18		
Tunnin keskituuli																			
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	12	15	15	16	15	15	15	15	15	15	11	11		
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	13	16	16	17	16	16	16	16	16	16	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	17	17	18	17	17	17	17	17	17	14	14		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	17	21	21	22	21	19	19	19	19	19	17	17		
Puuskatuuli																			
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	23	25	25	26	26	25	25	25	25	25	22	22		
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	24	27	27	28	27	28	27	28	28	28	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	26	28	28	29	28	27	27	27	27	27	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	30	31	31	32	32	31	31	30	30	30	29	29		

Rosoisuuden muutos 2

		Tuulen suuntakulma																Kommentti	Viite
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		
v_{ref}	m/s	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{01})	Tuulilästöt
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 k eroin	Eurokoodi
v_{ref}	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	1 v toistumisvälin tuuli	
U_f	m/s	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{01}	
z_0	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	rosisuusmitta (roughness length) keskittuulen perusarvoon liittyen	
z_{01}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.100	0.100	0.100	0.016	0.012	0.011	0.023	0.050	0.300	0.300	kohtealueen ympäristössä	
$h(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.20	0.20	0.19	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.28	0.28	turbulenssin intensiteetti	
$h(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19	0.19	0.26	0.26		
$h(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.19	0.18	0.25	0.25		
$h(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.15	0.15	0.13	0.15	0.17	0.17	0.16	0.18	0.16	0.21	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	13	16	16	17	16	16	16	16	16	16	12	12	10 min keskittuuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	17	17	18	18	17	17	17	17	17	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	15	18	18	19	18	18	18	18	17	18	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	19	22	22	23	22	20	21	20	20	20	18	18		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	12	15	15	16	15	15	15	15	15	15	11	11	tunnin keskittuuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	13	16	16	17	16	16	16	16	16	16	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	17	17	18	17	17	17	17	17	16	17	14	14	
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	17	21	21	22	21	19	19	19	19	19	17	17		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	23	25	25	26	26	25	25	25	25	25	22	22	puuskatuuli $g=3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	24	27	27	28	27	26	27	26	26	26	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	26	28	28	29	28	27	27	27	27	27	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	30	31	31	32	32	31	31	30	30	30	29	29		
z_{02}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.700	0.700	0.700	0.700	0.300	0.300	0.030	0.300	0.300	0.300	0.300	kohtealueen mukaan	
x	m	100000	100000	100000	100000	7000	4000	7000	7000	1500	800	800	800	1500	100000	100000	100000	etäisyys muutoksohtaan	
$h(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.35	0.35	0.35	0.35	0.28	0.28	0.18	0.28	0.28	0.28	0.28	turbulenssin intensiteetti	
$h(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.32	0.32	0.32	0.32	0.26	0.26	0.17	0.26	0.26	0.26	0.26		
$h(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	0.17	0.25	0.25	0.25	0.25		
$h(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.21	0.21	0.14	0.21	0.21	0.21	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	12	10	10	10	10	12	12	17	12	12	12	12	10 min keskittuuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	12	12	12	12	14	14	18	14	14	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	15	13	13	13	13	15	15	19	15	15	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	18	16	16	16	16	18	18	22	18	18	18	18		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	11	9	9	9	9	11	11	16	11	11	11	11	tunnin keskittuuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	13	11	11	11	11	13	13	17	13	13	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	12	12	12	12	14	14	18	14	14	14	14		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	17	15	15	15	15	17	17	21	17	17	17	17		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	22	20	20	20	22	22	22	26	22	22	22	22	puuskatuuli $g=3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	24	22	22	22	22	24	24	27	24	24	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	25	24	24	24	24	25	25	28	25	25	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	29	28	28	28	28	29	29	31	29	29	29	29		
Maaston rososuuden muutoksen ($z_{01} - > z_{02}$) vaikutus ESOU85020 mukaisesti																			Kohteessa
$h(z=10\text{ m})$		0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.26	0.20	0.28	0.29	0.28	0.28		
$h(z=15\text{ m})$		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.27	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.19	0.25	0.27	0.26	0.26	
$h(z=20\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25	0.26	0.25	0.24	0.22	0.22	0.18	0.23	0.25	0.25	0.25		
$h(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20	0.19	0.19	0.18	0.16	0.20	0.22	0.21	0.21		
10 min keskittuuli																			
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	12	12	12	12	13	12	12	13	13	13	13	16	12	12	12	12		
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	17	14	13	14	14		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	17	15	14	15	15		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	19	19	19	20	20	19	19	20	19	18	18	18		
Tunnin keskittuuli																			
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	11	11	11	11	12	11	11	11	11	12	12	15	11	11	11	11		
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	13	13	12	13	13	13	14	16	13	12	13	13		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	14	14	14	14	15	14	15	16	14	13	14	14		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	17	18	18	18	19	18	18	19	18	16	17	17		
Puuskatuuli																			
$v(z=10\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	23	22	22	23	23	23	23	25	22	22	22	22	puuskatuuli (1s, $g=3,5$)	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	24	25	24	25	25	25	25	26	24	24	24	24		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	26	26	26	26	27	26	26	27	26	25	25	25		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	30	31	31	31	31	30	30	30	30	29	29	29		
Puuskatuulen nopeuspaine (1 s): ilman tiheys = 1,25 kg/m ³																			
$q(z=10\text{ m})$	kN/m ²	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.30	0.32	0.32	0.32	0.32	0.38	0.31	0.30	0.31	0.31		
$q(z=15\text{ m})$	kN/m ²	0.36	0.36	0.36	0.36	0.38	0.37	0.38	0.39	0.38	0.38	0.38	0.41	0.37	0.35	0.36	0.36		
$q(z=20\text{ m})$	kN/m ²	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.42	0.42	0.43	0.44	0.42	0.42	0.44	0.41	0.39	0.40	0.40		
$q(z=50\text{ m})$	kN/m ²	0.53	0.53	0.53	0.53	0.55	0.59	0.58	0.62	0.60	0.56	0.56	0.55	0.55	0.52	0.53	0.53		
EN 1991-1-4:2005 & NA q(maasto g)																			Vertailuarvo
$q(z=10\text{ m})$	kN/m ²	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62		
$q(z=15\text{ m})$	kN/m ²	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66		
$q(z=20\text{ m})$	kN/m ²	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70		
$q(z=50\text{ m})$	kN/m ²	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82		

Rakennetekniset tarkastelut

Rosoisuuden muutos 1

		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_{ref}	m/s	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{01})	Tuulitilat
k		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	toistumisvälin kerroin	Eurokoodi
V_{ref}	m/s	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	1 v toistumisvälin tuuli	
u_r	m/s	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{01}	
z_0	m	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	rosaisuusmitta (roughness length) keskituulen perusarvoon liittyen	
z_{01}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.003	0.003	0.003	0.003	0.300	0.200	0.200	0.300	0.300	0.300	0.300	kohdealueen ympäristössä	
$lv(z=10\text{ m})$		0.27	0.27	0.27	0.27	0.22	0.14	0.14	0.14	0.14	0.27	0.25	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27	turbulenssin intensiteetti	
$lv(z=15\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.21	0.13	0.13	0.13	0.13	0.25	0.23	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25		
$lv(z=20\text{ m})$		0.24	0.24	0.24	0.24	0.20	0.13	0.13	0.13	0.13	0.24	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.17	0.11	0.11	0.11	0.11	0.21	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	23	31	31	31	31	19	21	21	19	19	19	19	10 min keskituuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	25	33	33	33	33	21	23	23	21	21	21	21		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	23	23	23	23	26	34	34	34	34	23	24	24	23	23	23	23		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	28	28	28	28	31	38	38	38	38	28	29	29	28	28	28	28		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	21	30	30	30	30	17	19	19	17	17	17	17	tunnin keskituuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	23	31	31	31	31	19	21	21	19	19	19	19		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	24	32	32	32	32	21	22	22	21	21	21	21		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	26	26	26	26	29	36	36	36	36	26	27	27	26	26	26	26		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	34	34	34	34	37	44	44	44	44	34	35	35	34	34	34	34	puuskatuuli $g = 3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	37	37	37	37	40	46	46	46	46	37	38	38	37	37	37	37		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	39	39	39	39	41	47	47	47	47	39	40	40	39	39	39	39		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	45	45	45	45	46	50	50	50	50	45	45	45	45	45	45	45		
z_{02}	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.100	0.100	0.100	0.001	0.001	0.010	0.001	0.050	0.300	0.300	kohdealueen mukaan	
x	m	100000	100000	100000	100000	7000	5000	5000	3000	7000	800	800	2500	600	12000	100000	100000	etäisyys muutostilastaan	
$lv(z=10\text{ m})$		0.27	0.27	0.27	0.27	0.22	0.14	0.14	0.14	0.14	0.27	0.25	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27	turbulenssin intensiteetti	
$lv(z=15\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.21	0.13	0.13	0.13	0.13	0.25	0.23	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25		
$lv(z=20\text{ m})$		0.24	0.24	0.24	0.24	0.20	0.13	0.13	0.13	0.13	0.24	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.17	0.11	0.11	0.11	0.11	0.21	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21		
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	23	31	31	31	31	19	21	21	19	19	19	19	10 min keskituuli	
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	25	33	33	33	33	21	23	23	21	21	21	21		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	23	23	23	23	26	34	34	34	34	23	24	24	23	23	23	23		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	28	28	28	28	31	38	38	38	38	28	29	29	28	28	28	28		
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	21	30	30	30	30	17	19	19	17	17	17	17	tunnin keskituuli	
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	23	31	31	31	31	19	21	21	19	19	19	19		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	24	32	32	32	32	21	22	22	21	21	21	21		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	26	26	26	26	29	36	36	36	36	26	27	27	26	26	26	26		
$v(z=10\text{ m})$	m/s	34	34	34	34	37	44	44	44	44	34	35	35	34	34	34	34	puuskatuuli $g = 3,5$	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	37	37	37	37	40	46	46	46	46	37	38	38	37	37	37	37		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	39	39	39	39	41	47	47	47	47	39	40	40	39	39	39	39		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	45	45	45	45	46	50	50	50	50	45	45	45	45	45	45	45		
Maaston rosoisuuden muutoksen ($z_{01} - > z_{02}$) vaikutus ESOU85020 mukaisesti																			
$lv(z=10\text{ m})$		0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.27	0.27	Kohteessa	
$lv(z=15\text{ m})$		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.25	0.25		
$lv(z=20\text{ m})$		0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.17	0.19	0.18	0.24	0.24		
$lv(z=50\text{ m})$		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.15	0.15	0.14	0.15	0.17	0.17	0.16	0.18	0.16	0.21	0.21		
10 min keskituuli																			
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	20	25	25	26	25	25	25	25	25	24	19	19		
$vm(z=15\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	22	28	28	28	27	26	27	26	26	26	21	21		
$vm(z=20\text{ m})$	m/s	23	23	23	23	24	29	29	30	29	27	28	28	27	27	23	23		
$vm(z=50\text{ m})$	m/s	28	28	28	28	29	34	34	35	34	31	32	31	31	31	28	28		
Tunnin keskituuli																			
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	17	17	17	17	18	24	24	24	23	23	24	23	23	22	17	17		
$vh(z=15\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	20	26	26	26	25	25	25	25	24	24	19	19		
$vh(z=20\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	22	27	27	28	27	26	26	26	25	25	21	21		
$vh(z=50\text{ m})$	m/s	26	26	26	26	27	32	32	33	32	29	30	29	29	30	26	26		
Puuskatuuli																			
$v(z=10\text{ m})$	m/s	34	34	34	34	35	40	40	40	39	38	39	38	38	38	34	34	puuskatuuli (1s, $g=3,5$)	
$v(z=15\text{ m})$	m/s	37	37	37	37	38	42	42	43	42	41	41	40	40	40	37	37		
$v(z=20\text{ m})$	m/s	39	39	39	39	40	44	44	44	44	42	42	42	42	42	39	39		
$v(z=50\text{ m})$	m/s	45	45	45	45	46	49	49	50	49	47	47	46	47	46	45	45		
Puuskatuulen nopeuspaine (1 s): ilman tiheys = 1,25 kg/m ³																			
$q(z=10\text{ m})$	kN/m ²	0.72	0.72	0.72	0.72	0.75	0.99	0.99	1.02	0.97	0.92	0.94	0.93	0.92	0.90	0.72	0.72		
$q(z=15\text{ m})$	kN/m ²	0.84	0.84	0.84	0.84	0.88	1.12	1.12	1.15	1.10	1.03	1.05	1.02	1.02	1.01	0.84	0.84		
$q(z=20\text{ m})$	kN/m ²	0.93	0.93	0.93	0.93	0.98	1.22	1.22	1.24	1.20	1.10	1.12	1.09	1.09	1.09	0.93	0.93		
$q(z=50\text{ m})$	kN/m ²	1.25	1.25	1.25	1.25	1.30	1.52	1.52	1.54	1.50	1.38	1.40	1.33	1.38	1.35	1.25	1.25		

Rosoisuuden muutos 2

		Tuulen suunta-alue																		
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 _m	m/s	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z ₀)	Tuulilähtö	
k		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	toistumisvälin kerroin	Eurokoodi	
v _{ref}	m/s	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	1 v _b toistumisvälin tuuli		
U _f	m/s	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	1.529	k _f anopeus (friction velocity) vastaten z _{0r}		
z ₀	m	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	rososiuusmitta (roughness length) keskittuulen perusarvoon liittyen		
z ₀₁	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.100	0.100	0.008	0.011	0.011	0.022	0.050	0.300	0.300	kohteeseen ympäristösä		
I _v (z = 10 m)		0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.27	0.27	turbulenssin intensiteetti		
I _v (z = 15 m)		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.25	0.25			
I _v (z = 20 m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	0.18	0.24	0.24		
I _v (z = 50 m)		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.15	0.15	0.14	0.15	0.17	0.17	0.17	0.16	0.18	0.16	0.21	0.21		
V _m (z = 10 m)	m/s	19	19	19	19	20	25	25	26	25	25	25	25	25	24	19	19	10 min keskituuli		
V _m (z = 15 m)	m/s	21	21	21	21	22	28	28	28	27	26	27	26	26	26	21	21			
V _m (z = 20 m)	m/s	23	23	23	23	24	29	29	30	29	27	28	28	27	27	23	23			
V _m (z = 50 m)	m/s	28	28	28	28	29	34	34	35	34	31	32	31	31	31	28	28			
V _h (z = 10 m)	m/s	17	17	17	17	18	24	24	24	23	23	24	23	23	22	17	17	tunnin keskituuli		
V _h (z = 15 m)	m/s	19	19	19	19	20	26	26	26	25	25	25	25	24	24	19	19			
V _h (z = 20 m)	m/s	21	21	21	21	22	27	27	28	27	26	26	26	25	25	21	21			
V _h (z = 50 m)	m/s	26	26	26	26	27	32	32	33	32	29	30	29	29	30	26	26			
V _g (z = 10 m)	m/s	34	34	34	34	35	40	40	40	39	38	39	38	38	38	34	34	puuskatuuli q = 3,5		
V _g (z = 15 m)	m/s	37	37	37	37	38	42	42	43	42	41	41	40	40	40	37	37			
V _g (z = 20 m)	m/s	39	39	39	39	40	44	44	44	44	42	42	42	42	42	39	39			
V _g (z = 50 m)	m/s	45	45	45	45	46	49	49	50	49	47	47	46	46	45	45	45			
z ₀₂	m	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.700	0.700	0.700	0.700	0.300	0.300	0.030	0.300	0.300	0.300	0.300	kohteeseen mukaan		
x	m	100000	100000	100000	100000	7000	4000	7000	7000	1500	800	800	800	1500	100000	100000	100000	etäisyys muutoksista		
I _v (z = 10 m)		0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.34	0.34	0.34	0.34	0.27	0.27	0.18	0.27	0.27	0.27	0.27	turbulenssin intensiteetti		
I _v (z = 15 m)		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31	0.31	0.31	0.31	0.25	0.25	0.17	0.25	0.25	0.25	0.25			
I _v (z = 20 m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.29	0.29	0.29	0.29	0.24	0.24	0.17	0.24	0.24	0.24	0.24			
I _v (z = 50 m)		0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.21	0.21	0.15	0.21	0.21	0.21	0.21			
V _m (z = 10 m)	m/s	19	19	19	19	19	16	16	16	16	19	19	18	19	19	19	19	10 min keskituuli		
V _m (z = 15 m)	m/s	21	21	21	21	21	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21	21			
V _m (z = 20 m)	m/s	23	23	23	23	23	20	20	20	20	23	23	23	23	23	23	23			
V _m (z = 50 m)	m/s	28	28	28	28	28	25	25	25	25	28	28	33	28	28	28	28			
V _h (z = 10 m)	m/s	17	17	17	17	17	14	14	14	14	17	17	17	17	17	17	17	tunnin keskituuli		
V _h (z = 15 m)	m/s	19	19	19	19	19	16	16	16	16	19	19	19	19	19	19	19			
V _h (z = 20 m)	m/s	21	21	21	21	21	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21	21			
V _h (z = 50 m)	m/s	26	26	26	26	26	23	23	23	23	26	26	32	26	26	26	26			
V _g (z = 10 m)	m/s	34	34	34	34	34	31	31	31	31	34	34	34	34	34	34	34	puuskatuuli g = 3,5		
V _g (z = 15 m)	m/s	37	37	37	37	37	34	34	34	34	37	37	42	37	37	37	37			
V _g (z = 20 m)	m/s	39	39	39	39	39	36	36	36	36	39	39	44	39	39	39	39			
V _g (z = 50 m)	m/s	45	45	45	45	45	43	43	43	43	45	45	48	45	45	45	45			
Maaston rososiuuden muutoksen (z ₀₁ > z ₀₂) vaikutus ESDU85020 mukaisesti																			Kohteessa	
I _v (z = 10 m)		0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.28	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25	0.20	0.26	0.28	0.27	0.27			
I _v (z = 15 m)		0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.19	0.24	0.26	0.25	0.25			
I _v (z = 20 m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22	0.18	0.23	0.25	0.24	0.24			
I _v (z = 50 m)		0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.20	0.20	0.18	0.19	0.18	0.16	0.19	0.22	0.21	0.21			
10 min keskituuli																				
V _m (z = 10 m)	m/s	19	19	19	19	20	19	19	19	20	20	20	24	19	19	19	19			
V _m (z = 15 m)	m/s	21	21	21	21	22	22	22	22	23	22	23	25	22	21	21	21			
V _m (z = 20 m)	m/s	23	23	23	23	24	24	24	24	25	24	25	27	24	22	23	23			
V _m (z = 50 m)	m/s	28	28	28	28	29	30	30	31	31	30	30	31	29	27	28	28			
Tunnin keskituuli																				
V _h (z = 10 m)	m/s	17	17	17	17	18	18	17	18	18	19	22	18	17	17	17	17			
V _h (z = 15 m)	m/s	19	19	19	19	20	20	20	20	21	21	21	24	20	19	19	19			
V _h (z = 20 m)	m/s	21	21	21	21	22	22	22	22	23	22	23	25	22	20	21	21			
V _h (z = 50 m)	m/s	26	26	26	26	27	28	28	29	29	28	28	29	27	25	26	26			
Puuskatuuli																				
V _g (z = 10 m)	m/s	34	34	34	34	35	34	34	34	35	35	35	38	34	33	34	34	puuskatuuli (1s, g=3,5)		
V _g (z = 15 m)	m/s	37	37	37	37	38	38	38	38	39	38	38	40	37	36	37	37			
V _g (z = 20 m)	m/s	39	39	39	39	40	40	40	40	41	40	40	41	39	38	39	39			
V _g (z = 50 m)	m/s	45	45	45	45	46	48	48	48	48	46	46	46	46	44	45	45			
Puuskatuulen nopeuspaine (1 s): ilman tiheys = 1,25 kg/m³																				
q _z (z = 10 m)	kN/m²	0.72	0.72	0.72	0.72	0.75	0.74	0.72	0.74	0.77	0.75	0.76	0.88	0.73	0.70	0.72	0.72			
q _z (z = 15 m)	kN/m²	0.84	0.84	0.84	0.84	0.88	0.90	0.88	0.90	0.93	0.88	0.90	0.98	0.88	0.82	0.84	0.84			
q _z (z = 20 m)	kN/m²	0.93	0.93	0.93	0.93	0.98	1.02	1.00	1.02	1.05	0.98	1.00	1.05	0.97	0.90	0.93	0.93			
q _z (z = 50 m)	kN/m²	1.25	1.25	1.25	1.25	1.31	1.43	1.41	1.45	1.45	1.32	1.33	1.31	1.31	1.21	1.25	1.25			
EN1991-1-4:2005 & NA q (maasto 0)																			Vertailuarvo	
q _z (z = 10 m)	kN/m²	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09			
q _z (z = 15 m)	kN/m²	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18			
q _z (z = 20 m)	kN/m²	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24			
q _z (z = 50 m)	kN/m²	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45			

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

