



TURUN RATAPIHA - ELÄMYSKESKUS

Tuulisuusselvitys

5.5.2020

Laadunhallinta

Versio/muutokset	Versio 1	Muutos 1	Muutos 2	Muutos 3
Huomautukset				
Päiväys	5.5.2020			
Laatija	Risto Kiviluoma			
Allekirjoitus				
Tarkastanut				
Allekirjoitus				
Hyväksynyt				
Allekirjoitus				
Raportin numero				
Tiedostotunnus				

Turun Ratapiha - Elämyskeskus

Tuulisuusselvitys

5.5.2020

Tilaaaja

Turun Ratapiha Kehitys Oy

c/o

GSP Group Oy
Kaivokatu 10 A, 8. krs
00100 HELSINKI
www.gsp.fi

Yhdyshenkilö Sami Kettunen

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	9
2.3 Tulokset	13
2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus	13
2.3.2 Tuulisuus tarkastelupisteissä	14
3 Tulosten ohjeellinen tulkinta	17
Lähdeluettelo	19
Liite 1: Tuulisuuden määrittämisen yleisperiaate	20
Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta	27
Liite 3: Maaston rosoisuuden huomioon ottaminen	31
Liite 4: Analyysissä käytetyt tuulimittaustiedot	35
Liite 5: Maaston rosoisuuden muutosten analyysi	38

1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään tuulisuusselvitys Turun ratapihalla suunniteltavan elämyskeskuksen asemakaavaehdotukseen liittyen (kuva 1). Kohde rakentuu areenarakennuksen ympärille, joka areenatoimintojen lisäksi sisältää kattopuutarhan ja hotellin. Areenan lounaispuolelle sijoittuu korkeaa asuinrakentamista korkeimman rakennuksen kerrosluvun ollessa 26.

Tuulisuusvaikutusten kannalta kohde sisältää ympäristöään korkeampaa rakentamista ja n. 30 m korkeudessa sijaitsevan julkisen alueen; kattopuutarhan. Tuulisuudella voi myös olla erityistä merkitystä viihtyvyyden kannalta mm. kohteen keskeisen sijainnin ja käyttötarkoituksen johdosta.

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

Kohdealue sijaitsee saaristomeren saarien suojassa. Maasto on vaihtelevaa ja kukkulaista, jolloin tuulitilastojen tulkinta sekä rosoisuuden muutosten määrittäminen tuulen suunnittain on oleellinen osa tuulisuuden numeroarvojen luotettavaa määrittämistä. Rosoisuuden muutosten analyysin periaatteet on kuvattu tarkemmin liitteessä 3.

Tämä tuulisuusselvitys on tehty menetelmällä, joka yhdistää Konsultin tekemien saman tyyppisten kohteiden tuulitunnelikokeiden tuloksia paikallisten tuulitilastojen perustella analysoituihin kohdealueen tuuliin. Konsultti on kehittänyt menetelmän alun perin Helsingin Jätkäsaaren kaavoituksen suunnitelmamuutosten analyysiin [1]. Sitä on käytetty noin 30 kohteessa Suomessa, mikä antaa vertailuaineistoa tuulisuuden numeroarvojen tulkintaan. Vastaavista menetelmistä käytetään kansainvälisesti nimitystä työpöytä tutkimus (*Desk Study*), ja sillä saadaan selville erityisesti tuulisuuden numeroarvojen suuruusluokkakäsitelmät (ja mahdollisten kohdekohtaisten tuulitunnelikokeiden tai tietokonesimulaatioiden tarve).



Kuva 1: Tuulisuusselvityksen kohde Turun Ratapiha - Elämyskeskus. Havainnekuva, PES-Arkkitehdit Oy.

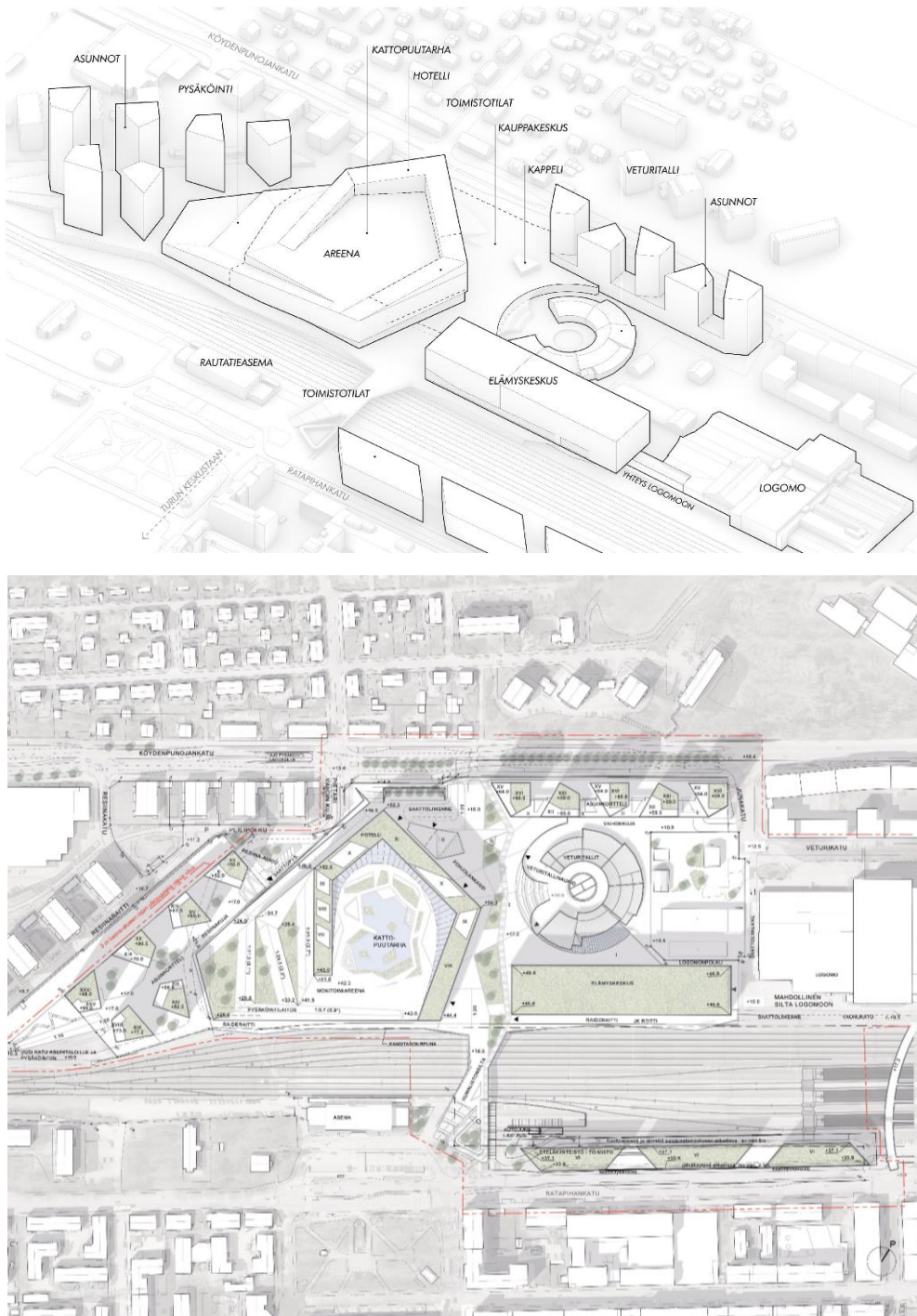
Tarkempia tutkimuksia voidaan joissain tapauksissa suositella erityisesti korkean rakentamisen, korkealla sijaitsevien pihakansien ja suurten siltojen suunnittelun yhteydessä. Suosituksia kaavamääräyksille Konsultti on esittänyt ainoastaan kolmessa korkean rakentamisen kohteessa Suomessa, joissa vaarallisen kovia puuskatuulia 23 m/s on arvioitu esiintyvän jalankulkijan korkeudella useammin kuin vuodessa. Turvallisuuskysymyksen kannalta Suomen tuulia voidaan kuitenkin luonnehtia lieviksi verrattuna moneen muuhun maahan.

Nykyisillä laskentakapasiteeteilla tuulitunnelikokeen ja numeerisen simuloinnin (numeerisen virtauslaskennan CFD) tärkein ero on siinä, että tuulitunnelikokeella saadaan selvitettyä hetkelliset tuulennopeuden ääriarvot, tuulen puuskanopeudet, joka ovat mm. turvallisuuskysymysten kannalta oleellisia. Liitteen 1 mukaisesti tuulisuus kiteereitä voidaan esittää sekä tuulen keskinopeudelle että puuskanopeudelle, Konsultin menetelmän soveltaessa molempia.

2 Tuulisuusselvitys

2.1 Tarkasteltava suunnitelma

Tuulisuusselvityksessä tarkasteleva suunnitelma on kuvien 2...4 mukainen.

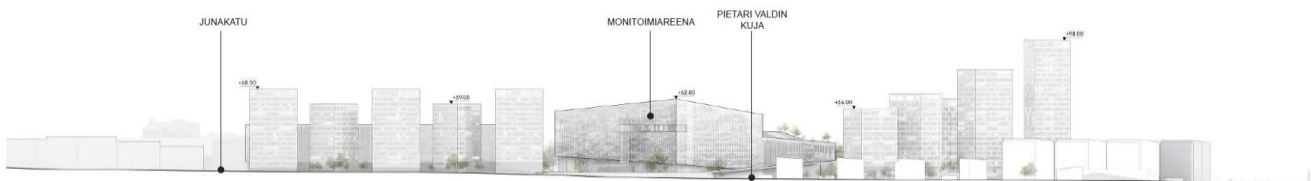


Kuva 2: Kohteen suunnitelma. Kuvat on muokattu PES-Arkkitehdit Oy aineistosta.



Kuva 3: Havainnekuvia ulkoalueista. Kuvat on muokattu PES-Arkkitehdit Oy aineistosta

a)



b)



Kuva 4: Aluejulkisivut a) Köydenpunojankadulle ja b) Ratapihankadulle. Kuvat on muokattu PES-Arkkitehdit Oy aineistosta.

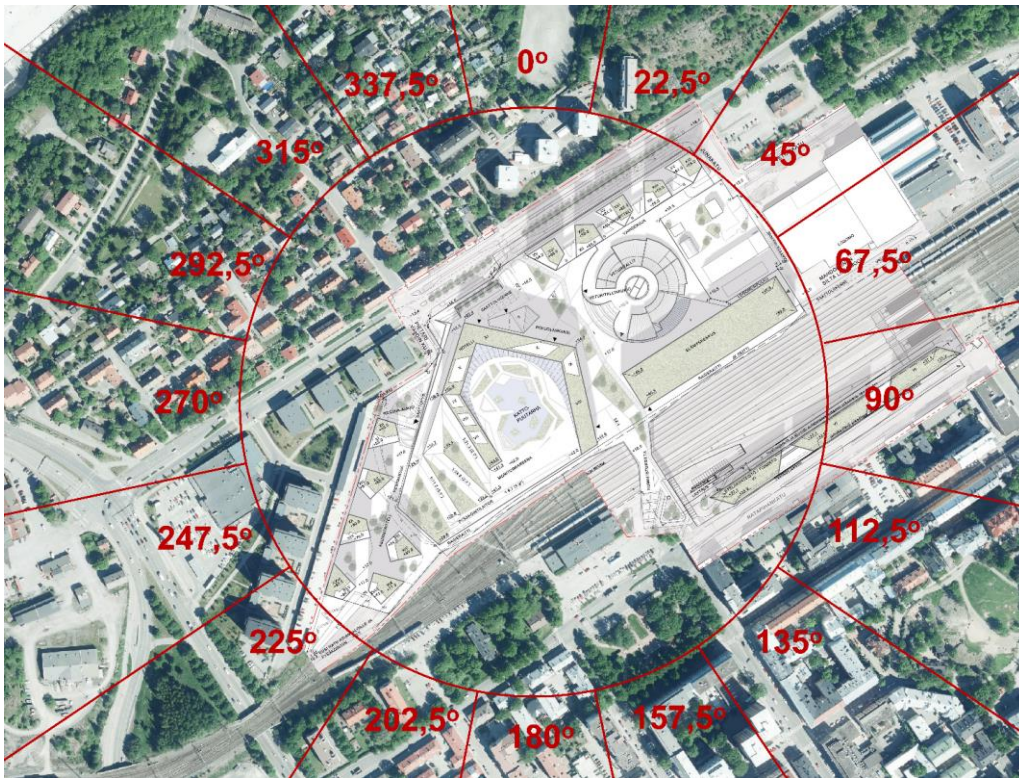
2.2 Analyysimenetelmä ja määrittelyt

Tuulisuuden laskenta/arviointi on tehty [1] yhteydessä kehitetyllä menetelmällä, joka perustuu suunnitelmaerojen vaikutusten laskentaan, kun käytössä on viitekohteiden tuulitunnelikoetuloksia. Menetelmä sijoittuu tarkkuudeltaan suunnittelukohteen tuulitunnelikokeen avulla tehdyn tuulisuuskartoituksen ja asiantuntijalausunnon välille.

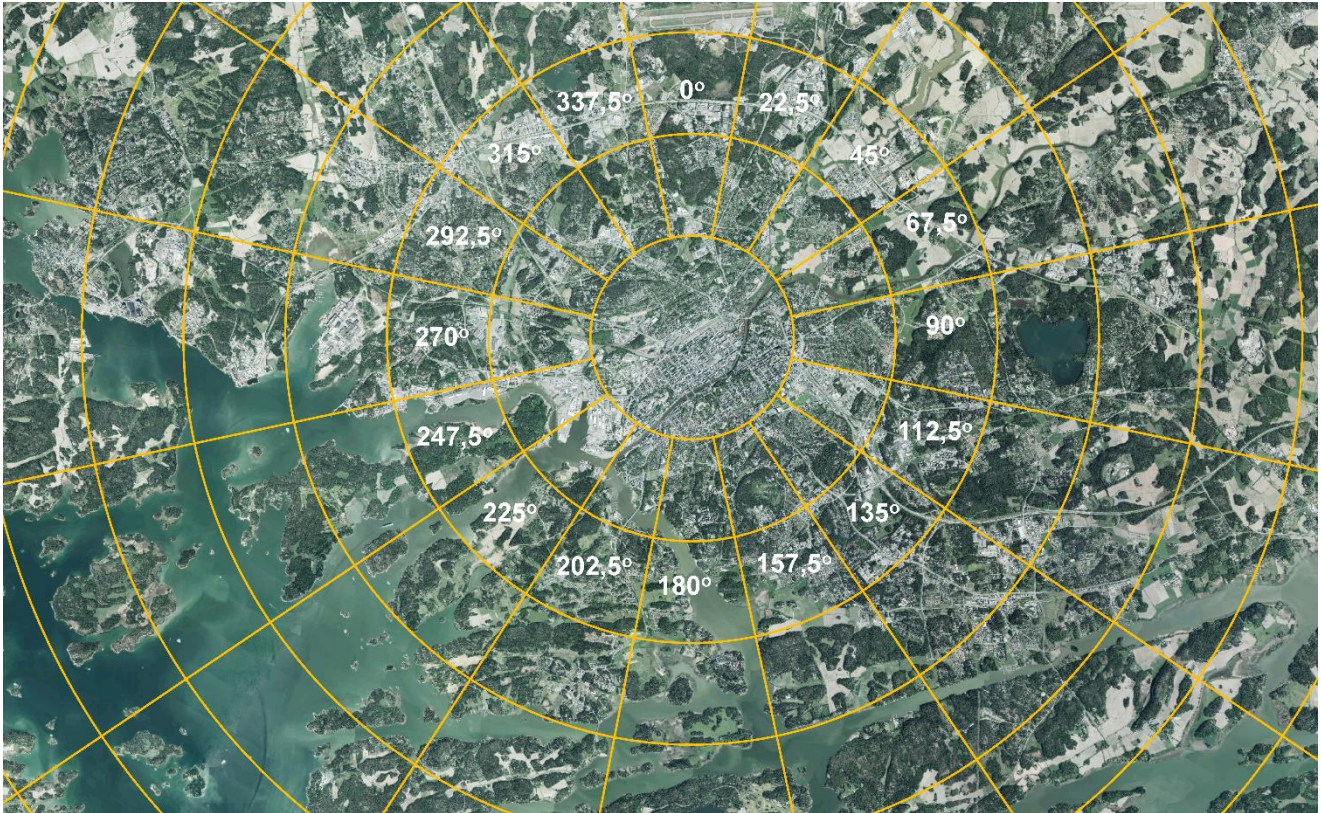
Kuten tuulisuuskartoituksissa yleisesti, menetelmässä määritetään lähtötiedoksi kohdealueen perustuulisuus. Se lasketaan rosoisuuden muutosten analyysin perusteella paikallisen sääaseman tuulitlastosta. Tällä analyysissä otetaan huomioon tuulitlaston mittauspisteen ja kohdealueen sijaintierosta johtuvat kysymykset sekä tuulitlaston mittauspisteen mahdolliset tuulivarjostukset.

Analyysiin on valittu kolmen Ilmatieteenlaitoksen sääaseman tulokset 10 v ajalta (vuodet 2001...2019). Sääasemat ja niiden mittaustulosten analyysi on kuvattu tarkemmin liitteessä 4.

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 kuvassa 6.



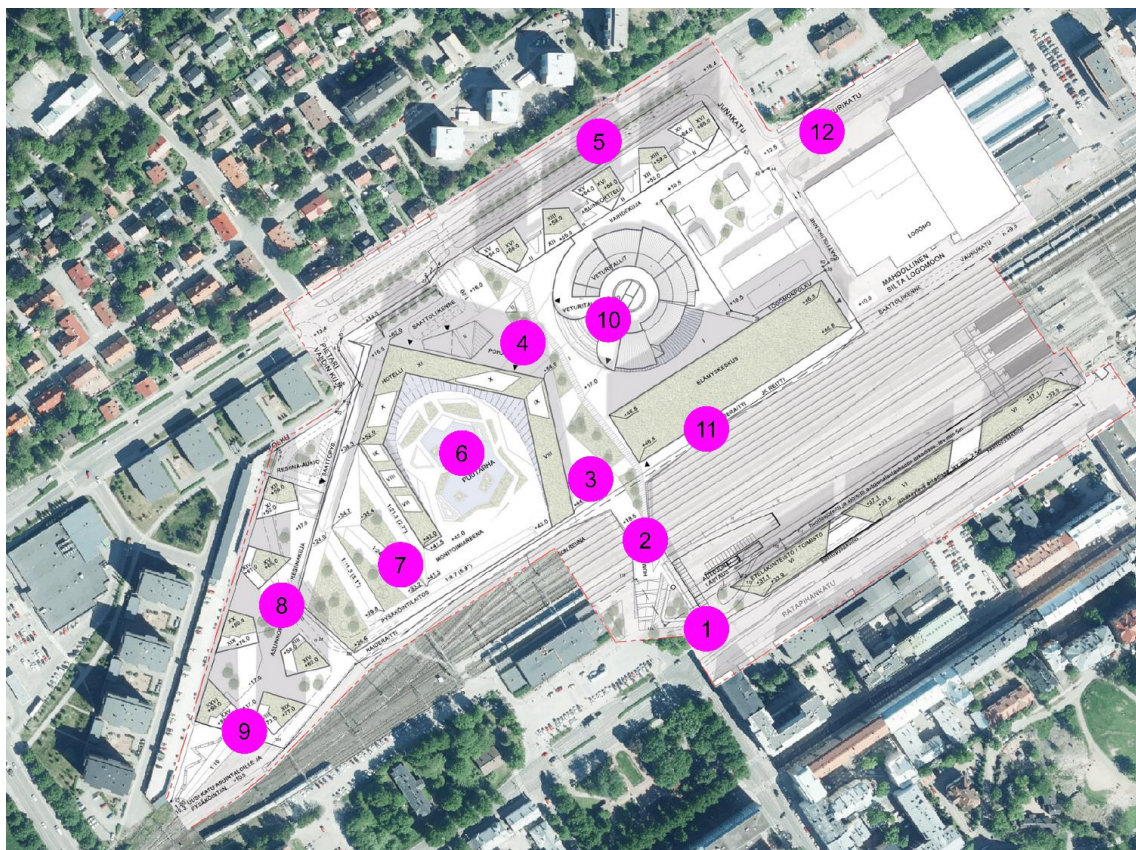
Kuva 5: Tuulensuuntien koordinaatisto (kuva muokattu Turun kaupungin ja PES-Arkkitehdit Oy ai-neistosta).



Kuva 6: Maaston tyyppi rosoisuuden muutosten analyysiin; ruudukon kehien väli = 2,0 km (kuva on muokattu Turun kaupungin kartta-aineistosta).

Tuulisuuden numeroarvojen määrittämiseen on valittu kuvan 7 mukaiset pisteet.

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



Kuva 7: Tuulisuuden tarkastelupisteet (kuva muokattu Turun kaupungin ja PES-Arkitehdit Oy aineistosta).

Taulukko 1: 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; ulkoilma- materiaalit; uima-altaat. Toiminnot ovat epäviihtyisiä, kun tuulia esiintyy kerran kesäkaudella (huhtikuu-syyskuu) tai useammin, $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,05$ % kesäkauden 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 useammin kesäkaudella (huhtikuu-syyskuu), $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,05$ % kesäkauden 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).	esteettömyys, turvallisuus
D puuskatuuli > 23 m/s (koko vuosi)	Vaarallisen kova tuuli toiminnosta riippumatta. Tuulisuus on ei-hyväksyttävä, kun tuulia esiintyy kerran vuodessa tai useammin $\geq 2,2$ h * ($\geq 0,025$ % ajasta).	turvallisuus

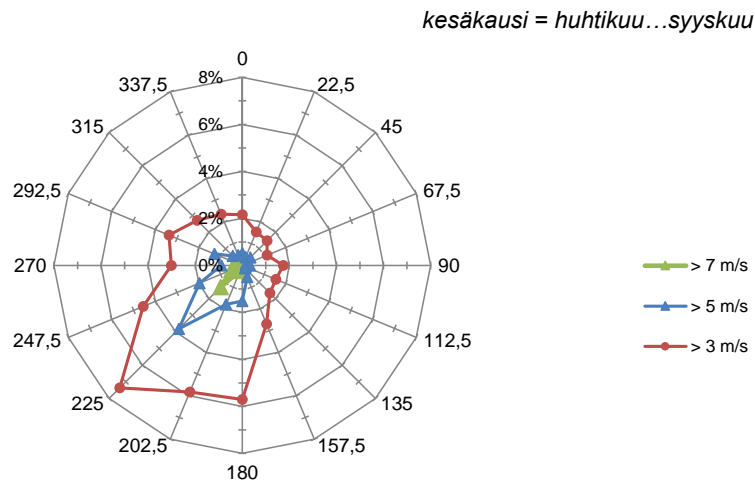
* sellaisten keskituulien osuus ajasta, joissa tuulennopeus voi puuskissa ylittää raja-arvon. Taulukon tuulennopeuden raja-arvot on annettu katutasossa, eli 1,5...2,0 m korkeudessa tarkastelupisteen alla olevasta maanpinnasta lukien.

2.3 Tulokset

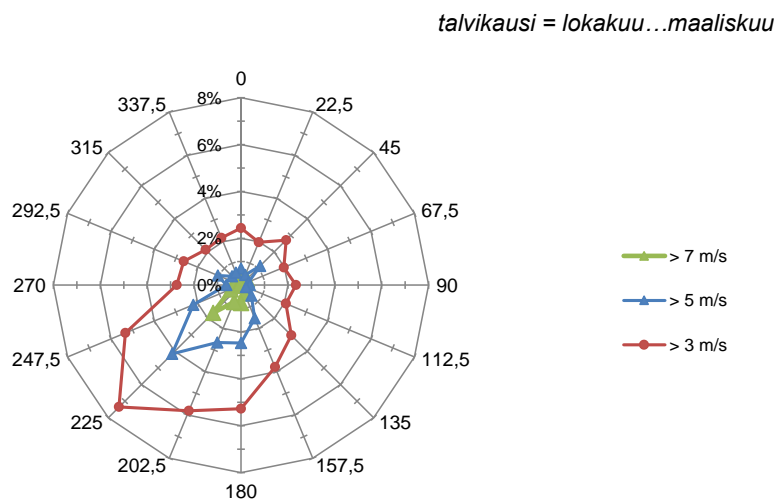
2.3.1 Kohdealueen perustuulisuus

Kohdealueen perustuulisuus on määritetty 15 m korkeudessa, joka vastaa Konsultin tuulitunneliko-keissa käyttämää. Tuloksia on havainnollistettu kuvissa 8 ja 9. Tulosten perustana oleva maaston ro-soisuuden muutosten analyysi on esitetty liitteessä 5.

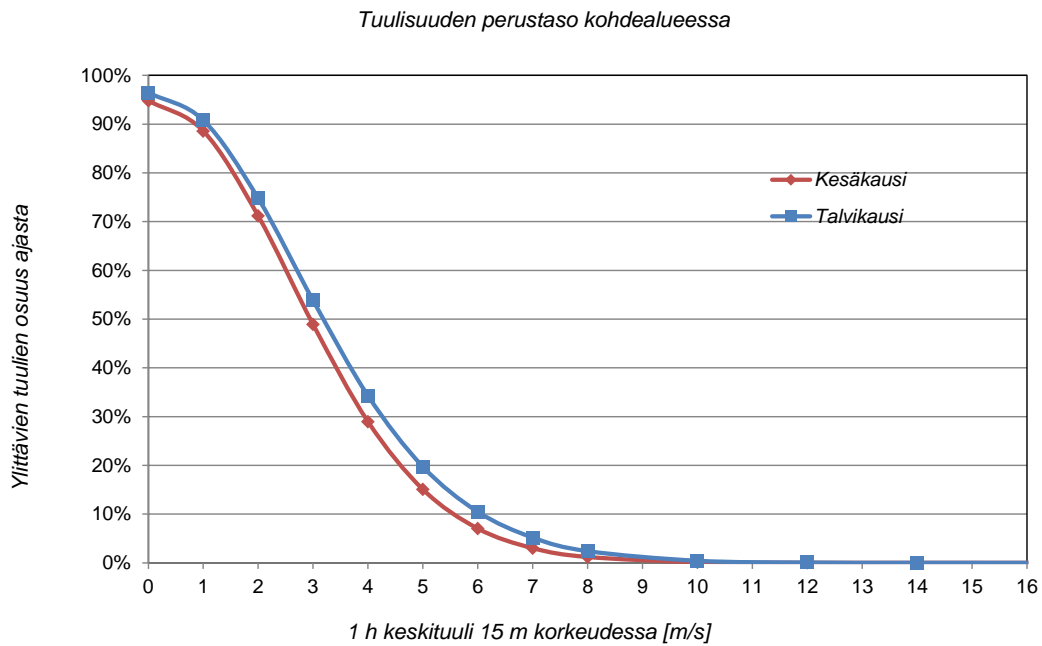
Kesäkausi: keskituulien esiintyminen avoimessa maastossa (% ajasta; 15 m korkeus)



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



Kuva 8: Perustuulisuus kohdealueessa tuulen suunnittain (tuulennopeudet ovat tunnin keskituulia 15 m korkeudessa).



Kuva 9: Perustuulisuus kohdealueessa summana kaikista tuulensunnista.

2.3.2 Tuulisuus tarkastelupisteissä

Laskennalliset tuulisuuden numeroarvot tarkastelupisteissä on esitetty kuvassa 10.

Tunnin keskituuli >

5 m/s

Piste	M Koko vuosi				Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0,0 %	0	0	0	0,0 %	0,0	0,0	0,0
2	2,3 %	202	17	4	2,0 %	88,4	14,7	3,4
3	0,3 %	22	2	0	0,2 %	9,7	1,6	0,4
4	0,0 %	2	0	0	0,0 %	0,4	0,1	0,0
5	0,0 %	0	0	0	0,0 %	0,0	0,0	0,0
6	1,0 %	86	7	2	0,7 %	29,2	4,9	1,1
7	0,4 %	36	3	1	0,4 %	18,3	3,0	0,7
8	0,8 %	67	6	1	0,4 %	15,6	2,6	0,6
9	2,7 %	239	20	5	2,3 %	99,6	16,6	3,8
10	0,3 %	27	2	1	0,2 %	8,0	1,3	0,3
11	2,0 %	174	14	3	1,8 %	76,8	12,8	3,0
12	0,0 %	0	0	0	0,0 %	0,0	0,0	0,0

* kesäkauden tunnit = 100 %

Puuskatuuli >

10 m/s

Piste	Koko vuosi				A Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0,2 %	14	1,2	0,3	0,08 %	3,5	0,6	0,1
2	3,8 %	335	27,9	6,4	3,05 %	133,7	22,3	5,1
3	2,3 %	200	16,6	3,8	1,58 %	69,2	11,5	2,7
4	0,2 %	18	1,5	0,4	0,13 %	5,7	1,0	0,2
5	0,1 %	7	0,6	0,1	0,03 %	1,3	0,2	0,1
6	8,7 %	766	63,9	14,7	6,85 %	300,2	50,0	11,5
7	4,4 %	388	32,4	7,5	3,48 %	152,5	25,4	5,9
8	1,4 %	126	10,5	2,4	0,80 %	35,1	5,8	1,3
9	2,5 %	215	17,9	4,1	1,89 %	82,6	13,8	3,2
10	0,7 %	61	5,1	1,2	0,51 %	22,3	3,7	0,9
11	2,5 %	215	17,9	4,1	1,78 %	78,1	13,0	3,0
12	0,1 %	5	0,4	0,1	0,03 %	1,2	0,2	0,0

* kesäkauden tunnit = 100 %

Puuskatuuli >

13 m/s

Piste	Koko vuosi				B Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0,0 %	0	0,0	0,0	0,00 %	0,1	0,0	0,0
2	0,6 %	48	4,0	0,9	0,41 %	17,7	3,0	0,7
3	0,3 %	28	2,3	0,5	0,16 %	7,2	1,2	0,3
4	0,0 %	2	0,2	0,0	0,01 %	0,5	0,1	0,0
5	0,0 %	0	0,0	0,0	0,00 %	0,0	0,0	0,0
6	2,0 %	172	14,4	3,3	1,23 %	53,7	9,0	2,1
7	1,1 %	93	7,7	1,8	0,77 %	33,8	5,6	1,3
8	0,2 %	15	1,2	0,3	0,06 %	2,5	0,4	0,1
9	0,3 %	30	2,5	0,6	0,21 %	9,3	1,5	0,4
10	0,1 %	6	0,5	0,1	0,04 %	1,6	0,3	0,1
11	0,3 %	31	2,6	0,6	0,23 %	10,1	1,7	0,4
12	0,0 %	0	0,0	0,0	0,00 %	0,0	0,0	0,0

* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 10a: Tuulisuuden laskennalliset numeroarvot tarkastelupisteissä.

Puuskatuuli >

16 m/s

Piste	C Koko vuosi				Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,00	0,00
2	0,057 %	5,0	0,4	0,1	0,034 %	1,5	0,25	0,06
3	0,037 %	3,2	0,3	0,1	0,011 %	0,5	0,08	0,02
4	0,002 %	0,1	0,0	0,0	0,001 %	0,0	0,01	0,00
5	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,00	0,00
6	0,344 %	30,1	2,5	0,6	0,165 %	7,2	1,20	0,28
7	0,232 %	20,3	1,7	0,4	0,166 %	7,3	1,21	0,28
8	0,012 %	1,0	0,1	0,0	0,002 %	0,1	0,02	0,00
9	0,032 %	2,8	0,2	0,1	0,014 %	0,6	0,10	0,02
10	0,004 %	0,3	0,0	0,0	0,001 %	0,1	0,01	0,00
11	0,035 %	3,1	0,3	0,1	0,018 %	0,8	0,13	0,03
12	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,00	0,00

* kesäkauden tunnit = 100 %

Puuskatuuli >

23 m/s

Piste	D Koko vuosi				Kesäkausi			
	% ajasta	h/vuosi	h/kk	h/vk	% ajasta*	h	h/kk	h/vk
1	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
2	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
3	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
4	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
5	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
6	0,002 %	0,2	0,0	0,0	0,001 %	0,0	0,0	0,0
7	0,003 %	0,3	0,0	0,0	0,002 %	0,1	0,0	0,0
8	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
9	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
10	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
11	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0
12	0,000 %	0,0	0,0	0,0	0,000 %	0,0	0,0	0,0

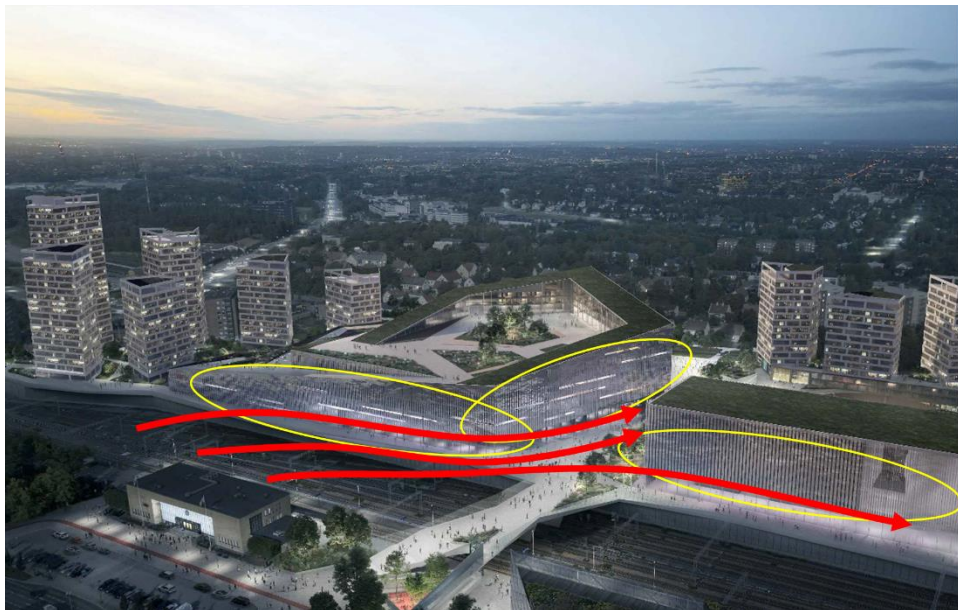
* kesäkauden tunnit = 100 %

Kuva 10b: Tuulisuuden laskennalliset numeroarvot tarkastelupisteissä.

3 Tulosten ohjeellinen tulkinta

- Tulosten perusteella saaristomeren saaret sekä mantereen puoleiset metsäalueet, kerrostalo-alueet ja kukkulat lieventävät tuulen keskinopeuksia siten, että kohdealueen perustuulisuuden taso (10...15 m korkeudessa) jää pieneksi. Tämä tulos on myös yhtenevä kohteen vieressä sijaitsevien Ilmatieteenlaitoksen Turku-Artukainen sääaseman mittaustulosten suhteen, jossa rakennuksen katolla sijaitsevasta mastosta on viimeisen 10 vuoden aikana mitattu enimmillään 13 m/s 10 min keskituuli
- perustuulisuuden taso on hieman suurempi kuin Konsultin aikaisemmin analysoima Kuopion seudun tuulisuus, ja selvästi pienempi, kuin pääkaupunkiseudun tuulisuus. Kesäkauden ja talvikauden tuulien välinen ero on suhteessa pienempi, kuin pääkaupunkiseudulla. Myös maamerituuli ja rantaviivan aiheuttama kanavointi (jotka ovat esimerkkejä paikallisesta ”rannikkoilmastosta”) ovat vähäisempiä
- tuulen keskinopeuteen liittyvät tuulisuuskriteerit (M, mukaan lukien mahdolliset CFD analyysien tulokset) eivät muodostu tulosten perusteella ongelmalliseksi
- samalla kun maaston suuri rosoisuus pienentää perustuulisuuden tasoa, tuulen puuskaisuuden osuus muodostuu merkittäväksi
- merialueiden läheisyys näkyy viihtyisyyttä kuvaavissa puuskatuulten kriteereissä A ja B, jotka tulosten valossa vastaavat tavanomaisia rantakaupunginosien tuloksia, jossa A ei täyty (tuulee liikaa) mutta B pääsääntöisesti täyttyy luonnollisen maanpinnan tasossa
- kohde sijaitsee kaupunkirakenteen keskellä (toisten rakennusten suojassa). Tällöin tyypillisesti tuulen puolella olevan aukean tilan pituus on määräävä tekijä jalankulkutason tuulisuudessa. Kohteessa ratapiha-aukio yhdessä uuden rakennusmassan kanssa ja merenlahtien sijainti tekevät lounaistuulet merkittäviksi tuulisuuden muodostumisessa
- kävelyä vaikeaksi tekeviä puuskatuulia (> 16 m/s, C-kriteeri) esiintyy oletettavasti ratapihan ylittävällä sillalla ja kattopuutarhassa useammin kuin kerran vuodessa. Nämä esiintyvät pääosin talvikaudella, mutta kattopuutarhan osalta niitä voi tulosten mukaan esiintyä myös kesäkaudella
- yleisenä suunnitteluohjeena (”tuulisuussuunnitteluna”) voidaan ehdottaa sekä kattopuutarhalle että aukioille katutaso virtauksiin kitkaa tuottavien rakenteiden ja istutusten käyttöä. Näinä voivat toimia esimerkiksi aidat, muurit, istutuslaatikot, LVI-rakennelmat, mainoskyltit, katokset, mastot, valaisinpylväät, pergolat, pensaat yms. Tällä on kohteessa merkitystä, koska suunnitelman rakennusmassat sisältävät laajoja tasaisia pintoja, jotka voivat ohjata virtauksia (kuva 11)
- Konsultin tekemistä Helsingin Kalasataman keskuksen tuulitunnelikokeiden [2, 3] perusteella edellä mainituilla voidaan merkittävästi lieventää kovien puuskatuulien esiintymistä. Tämä liittyy osaltaan kovien tuulien toistuvuuksiin yleisesti; esim. kuvan 9 mukaisesti - jos tuulennopeus saadaan suunnitteluratkaisulla tippumaan arvosta 8 m/s arvoon 6 m/s (-25 %), on kovien tuulien toistuvuus enää noin viidesosa alkuperäisestä
- vaarallisen kovat puuskatuulia (> 23 m/s, D-kriteeri) ei oletettavasti esiinny useammin kuin kerran vuodessa, joskin kattopuutarhan olalta se voi edellyttää edellä mainittuja tuuliesteiden käyttöä. On huomattava että esim. Turku-Artukainen sääasemalta (rakennuksen katolta) mitattu kovin puuskatuuli on ollut 25 m/s viimeisen 10 vuoden ajalla, vaikka mitattu keskituuli onkin vähäinen (liite 4)
- kovien talvikauden puuskatuulien mahdollisuuden johdosta tuulisuuden vaikutusten lieventämisestä voidaan harkita tehtäväksi ainakin kattopuutarhan ja ratapihan ylittävän sillan osalta esteettömyyden näkökulmasta:

- ulko-ovien avaaminen (mukaan lukien kattoterassien ovet) voi kovimmissa myrskyissä olla vaikeaa, ja rakenteet altistuvat lumen ja jään kertymiselle. Vaihtoehtoinen ”suojan puoleinen kulkureitti” on eduksi
 - liukkauden torjunta talvella, ja kaiteet ”pystyssä pysymiseen”
 - riittävä valaistus
 - kaiteiden korkeudella ja tyypillä voidaan vaikuttaa tuulisuusoloihin, samoin kuin kulkureittien sijainnilla.
- kohteen vaikutukset kohteen ympäristön (naapuritonttien) tuulisuuteen jäävät vähäisiksi. Tuulisuuden mahdolliset vaikutukset ovat merkittävinpä kohteessa itsessään
 - vaiheittaisen rakentamisen osalta tuulisuusvaikutukset ovat huonoimmillaan, kuin vain osa rakennusmassoista on valmiina. Tällöin erityisesti kattopuutarhan voi tuulisuus voi olla lopputilannetta epäedullisempi
 - suunnitelman tuulisuusvaikutuksissa ei ole kaavoitusvaikutuksen suhteen erityistä huomauttamista. Tarkempia tutkimuksia ei ole myöhemmissä suunnitteluvaiheissa tarve suositella, jos vertailtavana ei ole useampaa vaihtoehtoa, joiden tuulisuusvaikutusten keskinäisestä eroista halutaan lisätietoa.



Kuva 11: Laajat tasaiset julkisivupinnat voivat ohjata ja kanavoida virtauksia katutasoon tietyillä tuulensuunnilla. Tuulisuusvaikutuksia voidaan yleisesti lieventää katutason virtauksiin kitkaa tuovilla rakenteilla (kuva on muokattu PES-Arkkitehdit Oy aineistosta).

Lähdeluettelo

1. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto: Jätkäsaaren ja Hernesaaren asemakaavoitus, Tuulisuuden laskenta- ja luokitusohje. WSP Finland Oy, 18.10.2013, 78 s.
2. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto: Kalasataman keskuksen suunnittelu, tuulisuus-kartoitus. WSP Finland Oy, 2011, s. 51.
3. SRV Rakennus Oy. Kalasataman keskuksen suunnittelu, Kalasataman tornien tuulitunnelikokeet, loppuraportti. WSP Finland Oy 19.12.2016, 146 s.

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 sää tiedotuksissa 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, katopihoilla, 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, kiinnittäminen on välttämätöntä
> 28	hyvin epätodennäköisesti koskaan koettavissa

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

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

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

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

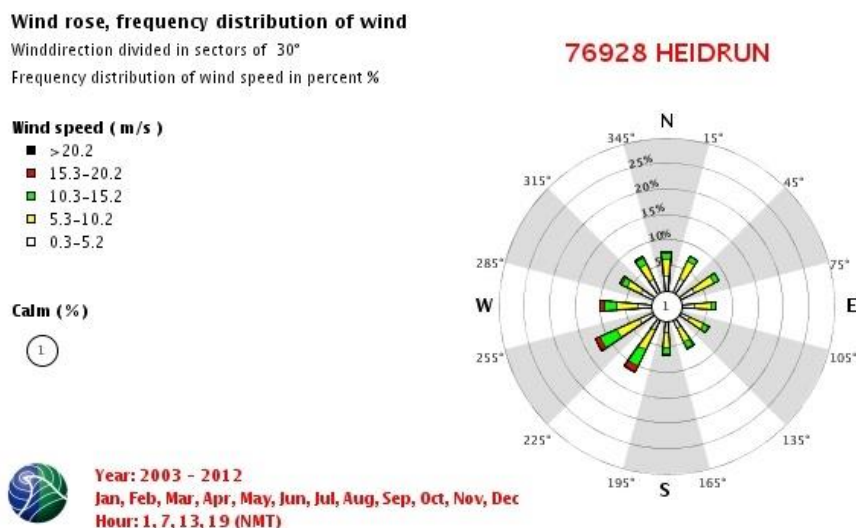
missä k = muotoparametri ja λ = skaalausparametri. Kumulatiivinen jakauma ($v \leq v_m$) on tällöin

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

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

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

missä P_0 = tuulen suunnan sektoriin liittyvien osuus kaikista tuulista. Weibull-jakauman parametrit k ja λ saadaan käyränsovituksella tuuliruusun arvoihin tai tuulitietoja toimittava organisaatio voi niitä määrittää valmiiksi. Käyränsovituksesta aiheutuva virhe on käytännössä pieni tavanomaisella 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 tuuliruususta (Heidrun, Norja).

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

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

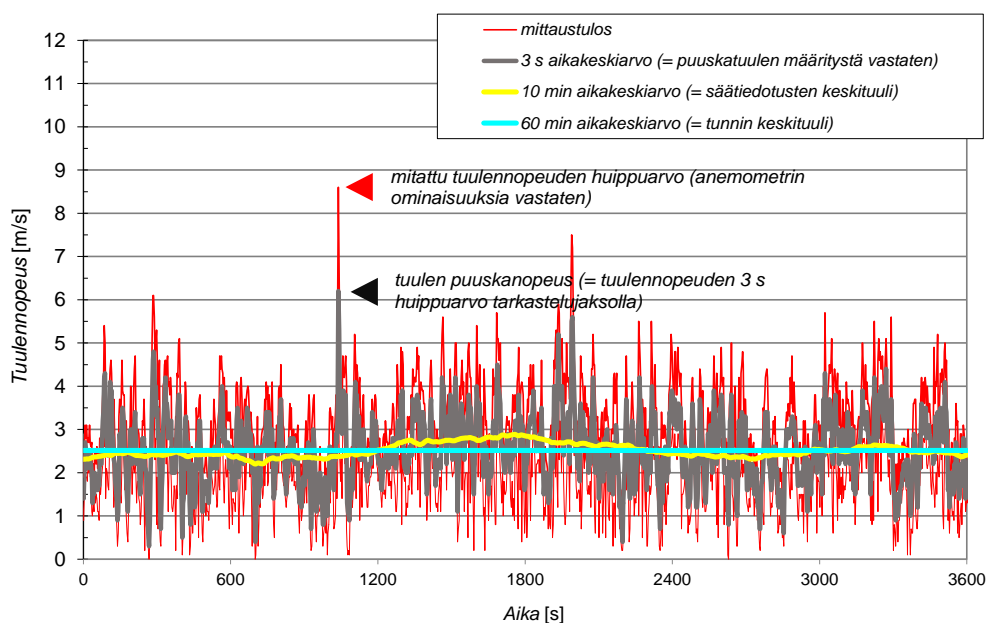
Kaupungeissa, joissa tuulisuudella on erityistä merkitystä, kriteerejä voidaan esittää kaupunginosa- ja aluekohtaisesti. Esimerkkinä tästä on tuuliseksi tunnettu Wellingtonin kaupunki Uudessa-Seelannissa, jossa kaupunki on määritellyt keskustan julkisille alueille standardin, kuinka paljon uusi rakennus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

Tuulisuuden hyväksytyt taso voidaan esittää tuulisuuskriteerinä, joka koostuu tyyppillisesti

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

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

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

Tuulisuudelle ei Suomessa, kuten ei muissakaan maissa, ole toistaiseksi olemassa viranomaisohjeita. Suunnittelussa voidaan käyttää tutkijoiden esittämiä suosituksia. Suunnittelukäyttöön vakiintuneet suositukset vaihtelevat maittain. Suomen oloissa esim. tuulen ja pakkasen yhteisvaikutus (pakkasen puhtuus) 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.:

- epäviihtyisiä
- vaarallinen, ei hyväksyttävä. Tuulisuudeltaan ongelmallinen piste tulisi korjata jatkosuunnitelmassa.

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: $v_g > 10 \text{ m/s}$; $P_A \geq 0,05 \% *$ (epäviihtyisiä)
- B: $v_g > 13 \text{ m/s}$; $P_B \geq 0,05 \% *$ (epäviihtyisiä)
- C: $v_g > 16 \text{ m/s}$; $P_C \geq 0,025 \%$ (epäviihtyisiä)
- 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 tuulenopeus voi tuulenpuuskissa tilastollisesti (eli huippuarvokertoimella $g = 3,5$ laskettuna) ylittää raja-arvon. Todellinen hetkellisten tuulenopeuksien 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 Lawsonin-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. tanskalaisen 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 tulisikin tulkita siten, että se soveltuu tyypilliseen tanskalaiseen rakennuskantaan, maastoon ja ilmastoon.

Liite 2: Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta

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

Tuulitunnelikokeiden käytön myötä alettiin esittää myös kriteerejä tuulisuuden sallitulle tasolle, toisinaan 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*) kehittyi kuitenkin koko ajan, ja sillä on saatu asiantuntijakäytössä enenevissä määrin käyttökelpoisia tuloksia. Periaatteessa voitaisiin kehittää myös CFD-laskennan tuloksiin perustuvia tuulisuuskriteereitä, mikä parantaisi käytettävyyttä edelleen. Tuulitunnelikoe ja CFD eivät kuitenkaan yleisesti anna yhteneviä tuloksia; eivät edes geometrialtaan yksinkertaisissa testimalleissa.

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 Jätkäsaaren osayleiskaavavaiheen kaupunkirakennemallin tuulisuuden selvittämiseksi (kuva WSP).

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

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

$$v_g = v_m + g\sigma_v$$

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

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

jolloin huippuarvo saadaan lausekkeesta

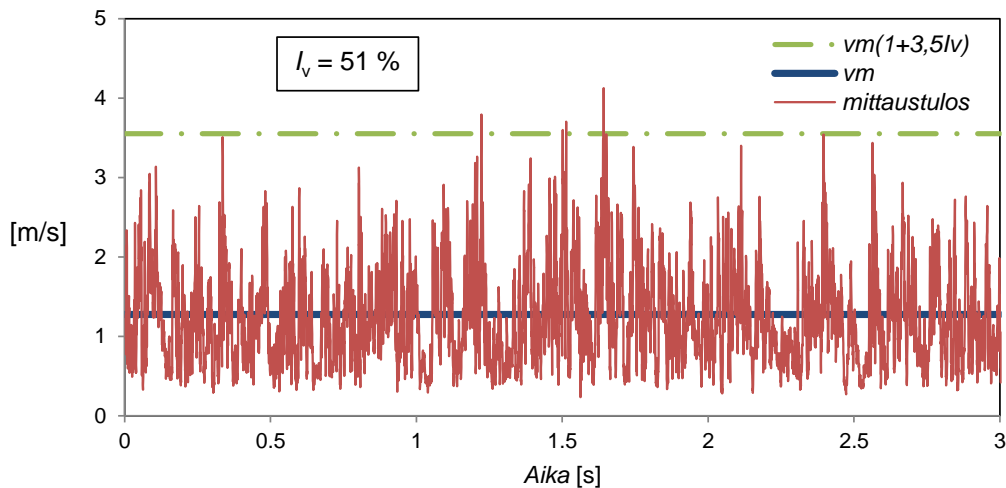
$$v_g = v_m(1 + gI_v)$$

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

Tuulisuuskartoituksiin soveltuva numeerinen virtauslaskenta voidaan tehdä kahdella vaihtoehtoisella menetelmällä: suurten pyörteiden simuloinnilla (LES, *Large Eddy Simulation*) tai ajasta riippumattomalla RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) -menetelmällä. Ensin mainittu on laskenta-ajaltaan huomattavasti pitempi siten, että RANS on tällä hetkellä käytetyin menetelmä. RANS-menetelmä soveltuu ainoastaan virtauksen keskinopeuden määrittämiseen (kuvan L2.2 yhtenäinen viiva). 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. Supertietokone-laskenta, avoimien vir-

tauslaskentaohjelmien kehittyminen (jolloin jokaisesta laskentaytimestä ei tarvitse ”maksaa lisää lisenssimaksua”) ja laskentaytimien määrän kasvu jopa useaan tuhanteen, pitää kuitenkin LES-laskennan mahdollisena tutkijakäytössä.

Jotta tulos olisi realistinen, myös kaupunkirakenteen kohtaavaan tuulen, eri laskennan raunaehdon, tulisi olla kuvan L2.2 mukainen turbulenttinen virtaus, joka vastaisi luonnon tuulta tarkasteltavalle tuulensuunnalle. Luonnon tuuli on aina turbulenttista.



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

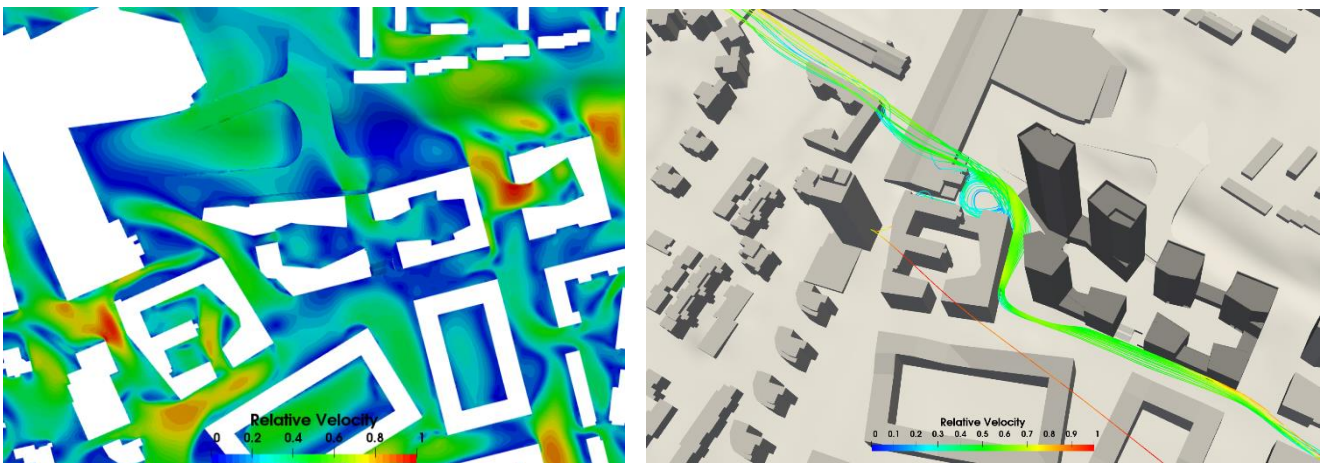
Numeerisen virtauslaskennan ja tuulitunnelikoetulosten tulosten tulkinnan tärkeä ero on käytännössä se, että virtausnopeuden hetkelliset huippuarvot (tuulen puuskien / turbulenssin vaikutus) tulevat aliarvioituksi numeerisessa laskennassa. Tämän virheen merkitys on mahdollisesti vähäinen, jos itse tuulisuuskriteeri perustuu tuulen keskinopeuteen – ja vastaavasti merkittävä, jos kriteeri perustuu tuulen puuskanopeuteen.

Tuulitunnelikokeilla ja numeerisella virtauslaskennalla on myös toinen merkittävä ero: 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 (kuva L2.3). Tuulitunnelikokeessa paikallisia virtauksia voidaan tarkastella ja visualisoida esim. savun avulla. Virtausnopeuden 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 suurina, 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 lisäksi huomioon tuulitilaston mittauspisteen ja kohteen välinen sijaintiero. Tämä edellyttää maaston rosoisuuden muutosten analyysiä ja sitä varten laadittujen laskentamallien käyttöä. Tavanomaisesti tuulen suunnat käydään läpi 22,5°...45° välein.

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 sijainneissa rajakerrostuulitunnelissa vuoteen 2016 asti; tämä tuulitunneli on sittemmin purettu.



Kuva L2.3: Tavanomaisia yksityiskohtaisen numeerisen virtauslaskennan tulosteita (kuvat WSP).

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 ilmapvirtauksen 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 ilmanvtauksen ja maan väliseen kitkaan.

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

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

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 myrkyissä 2 km luokkaa, jolloin kaavan (L3.1) logaritminen yhteys on voimassa on n. 200 m asti. Tuulen turbulenssin ominaisuudet muuttavat mittakaavaansa rajakerroksen korkeuden muuttuessa, joten kaikkein voimakkaimpien myrskyjen ominaisuuksista on vain vähän mitattua tutkimustietoa.

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

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

Logaritmisen yhteyden tapauksessa, koska tämä pätee vain pintakerroksessa, on otaksuttava tai mitattava tuulennopeuden korkeusriippuvuus myös rajakerroksen ylemmissä osissa. Näissä Coriolisvoima on oleellinen tekijä, jonka johdosta mm. virtauksen suunta kääntyy ilmanpaineen tasa-arvokäyrien suuntaiseksi. Kun otaksutaan, että rajakerroksen ylemmissä osissa tuulennopeudet ovat neutraalissa ilmakehässä verrannollinen tuulennopeuteen lähellä maapinta, voidaan dimensionanalyysissä nopeusmitaksi valita u^* ja yhteys olettaa riippuvaksi dimensiottomasta tulosta fz/u^* . Kun kaavan (L3.3) yhteys on voimassa, voidaan yhteys otaksua vaihtoehtoisesti riippuvaksi myös dimensiottomat tulosta z/h_G . Reunaehtona 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]

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (L3.5)$$

missä

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

ja

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

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

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

Kun kitkanopeus maastotyyppissä z_{01} tunnettaan, 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 avomerisääasemien tuulimittaustietoja, jossa myös tuulennopeudet ovat tyypillisesti suurimpia.

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

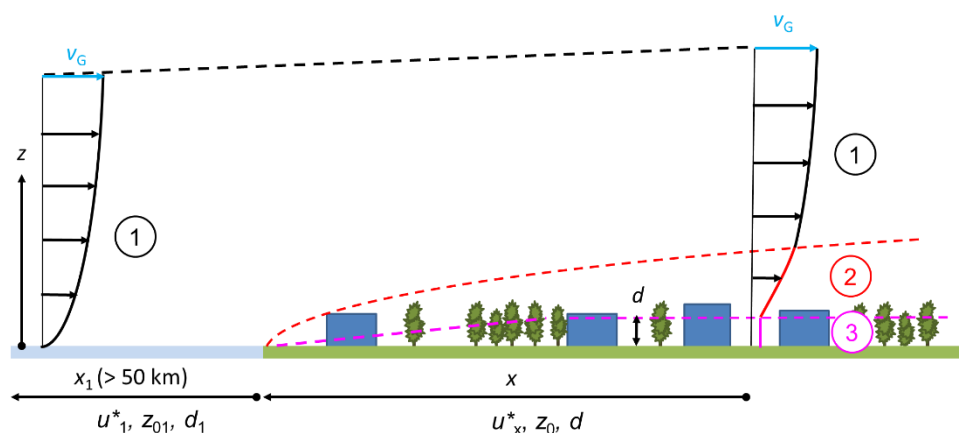
Tehollinen rosoisuusparametri voidaan tällöin laskea esimerkiksi saarten tai muiden yksittäisten esteiden pinta-alaosuuden perusteella tuulensuunnittain. Tarkasteltava etäisyys on n. 50 km tuulen puolella lähellä vaikuttavan rosoisuuden vaikutuksen ollessa merkittävämpi tarkastelupisteen korkeudesta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

Menettelyä sovelletaan tyypillisesti mm. tuulivoimatarkasteluissa ja numeerisissa virtauslaskennassa, kuten Suomen Tuuliatlaksen [L3.3] yhteydessä tehdyissä ilmastosimulaatioissa. Konsultin käyttämä menettely on eri pinta-alaosuuksilla painotettujen kitkakertoimien C_s summaaminen tietyllä korkeu-

della 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 karheusluokan muutosanalyysin yleinen periaate. Kerroksessa 1 tuulennopeudet ovat korkeuden funktiona samat (kun otetaan huomioon nollatason siirtymän muutos $d_1 \rightarrow d$). Kerroksessa 2 tuulennopeus on likimain logaritminen vastaten karheusparametriä 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

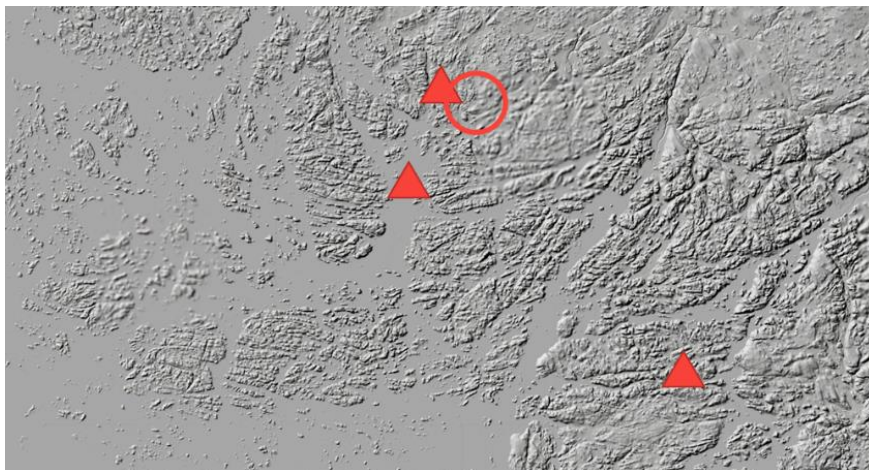
Liite 4: Analyysissä käytetyt tuulimittaustiedot

Tuulitilastoina on käytetty ilmatieteenlaitoksen julkaisemia avoimia tietoja (vuodet 2010...2019). Lähtötiedot on analysoitu kolmesta sääasemasta (kuva L4.1) mittauspisteiden virheiden (sääasemien tuulivarjostusten ja maaston roisisuusmuutosten) kompensoimiseksi tuulen suunnittain:

- Kemiönsaari, Kemiö (peltoaukealla)
- Turku Artukainen (kohteen lähistössä kaupunkiympäristössä)
- Turku Rajakari (merenlahdessa).

Näiltä sääasemilta on analysoitu jatkuvat mittaustulokset 10 min välin. Kunkin sääaseman mittauspisteelle on tehty maaston roisisuuden muutosanalyysi tuulen suunnittain, jossa on myös otettu huomioon mittauspisteen korkeuden, paikallisten esteiden ja maastonmuotojen vaikutus. Tuulen nopeudet on normalisoitu teoreettisen tasaisen maaston (10 m korkeus, $z_0 = 0,03$ m) tuloksiksi, joihin on sovitettu Weibull-jakauman parametrit (vrt. liite 1). Näistä parametreista on lopuksi otettu keskiarvo käytettyjen kolmen sääaseman osalta, joita on käytetty tuulisuusselvityksen lähtötietona (kuva L4.2).

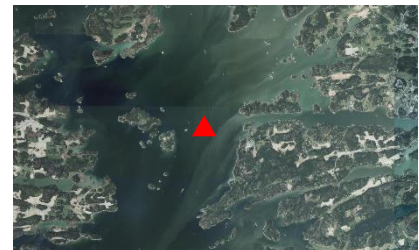
Kuvassa L4.3 on esitetty tilastoista analysoidut vuotuiset maksimituulennopeudet. Näistä voidaan päätellä mm. sääaseman sijaintien erot erityyppisissä maastoissa. Erityisesti tuulen keskinopeudet ovat herkkiä varjostustekijöille, ja edellä mainittu tulosten normalisointi on siten oleellinen osa analyysiä.



Kemiönsaari, Kemiö

Turku, Artukainen

Turku, Rajakari



Kuva L4.1: Tuulimittauspisteiden sijainti ja saaristomeren maastonmuodot (kuva on muokattu Maanmittauslaitoksen aineistosta).

Kemiönsaari, Kemiö
Tuulen 10 min keskinopeus mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	10,1	9,4	8,3	11,8	13,3	11,6	7,1	11,4	13,3
2011	10,7	7,5	8,5	12,6	13	15,4	11,2	11	15,4
2012	12,1	10,7	7,8	8,7	12,6	11,6	8,2	11,2	12,6
2013	12,7	9,9	11,3	8	12,4	12,3	10,9	13,1	13,1
2014	9,5	9,8	9,1	9,7	13,5	13,6	8,3	9,2	13,6
2015	13,4	10,6	9,4	8,8	12,1	13,7	9,7	11,5	13,7
2016	10,7	9,5	9,2	8,5	12,3	13,5	8,6	9,6	13,5
2017	10,6	10	10,4	9,3	13,7	11,8	7,2	9,5	13,7
2018	10,4	10,1	11,2	9,3	12,2	13,4	8,7	10	13,4
2019	13	8,9	9,1	8,4	11,4	11,1	9,1	11,3	13,0
Maks.	13,4	10,7	11,3	12,6	13,7	15,4	11,2	13,1	15,4

Kemiönsaari, Kemiö
Tuulen 3 s puuskanopeus [m/s] mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	15,4	15,9	14,6	16,5	21,3	18,1	14,2	17,4	21,3
2011	15,6	12,6	17,4	19,9	21	26,3	23,5	22,3	26,3
2012	19,4	19,7	11,9	15,7	20,4	20,2	17,3	19,3	20,4
2013	19,8	15,2	17,6	13,9	17,9	20,7	21,2	24,3	24,3
2014	15,4	14,3	16,2	17,8	21,1	22,9	16	15,8	22,9
2015	20,2	14,9	15,7	14,7	22,1	22,4	18,3	20,1	22,4
2016	16,4	15,6	14,6	14,1	20,6	21	16,4	16,4	21
2017	17	15,5	17,9	16,4	21,3	19	15,6	19,7	21,3
2018	16,3	15,6	17,3	16,9	19,8	22,8	18,1	18,6	22,8
2019	19,9	13,5	15,1	12,7	17,3	19	16	18,4	19,9
Maks.	20,2	19,7	17,9	19,9	22,1	26,3	23,5	24,3	26,3

Turku, Artukainen
Tuulen 10 min keskinopeus mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	5,3	5,7	6,3	6,3	7,2	5,7	5,8	5,3	7,2
2011	7,7	6	7,3	12,6	11,4	9,5	12,4	10,3	12,6
2012	11,2	7,8	7,5	9,9	9,5	7,8	7,9	10,7	11,2
2013	9,5	7,3	8,1	9,3	9,6	9,1	11,3	10,5	11,3
2014	7,3	7,1	8,4	9,1	9,8	8,5	8,3	7,7	9,8
2015	10	7,8	8,7	8,9	10	8,3	11	10,4	11
2016	9,9	7	7,3	8,5	9,9	8	9,2	7,6	9,9
2017	8,2	8,3	10	10,4	9,8	7,6	7,6	8,4	10,4
2018	9,3	8,6	9,9	10,7	10,6	9,1	8,9	8,8	10,7
2019	12	6,7	8,2	8,5	10,9	7,5	7,8	9,2	12
Maks.	12	8,6	10	12,6	11,4	9,5	12,4	10,7	12,6

Turku, Artukainen
Tuulen 3 s puuskanopeus mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	9,4	12	11,2	10,3	13	12,1	10,5	11,4	13
2011	12,8	10,6	13	20,5	19,2	20,1	24,8	23	24,8
2012	18,6	15,5	14,6	17,6	20,8	16,1	17	22,2	22,2
2013	19	13,3	16,8	15,9	18,6	18	22,3	22,5	22,5
2014	13,9	12,8	14,3	16,1	19,5	18,3	16,3	15,3	19,5
2015	19,4	13,4	16,2	18,2	18,8	17,2	21,2	21,8	21,8
2016	17,5	13,5	14,2	16,3	19,7	16,4	19	17,3	19,7
2017	14,9	16	18,4	18,9	17,6	15,4	14,7	17,7	18,9
2018	16,6	15,3	18,6	18,6	20	18,5	19	19	20
2019	23,1	13	14,4	15,4	18,9	15,3	17,2	18,9	23,1
Maks.	23,1	16	18,6	20,5	20,8	20,1	24,8	23	24,8

Turku, Rajakari
Tuulen 10 min keskinopeus [m/s] mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	15,4	15,3	11,8	13,4	16,6	16,3	16,6	15,9	16,6
2011	15,2	12,4	10,9	15,7	19,7	19,3	18,9	18,8	19,7
2012	15,2	13,9	10,3	13,2	18,6	15,1	15,3	19,1	19,1
2013	16,7	13,9	12,4	14,1	18,9	17,6	21,2	21,3	21,3
2014	13,7	14,5	11,5	14,3	19,1	16,9	14,4	16,9	19,1
2015	17,9	13,2	12,4	14,3	19,5	16,1	18,5	19,7	19,7
2016	15,4	12,9	13,4	14,8	18	15,4	16,2	16	18
2017	14,5	14,8	13,6	16,4	18,7	14,9	14,5	15,9	18,7
2018	14,3	14,8	13,6	14,9	19,3	18,6	18	18	19,3
2019	19,1	12,3	12,5	12,6	19	14,2	17,8	18,6	19,1
Maks.	19,1	15,3	13,6	16,4	19,7	19,3	21,2	21,3	21,3

Turku, Rajakari
Tuulen 3 s puuskanopeus [m/s] mittauspisteessä

Vuosi	Tuulen suunta								Maks.
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
2010	21,3	21,5	17,3	18,7	21,8	22,5	22,2	22,2	22,5
2011	20,4	17,3	15,3	23,2	25	27,1	25,3	26	27,1
2012	21,8	19,4	15,5	19,3	24,7	20	21,1	25,5	25,5
2013	21,5	19,3	17,1	18,9	22,5	22,5	27,5	29,6	29,6
2014	17,4	17,8	17	18,9	25,8	23	21,7	23,1	25,8
2015	23,1	17,1	17,6	19,3	25	24,2	26,2	28,5	28,5
2016	19,4	17,9	17,9	19,9	24,3	21,4	22	20,4	24,3
2017	20	19,2	19,1	23,2	25,1	19,5	18,6	23,3	25,1
2018	18,5	18,6	21,4	21,1	24,6	22,8	25,4	24,9	25,4
2019	25,8	15,4	16,6	16,6	24,4	20,6	22,1	24	25,8
Maks.	25,8	21,5	21,4	23,2	25,8	27,1	27,5	29,6	29,6

Kuva L4.3: Tuulilastoista analysoidut vuotuiset maksimituulet (suorat mittaustulokset, ilman normalisointien vaikutusta).

WSP Finland Oy
Heikkiläntie 7
FI-00210 Helsinki
Finland
Tel: 0207 864 11
Fax 0207 864 800
www.wsp.com/FI-fi

