



Foto: Helena Ryhä

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Hernesaaren kaavoitus

Tuulisuuskartoitus

Tammikuu 2012

Laadunhallinta

Versio/muutokset	Versio 1	Muutos 1	Muutos 2	Muutos 3
Huomautukset				
Päiväys	15.12.2011	19.1.2012		
Laatija	Risto Kiviluoma	Risto Kiviluoma		
Allekirjoitus				
Tarkastanut				
Allekirjoitus				
Hyväksynyt				
Allekirjoitus				
Projektinumero	303411	303411		
Tiedosto				

KONSULTTI

WSP Finland Oy
Heikkiläntie 7D
00210 HELSINKI
Puh. +358 207 864 11
Faksi +358 207 864 800
www.wspgroup.fi

Yhdyshenkilö
Risto Kiviluoma

TILAAJA

Helsingin Kaupunki, Kaupunki-
suunnitteluvirasto

PL 2100
00099 HELSINGIN KAUPUNKI
puh. +358 9 310 1673
faksi +358 9 310 37409

www.hel.fi/ksv

Yhdyshenkilö
Kati Immonen

Sisällys

Tiivistelmä	5
1 Johdanto	6
1.1 Kohde ja tuulisuuskartoituksen tavoite	7
1.2 Tämä raportti	8
1.3 Menetelmän yleiskuvaus	9
1.3.1 Tuulisuuskartoitus	9
1.3.2 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet	10
2 Lähtötiedot	11
2.1 Pienoismalli	11
2.2 Alueiden suunniteltu käyttö ja rakennukset	12
2.3 Tuulitilasto	13
2.4 Tuulen suuntakulman koordinaatisto	13
3 Tuulitunnelikoe	14
3.1 Koejärjestely	14
3.2 Mittauspisteet	16
3.3 Tuulitunnelikokeen tulokset	18
3.4 Tuulitunnelikokeen virhetarkastelu	22
4 Tuulisuuskartoitus	24
4.1 Tulosten vertailukriteerit	26
4.2 Tuulisuuskartoituksen tulokset	26
4.3 Tuulisuuskartoituksen virhetarkastelu	33
5 Tuulisuus viitesuunnitelman erityiskohteissa	34
5.1 Satama-allas jollapurjehduksen kannalta	34
5.2 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet	36
5.3 Alueen festivaalikäyttö rakennusvaiheessa	39
6 Tulosten ohjeellinen tulkinta	40
6.1 Katutason tuulisuus	40
6.1.1 Tuulen puuskanopeuteen perustuvat kriteerit	40
6.1.2 Tuulen keskinopeuteen perustuvat kriteerit	43
6.2 Satama-allas jollapurjehduksen suhteen	43
6.3 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet	43
6.4 Alueen festivaalikäyttö	44
7 Yhteenveto ja johtopäätökset	45

Lähdeluettelo	46
Liite 1: Tuulennopeuksien muunnoskertoimet	47

Tiivistelmä

Hernesaaren osayleiskaavan viitesuunnitelmalle on tehty tuulisuuskartoitus tuulitunnelikokeen ja tuulitilaston avulla. Hernesaari sijaitsee merenranta-alueella Helsingin kantakaupungissa. Nykyisellään alue sisältää pääosin telakka- ja risteilysatamatoimintoja. Kaavoituksessa alue kehitetään 5000 asukkaalle ja 3000 työpaikalle. Alueelle on suunniteltu rantapuisto, venesatama ja vesiurheilukeskus. Tarkastellussa viitesuunnitelmassa on korkeita rakennuksia alueen pohjoisosassa sekä helikopterikenttä terminaalineen alueen kaakkoisosassa.

Alue on alttiina mereltä puhaltaville tuulille n. 180° sektorilla. Alue on tasaista ja laajenee täyttömaalle. Ainostaan rakennukset, aidat ja istutukset antavat tuulensuojaa. Tuulisuusolosuhteet tiedetään pääosin viereisen Jätkäsaaren vastaavasta tutkimuksesta. Tuulisuuskartoituksen tavoitteena on selvittää tarkemmin Hernesaaren suunnittelukysymysten tuulisuusvaikutuksia:

- kuinka useasti epä mukavuutta tai vaaraa aiheuttavia tuulia esiintyy
- miten korkeat (n. 77 m) ja hoikat tornit vaikuttavat tuulisuuteen
- kuinka helikopterikentän meluaika vaikuttaa kentän turbulenssiolosuhteisiin
- kuinka tuulisuus vaikuttaa vesiurheilukeskuksen toimintoihin (jollapurjehduksen opetus ja kilpailukäyttöön).

Suoritetussa tuulisuuskartoituksessa on tehty mittauksia 20 pisteessä. Tuulisuuskartoituksen tulokset on tiivistetty neljään tuulisuuskriteeriin. Kriteerien raja-arvoina on käytetty 10 m/s, 13 m/s, 16 m/s ja 23 m/s puuskatuulta katutasossa (2,0 m korkeudessa). Lisäksi on tarkasteltu tuulen keskinopeuden > 5 m/s perustuvia kriteereitä.

Helikopterikentän osalta laskeutumista haittaavia turbulenssiolosuhteita on tarkasteltu pystysuuntaisen tuulen nopeuden keskihajonnan 1,75 m/s raja-arvolla viidellä ei korkeudella.

Satama-altaan jollapurjehduskäyttöä on tarkasteltu määrittämällä keskituulen 1...8 m/s ja 2...10 m/s esiintyminen kesäkaudella kahdessa eri pisteessä.

Tulosten mukaan Hernesaaren tuulisimmassa pisteessä katutasossa tunnin keskituuli > 5 m/s 6 % ajasta, joka on sama kuin Jätkäsaaren vastaava maksimi. Hernesaari sijaitsee etelä-pohjoinen suunnassa, jolloin rakennuskanta pienentää alueen kokonaistuulisuutta valitsevissa etelä- ja lounaistuu-lissa. Korkeat rakennukset lisäävät odotetusti tuulisuutta. Tuulisuus korkeiden rakennusten lähellä ei kuitenkaan kasva rantaviivan tuulisimpia kohtia suuremmaksi.

Viitesuunnitelma on tuulisuuden suhteen hyväksyttävä, eli vaarallisen kovia puuskatuulia ei esiinny katutasossa liian useasti.

Yksittäisiä jatkosuunnittelussa harkittavia ja mahdollisesti huomioon otettavia tuulisuuskysymyksiä ovat mm.

- raitiovaunun kääntöraiteen pysäkin suojaavat rakenteet
- helikopterikentälle johtavan sillan suojaaminen kaiteella sekä terminaalien ja parkkipaikan välisen kulkuyhteyden suojaaminen
- helikopterikentän turbulenssin pienentäminen erityisesti meluaidan aiheuttaman turbulenssin osalta.

1 Johdanto

Rakennetun ympäristön katutason tuulisuus on yksi korkealaatuisessa kaavoituksessa ja suunnittelussa huomioon otettava ympäristökysymys. Tuulisuus vaikuttaa mm. ihmisten viihtyvyyteen ja turvallisuuteen. Suomen olosuhteissa tuulisuudella on kaavoitusmielessä merkitystä mm. ympäristöään selvästi korkeampien rakennusten suunnittelussa sekä meren ja laajojen järviolueiden rantojen rakentamisessa.

Ihmisten lisäksi tuulisuustarkasteluissa voidaan ottaa huomioon mm. kulku-
neuvojen vaatimukset; esim. raitiovaunujen, junien sekä kevyiden ja korkeiden ajoneuvojen turvallinen kulku. Korkeat rakennukset ja sairaalat sisältävät toisinaan myös helikopteritason, ja näiden turbulenssiolosuhteille on esitetty suosituksia.

Tuulisuuskysymystä voidaan tutkia luotettavasti kokeellisilla menetelmillä, käyttäen apuna rajakerros-tuulitunnelia, kohdealueen pienoismallia ja tuulitalastoja. Tutkimuksessa määritetään tuulisuus alueen eri pisteissä. Vastavasta tutkimuksesta käytetään nimitystä tuulisuuskartoitus.

Tuulisuus voidaan esittää numeroarvoina periaatteella raja-arvon ylittävien tuulien kesimääräinen esiintyminen. Esim. tuulen keskinopeus > 5 m/s katusuhteissa ≥ 5 % ajasta on toisinaan käytetty nyrkkisääntö olosuhteelle, jossa tuulisuudella on merkitystä. Katutason tuulisuus riippuu alueen perustuulisuuden tasosta sekä rakennusten, puiden, pensaiden yms. paikallisten tekijöiden vaikutuksesta.

Tuulisuuskartoitusten laatiminen on kansainvälisesti muodostunut standardiksi tavaksi tuulisuuskysymysten selvittämiseen. Alueen käyttäjiä, omistajatahoja ja viranomaisia varten selvitetään aiheuttavatko suunnitteluratkaisut viihtyisän, hyväksyttävissä olevan vai liiallisen katutason tuulisuuden. Liiallista tuulisuutta esiintyy tyypillisesti tietyissä ongelmapiisteissä korkeiden rakennusten vieressä ja kattoterasseilla; avoimilla alueilla ja korkealla sijaitsevilla siltakansilla ja jalankuluväylillä; sekä hyvää viihtyvyyttä edellyttävissä paikoissa (puistot, urheilukentät ja katukahvilat jne.). Näille voidaan etsiä korjaavia suunnitteluratkaisuja.

Tuulisuuden hyväksytty taso voidaan esittää tuulisuuskriteerinä, joka koostuu tuulennopeuden raja-arvosta ja sen ylittävien tuulennopeuksien sallitusta esiintymistodennäköisyydestä (kestosta). Tuulisuuskriteereitä ovat esittäneen kansainvälisesti eri tutkimuslaitokset ja yksittäiset tutkijat. Niitä voidaan laatia periaatteessa tuulitunnelikokeiden avulla, tekemällä tuulennopeuden mittauksia todellisessa kohteessa ja haastattelemalla ihmisiä. Tuulisuuskriteereissä voi siten erottua maakohtaisia eroja, esim. ihmisten tottumus tuulen vaikutuksiin; maaston karheus, viherkasvillisuus ja tasaisuus; rakennusten korkeustaso; ja lämpötilan vaikutus.

Tuulisuuskriteereille ei Suomessa ole toistaiseksi olemassa viranomaisohjeita. Kansainvälisesti käytetään alan tutkijoiden esittämiä suosituksia. Suunnittelukäyttöön vakiintuneet suositukset vaihtelevat maittain. Suomen oloissa esim. tuulen ja pakkasen yhteisvaikutus (pakkasen purevuus) ja siihen liittyvä kasvojen paleltumisriski on oma kysymyksensä. Esim. vuodenvaihteen 2011-2012 myrskyjen perusteella myös kaatuneiden ja kaatuvien puiden aiheuttamat riskit voivat olla merkittäviä.

Helsingin kaupunki on teettänyt Konsultilla tuulitunnelikokeisiin perustuvia tuulisuuskartoituksia aikaisemmin Jätkäsaaren, Keski-Pasilan ja Kalasataman keskuksen suunnitelmista. Näissä kaavoituksen hyväksymisen kannalta kriteeriksi on ehdotettu kovien puuskatuulien ($> 23 \text{ m/s}$) esiintymistä keran vuodessa katutasossa. Suomen perustuulisuuden tasosta johtuen tämä kriteeri voi jäädä täyttymättä (eli tuulisuus olisi liiallista) pääosin ainoastaan korkeiden rakennusten vierustan ongelmapiesteissä sekä korotettujen jalankulkutasojen yhteydessä. Kaavassa voidaan tällöin esim. edellyttää ongelmapiesteiden korjaamista suunnitteluratkaisuilla tai jalankulun ohjaamista näiltä pois. Muut kriteerit liittyvät viihtyvyystekijään ja ohjaavat jakosuunnittelua tuulisuuden suhteen viihtyisän ympäristön luomiseksi.

1.1 Kohde ja tuulisuuskartoituksen tavoite

Tuulisuuskartoituksen kohteena on Hernesaaren osayleiskaavan viitesuunnitelma (kuva 1). Hernesaari sijaitsee tasaisella niemimäisellä alueella Helsingin kantakaupungissa, ja on osittain täyttömaalle rakennettu. Nykyisellään alue sisältää pääosin telakka- ja risteilysatamatoimintoja. Kaavoituksessa alue kehitetään 5000 asukkaalle ja 3000 työpaikalle. Alue on alttiina mereltä puhaltaville tuulille n. 180° sektorilla



Kuva 1: Hernesaari etelästä katsottuna, havainnekuva Kaupunkisuunnitteluvirasto.

Alueelle on suunniteltu mm. rantapuisto, venesatama ja vesiurheilukeskus. Alueen läpi kulkevat raitiovaunut, joidenka kääntöraide on avoimessa kohdassa eteläpäässä.

Tarkastelussa viitesuunnitelmassa on korkeita rakennuksia alueen pohjoisosassa sekä helikopterikenttä terminaaleineen (kuva 2) alueen kaakkoisosassa. Ympäristöään selvästi korkeampia rakennuksia on kolme, ja niiden korkeus on tarkastellussa viitesuunnitelmassa noin 77 m.

Helikopterikenttä on suojattu meluaidalla etelän suuntaan leviävälle melulle. Meluaidasta on tehtävä korkea, ja se saattaa vaikuttaa laskeutumistason turbulenssiolosuhteisiin vallitsevilla etelän- ja lounaan välisillä tuulilla.

Tuulisuusolosuhteet tiedetään pääosin viereisen Jätkäsaaren vastaavasta tutkimuksesta [1]. Kuten Jätkäsaarella, Hernesaarella ainoastaan rakennukset, aidat ja istutukset antavat tuulensuojaa. Satama-altaan tuulisuutta vesiurheilukeskus-toiminnon (erityisesti jollapurjehduksen) kannalta on käsitelty aikaisemmin lausunnossa [2]. Viitesuunnitelma on kuitenkin muuttunut em. lausunnon aikaisesta mm. risteilylaiturin sijainnin osalta.

Tuulisuuskartoituksen tavoitteena on selvittää tarkemmin Hernesaaren suunnittelukysymysten tuulisuusvaikutuksia:

- miten suunnitellut korkeat rakennukset vaikuttavat tuulisuuteen
- kuinka helikopterikentän meluaita vaikuttaa kentän turbulenssiolosuhteisiin
- kuinka useasti epämukavuutta tai vaaraa aiheuttavia tuulia esiintyy
- kuinka tuulisuus vaikuttaa vesiurheilukeskuksen toimintoihin.



Kuva 2: Helikopterikenttä (kuva kaupunkisuunnitteluvirasto).

1.2 Tämä raportti

Tässä raportissa esitetään Hernesaaren osayliskaavan viitesuunnitelmalle laadittu tuulisuuskartoitus, sen tulokset ja tulosten ohjeellinen tulkinta. Tuulisuuskartoitus perustuu viitesuunnitelmaan (suunnitelman versio lokakuu 2011), suunnitelmaa varten suoritettuun tuulitunnelikokeeseen sekä lähialueen tuulitilastoihin.

1.3 Menetelmän yleiskuvaus

1.3.1 Tuulisuuskartoitus

Tuulisuuskartoituksen menetelmä tuulisuuskriteereineen ja tuulitilastoineen vastaa Konsultin Jätkäsaaren [1] tutkimuksessa käyttämää.

Tuulitunnelina on käytetty rajakerros-tuulitunnelia, joka on suunniteltu luonnon tuulien simulointiin. Tuulitilastona on käytetty paikallista tuulitilastoa, joka kattaa jatkuvat mittaukset noin vuosikymmenen ajalta. Tuulitilaston lukemat on muunnettu maaston karheusluokan muutos-analyysin avulla kohdealueen lukemiksi.

Menetelmässä tuulisuus määritetään valituissa katutasen pisteissä. Tuulisuuden määrittämisspisteet (mittauspisteet) on sijoitettu tarkasteltavan suunnitelman kannalta kuvaaviin ja merkityksellisiin pisteisiin.

Arvioitaessa tuulisuuden merkitystä tuloksia on verrattu useampaan kirjallisuudessa esitettyyn tuulisuuden kriteeriin. Näitä on sovellettu Suomen oloihin ottaen huomioon talvikauden vaikutus.

Tuulisuuskriteerit koostuvat yleisesti kahdesta osasta [3]:

- rajatuulennopeus v_c : tuulennopeuden raja-arvo jolla jokin toiminto muuttuu epämukavaksi tai vaaralliseksi
- ylitystodennäköisyys P_E : kuinka pitkän ajan raja-tuulennopeus ylittyy tarkastelujaksolla. Esim. vuotuinen ylitystodennäköisyys $P_E = 0,001$ (= 0,1%) tarkoittaa, että raja-tuulennopeus ylittyy keskimäärin 8,75 tuntia vuodessa.

Tarkasteltavia toimintoja ovat esim. pitkä-aikainen paikoillaan olo; paikoillaan olo; kävely; ja ”tavoitteellinen” kävely (kun on vain päästävä myrkyssä eteenpäin viihtyvyydestä välittämättä).

Rajatuulennopeuksia määritellään yleisesti keskinopeuden vaikutuksen perusteella (esim. bofori-asteikko) tai paikalliset vaikutukset tarkemmin kuvaavan puuskanopeuden perusteella. Rajatuulennopeus on yleisesti jokin seuraavista:

- $v_c \sim v_h$ = tuulen keskinopeus (10 min tai 1 h keskiarvo)
- $v_c \sim v_{ekv}$ = tuulen mitatun puuskanopeuden perusteella laskettu ekvivalentti keskinopeus
- $v_c \sim v$ = tuulen todellinen puuskanopeus esim. 1 s tai 3 s keskiarvo
- $v_c \sim v_g$ = puuskatuulen vertailunopeus, joka lasketaan muodossa

$$v_g = v_h + g v_{rms} = v_h(1 + gI)$$

missä

g = kriteeristä riippuva kerroin $g = 1 \dots 3,5$

v_{rms} = nopeuden keskihajonta (kirjallisuudessa yleensä r.m.s. nopeus)

I = turbulenssiaste tai turbulenssin intensiteetti laskettuna kaavalla $I = v/V_h$

Tässä tutkimuksessa on käytetty rajatuulennopeuskriteereitä:

- v_h = tunnin aika-keskiarvo

- v_g = puuskatuulen vertailunopeus, $g = 3,5$.

Tällöin puuskatuulen vertailupuuskanopeus vastaa likimain todellista puuskanopeutta luonnossa ($v_g \approx v$). Turbulenssiaste vastaa likimain luonnon tuulen pituussuuntaista turbulenssin intensiteettiä ($I \approx I_v$).

Tässä raportissa on käytetty puuskatuulen vertailunopeudesta yleisesti nimityksiä "puuskanopeus" ja "puuskatuuli".

Tuulisuuskriteerin tulokset on esitetty tiettyä toimintoa vastaavalla v_c :n arvoilla mittauspisteittäin. Esitystapa on matemaattisesti eksakti. Johtopäätösten tekemiseksi käytetään kriteerikohtaista "subjektiivista" tulkintaa siitä, mikä on hyväksyttävä tai ei-hyväksyttävä arvo.

1.3.2 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet

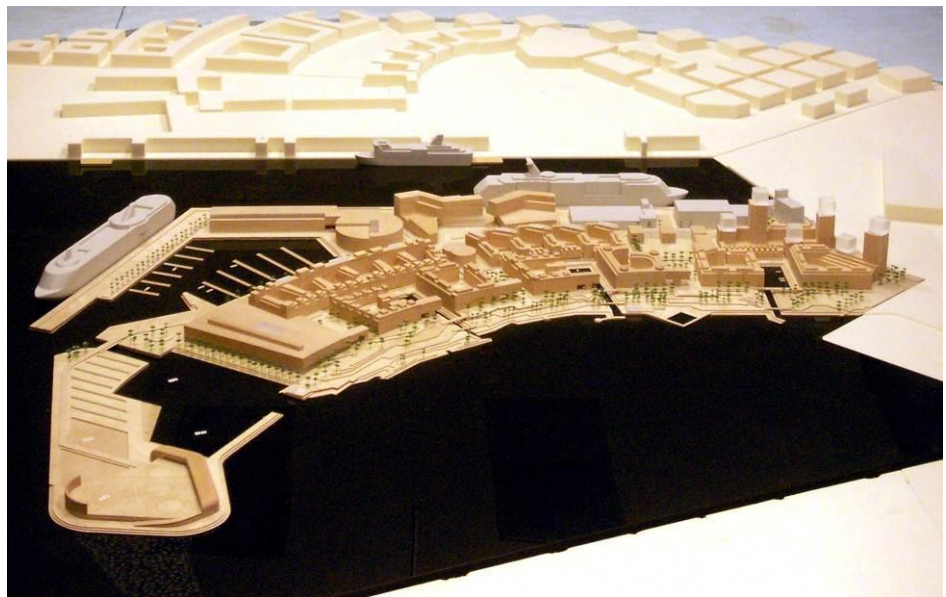
Helikopterikentän tuulisuusolosuhteita on arvioitu lähteen [4] mukaisesti. Pystysuuntaisen tuulennopeuden keskihajonta $v_{z,rms}$ tulisi olla pienempi kuin 1,75 m/s. Muussa tapauksessa turbulenssiolosuhteet ovat epäedulliset laskeutumiselle. Lähde tyypiltään suunnitteluohje. Se on laadittu pääasiassa meritekniiikan rakenteiden tarpeisiin, ja julkaistu Ison-Britannian siviili-ilmailun standardeista vastaavan organisaation toimesta. Lähteellä ei siten ilmeisimmin ole Suomen siviili-ilmailussa luokiteltua asemaa. Ohjeessa mainitut muut kriteerit kuin turbulenssi (kuumien pakokaasujen vaikutus ja laskeutumisalustan liike) on oletettu tarkasteltavassa tapauksessa merkityksettömiksi.

Pystysuuntaisen tuulennopeuden keskihajonta $v_{z,rms}$ voidaan periaatteessa mitata suoraan tuulitunnelikokeella, käyttäen tarkoitusta varten suunniteltua 3-komponenttista kuumalanka-anemometrilaitteistoa. Tässä raportissa on kuitenkin käytetty hyväksi teoreettista yhteyttä, jonka mukaan lähellä maanpintaa $v_{z,rms} = 0,55 v_{rms}$, missä v_{rms} on kohdan 1.3.1 mukainen (vaakasuuntaisen) tuulennopeuden keskihajonta. Vaakasuuntaisen tuulennopeuden keskihajonnan perusteella lausuttuna kriteerin raja-arvoksi saadaan $v_{rms} = 3,2$ m/s.

2 Lähtötiedot

2.1 Pienoismalli

Tuulitunnelikokeiden pienoismallina on käytetty Tilaajan toimittamaa pienoismallia 1:1000. Pienoismallissa on mallinnettu tarkasti kohdealue siten, että risteilylaiturissa on kaksi suurempaa laivaa. Puut on mallinnettu neula- maisilla yksityiskohdilla. Tuulitunnelikoetta varten Konsultti on mallintanut erikseen viereisten alueiden rakennuksia. Yleiskuva tuulitunnelikokeen pienoismallista on esitetty kuvassa 3.



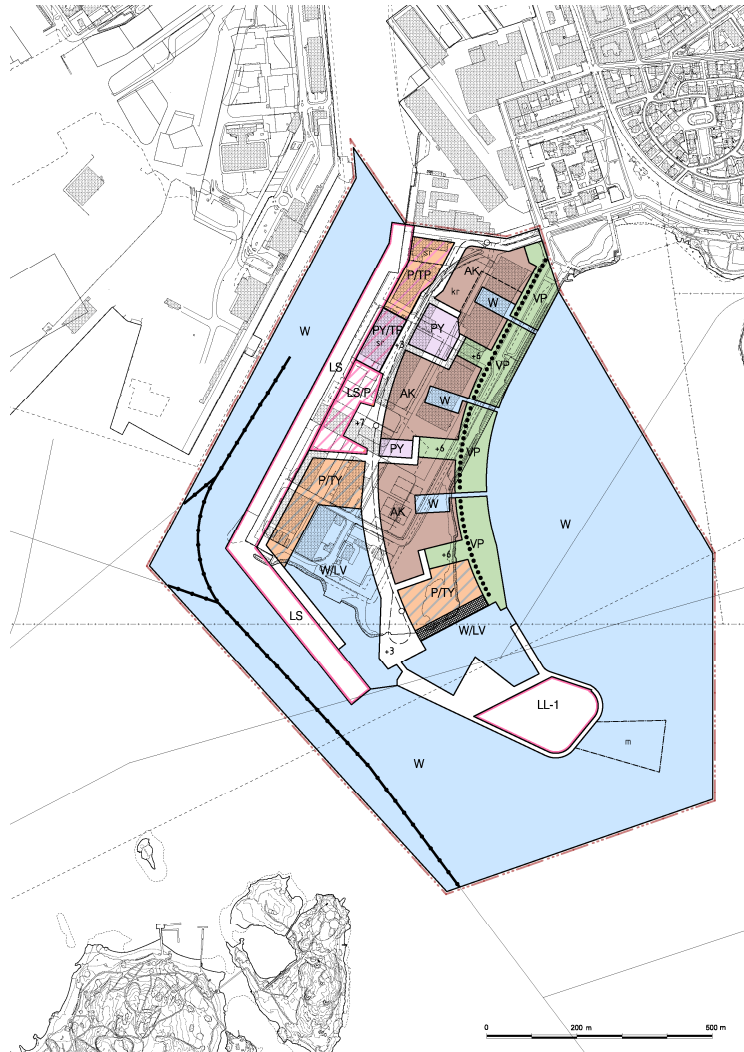
Kuva 3: Tuulitunnelikokeen pienoismalli.

2.2 Alueiden suunniteltu käyttö ja rakennukset

Tarkasteltu osayleiskaavaluonnos on esitetty kuvassa 4. Alueelle sijoittuu erityyppisiä toimintoja, mm.

- asuinkylät 5000 asukkaalle (AK)
- julkiset palveluiden yms. alueet, 3000 työpaikkaa (P/TY)
- itäosan rantapuisto (VP)
- venesatama, risteilylaiturin vieressä (W/LV)
- vesiurheilukeskus (W/LV, P/TY)
- risteilysatama ja –laituri (LS/P, LS)
- helikopterikenttä (LL-1).

Tarkastelussa viitesuunnitelmassa on ympäristöään korkeampia rakennuksia alueen pohjois-osassa (vrt. kuva 3).



Kuva 4: Kohdealueen osayleiskaavaluonnos.

2.3 Tuulitilasto

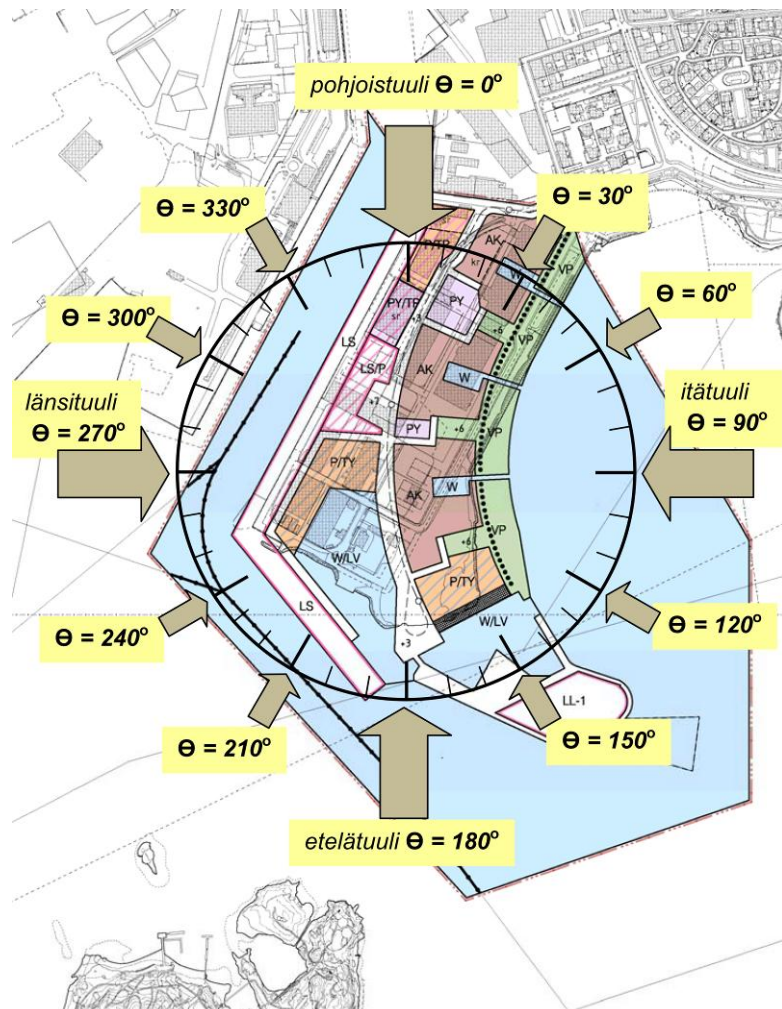
Tuulitilastona on käytetty Lapinlahden sillan sääaseman mittaustuloksia, jotka kattavat jatkuvat mittaukset 13 v. ajalta (1992...2004). Tuulitilaston mittauskorkeus on 22 m. Tilasto on sama kuin Jätkäsaaren tuulisuuskartoituksessa [1] käytetty.

Tuulitilaston mittauspiste sijaitsee kohdealueesta n. 2 kilometriä luoteeseen. Sijainnin vaikutus on otettu huomioon laskennallisesti liitteen 1 mukaisesti.

Tuulitilasto kattaa tarkasti tuulen suuntien vaikutukset ja tuulisuuden muutokset eri kuukausina. Se kattaa myös merituuli-ilmion (maa-merituuli ja merituuli-maatuuli), jolla on vaikutusta rannikolla.

2.4 Tuulen suuntakulman koordinaatisto

Tuulen suuntakulman koordinaatisto ja tuulitunnelikokeessa käytetyt tuulensuunnat on esitetty kuvassa 5.



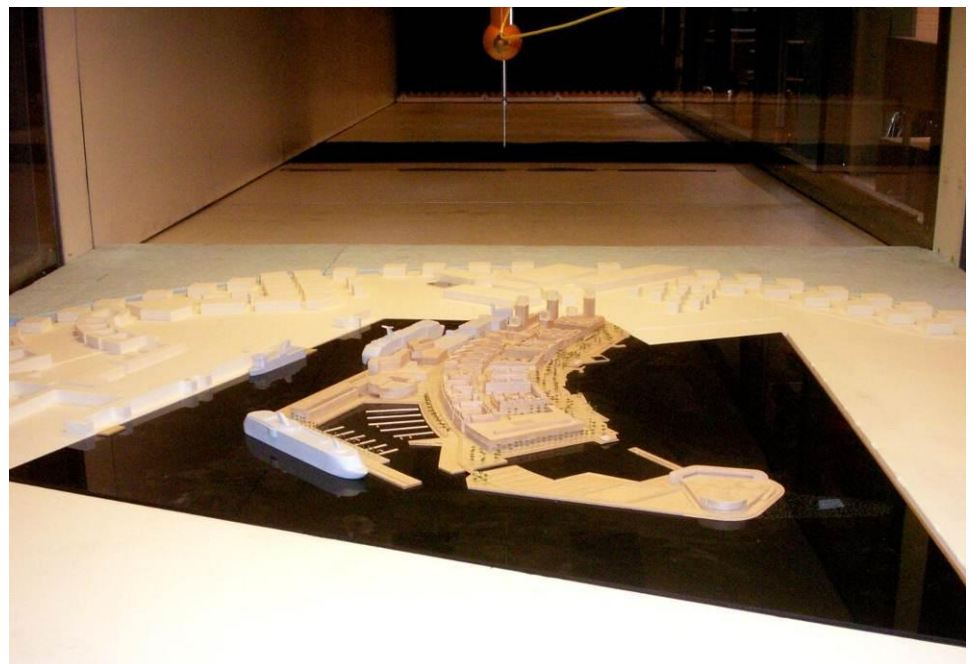
Kuva 5: Tuulensuuntien koordinaatisto: tuulitunnelikokeessa käytetyt tuulensuunnat (tuulensuunnat 30° välein) on esitetty nuolilla ja numeroilla.

3 Tuulitunnelikoe

3.1 Koejärjestely

Kokeet on suoritettu Aalto-yliopiston tuulitunnelissa Espoossa. Yleiskuva koejärjestelystä on esitetty kuvassa 6. Tuulitunneli on tyypiltään rajakerros-tuulitunneli ja suunniteltu luonnon tuulien simuloitiin. Kokeen kannalta tärkeät ominaisuudet ovat:

- mittatila $2,5 \times 1,5 \text{ m}^2$
- rajakerroksen simulointiin käytettävissä oleva matka 10 m.

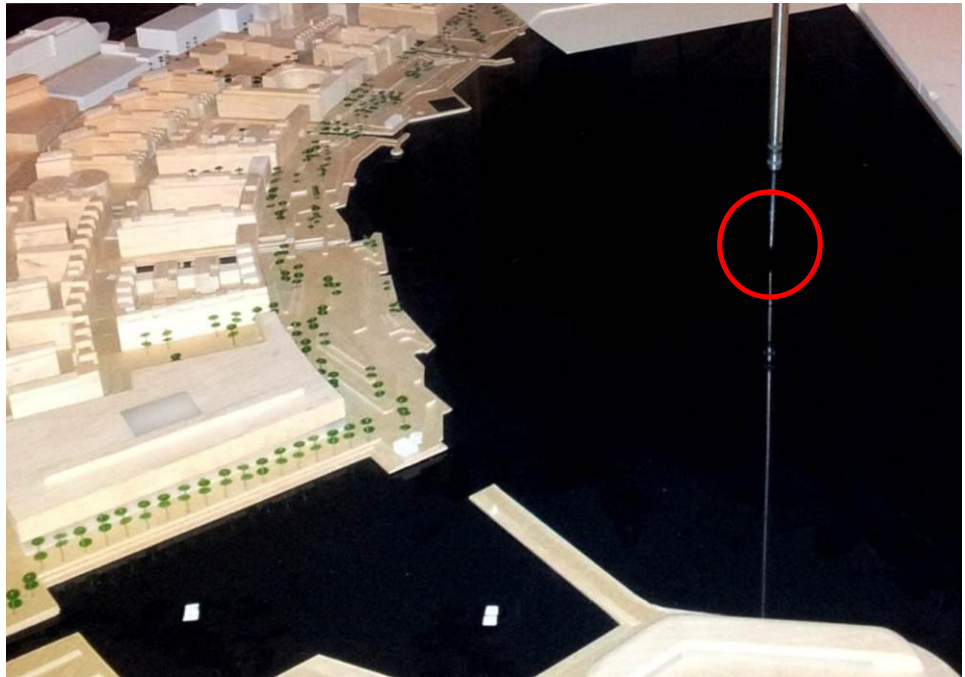


Kuva 6: Yleiskuva koejärjestelystä.

Luonnon tuulien simuloinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että pienoismallin kohtaava virtaus vastaa nopeuden korkeusprofiiltaan ja turbulenssiltaan kohteessa esiintyvää luonnon tuulta.

Koetyypissä pienoismallilla tarkasti mallinnettu osa simuloi kiinnostuksen kohteena olevan paikallisen turbulenssin. Pienoismallin reunalle on lisätty sovituspalat siten, että pienoismallin reunat eivät aiheuta häiriötä virtaukseen. Pienoismalli on tasossa kiekon muotoinen, halkaisijaltaan 2,4 m, ja sijoitettu mittatilan kääntöpöydälle. Eri tuulensuunnat mitataan pyörittämällä mallia kääntöpöydän avulla.

Mittaukset on suoritettu kuumalanka-anemometrillä mallin yläpuolelta käsin (kuva 7). Mittauskorkeus on 5 mm alapuolisen pinnan yläpuolelta, mikä vastaa täydessä mittakaavassa 5,0 m. Tulokset on muunnettu muunnoskertoimien avulla tarkastelutasoa 2,0 m vastaavaan korkeuteen (liite 1).

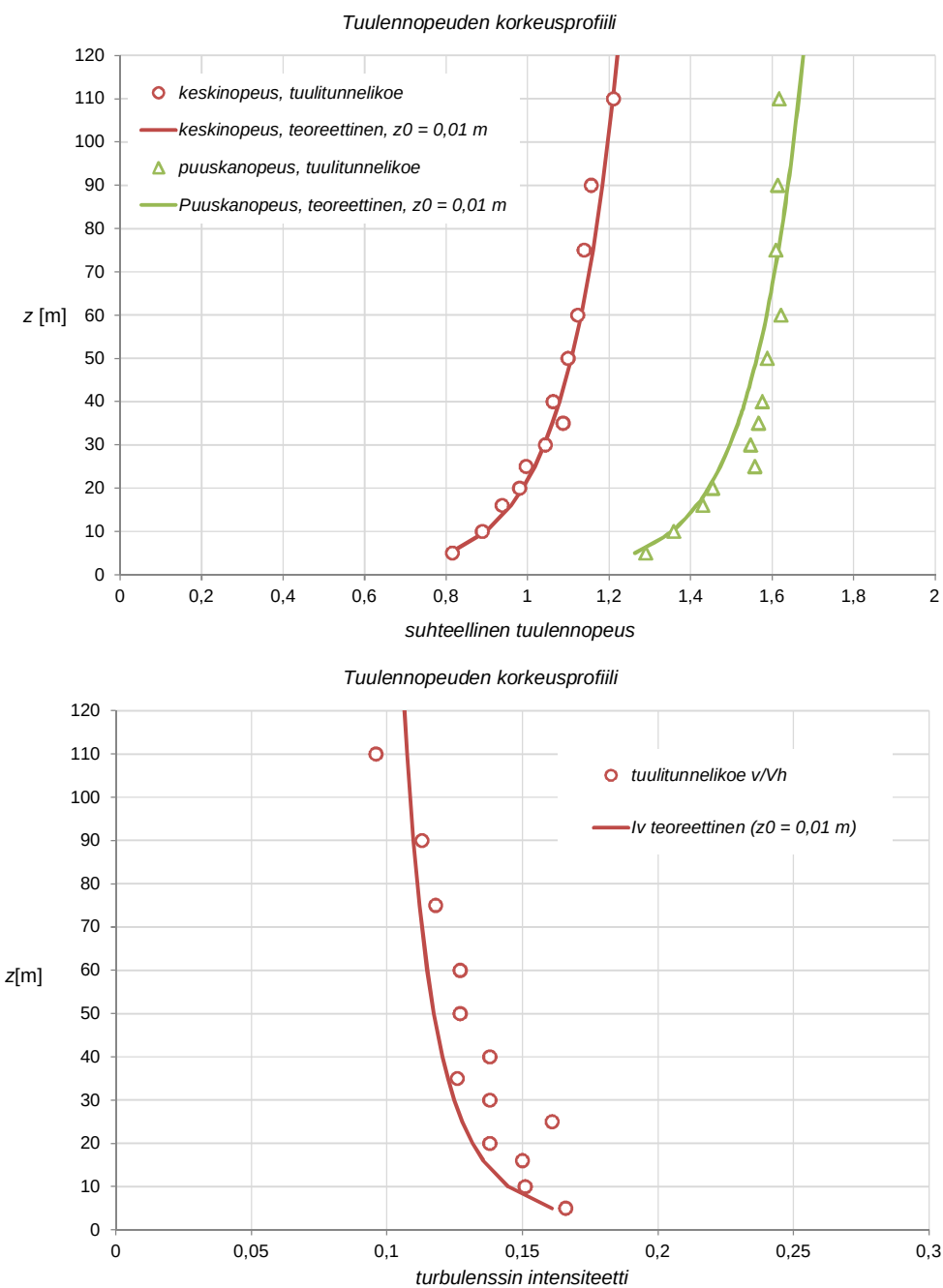


Kuva 7: Kuumalanka-anemometri (ympyröity kuvassa).

Näytteenottotaajuus = 1 kHz (1000 mittausta sekunnissa), tulokset on suodatettu 460 Hz alipäästösuodatuksella ja mittausaika yhtä pistettä ja tuulen kulmaa kohden = 30 s. Käytetty suuri näytteenottotaajuus takaa sen, että turbulenssin pienet pyörteet tulevat mitatuksi, ja tulokset vastaavat tältä osin luonnon tuulta.

Ennen varsinaisia mittauksia tulovirtauksen rajakerros on säädetty halutuksi lattian ja virtauksen sisään tulon karhennuselementeillä. Tuulen turbulenssiolosuhteet tarkastelualueen reunoilla on oletettu noudattavan standardimaastokuokan $z_0 = 0,01$ m olosuhteita, missä z_0 = maaston karheusparametri (SFS-EN1991-1-4:2005 maastoluokka I [5]).

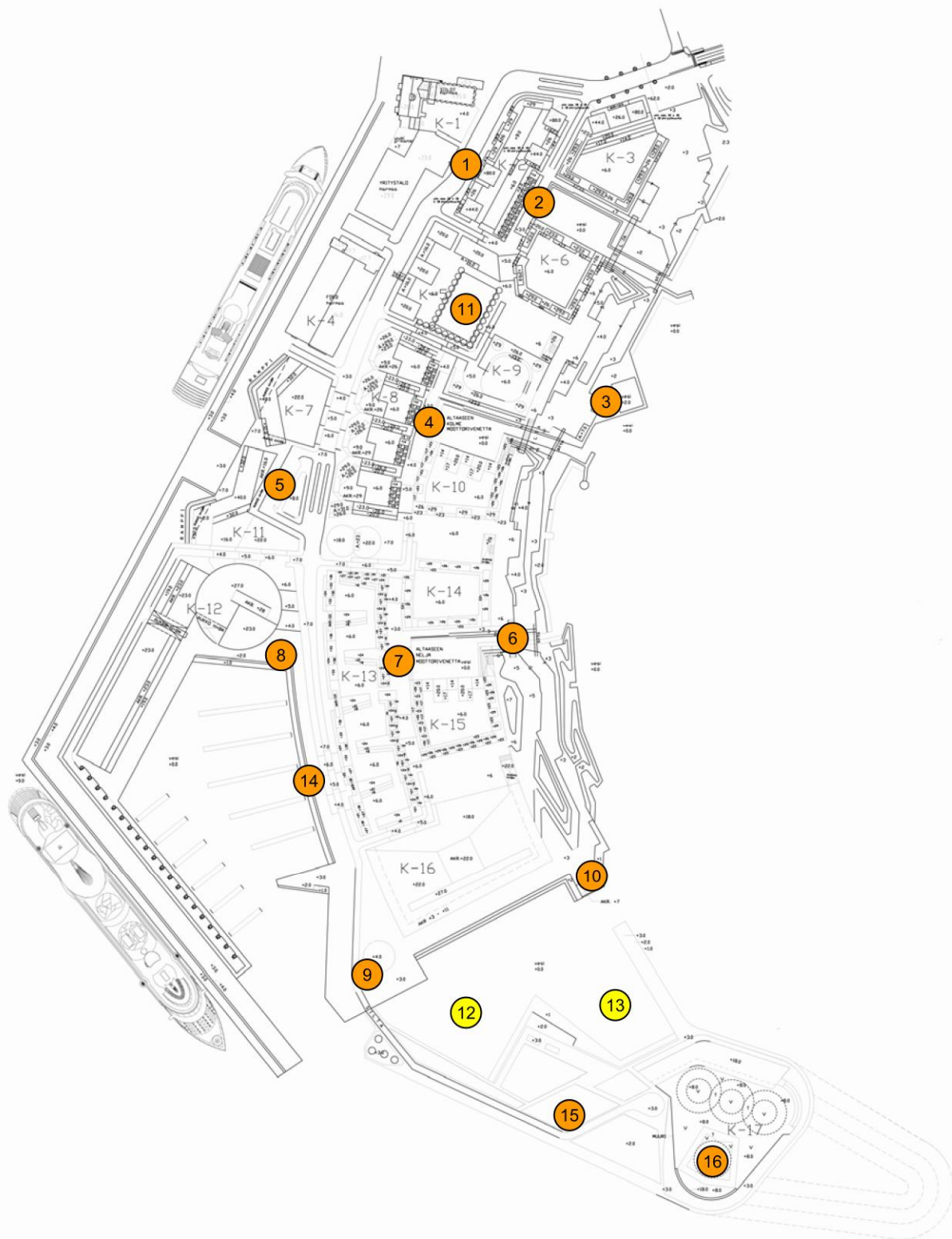
Tulovirtauksen mitatut ja tavoitteelliset turbulenssiparametrit on esitetty kuvassa 8. Tuulennopeudet on esitetty suhteessa 22 m korkeudessa mitattuun tuulen keskinopeuteen $V_{h,ref}$. Tässä 22 m korkeus on sama kuin tuulitilaston mittauskorkeus.



Kuva 8: Tulovirtauksen korkeusprofiili ja turbulenssin intensiteetti tuulitunnelikokeessa (korkeus z todellista kohdetta vastaten).

3.2 Mittauspisteet

Mittauspisteet on esitetty kuvassa 9. Mittauspisteet on valittu suunnitelman kannalta mielenkiintoisiin pisteisiin.



Kuva 9: Mittauspisteet ja niiden numerointi. Pisteet 12 ja 13 sijaitsevat satama-altaassa meren päällä. Helikopterikentän mittauspisteet sijaitsevat pisteen 16 kohdalla, korkeuksilla: piste 16, 10 m; piste 17, 20 m; piste 18, 30 m; piste 19, 40 m; ja piste 20, 50 m.

3.3 Tuulitunnelikokeen tulokset

Tuulitunnelikokeen tuloksena saadaan suhteellisia virtausnopeuksia; mittauspisteen ja tulovirtauksen referenssipisteen virtausnopeuden suhteena. Referenssipisteenä on käytetty virtauksen yläpuolella avoimessa maastossa sijaitsevaa pistettä, joka on 22 m korkeudessa täydessä mittakaavassa.

Tulokset on esitetty taulukoissa 1...3. Maksimeita on havainnollistettu kuvissa 10 ja 11.

Tulokset pisteille 1...15 koskevat 5,0 m korkeutta täydessä mittakaavassa. Muunnos katutasen tuulisuuden tarkastelutasoon 2,0 m on esitetty mittauspisteittäin ja tuulen suunnittain liitteessä 1.

Kuvassa 12 on havainnollistettu tuulen suunnan merkitystä yksittäisissä mitauspisteissä.

Taulukko 1: Suhteellinen keskituuli (mittauspisteen keskituuli jaettuna referenssipisteen keskituulella)

Suhteellinen keskituuli $v_{h,5\text{ m}}/v_{\text{ref}, 22\text{ m}}$

Piste	Tuulen suuntakulma (°)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	0,55	0,77	0,56	0,35	0,19	0,57	0,59	0,44	0,52	0,56	0,26	0,54
2	0,56	0,34	0,54	0,56	0,51	0,48	0,26	0,28	0,29	0,35	0,60	0,63
3	0,53	0,66	0,65	0,66	0,73	0,81	0,62	0,57	0,35	0,37	0,25	0,20
4	0,22	0,37	0,26	0,40	0,34	0,25	0,31	0,21	0,15	0,17	0,29	0,25
5	0,20	0,26	0,33	0,28	0,28	0,42	0,41	0,25	0,35	0,19	0,22	0,20
6	0,45	0,63	0,68	0,68	0,66	0,63	0,36	0,35	0,41	0,56	0,33	0,26
7	0,26	0,25	0,40	0,39	0,24	0,29	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,45
8	0,51	0,46	0,59	0,20	0,54	0,54	0,74	0,75	0,71	0,44	0,35	0,38
9	0,62	0,24	0,62	0,79	0,82	0,65	0,70	0,81	0,51	0,95	0,70	0,64
10	0,69	0,87	0,98	0,79	0,74	0,74	0,52	0,85	0,67	0,52	0,32	0,55
11	0,26	0,18	0,30	0,39	0,27	0,24	0,25	0,17	0,21	0,33	0,50	0,47
12	0,42	0,46	0,88	0,84	0,70	0,57	0,66	0,71	0,69	0,78	0,33	0,22
13	0,76	0,77	0,73	0,73	0,71	0,58	0,76	0,77	0,81	0,86	0,53	0,56
14	0,49	0,56	0,21	0,26	0,61	0,48	0,69	0,70	0,58	0,40	0,44	0,39
15	0,73	0,76	0,69	0,68	0,66	0,77	0,84	0,82	0,86	0,65	0,67	0,66
16	0,77	0,83	0,95	1,00	1,05	0,39	0,35	0,37	0,65	0,96	0,77	0,73
17	0,98	0,95	1,06	1,11	1,12	1,06	0,90	0,92	1,21	1,02	0,87	0,82
18	1,06	1,02	1,13	1,14	1,13	1,16	1,22	1,21	1,28	1,05	0,93	0,90
19	1,12	1,08	1,16	1,16	1,15	1,18	1,22	1,20	1,24	1,11	0,97	1,00
20	1,19	1,14	1,20	1,18	1,17	1,17	1,21	1,21	1,25	1,14	1,03	1,05

Taulukko 2: Suhteellinen puuskatuuli (mittauspisteen puuskatuuli jaettuna referenssipisteen keskituulella)

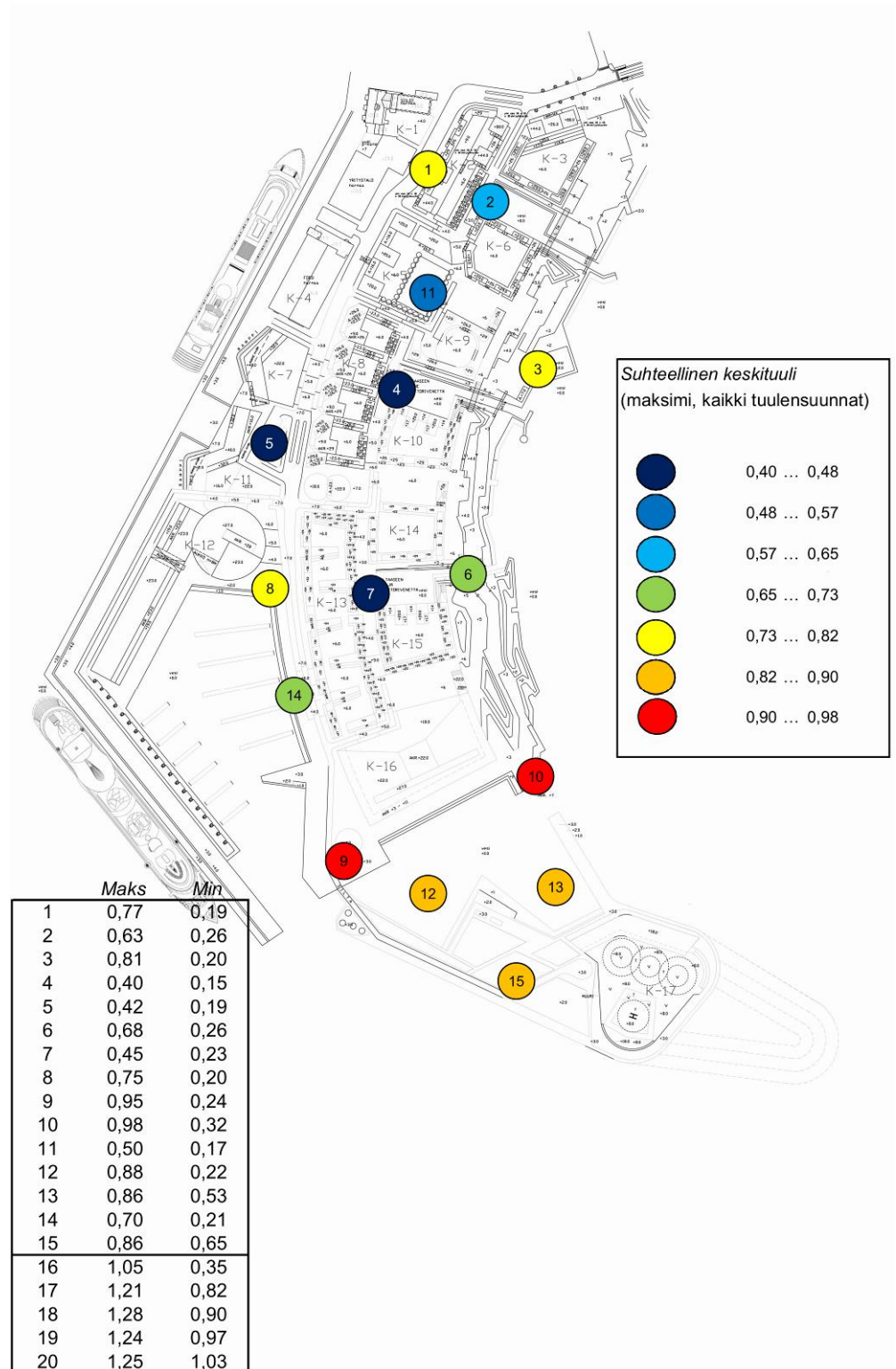
Suhteellinen puuskatuuli $v_{g,5\text{ m}}/v_{\text{ref}, 22\text{ m}}$

Piste	Tuulen suuntakulma (°)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	1,04	1,33	1,10	0,74	0,50	1,12	1,18	0,88	1,00	1,17	0,67	1,06
2	1,19	0,88	1,12	1,18	1,00	1,06	0,65	0,74	0,67	0,92	1,23	1,50
3	1,02	1,17	1,17	1,16	1,27	1,35	1,17	1,18	0,86	0,94	0,73	0,56
4	0,55	0,87	0,68	0,92	0,78	0,64	0,86	0,58	0,41	0,47	0,75	0,67
5	0,57	0,70	0,87	0,72	0,81	0,97	0,98	0,67	0,92	0,51	0,61	0,57
6	0,85	1,08	1,19	1,21	1,17	1,21	0,87	0,94	1,14	1,19	0,92	0,70
7	0,58	0,52	0,80	1,00	0,47	0,54	0,40	0,42	0,44	0,55	0,70	0,98
8	1,12	0,95	1,19	0,52	1,08	0,99	1,23	1,38	1,30	1,04	1,01	0,83
9	1,19	0,63	1,11	1,23	1,35	1,13	1,26	1,35	1,22	1,58	1,28	1,23
10	1,15	1,39	1,51	1,29	1,27	1,43	1,39	1,62	1,46	1,22	0,83	1,07
11	0,72	0,54	0,75	0,94	0,69	0,63	0,59	0,48	0,58	0,83	1,25	1,15
12	0,97	1,05	1,35	1,33	1,38	1,10	1,22	1,27	1,24	1,52	0,87	0,63
13	1,27	1,34	1,32	1,29	1,24	1,25	1,29	1,29	1,29	1,43	1,13	1,09
14	1,01	1,01	0,49	0,62	1,22	0,92	1,21	1,29	1,31	1,00	1,06	0,89
15	1,26	1,33	1,24	1,18	1,18	1,31	1,39	1,37	1,38	1,23	1,31	1,22
16	1,47	1,40	1,53	1,53	1,63	1,02	0,92	0,95	1,45	1,64	1,39	1,35
17	1,55	1,44	1,57	1,62	1,68	1,81	1,93	1,92	1,81	1,71	1,54	1,43
18	1,60	1,54	1,63	1,63	1,67	1,73	1,78	1,75	1,77	1,85	1,64	1,56
19	1,67	1,63	1,65	1,66	1,66	1,71	1,76	1,74	1,76	1,88	1,67	1,64
20	1,77	1,67	1,71	1,69	1,67	1,69	1,74	1,70	1,74	1,95	1,74	1,71

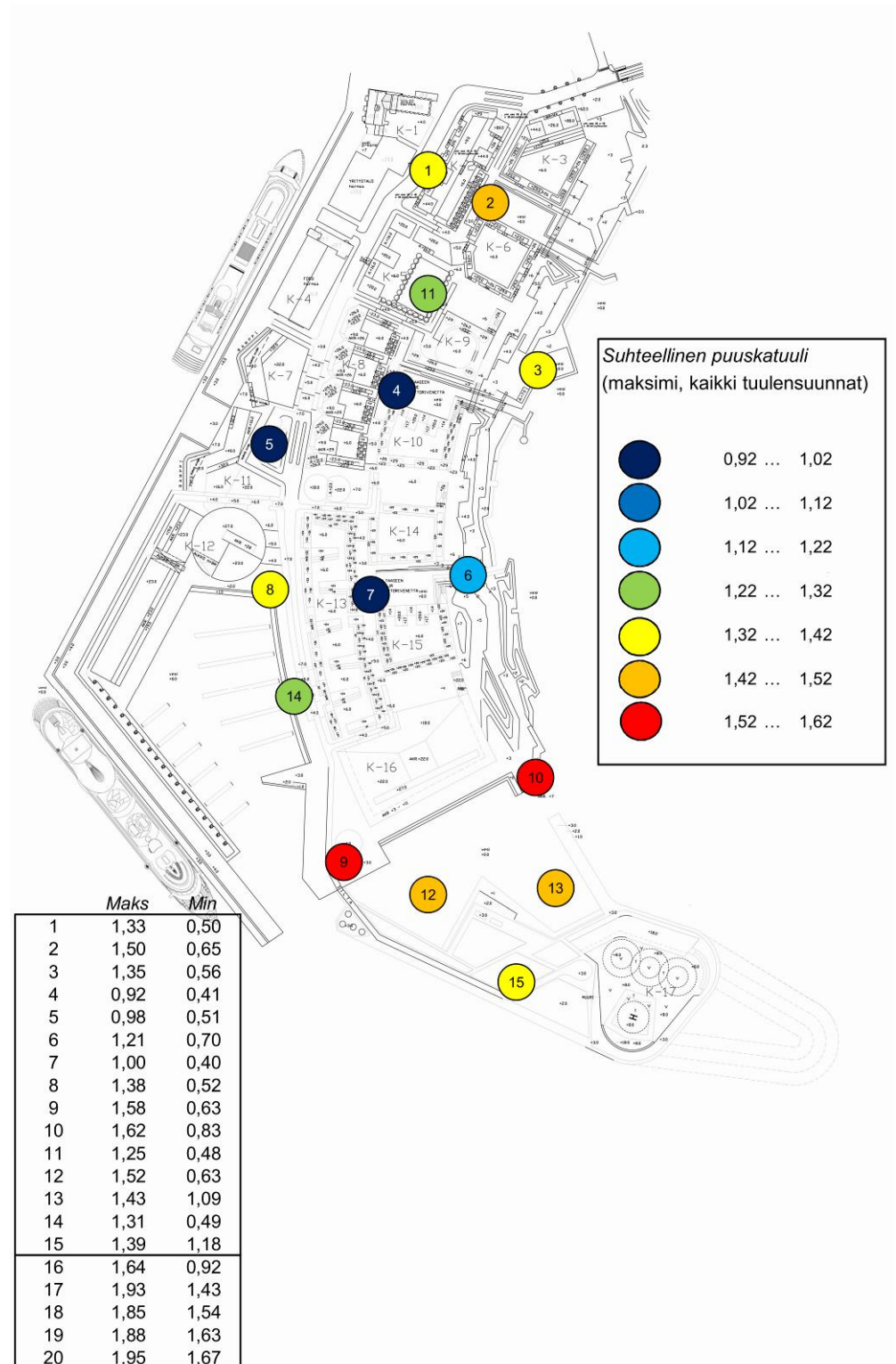
Taulukko 3: Turbulenssin intensiteetti v_{rms}/v_h

Tuulen heilahtelunopeuden vaakakomponentin turbulenssin intensiteetti v_{rms}/v_h , 5 m

Piste	Tuulen suuntakulma (°)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	0,25	0,21	0,28	0,32	0,47	0,28	0,28	0,29	0,26	0,31	0,46	0,28
2	0,32	0,46	0,31	0,32	0,27	0,34	0,43	0,47	0,38	0,46	0,30	0,39
3	0,27	0,23	0,23	0,22	0,21	0,19	0,25	0,31	0,41	0,44	0,54	0,50
4	0,43	0,39	0,46	0,37	0,36	0,44	0,50	0,50	0,48	0,52	0,46	0,49
5	0,52	0,48	0,46	0,45	0,54	0,37	0,40	0,48	0,46	0,49	0,50	0,54
6	0,25	0,20	0,21	0,22	0,23	0,27	0,41	0,47	0,51	0,32	0,51	0,50
7	0,35	0,31	0,29	0,45	0,28	0,24	0,19	0,25	0,24	0,38	0,55	0,33
8	0,35	0,31	0,29	0,45	0,28	0,24	0,19	0,25	0,24	0,38	0,55	0,33
9	0,26	0,47	0,23	0,16	0,18	0,22	0,23	0,19	0,39	0,19	0,24	0,26
10	0,19	0,17	0,15	0,18	0,21	0,27	0,48	0,26	0,34	0,38	0,45	0,27
11	0,50	0,55	0,43	0,41	0,44	0,46	0,39	0,52	0,50	0,44	0,43	0,42
12	0,37	0,37	0,15	0,17	0,28	0,26	0,24	0,22	0,23	0,27	0,46	0,53
13	0,19	0,21	0,23	0,22	0,22	0,33	0,20	0,19	0,17	0,19	0,32	0,27
14	0,31	0,23	0,38	0,38	0,28	0,26	0,22	0,24	0,35	0,43	0,41	0,38
15	0,21	0,21	0,23	0,21	0,23	0,20	0,19	0,20	0,18	0,26	0,27	0,24
16	0,26	0,20	0,17	0,15	0,16	0,46	0,47	0,45	0,35	0,20	0,23	0,24
17	0,17	0,15	0,14	0,13	0,14	0,20	0,33	0,31	0,14	0,19	0,22	0,21
18	0,15	0,15	0,13	0,12	0,14	0,14	0,13	0,13	0,11	0,22	0,22	0,21
19	0,14	0,15	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,20	0,21	0,19
20	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,11	0,20	0,20	0,18

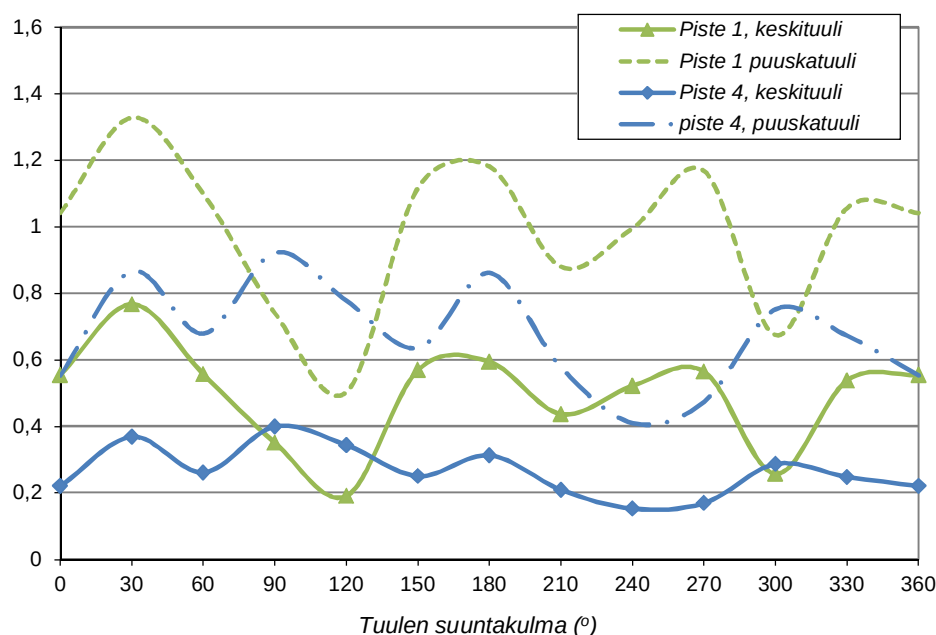


Kuva 10: Suhteellisen keskituulen maksimit (ja minimi) kaikki tuulensuunnat huomioon ottaen.



Kuva 11: Suhteellisen puuskatuulen maksimit (ja minimit) kaikki tuulensuunnat huomioon ottaen.

Suhteelliset tuulennopeudet pisteissä 1 ja 4



Kuva 12: Esimerkki tuulen suunnan vaikutuksesta: piste 1 (tornitalon vieressä) ja piste 4 (matalampien rakennusten suojassa).

3.4 Tuulitunnelikokeen virhetarkastelu

Tuulitunnelikokeelle pätee sama virhetarkastelu kuin Jätkäsaaren [1] tutkimuksessa.

Epävarmuuksia aiheuttaa erityisesti se, että mallin mittakaavasta johtuen mittaukset on tehty 5,0 m korkeutta vastaten siten, että tulokset muunnettu laskennallisesti 2,0 m tasoon. Muunnoskertoimen laskenta on pyritty tekemään tavanomaista tarkemmin pistekohtaisesti ja tuulen suunnittain (liite 1) siten, että avoimessa maastossa keskituulennopeuksien muunnos noudattaa tuulennopeuden korkeusprofiilia ja karheammassa maastossa muunnoskertoimen vaikutus häviää. Puuskatuulen osalta puuskatuulet on oletettu yhtä suuruisiksi 2,0 m ja 5,0 korkeuksilla, mikä on konservatiivinen otaksu-

ma. Koska pienoismallissa puita ja pensaita ei ole mallinnettu niin että ne vaikuttaisivat merkittävästi paikallisiin tuloksiin, voidaan tuloksia pitää konservatiivisina niiden pisteiden osalta, jotka todellisuudessa jäävät viherkasvillisuuden suojaan. Korkeiden rakennusten vieressä tuulisuus vaihtelee voimakkaasti pisteestä toiseen, jolloin käytetty 30° tuulensuunnan jako voi olla karkea siten, että kovimmat paikalliset virtaukset jäävät mittaamatta.

Muita vaikuttavia tekijöitä ovat mm.:

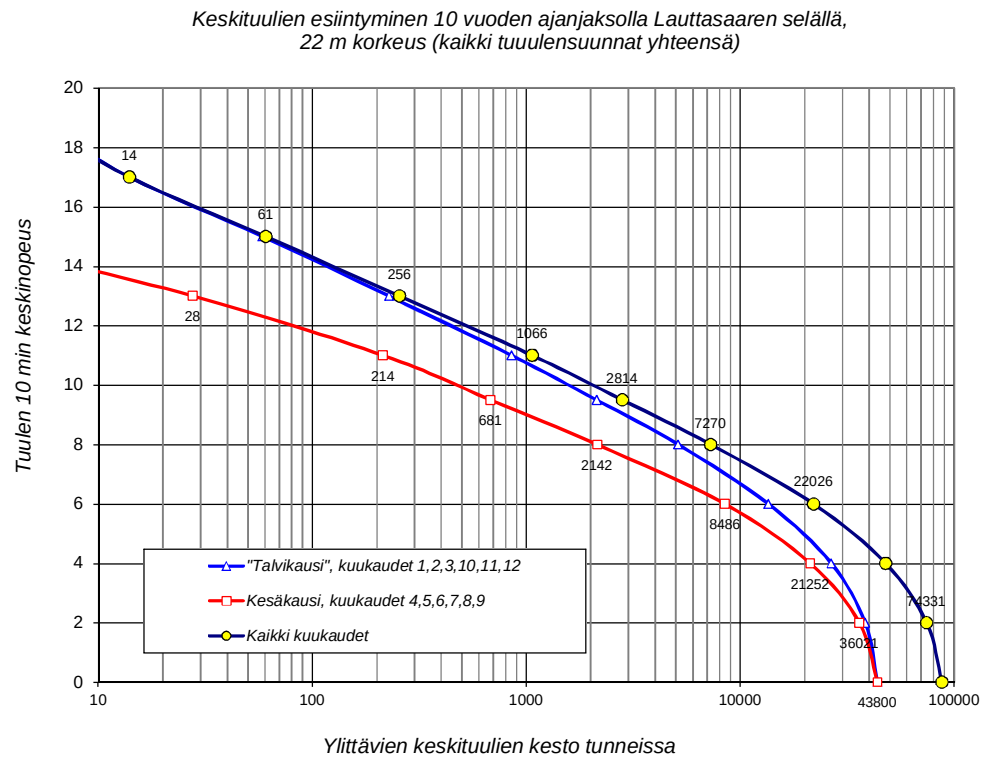
- tulovirtauksen turbulenssiolosuhteiden (vrt. kuva 8) ja todellisen reuna-alueen turbulenssiolosuhteiden erot, jotka vaikuttavat erityisesti suurempiin pyörteisiin ja turbulenssin mittakaavaan. Lähteen [1] koejärjestelyistä poiketen mittaukset on tehty yhdellä tulovirtauksen karheusluokalla, kun niitä lähteessä [1] on ollut kaksi ("maatuuli" ja "merituuli")

- pienoismallin tarkasti mallinnetun osan koko suhteessa mitta-alueeseen
- meren jäätyamisen vaikutus tai korkean aallokon vaikutus merituulten turbulenssiin (karheusparametriin) ja edelleen keskituuliin lähellä maanpintaa
- virtauksen pystykomponentin vaikutus kuumalanka-anemometrin tuloksiin
- mittausten näytteenottotaajuuden ja alipäästösuodatuksen vaikutus turbulenssin intensiteetin mitattuun arvoon.

Yhteenvetona voidaan todeta että tuulitunnelikokeet on suoritettu pääosin samalla menetelmällä kuin Jätkäsaaren tutkimuksessakin [1]: korkealaatuisella tuulitunnelilla ja mittauslaitteistoilla, ja yleisesti hyväksytyillä menetelmillä, joita on käytetty muissa vastaavissa tutkimuksissa kansainvälisesti. Tuulitunnelikokeiden tuloksille voidaan ehdottaa virhemarginaalia n. ± 10 % analyysin kannalta kiinnostavissa pisteissä, eli pisteissä jossa tuulen keskinopeus ei ole lähellä nollaa.

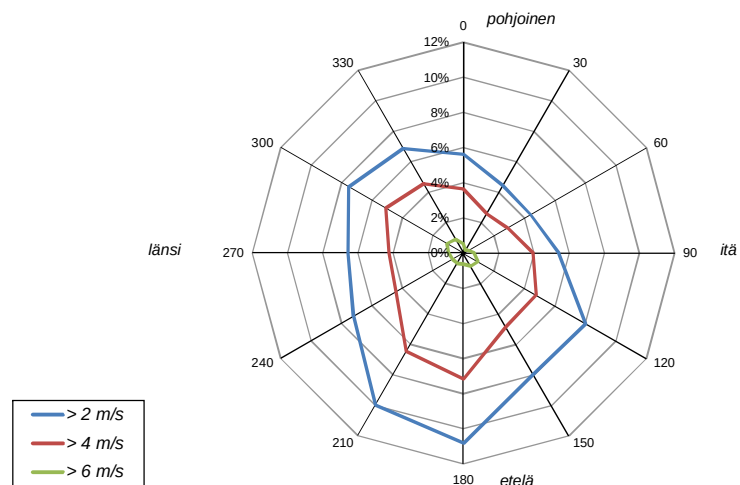
4 Tuulisuuskartoitus

Tuulisuuskartoitusta varten tuulitilastot lukemat on muunnettu laskennallisesti kohdealueen (tuulitunnelikokeen referenssipisteen) arvoiksi. Kertoimet on esitetty liitteessä 1. Kuvassa 13 on esitetty keskituulien esiintyminen Lauttasaaren selällä. Kuvan 13a mukaisesti kovat tuulet ovat kesäkaudella harvinaisempia kuin talvikaudella. Esimerkiksi 14 m/s keskituulia esiintyy kesäkaudella keskimäärin 1 h/v ja talvikaudella 10 h/v.

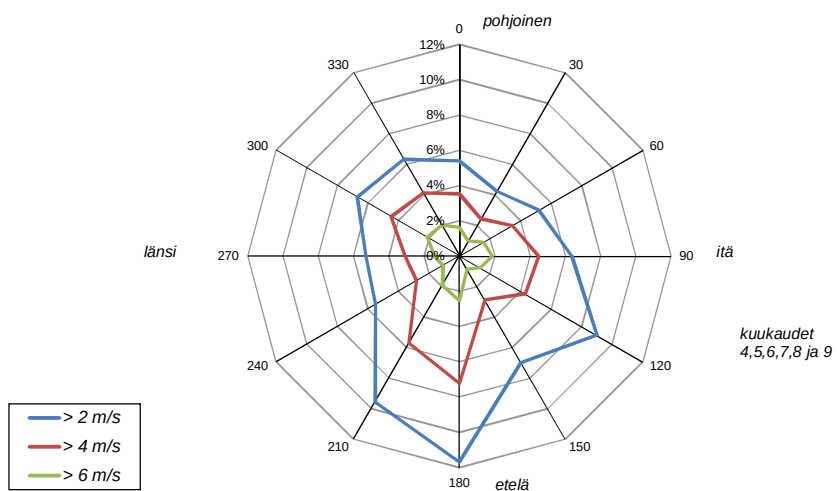


Kuva 13a: Keskituulien esiintyminen (kaikki tuulensuunnat) Lauttasaaren selällä 22 m korkeudessa [1].

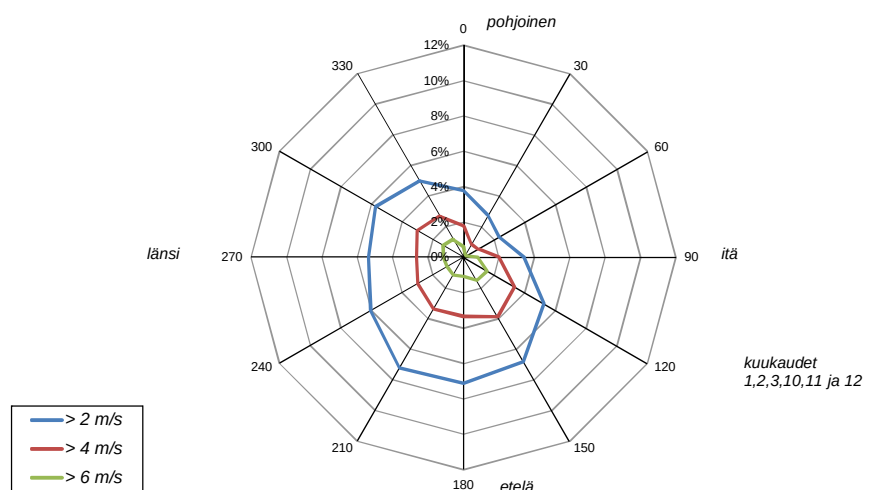
10 min keskituulien esiintyminen (z = 22 m, Lauttasaaren selkä): koko vuosi



10 min keskituulien suhteellinen kesto tuulen suunnittain: kääskausi



10 min keskituulien suhteellinen kesto tuulen suunnittain: talvikausi



Kuva 13b: Keskituulien esiintyminen tuulen suunnittain Lauttasaaren selällä 22 m korkeudessa [1].

4.1 Tulosten vertailukriteerit

Vertailukriteereinä on käytetty toiminnallisia luokkia [1,3]:

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

Näihin liittyviä hyväksymisluokkia ovat esim.:

- hyväksyttävä
- epäviihtyisä
- siedettävä
- sietämätön/vaarallinen, ei hyväksyttävä.

Tässä tutkimuksessa käytetyt raja-arvot perustuvat Melbournen esittämään malliin, joka perustuu kerran vuodessa esiintyvään puuskatuuleen. Tämä voidaan esittää vertailupuuskanopeuden kertoimen g arvolla 3,5 ja käyttäen keskituulena tunnin aikakeskiarvoa. Mallissa todennäköisyyden raja-arvo "kerran vuodessa" vastaan likimain vuotuista ylitystodennäköisyyttä

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

Tuulisuuskriteerit ovat:

- A: $v_g > 10 \text{ m/s}$; $P_E \geq 0,025 \%$ (epäviihtyisä)
- B: $v_g > 13 \text{ m/s}$; $P_E \geq 0,025 \%$ (epäviihtyisä)
- C: $v_g > 16 \text{ m/s}$; $P_E \geq 0,025 \%$ (epäviihtyisä)
- D: $v_g > 23 \text{ m/s}$; $P_E \geq 0,025 \%$ (vaarallinen)

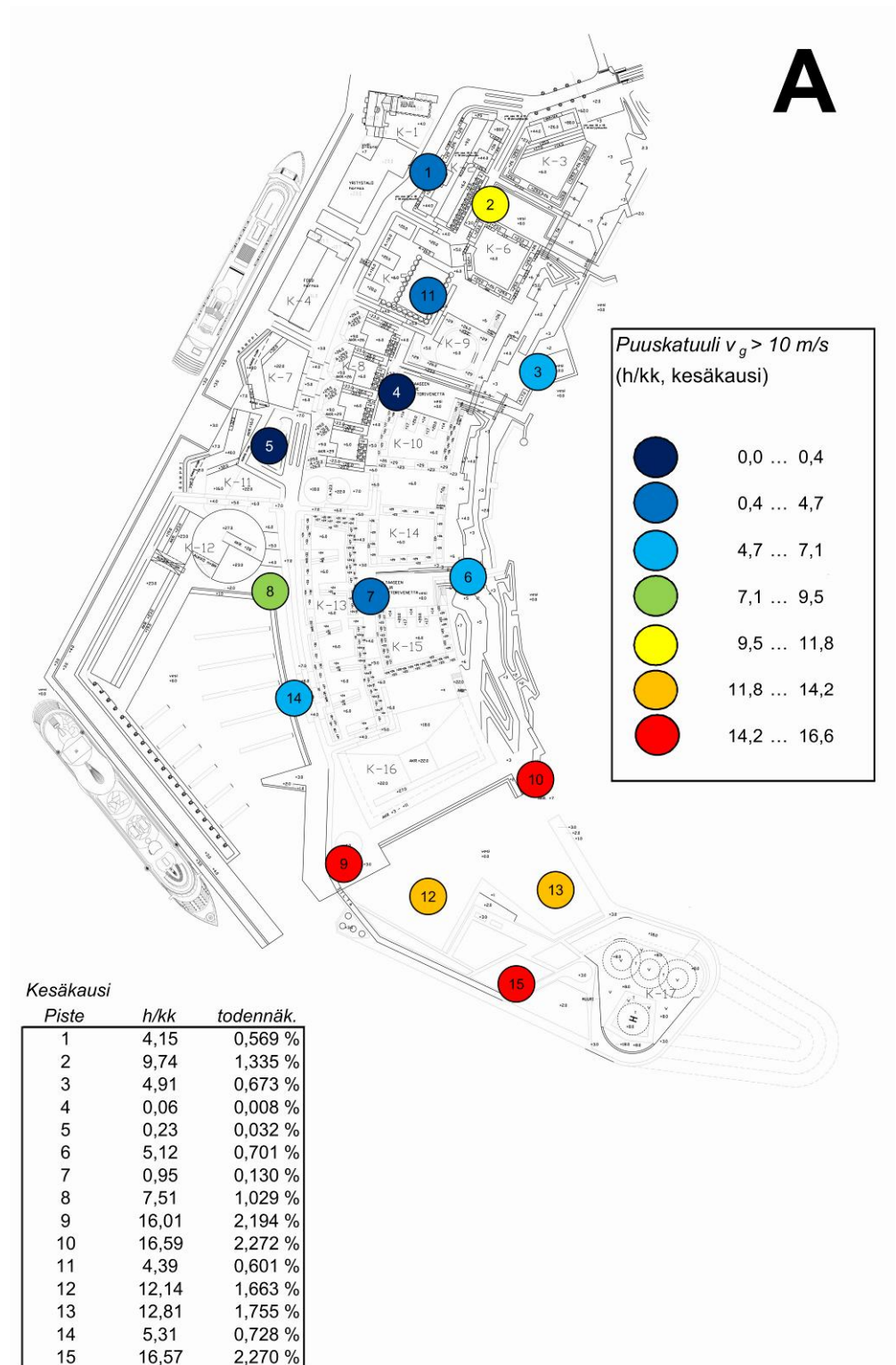
Kun kriteeri "ei täyty", tarkoittaa se, että tuulisuutta esiintyy siinä määrin ("liian monta tuntia tarkastelujaksolla"), että kriteerin mukainen toiminto on epäviihtyisää (luokat A, B, C), tai vaarallista (luokka D) tarkastelupisteessä.

Sovellettavissa olevia keskituuleen perustuvia malleja on esim. FORCE Technologyn malli [3], joka perustuu 1 h keskituuleen:

- A: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_E \leq 0,1 \%$ (hyväksyttävä)
- B: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_E \leq 6 \%$ (hyväksyttävä)
- C: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_E \leq 23 \%$ (hyväksyttävä)
- D: $v_h > 5 \text{ m/s}$; $P_E \leq 43 \%$ (hyväksyttävä).

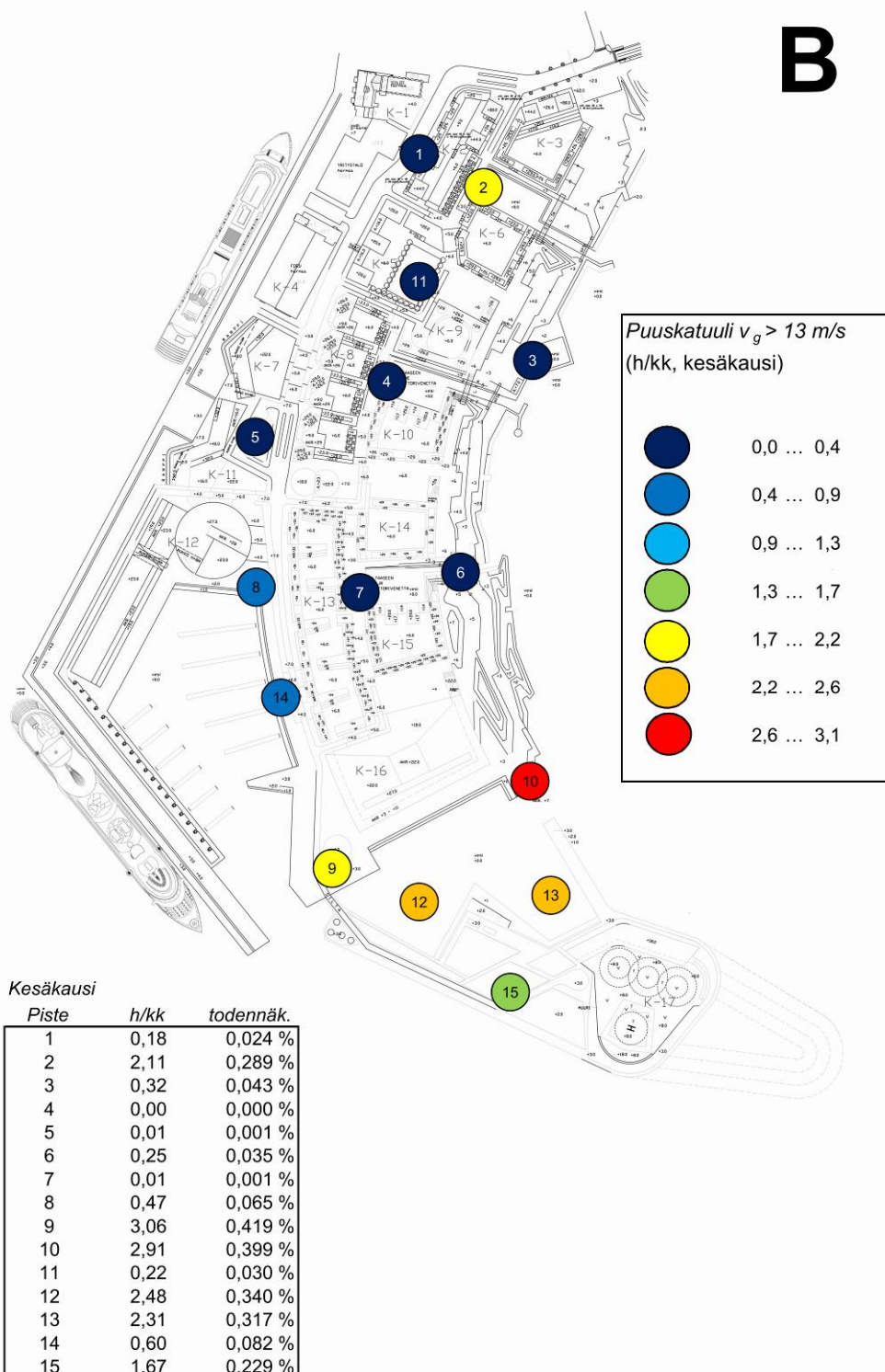
4.2 Tuulisuuskartoituksen tulokset

Tuulisuuskartoituksen tulokset on esitetty kuvissa 14...19.

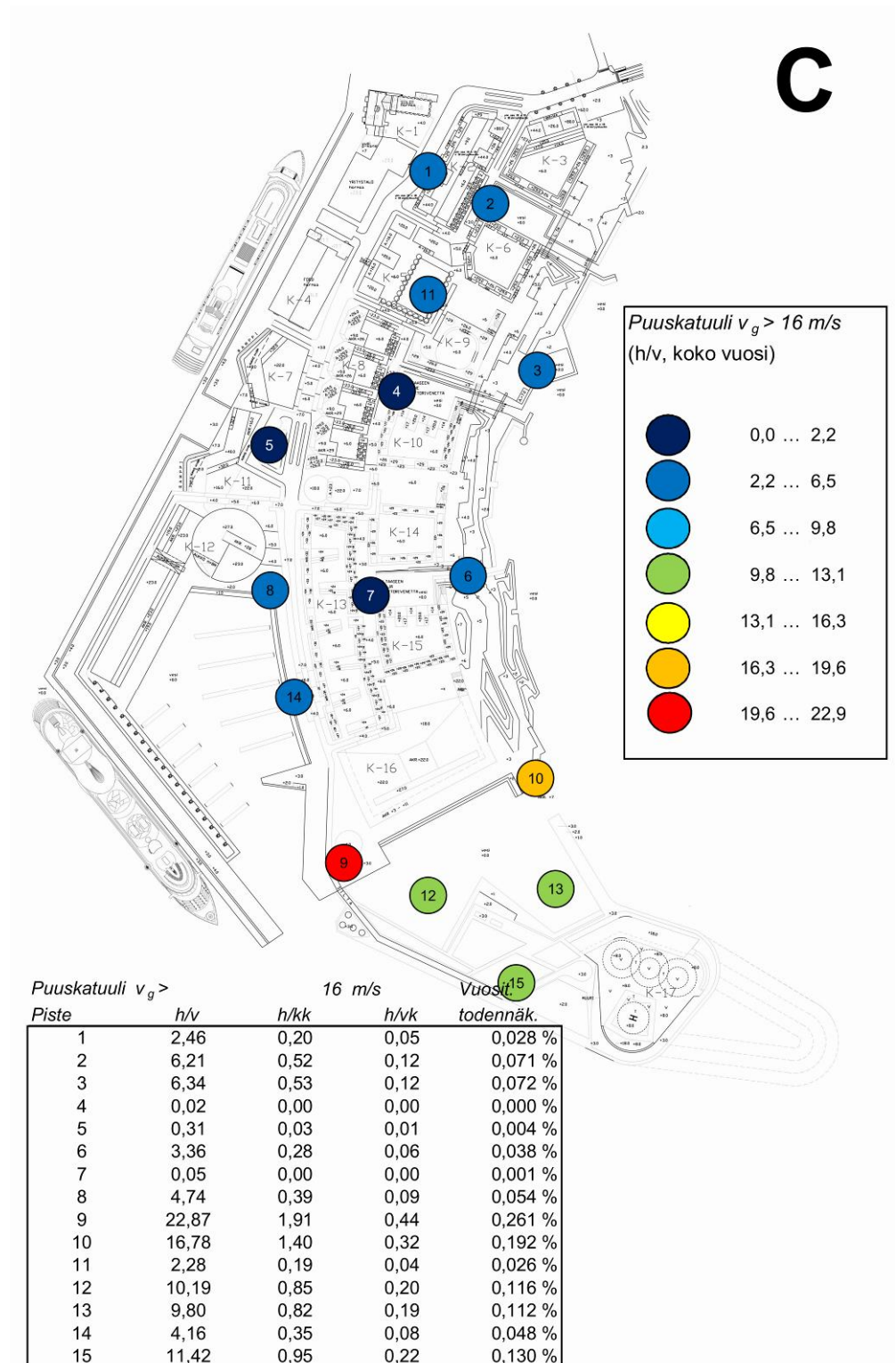


Kuva 14: Tuulisuus pitkäaikaisen oleskelun suhteen (A-kriteeri): kun puuskatuuli $v_g > 10$ m/s esiintyy $\geq 0,4$ h/kk kesäkaudella on toiminto epäviihtyisää.

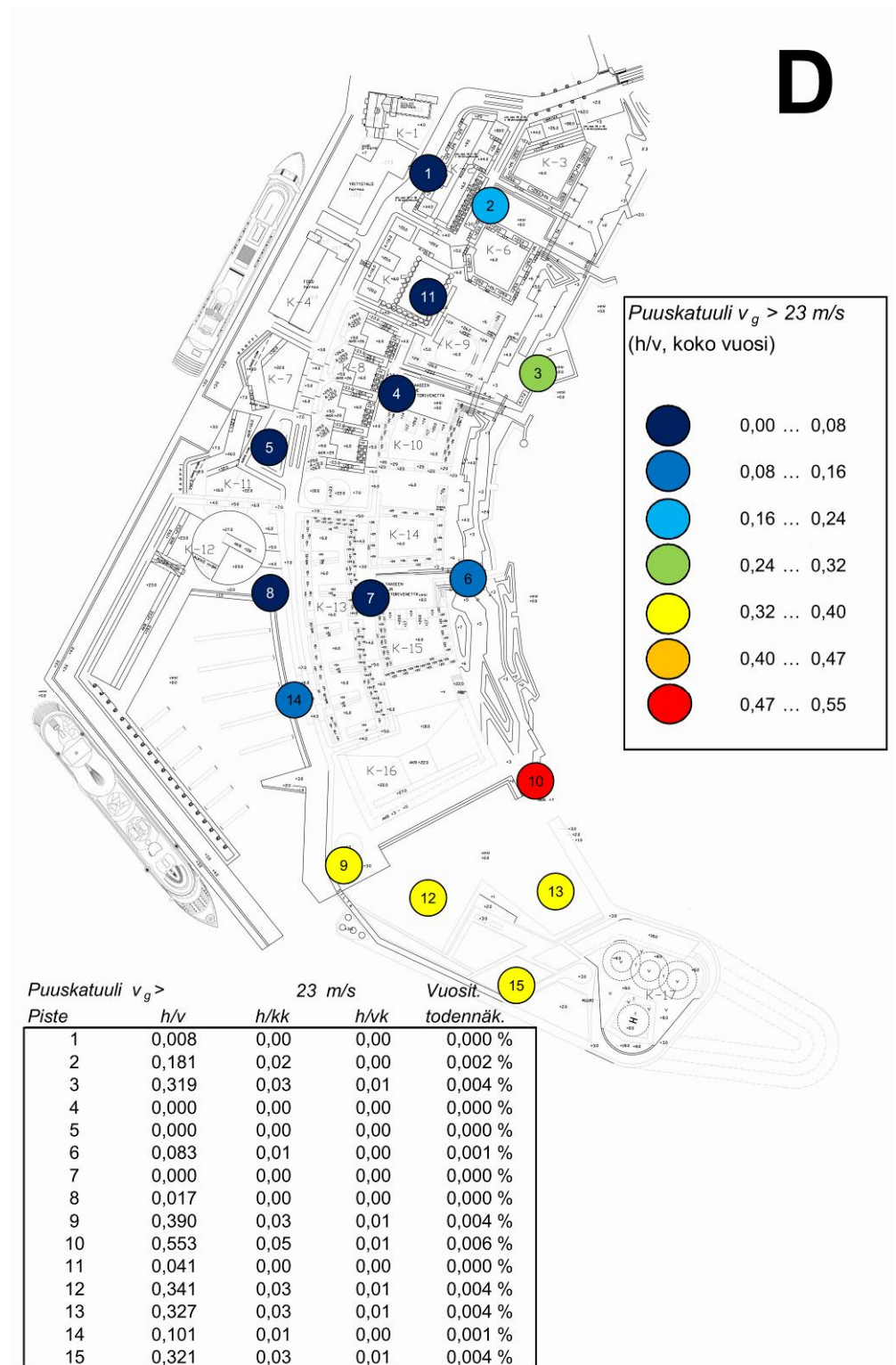
B



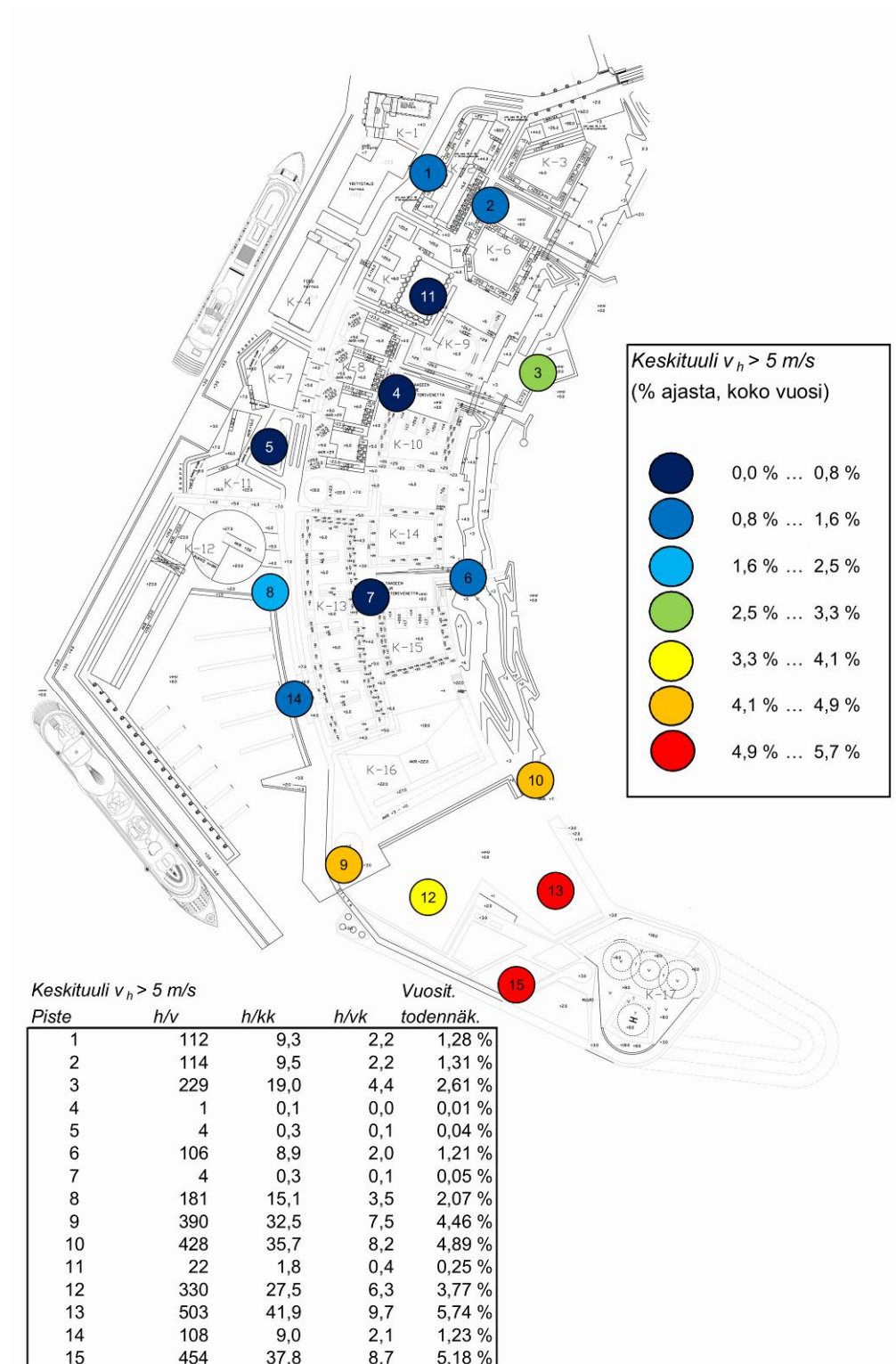
Kuva 15: Tuulisuus lyhytaikaisen oleskelun suhteen (B-kriteeri): kun puuskatuuli $v_g > 13$ m/s esiintyy $\geq 0,4$ h/kk kesäkaudella on toiminto epäviihtyisää.



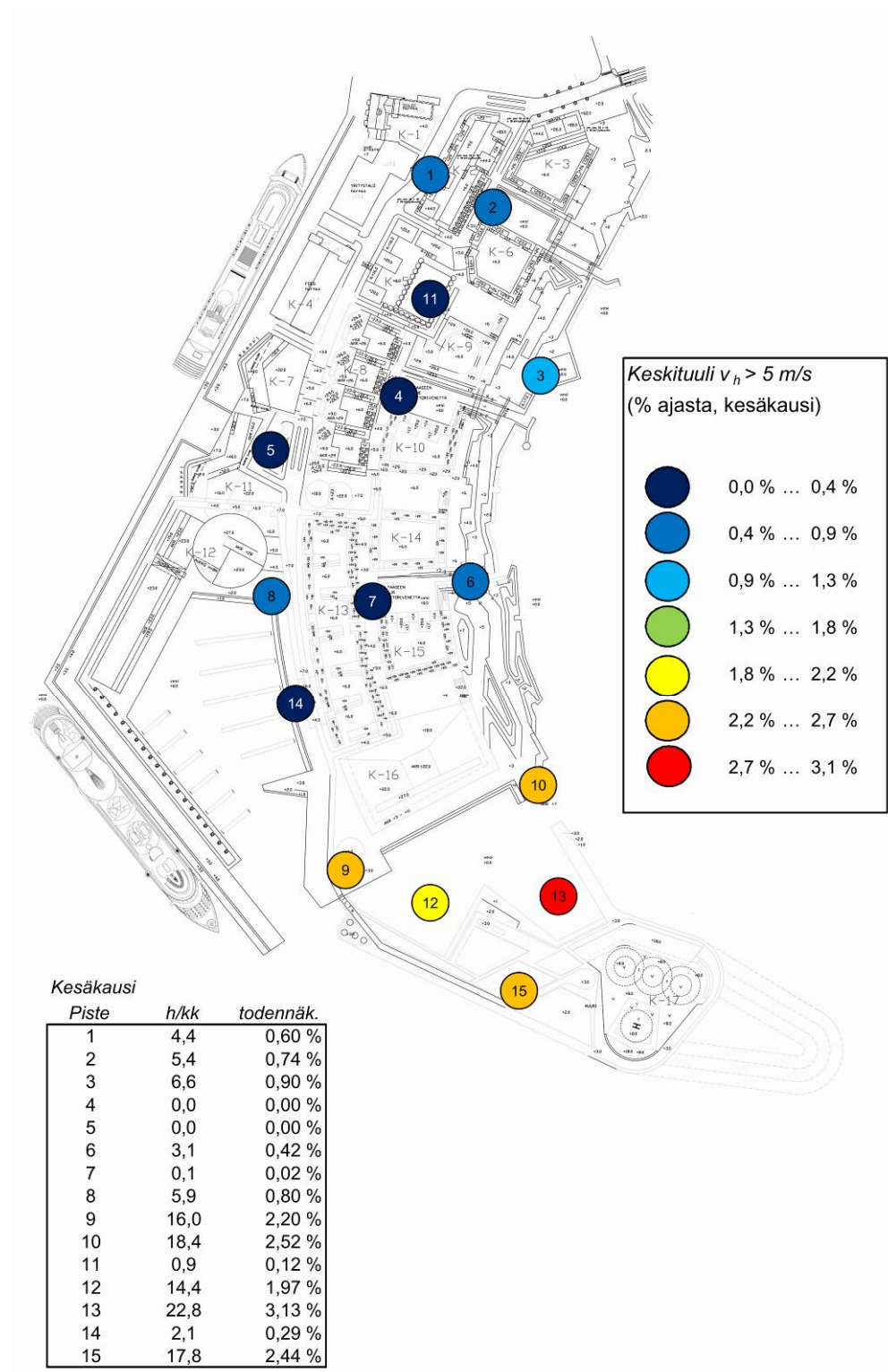
Kuva 16: Tuulisuuskriteeri kävelyn suhteen (C-kriteeri): kun puuskatuuli $v_g > 16$ m/s esiintyy $\geq 2,2$ h/v on toiminto epäviihtyisää.



Kuva 17: Tuulisuuskriteeri vaarallisen kovien tuulien suhteen (D-kriteeri): kun puuskatuuli $v_g > 23$ m/s esiintyy $\geq 2,2$ h/v ovat toiminnot vaarallisia ja korjaavat toimenpiteet tarpeen.



Kuva 18: Tunnin keskituulien esiintymien katutasossa: koko vuosi.



Kuva 19: Tunnin keskituulien esiintymien katutasossa: kesäkausi.

4.3 Tuulisuuskartoituksen virhetarkastelu

Tuulisuuskartoituksessa virhemahdollisuuksia aiheuttaa mm. tuulitilaston mittauspisteen ja tuulitunnelikokeen referenssipisteen sijaintiero. Tämä on otettu huomioon laskennallisesti liitteen 1 kertoimilla, jotka ovat pääosin samoja kun Jätkäsaaren tutkimuksessa [1] käytetyt.

Tuulitilasto voidaan olettaa hyvin tarkoitukseen sopivaksi. Ilmastonmuutoksen myötä sään ääri-ilmiöiden, mukaan lukien myrskyt, toistumisen on yleisesti ennustettu kasvavan myös trooppisten alueiden ulkopuolella, kuten Skandinaviassa. Tämä näkyisi pitkällä (50..100 v) aikajänteellä myös tuulilastoissa. Muutosten voidaan olettaa olevan sen verran hitaita, että niillä ei ole merkitystä tarkasteltavassa tapauksessa. Muutosten tapahtuessa hitaasti myös ihmisten tottumus kovien puuskatuulien vaikutuksiin oletettavasti kasvaa.

Tuulien esiintymisestä johtuen 5% virhe keskituulella v_h aiheuttaa noin 25...30% virheen esiintymistodennäköisyydessä P_E , kun tarkastellaan 5 m/s keskituulia. Kokonaisuutena tuulisuuskartoituksen tuloksille voidaan ehdottaa n. $\pm 40\%$ virhemarginaalia, joka on sama kuin Jätkäsaaren tutkimuksessa [1] esitetty. Virhemarginaalilla ei ole oleellista merkitystä tulosten tulkitaan.

5 Tuulisuus viitesuunnitelman erityiskohteissa

5.1 Satama-allas jollapurjehduksen kannalta

Satama-altaan (kuva 20) käyttöä jollapurjehduksessa on aikaisemmin käsitelty lausunnossa [2]. Viitesuunnitelma on muuttunut em. lausunnon aikaisesta mm. risteilylaiturin sijainnin osalta, jolloin laturissa olevat laivat eivät aiheuta yhtä merkittäviä tuulikatveja.



Kuva 20: Satama-allas (kuva kaupunkisuunnitteluvirasto).

Tuulisuutta jollapurjehduksen koulutus- ja kilpailukäyttöön on tarkasteltu seuraavien raja-arvojen pohjalta [2]:

koulutustoiminta

sopivat keskituulet 1...8 m/s (meteorologinen keskituuli, 10 m korkeus, 10 min keskiarvo).

kilpailutoiminta

sopivat keskituulet 2...10 m/s (meteorologinen keskituuli, 10 m korkeus, 10 min keskiarvo).

Purjehduksessa tuulen tulisi olla tasaista, eli puuskaisuuden osuus tulisi olla pieni (kuten avomerellä). Lähellä rantaa tuulen ollessa mantereiden puolelta maaston karheus ja paikalliset suuret kappaleet (kohdealueella rakennukset ja isot laivat) lisäävät puuskaisuutta.

Jollapurjehduksen suhteen otollisina on tässä raportissa käsitelty tuulen suuntia, jossa turbulenssin intensiteetti 5 m korkeudessa < 25 %. Tämä raja-arvo on suuntaa antava ja kuvaa tuulen puuskaisuuden osuutta mantereiden puoleisissa tuulissa. Vertailun vuoksi avomerellä aallokossa turbulenssin intensiteetti on arviolta 15...20 % 5 m korkeudessa. Tulokset on esitetty taulukossa 4. Purjehduskausi on oletettu kattavan puolet vuodesta (tuulitilaston mukainen kesäkausi).

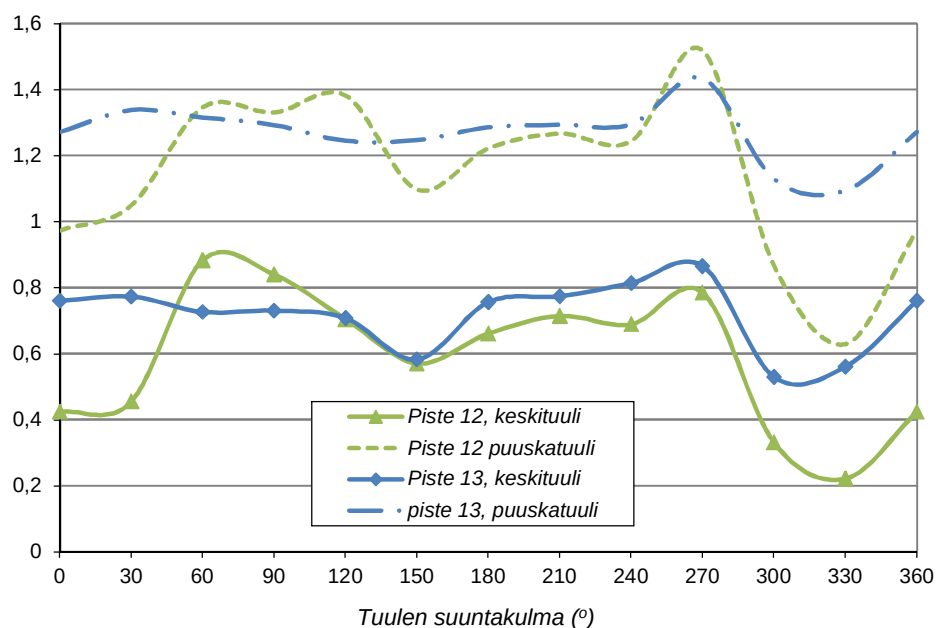
Suhteelliset tuulennopeudet ja turbulenssin intensiteetti satama-altaan mitauspisteissä 11 ja 12 on esitetty kuvassa 21.

Taulukko 4: Tuulisuus satama-altaassa jollapurjehduksen kannalta.

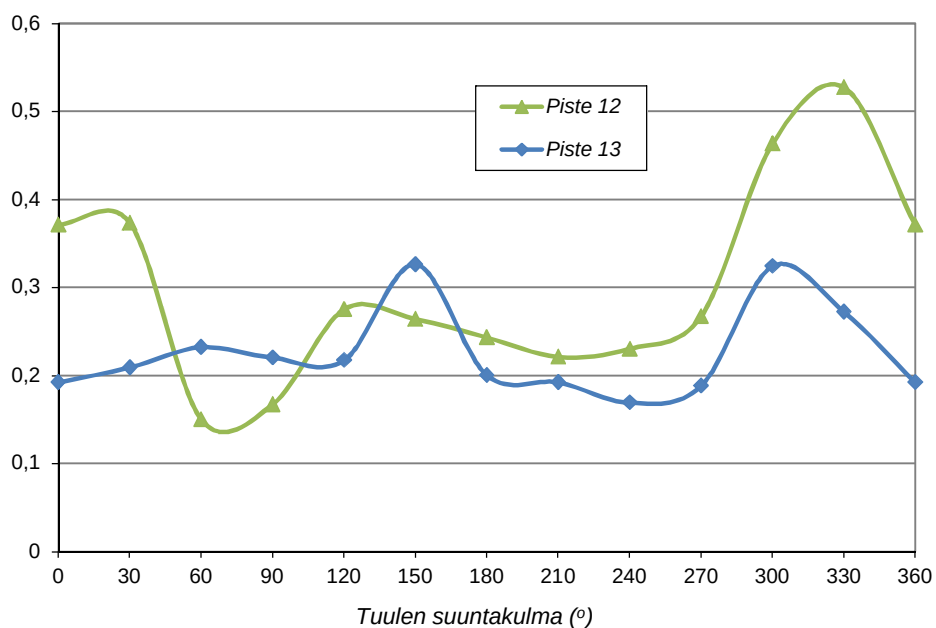
Piste	Koulustoiminta (tuulialue 1...8 m/s)				Kilpailutoiminta (tuulialue 2...10 m/s)			
	Soveltuvat tuulet [vrk/v]	Otolliset tuulet [vrk/v]	Kovan tuulen riski [%]	Tyynen riski [%]	Soveltuvat tuulet [vrk/v]	Otolliset tuulet [vrk/v]	Kovan tuulen riski [%]	Tyynen riski [%]
12	135	70	0,5 %	26 %	74	43	0,1 %	60 %
13	150	113	0,7 %	18 %	88	67	0,1 %	51 %

Purjehduskausi = 0,5 vuotta (=183 vrk)

Suhteelliset tuulennopeudet satama-altaassa (5 m korkeus vs. 22 m)



Turbulenssin intensiteetti v_{rms}/V_h satama-altaassa (5 m korkeus)



Kuva 21: Suhteelliset tuulennopeudet ja turbulenssin intensiteetti satama-altaan mittauspisteissä.

5.2 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet

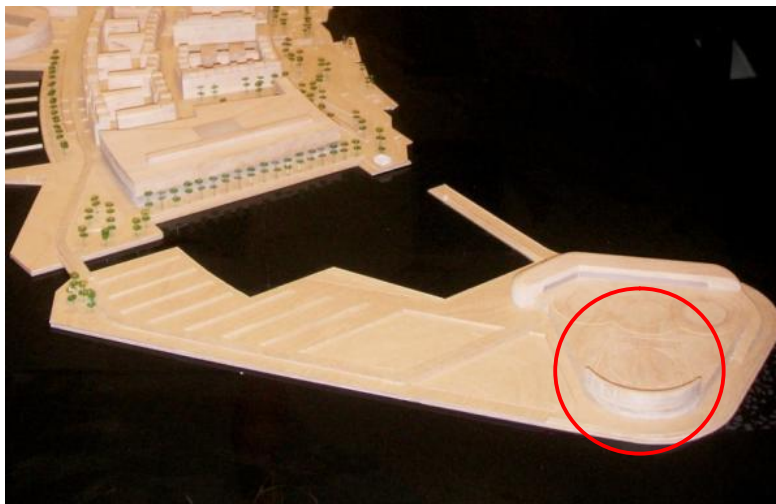
Helikopterikentän (kuva 22) turbulenssiolosuhteita on tarkasteltu helikopterin laskeutumisalustan kohdalla viidellä eri korkeudella; 10, 20, 30, 40 ja 50 m.

Raja-arvona (vrt. kohta 1.3.2) on käytetty tuulennopeuden sijaan pystysuuntaisen tuulennopeuden keskihajontaa $v_{z,rms} = 1,75$ m/s. Jos $v_{z,rms} > 1,75$ m/s turbulenssiolosuhteet ovat epäedulliset laskeutumiselle ja "lentäjillä pitää olla mahdollisuus saada mahdollisimman tarkka tieto turbulenssiolosuhteista, jotta he voivat suunnitella ja mahdollisesti keskeyttää laskeutumisen" [4].

Koska pystysuuntaista tuulennopeutta ei ole suoraan mitattu tuulitunnelikokeessa, on käytetty lähellä maanpintaa pätevää otaksumaa $v_{rms} = v_{z,rms}/0,55 = 3,2$ m/s, missä v_{rms} = vaakasuuntaisen tuulennopeuden keskihajonta (ja joka on mitattu suoraan tuulitunnelikokeessa).

Kuvassa 23 on esitetty tuulitunnelikokeen tuloksena saadut turbulenssiparametrit ja taulukossa 5 raja-arvon ylittävien tuulien esiintyminen. Kuvassa 24 on esitetty avoimen maaston keskituulennopeus, jossa haitallista turbulenssia voi esiintyä.

Taulukossa 6 on esitetty kovien puuskatuulien esiintyminen laskeutumisalusta yläpuolella.



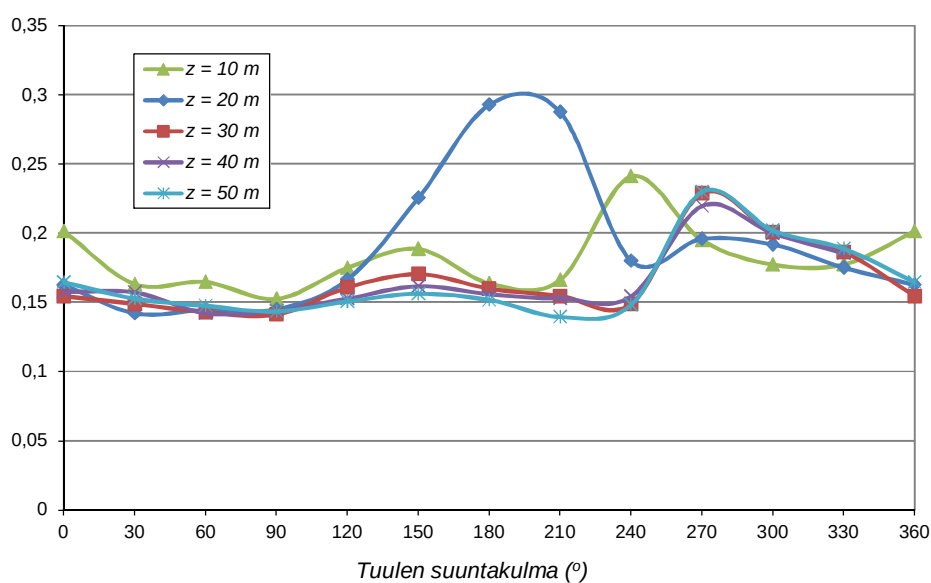
Kuva 22: Helikopterikenttä: laskeutumisalusta ja meluseinä ympyröity.

Taulukko 5: Haitallista turbulenssia aiheuttavien tuulien esiintymien helikopterikentällä

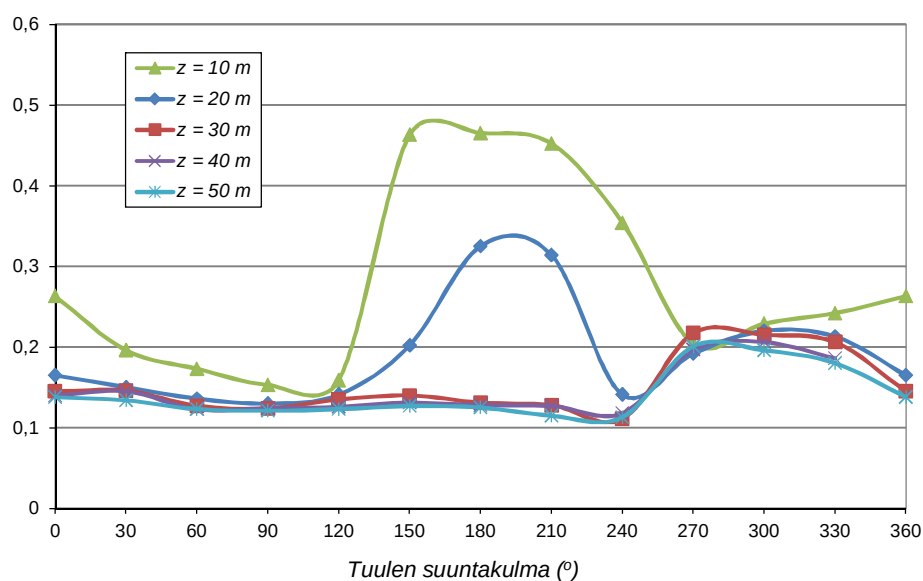
Piste	Korkeus [m]	Raja-arvon ¹ ylittävien tuulien keskimääräinen esiintyminen [h/v]	Osuus ajasta P_E [%]	Kuvaus
16	10	0,9	0,011 %	kerran 2,4 vuodessa
17	20	3,5	0,040 %	kerran 0,6 vuodessa
18	30	1,1	0,013 %	kerran 1,9 vuodessa
19	40	0,5	0,006 %	kerran 4,1 vuodessa
20	50	1,1	0,012 %	kerran 2,1 vuodessa

¹ pystysuuntaisen tuulennopeuden keskihajonta $v_{z,rms} > 1,75$ m/s

Suhteellinen heilahtelunopeuden keskihajonta helikopterikentällä $v_{rms}/v_{h,22}$

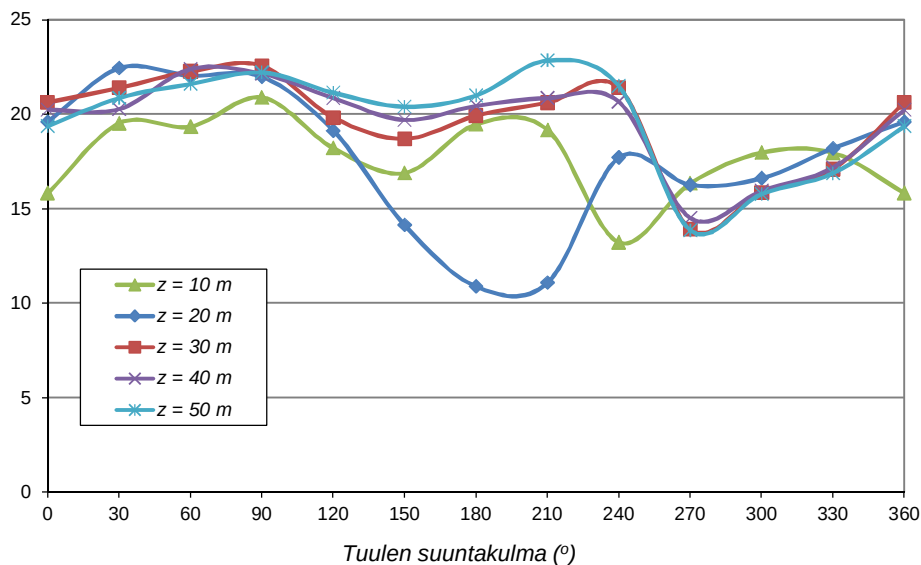


Turbulenssin intensiteetti helikopterikentällä v_{rms}/v_h



Kuva 23: Turbulenssiparametrit helikopterikentällä.

Keskituuli Lauttasaarenselällä ($v_{h,22}$) kun $v_{rms} = 3,2$ m/s helikopterikentällä



Kuva 24: Avoimen maaston tunnin keskituuli 22 m korkeudessa ($V_{h,22}$) kun turbulenssiolosuhteet helikopterikentällä ovat epäedulliset (tulokset eri korkeuksilla helikopterikentän laskeutumisalusta yläpuolella).

Taulukko 6: Puuskatuulien 16 m/s ja 23 m/s esiintyminen helikopterin laskeutumisalustan yllä (pisteissä 16...20, vastaavasti, 10, 20, 30, 40 ja 50 m korkeudessa)

Puuskatuuli $v_g >$		16 m/s		Vuosit. todennäk.
Piste	h/v	h/kk	h/vk	
16	41,3	3,44	0,79	0,47 %
17	135,1	11,26	2,60	1,54 %
18	147,4	12,29	2,84	1,68 %
19	141,0	11,75	2,71	1,61 %
20	141,0	11,75	2,71	1,61 %

Puuskatuuli $v_g >$		23 m/s		Vuosit. todennäk.
Piste	h/v	h/kk	h/vk	
16	1,217	0,10	0,02	0,014 %
17	9,194	0,77	0,18	0,105 %
18	4,021	0,34	0,08	0,046 %
19	5,445	0,45	0,10	0,062 %
20	9,538	0,79	0,18	0,109 %

5.3 Alueen festivaalikäyttö rakennusvaiheessa

Keskeisen sijaintinsa vuoksi Hernesaari voisi tulla ainakin rakennusvaiheessa kysymykseen yleisötapahtumien järjestyspaikkana.

Festivaalikäytössä kevytrakenteisten lavarakenteiden turvallisuuteen puuskaisessa tuulella on kiinnitettävä huomiota. Festivaalin tai konsertin päivämäärä tiedetään tyypillisesti etukäteen, ja sitä on hankalaa tai mahdotonta muuttaa huonon sään johdosta. Lavarakenteiden toimittajien tulisi yleisesti määrittää tuulennopeus, jolla rakenne on turvallinen. Toisin sanoen, on olemassa riski, että tapahtuma viivästyy tai kokonaan peruuntuu kovan tuulen johdosta. Tällaisen riskin kartoittamiseksi on tarkasteltu kolmea mittauspistettä nykyisessä viitesuunnitelmassa (rakennetussa ympäristössä):

- piste 6; kuvaa aluetta joka on osittain rakennusten suojassa
- piste 10; kuvaa aluetta johon rakennus ohjaa epäedullisesti virtauksia (tuulensunnasta $\theta = 210^\circ$)
- piste 15; kuvaa avointa aluetta.

Tarkasteltavaksi kuukaudeksi on otettu elokuu ja puuskanopeuden raja-arvoksi 15 m/s lavarakenteen huipulla 18 m korkeudessa [6].

Riskitarkastelu on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Tuulisuus suurten lavarakenteiden turvallisuuden kannalta

Piste	Raja-arvon ¹ ylittävien tuulien esiintyminen keskimäärin elokuussa [h/kk]	Ylittävien tuulien esiintyminen [% ajasta]	Kuvaus ²	Riski tuulennopeuden ylitykselle festivaalin aikana		
				4 vrk ³	5 vrk ³	6 vrk ³
6	0,22	0,03 %	kerran 10 v elokuun aikana	1,3 %	1,6 %	2,0 %
10	1,02	0,14 %	joka toinen v elokuun aikana	5,9 %	7,4 %	8,8 %
15	0,98	0,13 %	joka toinen v elokuun aikana	5,7 %	7,1 %	8,4 %

¹ tuulennopeudet jossa puuskatuuli > 15 m/s 18 m korkeudessa

² kerran vuodessa -tapahtuman on oletettu vastaavan 2,2 h kestoista ylitystä

³ lavarakenteen pystyssäoloaika

6 Tulosten ohjeellinen tulkinta

6.1 Katutason tuulisuus

6.1.1 Tuulen puuskanopeuteen perustuvat kriteerit

A kriteeri ($v_g > 10$ m/s)

Tuulisimmissa pisteissä eteläpäässä tuulisuuden perustaso on oletetusti samaa suuruusluokkaa Jätkäsaaren [1] kanssa. Kesäkaudella yli 10 m/s puuskia esiintyy katutasossa suurimmillaan n. 15 h/kk.

Asuinkylän venealtaista (kuva 25) kaksi etelän puoleista (pisteet 4 ja 7) ovat vähätuulisia ja tuulen suhteen viihtyisiä myös pitkäaikaisessa paikoillaan oleskelussa. Pohjoisen kahteen venealtaaseen ja puistoon (pisteet 2 ja 11) vaikuttaa korkeiden tornien aiheuttama tuulisuus. Näiden pisteiden tuulisuus koostuu lähes kokonaan $\theta = 300^\circ$ ja $\theta = 330^\circ$ tuulensuunnista, joka viittaa siihen, että tornit kanavoivat tuulta (kuva 26).



Kuva 25: Asuinkylän veneallas (kuva Kaupunkisuunnitteluvirasto).



Kuva 26: Korkeiden tornien kanavointivaikutus 330° tuulensuunnalla.

Venesataman laituralueella tuulisuus on samaa tasoa Jätkäsaaren [1] venesataman kanssa. Puuskatuulia esiintyy kesäkaudella kestoaltaan noin puolet Hernesaaren tuulisiman pisteen arvosta, tarkoittaen että venesatama saa hieman tuulensuojaa rakennuksista ja laituriin kiinnittyvistä risteilyaluksista.

B-kriteeri ($v_g > 13$ m/s)

Tulkinta on ohjeellisesti sama kuin A-kriteerissäkin. Pisteen 2 venealtaassa lyhyen oleskelun kriteerin ehto ei täyty, eli korkea rakentaminen hieman heikentää alueen käyttöä esim. katukahvilana. Samoin pisteen 10 liiketilan pihalle-alueella yli 13 m/s puuskatuulia esiintyy tutkituista pisteistä eniten (3 h/kk). Tähän tulokseen vaikuttaa ilmeisesti se, että vesiurheilukeskuksen pitkä rakennus ohjaa tuulia tähän pisteeseen tuulensuunnalla $\theta = 210^\circ$.

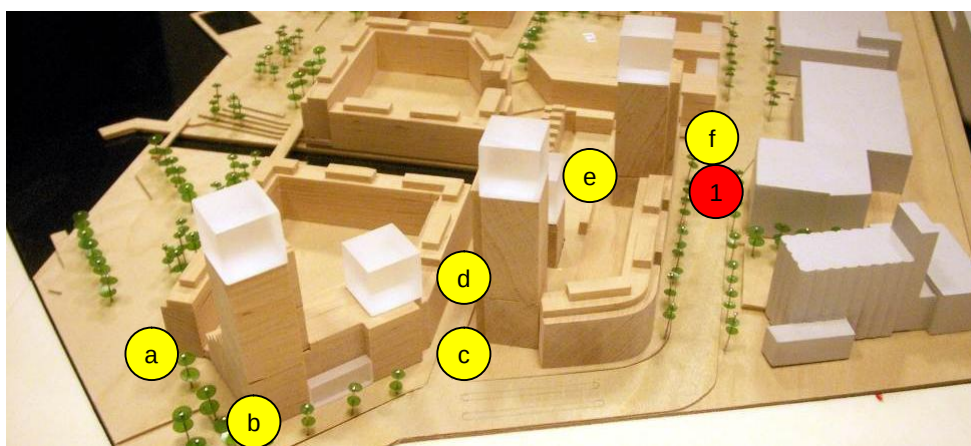
C-kriteeri ($v_g > 16$ m/s)

Kävelyä ja rakennusten sisäänkäyntejä koskevan kriteerin C suhteen Hernesaaren sisäosa on tuulisuuden suhteen viihtyisiä. Vastaavasti ranta-osat jäävät tuulisemmiksi. Itärannan puiston kävelyreitit (kuva 27) ovat tuulisuuden osalta on n. 20 % Hernesaaren tuulisimmasta pisteistä. Puiston sijainti etelä-pohjoinen suunnassa jättää sen katveeseen etelän ja luoteen välisille tuulille.



Kuva 27: Itärannan puistoalue.

Mittauspiste 1 sijaitsee korkean tornin vieressä (kuva 28). Sen tuulisuus koostuu pääosin tuulen suunnasta $\theta = 150^\circ$ liittyen siihen, että tornin kulman kiertävä virtaus ohjautuu katutasoon. Tuulisuus pisteessä 1 on kuitenkin vain 11 % Hernesaaren tuulisimman pisteen arvosta. Tuloksen tulkinnassa on otettava huomioon, että kulman kiertävä virtaus ei välttämättä ole osunut $\theta = 150^\circ$ tuulen suuntakulmalla tarkasti tähän pisteeseen, ja toisaalta tarkasteltu piste ei ole välttämättä tuulisin tornien vaikutuksessa. Muita mahdollisesti tuulisempia pisteitä on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28: Hernesaaren torneihin liittyviä mahdollisia tuulisuuden ongelmapistejä.

Yleisesti korkean tornin aiheuttama tuulisuuden lisä tornin vieressä riippuu mm. rakennuksen korkeudesta suhteessa ympäröiviin rakennuksiin; tornin etäisyyteen avoimesta maastosta (merestä); tuulen vastaisen julkisivun leveydestä; ja toisten tornien yhteisvaikutuksesta. Tornin korkeuden vaikutusta voidaan arvioida taulukon 2 tuulitunnelikoetulosten ja lähteen [7] tarkastelun perusteella. Suhteellinen puuskatuuli on Hernesaaren tornien (77 m korkeus) vieressä (piste 1) ollut suurimmillaan 1,33. Vastaava lukema 100 m korkean tornin vieressä on Keski-Pasilan tornien tuulitunnelikokeiden mukaan 1,79 [7]. Jätkäsaaren tornihotellin tarkastelussa [7] on tällöin saatu $v_g > 16$ m/s arvio 55 h/kk, joka on yli kaksinkertainen Jätkäsaaren ja Hernesaaren tuulisimman pisteen arvoon ilman korkeaa rakentamista. Hernesaaren kaavoitukseen voitaisiin ehdottaa suositukseksi että korkeudeltaan n. 100 m ja sitä koreampien tornien vaikutus tuulisuuteen tarkastettaisiin tuulitunnelikokeilla viimeistään suunnitteluvaiheessa, jolloin voitaisiin myös suunnitella tuulisuutta korjaavia rakenteita.

C-kriteeriä vastaava tuulisuus on suurinta pisteessä 9 johon sijoittuvat raitiovaunujen kääntöpaikka ja ainut helikopterikentälle johtava silta. Ongelmallisia tuulia kävelyn suhteen on keskimäärin 23 h/vv. Tämä tulos on sama kuin Jätkäsaarella [1] suurimmillaan. Raitiovaunujen kääntöpaikan pysäkin suojaamista samoin kuin sillan suojaamista esim. normaalia korkeammilla kaitteilla voitaisiin selvittää jatkosuunnittelussa. Jalankulkijoiden ja kevyen liikenteen lisäksi kovat puuskat vaikuttavat myös ajoneuvoihin. Lähteen [8] mukaan tuulen aiheuttamien onnettomuuksien riski kasvaa merkittävästi puuskanopeuden ylittäessä arvon 17,5 m/s. Ilman kaidesuojausta tällaisia tuulia esiintyisi sillalla noin 4 kertaa vuodessa. Yleisesti puoliläpäisevät kaitteet, aukkosuhteeltaan noin 50 %, toimivat tehokkaasti tuulensuojakaiteina.

Kävelyä vaikeuttavia tuulia esiintyy helikopterikentän terminaalien ja parkkipaikan välisellä alueella noin 5 kertaa vuodessa. Sade sekä tuulen ja pakkasen yhteisvaikutus tekevät oman lisänsä viihtyvyyden alentumiseen, joten jatkosuunnittelussa voitaisiin harkita esim. jalankulun suojaamista ”jalankulputkella” tai tuulensuoja-aidalla.

C-kriteerin mukaisia yli 16 m/s puuskatuulia katutasossa esiintyy kuvan 13 mukaisesti pääosin vain talvikaudella. Esimerkiksi tuulisimmassa kohdassa (piste 9) kesäkaudelle sattuvien tuulien osuus on 13 % koko vuoden tuulista.

D-kriteeri ($v_g > 23$ m/s)

Tulosten mukaan vaarallisen kovia tuulia voi esiintyä Hernesaaren etelä-osan aukeilla alueella keskimäärin kerran 4...5 vuodessa, eli kriteeri täyttyy kaikissa tarkastelupisteissä. Lisäksi voidaan ottaa huomioon että kovimmat puuskat esiintyvät paikoissa jossa ihmiset olettavatkin niiden esiintyvän eli aukealla merenranta-alueella.

Tarkastelua viitesuunnitelmaa voidaan pitää tuulisuuden suhteen hyväksytävänä, eli vaarallisen kovia tuulia ei esiinny liian useasti.

Hernesaaren etelä-osan osalta tulosten tulkinta on ohjeellisesti sama kuin C-kriteerissäkin.

Tarkastelussa kaikki katutason puuskatuulet $v_g > 23$ m/s ovat esiintyneet talvikaudella.

6.1.2 Tuulen keskinopeuteen perustuvat kriteerit

Keskinopeuskriteerien suhteen tuulisimmat pisteet sijaitsevat helikopterikentän parkkipaikalla ja satama-altaan itänurkassa. Tunnin keskituuli ylittää arvon 5 m/s noin 6 % ajasta. Tulos on sama kuin Jätkäsaaren [1] tuulisimmassa pisteessä.

Hernesaari sijaitsee etelä-pohjoinen suunnassa, jolloin rakennuskanta pienentää alueen kokonaistuulisuutta valitsemissa etelä- ja lounaistuulissa. Pohjoisosan korkeat tornitalot lisäävät tuulisuutta myös keskinopeuteen perustuvien kriteerien mukaan. Ero on suhteellisesti suurempi kuin puuskanopeuskriteereissä; koska tasakorkean rakennuskannan suojassa tuulen tunnin keskinopeus on lähellä nollaa.

6.2 Satama-allas jollapurjehduksen suhteen

Tulosten mukaan laiturissa olevat risteilyalukset eivät aiheuta samanlaista katvetta kuin aikaisemmin tutkitussa [2] viitesuunnitelmassa. Satama-altaan itä-nurkassa (piste 13) tuulee hieman useammin ja tuuli on tasaisempaa (ja paremmin purjehdukseen sopivaa) kuin länsi-nurkassa (piste 12).

Kovan tuulen riski on pieni, ja tyynen riski kohtuullisen suuri. Tulokset ovat samaa suuruusluokkaa aikaisemman [2] lausunnon tulosten kanssa.

Kilpailukäytön osalta satama-altaassa liian heikon tuulen riski on noin 50 %, eli kilpailut on periaatteessa järkevämpää pitää satama-altaan ulkopuolella. Esimeriksi Lautasaaren selällä heikon tuulen riskin on 20 % [2].

6.3 Helikopterikentän turbulenssiolosuhteet

Tulosten mukaan meluaita lisää turbulenssia siten, että laskeutumista hankaloittavaa turbulenssia esiintyy 3,5 h/v arvon 1 h/v sijaan. Koska hankalat olosuhteet liittyvä koviin tuuliin, kuvan 13 mukaisesti hankalien olosuhteiden voidaan olettaa esiintyvän pääsääntöisesti talvikaudella.

Turbulenssia lisäävä vaikutus näkyy korkeudella (20 m) joka on hieman meluidan yläosan tason yläpuolella. Tällä on merkitystä tuulen suunnissa $\theta = 150^\circ \dots 210^\circ$, jotka ovat samoja suuntia jonne melun leviämistä halutaan es-

tää. Keskituulennopeudet ovat avoimella alueella tällöin n. 11 m/s tai suurempia 20 m korkeudessa. Tuloksissa näkyy myös laiturissa olevan suuren risteilyaluksen vaikutus länsituulissa ($\theta = 270^\circ$) turbulenssia lisäävänä tekijänä.

Alimmalla mittauskorkeudella (10 m) vaikuttaa helikopterikentän korotettu taso.

Helikopterikentän turbulenssin mahdollinen merkitys voitaisiin selvittää tarkemmin jatkosuunnittelussa. Meluidan rakennetta voitaisiin tarvittaessa muuttaa siten, että sen aiheuttama turbulenssi pienenesi.

6.4 Alueen festivaalikäyttö

Tulosten mukaan kovien puuskien riski lavarakenteiden turvallisuuden suhteen vaihtelee selvästi tarkastelupisteestä toiseen. Jos lavarakenne jää osittain rakennusten suojaan, putoaa lavarakennetta mahdollisesti vaurioittavan kovan tuulen riski n. viidennekseen. Avoimessa paikassa riski sille, että ongelmallinen tuuli osuisi festivaalipäiviin, on kohtuullisen suuri. Esimerkiksi jos lava on pystytyssä 5 vrk kerrallaan elokuussa, tapahtumista keskimäärin yksi neljästätoista voisi kärsiä kovasta tuulesta.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

- Raportissa on esitetty yksityiskohtainen tuulisuuskartoitus Hernesaaren osayleiskaavan viitesuunnitelmalle. Tuulisuuskartoitus on tehty tuulitunnelikokeen ja tuulitilaston avulla samalla periaatteella kuin aikaisemmin mm. Jätkäsaaren, Keski-Pasilan ja Kalasataman keskuksen kaavoituksessa
- tulosten mukaan Hernesaaren tuulisimmassa pisteessä katutasossa tunnin keskituuli > 5 m/s 6 % ajasta, joka on sama kuin Jätkäsaaren vastaava maksimi
- pohjoisosan korkeat rakennukset lisäävät odotetusti tuulisuutta. Tornien vierustan tuulisuus ei kuitenkaan nouse rantaviivan tuulisimpia pisteitä suuremmaksi
- asuinkyläjen venealtaat ovat tuulisuuden suhteen viihtyisiä. Poikkeuksena on pohjoisin allas, jossa näkyy korkeiden rakennusten vaikutus
- kävelyä haittaavia kovia puuskatuulia ($v_g > 16$ m/s) esiintyy alueen avoimessa eteläosassa enimmillään n. 23 tuntia vuodessa. Näille puuskatuulille herkkiä suunnittelukohteita ovat mm. raitiovanun kääntöpaikan pysäkki, helikopterikentälle johtava silta ja helikopterikentän parkkipaikka
- viitesuunnitelma on tuulisuuden suhteen hyväksyttävä, eli vaarallisen kovia puuskatuulia ($v_g > 23$ m/s) ei esiinny katutasossa liian useasti
- helikopterikentän turbulenssiolosuhteisiin vaikuttavat laskeutumista haittaavina turbulenssia lisäävinä tekijöinä meluaita, risteilylaiturissa oleva suuri risteilyalus ja laskeutumisalustan korko. Suoritetun tarkastelun perusteella haitallista turbulenssia esiintyy 3,5 h/v
- vesiurheilukeskuksen satama-allasta voidaan pitää otollisena jollapurjehduksen koulutuskäyttöön. Liiallisen kovan tuulen riski on pieni, ja liian alhaisen tuulen riski kohtuullinen. Satama-altaan itänurkassa tuuli on suhteellisen tasaista.

Yksittäisiä jatkosuunnittelussa harkittavia ja mahdollisesti huomioon otettavia tuulisuuskysymyksiä ovat mm.

- raitiovaunun kääntöraiteen pysäkin suojaavat rakenteet
- helikopterikentälle johtavan sillan suojaaminen tuulensuojalla
- terminaalien ja parkkipaikan välisen kulkuyhteyden suojaaminen
- helikopterikentän turbulenssin pienentäminen erityisesti meluaidan aiheuttaman turbulenssin osalta.

Lähdeluettelo

1. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto: Jätkäsaaren kaavoitus, tuulisuuden sekä pakkasen ja tuulen yhteisvaikutuksen kartoitus, tutkimusraportti versio C, WSP Finland Oy, 2007, s. 79.
2. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto. Hernesaaren kaavoitus, Lausunto tuulisuudesta, WSP Finland Oy, 12.11.2009, s. 17.
3. COST Action C14 Impact on Wind and Storm on City Life and Built Environment: Impact on Wind and Storm on City Life and Built Environment. Proc. of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, Belgium, 2004, Ed. van Beeck, J.P.A.J., von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium 2004. Artikkelit:
Baker C. J. Assessment of urban wind problems and synthesis of results, s. A.1.1-A.1.6
Koss H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. s. B.2.1-B.2.12
4. CAA Paper 2008/03. Helideck Design Considerations – Environmental Effects; Civil Aviation Authority, Safety regulation group, www.caa.co.uk, s. 49.
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 (15.10.2007).
6. Keskustelu Tuomas Kallion (Flow Festival Oy) kanssa 26.10.2011.
7. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto. Jätkäsaaren tornihotelli, Lausunto tuulisuudesta, WSP Finland Oy, 17.1.2012, s. 25.
8. Baker, C.J. The effects of high wind on vehicle behaviour. Proc. Bridge aerodynamics, Larsen & Eshdal (eds). Balkema, Rotterdam 1998. s. 267-282.

Liite 1: Tuulennopeuksien muunnoskertoimet

Tuulennopeuksille käytetyt muunnoskertoimet on esitetty oheisissa taulukoissa. Kerroin k_θ ottaa huomioon tuulitilaston mittauspisteen ja tuulitunnelikokeen referenssipisteen sijaintieron. Kerroin on laskettu maaston karheusluokan muutosanalyysillä ja on muutamaa tuulensuuntaa lukuun ottamatta sama kuin Jätkäsaaren tutkimuksessa [1] käytetty.

Muunnoskerroin tuulitunnelikokeen mittaustuloksesta (5,0 m korkeus) tarkastelutasoon 2,0 m on laskettu pisteittäin ja tuulen suunnittain turbulenssin intensiteetin perusteella. Tässä avoimessa maastossa (jossa turbulenssin intensiteetti on pieni; < 16 %) yhteys noudattaa teoreettista yhteyttä, jolloin kerroin on 0,85 (kun $z_0 = 0,01$ m tulovirtauksen korkeusprofiilia vastaten). Pisteissä jossa turbulenssin intensiteetti on suuri (> 30 %), logaritminen korkeusprofiili ei ole voimassa lähellä maanpintaa, ja kertoimeksi on oletettu 1,00. Väliarvot on interpoloitu suoraviivaisesti. Muunnoskerrointa sovelletaan ainoastaan keskituuleen; puuskatuli on oletettu samaksi 2,0 m ja 5,0 m korkeuksissa.

Kerroin	Tuulen suuntakulma (°)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
k_θ	1,00	0,94	1,00	1,03	1,08	1,16	1,21	1,31	1,27	1,00	1,00	1,00
Tunnin aikakeskiarvoa soveltavat kriteerit, lisäkerroin *)												
k_h	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,93	0,91	0,91	0,94	0,95	0,96	0,95

*) turbulenssin intensiteetistä riippuva teoreettinen arvo. Laskelmassa on käytetty vakioarvoa $k_h = 0,93$

Muunnoskerroin $v_{h, 5\text{ m}} \rightarrow v_{h, 2\text{ m}}$

Piste	Tuulen suuntakulma (°)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	0,95	0,90	0,98	1,00	1,00	0,97	0,98	0,99	0,96	1,00	1,00	0,97
2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	0,96	0,92	0,92	0,91	0,91	0,88	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,95	0,90	0,91	0,92	0,92	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,00	1,00	0,99	1,00	0,98	0,94	0,88	0,94	0,93	1,00	1,00	1,00
8	1,00	1,00	0,99	1,00	0,98	0,94	0,88	0,94	0,93	1,00	1,00	1,00
9	0,96	1,00	0,92	0,85	0,88	0,91	0,93	0,88	1,00	0,88	0,94	0,96
10	0,89	0,86	0,85	0,87	0,90	0,97	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,96
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	0,85	0,86	0,97	0,96	0,94	0,92	0,93	0,96	1,00	1,00
13	0,88	0,90	0,93	0,91	0,91	1,00	0,89	0,88	0,86	0,88	1,00	0,97
14	1,00	0,92	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,90	0,91	0,92	0,90	0,92	0,89	0,88	0,89	0,87	0,96	0,97	0,94