

**Faculteit Bouwkunde**  
**Unit Building Physics and Services**

Den Dolech 2, 5612 AZ Eindhoven  
Postbus 513, 5600 MB Eindhoven  
Intern adres: Vertigo VRT 6.30  
[www.urbanphysics.net](http://www.urbanphysics.net)

**Onderwerp**  
Onderzoek windhinder Bunkertoren

**Datum**  
20/03/2018

**Contact**  
Prof.dr.ir. Bert Blocken  
T +31 40 247 2138  
[b.j.e.blocken@tue.nl](mailto:b.j.e.blocken@tue.nl)

**Ons kenmerk**  
BWK2018-524

## Onderzoek windhinder Bunkertoren

Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) is de mogelijke windhinder rondom de geplande nieuwbouw van de Bunkertoren onderzocht. De nieuwbouw zal gebouwd worden op de reeds bestaande Bunker aan de John F. Kennedylaan 3 te Eindhoven en zal een totale hoogte bereiken van 100 meter ten opzichte van het maaiveld. Het windklimaat rondom de geplande nieuwbouw is beoordeeld volgens de Nederlandse norm voor windhinder en windgevaar NEN 8100, en getoetst aan het ambitieniveau zoals verstrekt door de opdrachtgever.

De door de TU/e uitgevoerde analyse door numerieke simulatie met CFD houdt rekening met de gebouwde omgeving, de al dan niet aanwezige en geplande vegetatie, en de windstatistiek op de betreffende locatie. Uit de berekende windsnelheden en de windstatistiek voor de bouwlocatie zijn vervolgens de overschrijdingskansen voor windhinder volgens NEN 8100 bepaald. Uit de resultaten volgt dat voor de situatie **met vegetatie** een overwegend goed windklimaat te verwachten is, terwijl er voor de situatie **zonder vegetatie** een substantieel hogere mate van windhinder rondom de Bunkertoren bestaat.



Figuur 1: Impressie Bunkertoren zoals te zien vanaf de Kennedylaan. (Bron: <http://delva.la/nieuws/eigentijdse-landschapstuin-voegt-zich-rondom-bunkertoren-eindhoven/>)

**Datum**  
20/03/2018

**Pagina**  
2 / 16

Inhoud .....	2
1 Omschrijving .....	3
1.1 NEN 8100 .....	3
2 CFD-analyse .....	5
2.1 Rekendomein .....	6
2.1.1 Interessegebied .....	6
2.1.2 Randgebied .....	7
2.2 Randvoorwaarden .....	9
2.3 Raster .....	11
3 Resultaten .....	12
3.1 Situatie zonder vegetatie .....	12
3.2 Situatie met vegetatie .....	13
4 Discussie en conclusie .....	15
Referenties .....	16

Datum  
20/03/2018

Pagina  
3 / 16

## 1 Omschrijving

De opdracht omvat een onderzoek naar de mogelijke windhinder rondom de geplande nieuwbouw van de Bunkertoren. De nieuw te bouwen Bunkertoren zal een hoogte hebben van 100 meter. Volgens de norm met betrekking tot windhinder en windgevaar, NEN 8100, is een windhinderstudie nodig voor gebouwen met een hoogte vanaf 30 meter.

De door de TU/e uit te voeren opdracht is de aerodynamische analyse door numerieke simulatie met Computational Fluid Dynamics (CFD) voor de nieuwbouwsituatie. Hierbij wordt rekening gehouden met de gebouwde omgeving, de al dan niet aanwezige vegetatie en de windstatistiek. Voor de beoordeling van het windklimaat op voetgangersniveau rondom de Bunkertoren wordt gebruik gemaakt van het beslismodel zoals omschreven in NEN 8100. De windsnelheden rondom de Bunkertoren worden voor 12 windrichtingen berekend en gekoppeld aan windstatistiek voor de specifieke locatie. Hierna wordt de totale overschrijdingskans voor windhinder bepaald. Er zijn twee situaties onderzocht; (1) een situatie zonder vegetatie, waarbij ook de huidige vegetatie is verwijderd; met andere woorden: een "worst-case scenario", overeenstemmend met de wintersituatie voor loofbomen; en (2) een situatie met bestaande vegetatie rondom de Bunkertoren en nieuwe vegetatie zoals voorzien in de aangeleverde bouwplannen.

### 1.1 NEN 8100

In Nederland is de boordeling van het windklimaat vastgelegd in de norm NEN 8100. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende typen activiteiten, daar de gevoeligheid voor windhinder van de mens hiervan sterk afhankelijk is. Omdat windhinder bij bepaalde weersomstandigheden nooit helemaal voorkomen kan worden, beoordeelt NEN 8100 het windklimaat op basis van de kans  $P$  op windhinder, waarvoor een gemiddelde windsnelheid van  $U > 5$  m/s is aangenomen. Hoe kleiner de kans op overschrijding van deze drempelwaarde hoe hoger de kwaliteitsklasse van de plek is en dus des te beter het windklimaat voor diverse activiteiten. In onderstaande tabel is het beoordelingskader met betrekking tot windhinder uit NEN 8100 weergegeven.

Tabel 1. Beoordelingskader windhinder volgens NEN 8100.

Overschrijdingskans $P(U > 5 \text{ m/s})$ in procenten van het aantal uren per jaar.	Kwaliteitsklasse	Activiteit		
		I. Doorlopen	II. Slenteren	III. Langdurig zitten
< 2,5	A	Goed	Goed	Goed
2,5 – 5	B	Goed	Goed	Matig
5 – 10	C	Goed	Matig	Slecht
15 – 20	D	Matig	Slecht	Slecht
> 20	E	Slecht	Slecht	Slecht

NEN 8100 geeft uitleg bij de begrippen goed, matig en slecht:

- 'Bij een goed windklimaat ondervindt men geen overmatige windhinder. In een situatie zonder overmatige windhinder heeft het merendeel van het publiek geen last van windhinder.
- Bij een matig windklimaat ervaart men af en toe overmatige windhinder.
- In een slecht windklimaat ervaart men regelmatig overmatige windhinder. In een dergelijke situatie heeft het merendeel van het publiek last van windhinder'.

Datum  
20/03/2018

Pagina  
4 / 16

Om de jaarlijkse overschrijdingskans van windhinder te bepalen worden de resultaten van de CFD-simulaties gecombineerd met de windstatistiek van Eindhoven en de drempelwaarde voor windhinder.

In de NEN 8100 staat voorgeschreven dat de windstatistiek zoals deze door de NPR 6097 (Nederlandse praktijkrichtlijn) wordt bepaald, dient te worden gebruikt (zie Tabel 2). De tabel toont dat bij met name de windrichtingen 210° (ZZW) en 240° (WZW) hoge windsnelheden voorkomen. Daarnaast komen deze windrichtingen relatief vaak voor.

Tabel 2: Cumulatieve relatieve frequentietabel van de 60 meter windsnelheid (U60m) in Eindhoven (coördinaten Rijksdriehoekstelsel X162239 Y384522) jaren 1963-2002 (bron: NPR 6097)

Windsnelheid (m/s)	Windrichting (°)											
	350-10	20-40	50-70	80-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310	320-340
0,0 - 0,9	0,22	0,21	0,24	0,20	0,23	0,27	0,29	0,29	0,29	0,27	0,27	0,25
1,0 - 1,9	0,85	0,84	0,96	0,79	0,89	1,03	1,27	1,34	1,18	1,08	1,05	0,94
2,0 - 2,9	1,66	1,76	1,99	1,65	1,85	2,12	2,59	2,83	2,52	2,25	2,03	1,80
3,0 - 3,9	2,48	2,82	3,15	2,63	2,80	3,20	4,10	4,83	4,23	3,51	3,11	2,66
4,0 - 4,9	3,21	3,87	4,44	3,65	3,61	4,18	5,61	7,09	6,11	4,84	4,02	3,42
5,0 - 5,9	3,80	4,79	5,60	4,47	4,20	4,87	6,95	9,23	8,02	5,96	4,79	3,96
6,0 - 6,9	4,24	5,53	6,45	5,09	4,59	5,33	8,04	11,12	9,77	6,92	5,42	4,34
7,0 - 7,9	4,48	6,08	7,09	5,56	4,84	5,65	8,87	12,80	11,27	7,66	5,85	4,59
8,0 - 8,9	4,60	6,45	7,54	5,87	4,96	5,82	9,48	14,17	12,49	8,17	6,11	4,76
9,0 - 9,9	4,66	6,67	7,86	6,06	5,01	5,91	9,88	15,18	13,37	8,54	6,28	4,82
10,0 - 10,9	4,70	6,80	8,05	6,17	5,03	5,95	10,12	15,88	14,03	8,78	6,37	4,86
11,0 - 11,9	4,72	6,87	8,16	6,22	5,03	5,97	10,24	16,34	14,43	8,95	6,41	4,88
12,0 - 12,9	4,73	6,90	8,22	6,26	5,04	5,97	10,31	16,61	14,67	9,05	6,43	4,90
13,0 - 13,9	4,73	6,92	8,25	6,27	5,04	5,98	10,34	16,76	14,82	9,11	6,44	4,90
14,0 - 14,9	-	6,92	8,25	6,28	-	-	10,35	16,83	14,90	9,14	6,44	4,90
15,0 - 15,9	-	6,92	8,26	6,28	-	-	10,36	16,88	14,94	9,16	6,45	4,90
16,0 - 16,9	-	-	8,26	-	-	-	10,37	16,90	14,96	9,17	6,45	-
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	10,37	16,91	14,97	9,18	6,45	-
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	16,91	14,97	9,18	6,45	-
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	16,92	14,97	9,18	6,45	-
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	16,92	14,98	9,18	6,45	-
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	16,92	14,98	9,18	6,45	-
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	16,92	14,98	9,18	-	-
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	14,98	-	-	-

Voor windgevaar wordt een drempelwaarde van  $U > 15$  m/s aangenomen. De overschrijdingskansen en het bijbehorende beoordelingskader zijn te vinden in tabel 3.

Tabel 3. Beoordelingskader windgevaar volgens NEN 8100.

Overschrijdingskans $P(U > 15$ m/s) in procenten van het aantal uren per jaar.	Beoordeling windgevaar
< 0,05 %	Geen gevaar
0,05 tot 0,30 %	Beperkt risico
> 0,30 %	Gevaarlijk

Datum  
20/03/2018

Pagina  
5 / 16

### 1.2 Ambitieniveau windhinder

Figuur 2 geeft het ambitieniveau voor windhinder zoals verstrekt door de opdrachtgever in lijn met de normering NEN 8100. In het algemeen is een beoordeling van minimaal kwaliteitsklasse D beschreven in het gebied rondom de Bunkertoren. Een uitzondering hierop is de ruimte voor de voordeuren van de woningen ten westen van de Bunkertoren, gelegen aan de Bisschopsmolen. Hier is een goede beoordeling voor activeitenklasse II (slenteren) vereist, wat minimaal kwaliteitsklasse B betekent.

## Ambitieniveau Windhinder Openbaar Gebied Conform NEN8100

Deerns



Tabel: Uit NEN 8100 – Eisen voor de beoordeling van het lokale windklimaat voor windhinder.

Figuur 2: Ambitieniveau windhinder zoals verstrekt door de opdrachtgever.

## 2 CFD-analyse

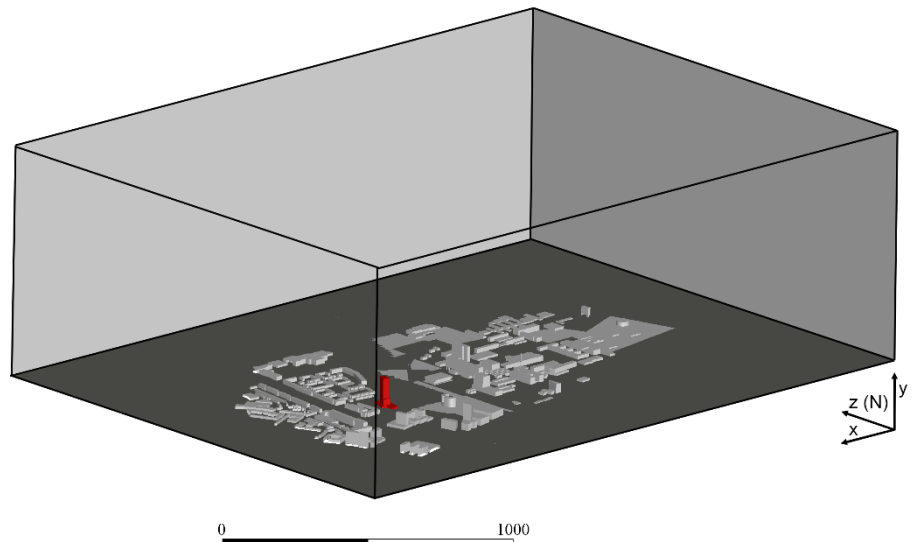
De CFD-analyse gebeurt op basis van de Reynolds-gemiddelde Navier-Stokes-vergelijkingen en het realizable k- $\epsilon$  model van Shih et al. (1995). Een hoge-resolutieraster is opgebouwd met behulp van de door onszelf ontwikkelde rastergeneratiemethode (van Hooff & Blocken, 2010). Berekeningen gebeuren met tweede-orde-discretisatieschema's. De CFD-analyse gebeurt in overeenstemming met de internationale Best Practice Guidelines voor CFD in dit type toepassingen (Franke et al., 2007; Tominaga et al., 2008; Blocken, 2015).

Datum  
20/03/2018

Pagina  
6 / 16

## 2.1 Rekendomein

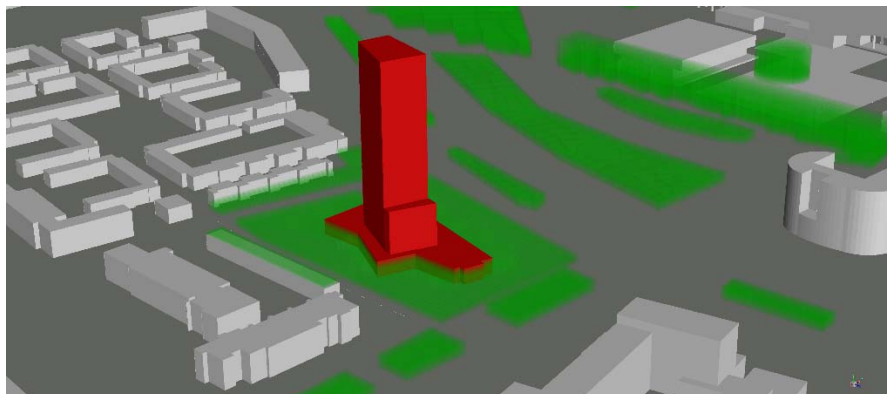
De grootte van het domein (zie Fig. 3) is gebaseerd op de internationale Best Practice-richtlijnen voor CFD in dit type toepassingen. De Bunkertoren is rood gemarkeerd. Het rekendomein bestaat uit een interessegebied met relatief kleine cellen waarin de gebouwen expliciet zijn gemodelleerd en een randgebied hier omheen.



Figuur 3: Rekendomein.

### 2.1.1 Interessegebied

Als onderlegger voor het stedenbouwkundig model is de plattegrond gebruikt zoals verstrekt door de opdrachtgever. Voor de hoogtes van gebouwen is gebruik gemaakt van GISdata (geografisch informatiesysteem) volgens het Algemeen Hoogtebestand Nederland. Daarnaast zijn door de opdrachtgever verstrekte tekeningen gebruikt om de Bunkertoren en omliggend gebied te modelleren, waar de geometrie van de toren versimpeld is door het weglaten van balkons, ramen, etc. Dit is opgevangen door ruwheid op het gebouw toe te passen. De geometrie van de situatie is gegeven in Figuur 4. Bestaande en geplande hoge vegetatie zijn (voor de situatie met vegetatie) gemodelleerd als aparte zones in het rekendomein en groen gemarkeerd in Figuur 4. Deze zones starten op 4 meter boven de grond en strekken, afhankelijk van de vegetatie, tot hoogtes van 8 tot 26 meter.



Figuur 4: Geometrie van de situatie.



Datum  
20/03/2018

Pagina  
7 / 16

### 2.1.2 Randgebied

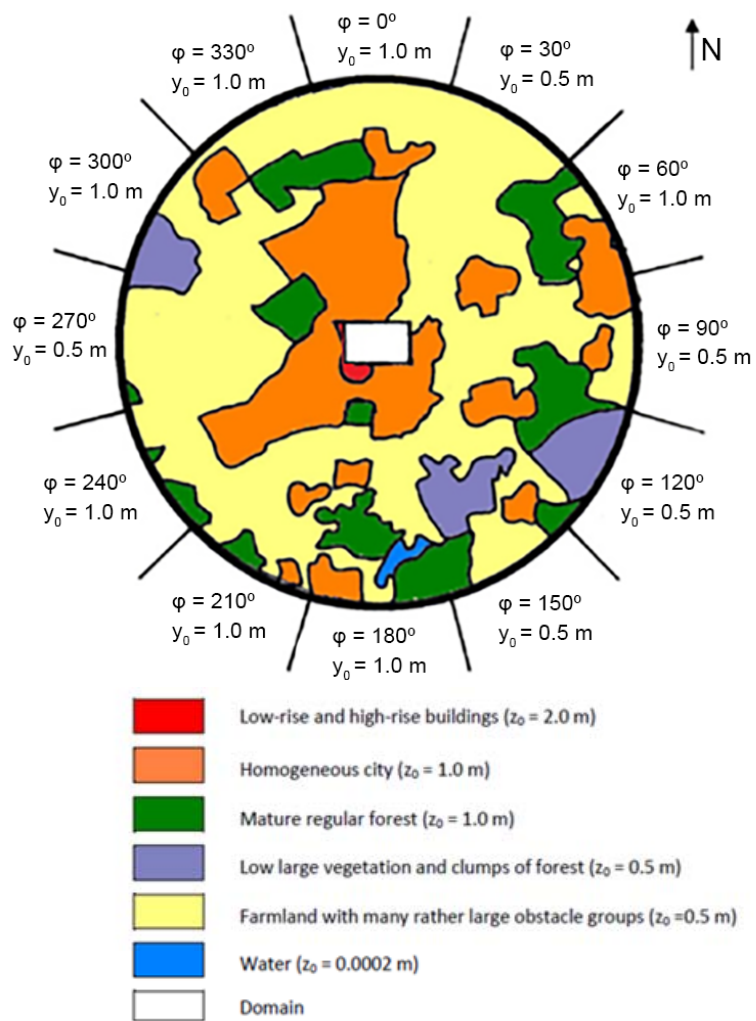
De ruwheid van de omgeving van het expliciet gemodelleerde gebied wordt gekarakteriseerd door de aerodynamische ruwheidslengte  $y_0$ , die bepaald wordt aan de hand van de ruwheidsclassificatie van Wieringa (1992) (zie Tabel 4). De omgevingsruwheid is grafisch weergegeven in Figuur 5.

*Tabel 4: Davenport classificatie van effectieve terreinruwheid aangepast door Wieringa (1992)*

$y_0$ (m)	Landscape description
0.0002 "Sea"	Open sea or lake (irrespective of the wave size), tidal flat, snow-covered flat plain, featureless desert, tarmac and concrete, with a free fetch of several kilometers.
0.005 "Smooth"	Featureless land surface without any noticeable obstacles and with negligible vegetation; e.g. beaches, pack ice without large ridges, morass, and snow-covered or fallow open country.
0.03 "Open"	Level country with low vegetation (e.g. grass) and isolated obstacles with separations of at least 50 obstacle heights; e.g. grazing land without windbreaks, heather, moor and tundra, runway area of airports.
0.10 "Roughly open"	Cultivated area with regular cover of low crops, or moderately open country with occasional obstacles (e.g. low hedges, single rows of trees, isolated farms) at relative horizontal distances of at least 20 obstacle heights.
0.25 "Rough"	Recently-developed "young" landscape with high crops or crops of varying height, and scattered obstacles (e.g. dense shelterbelts, vineyards) at relative distances of about 15 obstacle heights.
0.5 "very rough"	"Old" cultivated landscape with many rather large obstacle groups (large farms, clumps of forest) separated by open spaces of about 10 obstacle heights. Also low large vegetation with small interspaces, such as bushland, orchards, young densely-planted forest.
1.0 "closed"	Landscape totally and quite regularly covered with similar-size large obstacles, with open spaces comparable to the obstacle heights; e.g. mature regular forests, homogeneous cities or villages.
$\geq 2$ "chaotic"	Centres of large towns with mixture of low-rise and high-rise buildings. Also irregular large forests with many clearings.

Datum  
20/03/2018

Pagina  
8 / 16



Figuur 5: Ruwheidslengtes in een straal van 10 km buiten het interessegebied met de classificatie volgens de 'revised Davenport roughness classification' (Blocken et. al, 2012). Omdat de Bunkertoren aan de rand van het TU/e terrein ligt kunnen de aerodynamische ruwheidslengtes voor de verschillende windrichtingen uit deze figuur worden overgenomen.



Datum  
20/03/2018

Pagina  
9 / 16

## 2.2 Randvoorwaarden

De simulaties worden uitgevoerd met de Reynoldsgemiddelde Navier-Stokesvergelijkingen, aangevuld met het realizable k- $\epsilon$  turbulentiemodel (Shih et al., 1995). De inlaatrandvoorwaarden voor gemiddelde snelheid worden beschreven door het logaritmisch windprofiel (Vergelijking 1) met een aerodynamische ruwheidslengte  $y_0 = 0.5$  m of  $y_0 = 1$  m, afhankelijk van de ruwheidslengte voor de te simuleren windrichting  $\phi$  (zie Fig. 5).

$$U(y) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{y + y_0}{y_0}\right) \quad (1)$$

Hierin is  $y$  de hoogtecoördinaat,  $\kappa$  de von Karman constante (0.42), en  $u_{ABL}^*$  de wrijvingsnelheid:

$$u_{ABL}^* = \kappa \frac{U_{ref}}{\ln\left(\frac{y + y_0}{y_0}\right)} \quad (2)$$

De turbulente kinetische energie  $k$  wordt berekend door middel van:

$$k(y) = \frac{u_{ABL}^*{}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3)$$

met  $C_\mu = 0.09$ . Het profiel van de turbulente dissipatiesnelheid  $\epsilon$  wordt berekend met de volgende formule:

$$\epsilon(y) = \frac{u_{ABL}^*{}^3}{\kappa(y + y_0)} \quad (4)$$

Aan de uitlaat is de relatieve statische druk gelijk aan nul gesteld. De bovenzijde van het rekendomein is als symmetrievlak gemodelleerd. Voor het grondvlak en de gebouwvlakken zijn de standaard wandfuncties van Launder & Spalding (1974) gebruikt, met ruwheidsmodificatie volgens Cebeci & Bradshaw (1977).

Voor het stroomopwaartse en stroomafwaartse gebied zijn de vereiste parameters voor de wandfuncties, namelijk de ruwheidshoogte  $k_s$  en de ruwheidsconstante  $C_s$ , bepaald aan de hand van de aerodynamische ruwheidslengte  $y_0$  en de volgende formule (zie Blocken et al., 2007):

$$k_s = \frac{9.793 y_0}{C_s} \quad (5)$$

Datum  
20/03/2018

Pagina  
10 / 16

Binnen het domein zijn wanden met verschillende ruwheden te onderscheiden, zoals weergegeven in Figuur 6. De gebouwen zijn donkergrijs gemarkeerd met  $k_s = 0.10$  m en  $C_s = 0.5$ . Het gras is gegeven in groen met  $y_0 = 0.03$  m,  $k_s = 0.10$  m en  $C_s = 3$ . Het straatwerk is gegeven in lichtgrijs met  $y_0 = 0.02$  m,  $k_s = 0.10$  m en  $C_s = 2$ . De omgeving beslaat het randgebied met  $y_0 = 0.5$  m,  $k_s = 1.6$  m en  $C_s = 3$ . In Figuur 6 is de Bunkertoren rood omcirkeld.



Figuur 6: Ruwheidspecificatie voor de grond- en wandoppervlakten.

De effecten door aanwezige vegetatie op de luchtstroming worden in acht genomen door termen toe te voegen aan de vergelijkingen betreffende momentum (Vergelijking 6), turbulente kinetische energie (Vergelijking 7) en turbulente dissipatiesnelheid (Vergelijking 8) in de cellen waar vegetatie aanwezig is (Green, 1992; Gromke et al., 2015).

$$S_{u_i} = -\rho C_d LAD U_i U \quad (6)$$

$$S_k = \rho C_d LAD (\beta_p U^3 - \beta_d U k) \quad (7)$$

$$S_\varepsilon = \rho C_d LAD \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 4} \beta_p U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U k) \quad (8)$$

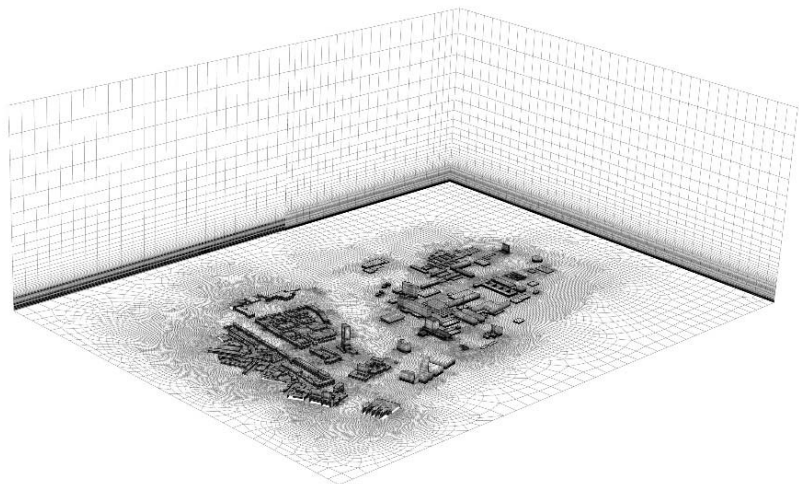
Hierin is  $\rho$  de dichtheid van de lucht,  $C_d = 0.2$  de weerstandscoefficient,  $LAD = 2$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de dichtheid van het bladoppervlak in het volume,  $U_i$  de snelheidscomponent in richting  $i$ ,  $\mathbf{U}$  the grootte van de driedimensionale snelheidsvector,  $\beta_p = 1.0$  de fractie gemiddelde kinetische energie die omgezet wordt naar turbulente kinetische energie in het zog,  $\beta_d = 5.1$  de coefficient verantwoordelijk voor de wervelcascade.  $C_{\varepsilon 4} = 0.9$  en  $C_{\varepsilon 5} = 0.9$  zijn experimenteel bepaalde coëfficiënten. De berekeningen zijn uitgevoerd met tweede-orde discretisatieschema's en druk-snelheidskoppeling is verwezenlijkt met het SIMPLE-algoritme.

Datum  
20/03/2018

Pagina  
11 / 16

### 2.3 Raster

Het rekendomein, dit is het luchtvolume rondom de objecten, is gediscrèteerd met een hoge-resolutieraster bestaande uit 17.331.795 cellen. Het raster is gegenereerd met behulp van de rastergeneratietechniek zoals gepresenteerd door van Hooff & Blocken (2010), en volgens de Best Practice-richtlijnen van Franke et al. (2007), Tominaga et al. (2008) en Blocken (2015). Een niet-conform raster is toegepast om te kunnen voldoen aan Vergelijking 5 ten behoeve van een neutraal gestratificeerd, horizontaal homogeen windprofiel. Figuren 7 en 8 tonen het rekenraster.



*Figuur 7: Rekenraster voor de simulaties.*



*Figuur 8: Detail van het rekenraster. Situatie rond de Bunkertoren.*

Datum  
20/03/2018

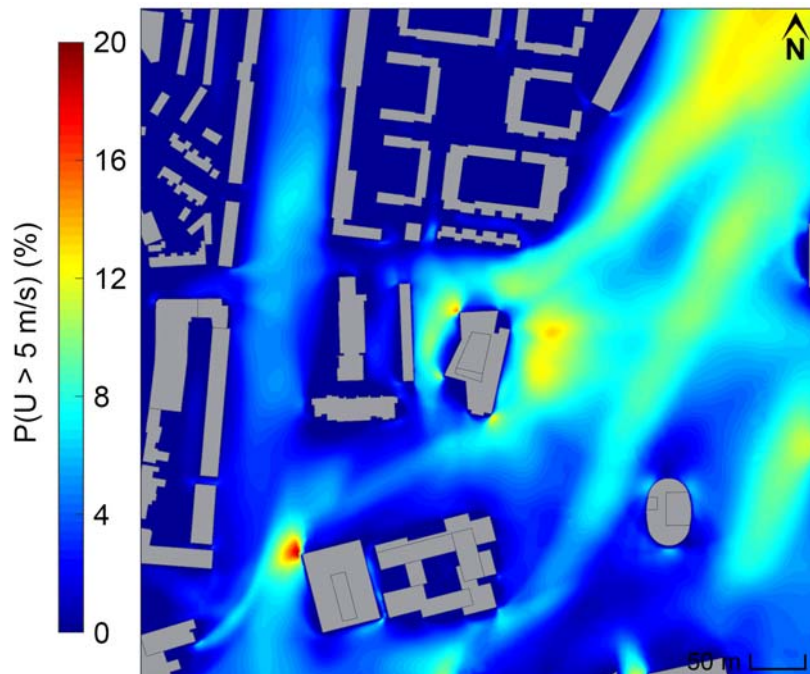
Pagina  
12 / 16

### 3 Resultaten

Het windklimaat wordt beoordeeld op basis van CFD-simulaties voor de situatie met vegetatie en voor de situatie zonder vegetatie. De resultaten uit de CFD-simulaties worden gecombineerd met de windstatistiek van Eindhoven. Zoals door NEN 8100 omschreven zijn deze windstatistieken verkregen door middel van NPR 6097:2006. De gepresenteerde resultaten zijn een som van de overschrijdingskansen voor windhinder voor alle 12 windrichtingen. Uit de CFD-simulaties blijkt dat er geen risico is op windgevaar. De kans op overschrijding van de drempelwaarde van 15 m/s is slechts 0.01% in de situatie zonder vegetatie. In de situatie met vegetatie is dit 0%.

#### 3.1 Situatie zonder vegetatie

Allereerst is het windklimaat bepaald voor de situatie zonder vegetatie. Hierbij is uitgegaan van een extreme situatie, waarbij ook de huidige vegetatie is verwijderd: met andere woorden: een “worst-case scenario”, overeenstemmend met de wintersituatie voor loofbomen. Hiertoe zijn alle rekencellen in het domein gedefinieerd als lucht, en zijn de extra termen voor vegetatie (zie 2.2) uitgeschakeld. In dit geval (Fig. 9) zijn er gebieden met een relatief hoog overschrijdingspercentage ( $P > 10\%$ ) rondom de Bunkertoren. Desalniettemin is de zone rond de Bunkertoren niet de zone met de hoogste overschrijdingskansen.



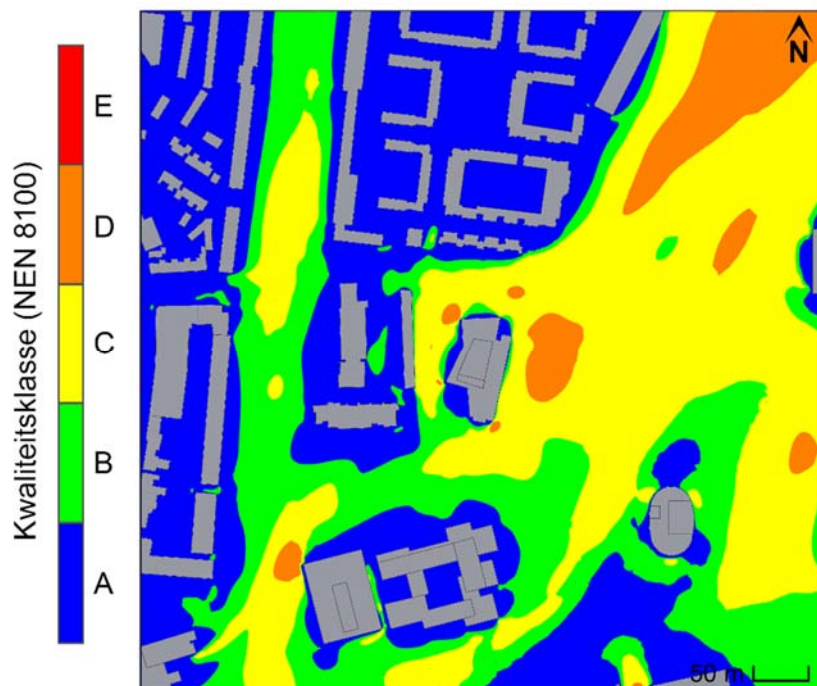
Figuur 9: Contouren op voetgangsniveau ( $y = 1.75 \text{ m}$ ) van de jaarlijkse totale overschrijdingskansen voor ( $U > 5 \text{ m/s}$ ) voor de situatie zonder vegetatie.



Datum  
20/03/2018

Pagina  
13 / 16

Figuur 10 geeft de kwaliteitsklassen voor de situatie zonder vegetatie. Het gebouw wordt voornamelijk omsloten door een windklimaat beoordeeld met kwaliteitsklasse C. Aan de zuidwestelijke kant van het gebouw is een windluwe zone te identificeren met kwaliteitsklassen A en B. Ook het windklimaat in de achtertuinen van de nabijgelegen woningen (Bisschopsmolen en Stevertsemolen) wordt goed beoordeeld voor langdurig zitten (kwaliteitsklasse A). Dit met uitzondering van enkele relatief kleine gebieden beoordeeld als matig voor deze activiteit. Daarentegen zijn er bij de uiterste hoeken van de Bunkertoren gebieden te vinden met kwaliteitsklasse D. De Kennedylaan, ten oosten van het gebouw, wordt hoofdzakelijk beoordeeld met kwaliteitsklassen C en D. Gebieden met Kwaliteitsklasse E zijn niet aanwezig in de regio zichtbaar in Figuur 10. Een belangrijke vereiste in het ambitieniveau voor windhinder (zie 1.2) is een goede beoordeling voor activiteitenklasse II (slenteren) nabij de voordeuren van de woningen ten westen van de Bunkertoren aan de Bisschopsmolen. Dit betekent dat er in dit gebied een minimale kwaliteitsklasse B behaald dient te worden. In de situatie zonder vegetatie (worst-case scenario) wordt deze ruimte beoordeeld met kwaliteitsklasse C.



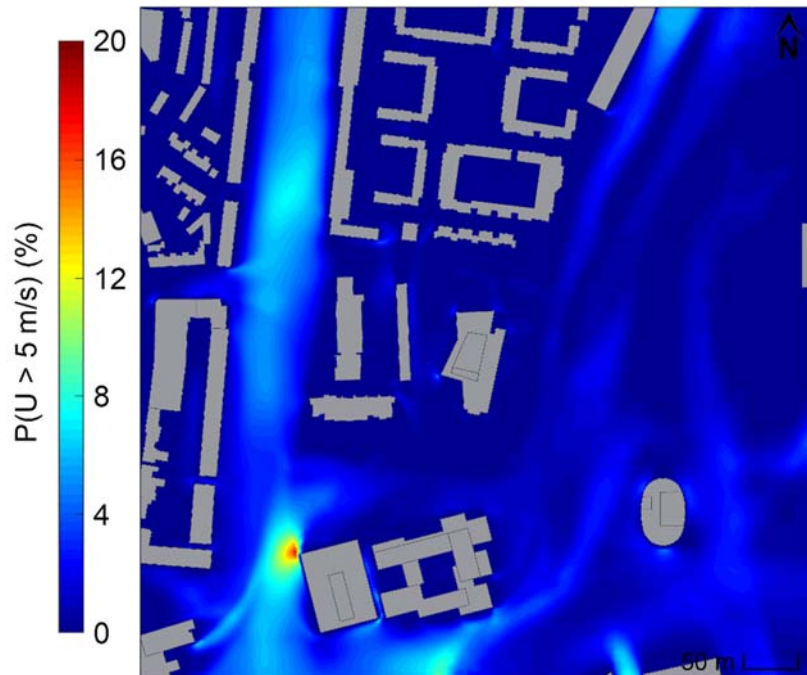
Figuur 10: Contouren op voetgangsniveau ( $y = 1.75$  m) van de kwaliteitsklassen zoals bepaald door NEN 8100, voor de situatie zonder vegetatie.

### 3.2 Situatie met vegetatie

Figuur 11 geeft de grootte van de jaarlijkse overschrijdingskans voor ( $U > 5$  m/s) in een horizontaal vlak op 1,75 meter hoogte (voetgangsniveau). Het gebied rondom de nieuw te bouwen bunkertoren, te vinden in het midden van Figuur 11, kenmerkt zich grotendeels door een laag overschrijdingspercentage ( $P < 5\%$ ).

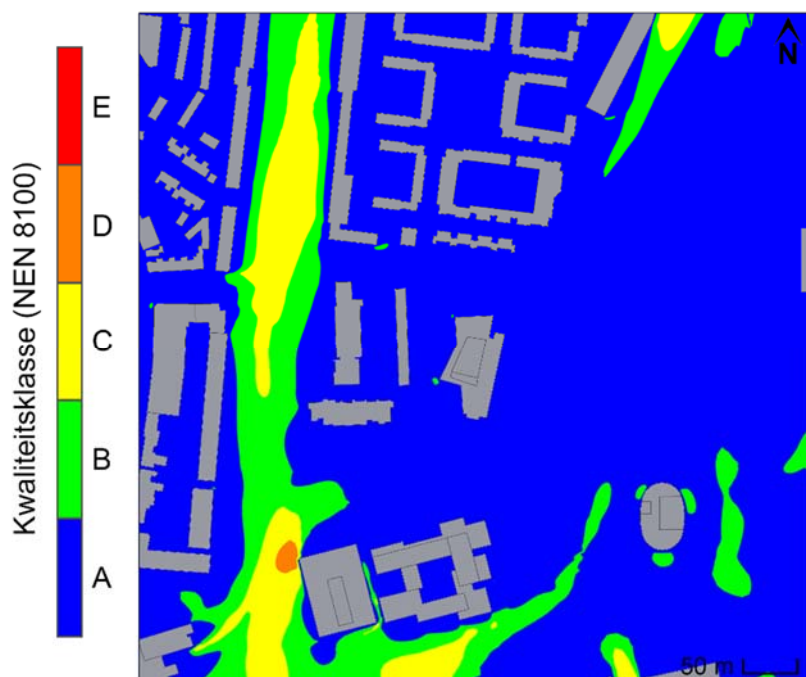
Datum  
20/03/2018

Pagina  
14 / 16



Figuur 11: Contouren op voetgangersniveau ( $y = 1.75 \text{ m}$ ) van de jaarlijkse totale overschrijdingskans voor ( $U > 5 \text{ m/s}$ ) voor de situatie met vegetatie.

De resulterende kwaliteitsklassen worden getoond in Figuur 12. Het windklimaat rondom Bunkertoren wordt voornamelijk met kwaliteitsklasse A beoordeeld. Dit is te wijten aan hoofdzakelijk twee factoren: (1) de slankheid van de toren (hoogte-breedte-verhouding) en (2) de veelvuldig aanwezige vegetatie. In dit geval wordt er ruimschoots voldaan aan de vereiste kwaliteitsklassen zoals omschreven in het ambitieniveau (zie 1.2).



Figuur 12: Contouren op voetgangersniveau ( $y = 1.75 \text{ m}$ ) van de kwaliteitsklassen zoals bepaald door NEN 8100, voor de situatie met vegetatie.



Datum  
20/03/2018

Pagina  
15 / 16

#### **4 Discussie en conclusie**

Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties is een onderzoek gedaan naar de te verwachten windhinder rondom de nieuw te bouwen Bunkertoren aan de John F. Kennedylaan 3 te Eindhoven. Het berekende windklimaat is vervolgens beoordeeld door middel van het beslismodel zoals beschreven in de NEN 8100, de Nederlandse norm voor windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving.

Uit de resultaten volgt dat voor de situatie zonder vegetatie, hoofdzakelijk de kwaliteitsklasse C gehaald wordt, met daarbij ook enkele gebieden met klassen B en D. In dit geval is er slechts een goed windklimaat te verwachten voor de activiteitenklasse 'doorlopen'.

De resultaten met veelvuldige vegetatie, zoals voorzien op de aangeleverde bouwplannen, geven aan dat een overwegend goed windklimaat te verwachten is binnen alle activiteitenklassen (doorlopen, slenteren en langdurig zitten). Rondom de Bunkertoren is er nergens een beoordeling slecht.

Het ambitieniveau, zoals verstrekt door de opdrachtgever, omschrijft een beoordeling van minimaal kwaliteitsklasse D in het merendeel van het gebied rondom de Bunkertoren. In beide situaties (met en zonder vegetatie) wordt aan deze vereiste voldaan. Voor de ruimte nabij de voordeuren van de woningen gelegen aan de Bisschopsmolen, ten westen van de Bunkertoren, is een goede beoordeling binnen activiteitenklasse II (slenteren) vereist. Met het in acht nemen van zowel de bestaande als de te planten vegetatie wordt ook aan deze vereiste voldaan. Zonder vegetatie is dit echter niet het geval. Vegetatie op die locaties zal dus nodig zijn.

Uit de berekeningen blijkt dat er volgens het gevaarcriterium in de NEN 8100 geen risico is op windgevaar, noch in de situatie zonder, noch in de situatie met vegetatie.

De te verwachte windhinder is sterk afhankelijk van het toepassen van vegetatie. Het gunstige effect van de vegetatie bestaat erin dat ze de wind ver boven voetgangersniveau (tussen 4 en 10 meter hoogte) gedeeltelijk afleidt en de windsnelheden reduceert. Wanneer voor de activiteitenklassen 'slenteren' of 'langdurig zitten' het kenmerk "goed" behaald moet worden rondom de Bunkertoren, zal er veelvuldig vegetatie toegepast moeten worden, zoals ook vastgelegd op de aangeleverde bouwplannen, om een verhoogd comfortniveau te realiseren.

Verder laten de berekeningen zien dat de bouw van de Bunkertoren niet leidt tot een slechte kwaliteitsklasse in de achtertuinen van de nabijgelegen woningen (Bisschopsmolen en Stevertsemolen). In beide situaties wordt het windklimaat hier grotendeels als goed beoordeeld voor de activiteitenklasse langdurende zitten (kwaliteitsklasse A), en dit al in de situatie zonder vegetatie.

Datum  
20/03/2018

Pagina  
16 / 16

## Referenties

- Franke J, Hellsten A, Schlünzen H, Carissimo B, 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models
- Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, Kataoka H, Nozu T, Yoshikawa M, Shirasawa T, 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(10-11): 1749-1761.
- Blocken B, 2015. Computational Fluid Dynamics for Urban Physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* 91: 219-245
- Wieringa J (1992) Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41: 357-368.
- Blocken B, Janssen W, van Hooff T (2012) CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas : general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling and Software* 30: 15-34
- van Hooff T, Blocken B, 2010. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: a case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software* 25(1): 51-65.
- Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Zhu J, 1995. A new  $k-\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation. *Computers and Fluids*, 24(3), 227-238.
- Launder BE, Spalding DB, 1974. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3: 269-289.
- Cebeci T, Bradshaw P, 1977. *Momentum transfer in boundary layers*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J, 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment* 41(2): 238-252.
- Green S.R. (1992) Modelling turbulent air flow in a stand of widely-spaced trees. *Phoenics Journal computational fluid dynamics and its applications*, 5: 294-312.
- Gromke C., Blocken B., Janssen W., Merema B., van Hooff T., Timmermans H. (2015) CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83: 11-26.