

# Rapport

---

## Project: De Aarhof

Locatie: Alphen aan den Rijn, Nederland  
Onderwerp: CFD simulaties windhinderonderzoek  
Document: B621009e001  
Datum: 30 Juni 2023

| Revisie | Status                 | Omschrijving                         | Auteur   | Controle door | Datum      |
|---------|------------------------|--------------------------------------|----------|---------------|------------|
| 0       | 1 <sup>e</sup> uitgave | CFD rapport                          | J. Braal | S. Stengewis  | 11/11/2021 |
| 1       | 2 <sup>e</sup> uitgave | Veranderingen geometrie ontwikkeling | J. Braal | A. de Loor    | 30/06/2023 |

|                      |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|
| <b>Project</b>       | <b>De Aarhof</b>                          |
| Locatie              | Alphen aan den Rijn, Nederland            |
| <br>                 |                                           |
| <b>Onderwerp</b>     | <b>CFD simulaties windhinderonderzoek</b> |
| Document             | B621009e001                               |
| Revisie              | 1                                         |
| Datum                | 30 Juni 2023                              |
| Status               | Definitief                                |
| Auteur               | J. Braal                                  |
| Controle door        | A. de Loor                                |
| <br>                 |                                           |
| <b>Opdrachtgever</b> | <b>Nelissen ingenieursbureau</b>          |
|                      | Larixplein 7                              |
|                      | 5602 BG Eindhoven                         |
|                      | Nederland                                 |
| Contact              | Erik Bouwens                              |
| <br>                 |                                           |
| <b>Uitgever</b>      | <b>ONE Simulations BV</b>                 |
|                      | 3 <sup>e</sup> Binnenvestgracht 23K       |
|                      | 2312 NR Leiden                            |
|                      | Nederland                                 |
|                      | +31 (0)71 5680900                         |
|                      | info@onesimulations.com                   |
|                      | www.onesimulations.com                    |

## Inhoudsopgave

|     |                                                                            |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Introductie.....                                                           | 4  |
| 2   | Onderzoeksdoel en beoordelingsmethodiek.....                               | 4  |
| 3   | Uitgangspunten.....                                                        | 5  |
| 3.1 | Geometrie.....                                                             | 5  |
| 3.2 | Windklimaat.....                                                           | 8  |
| 3.3 | Windprofiel.....                                                           | 10 |
| 3.4 | CFD modellering.....                                                       | 12 |
| 4   | Resultaten windhinderonderzoek.....                                        | 13 |
| 4.1 | Windhinder.....                                                            | 13 |
| 4.2 | Windgevaar.....                                                            | 20 |
| 5   | Samenvatting.....                                                          | 24 |
|     | Referenties.....                                                           | 25 |
|     | Appendix A – CFD simulatieresultaten per windrichting oude situatie.....   | 26 |
|     | Appendix B – CFD simulatieresultaten per windrichting nieuwe situatie..... | 51 |
|     | Appendix C – Omschrijving software en validatielijst.....                  | 76 |

## 1 Introductie

Op verzoek van Nelissen ingenieurbureau is een windhinderonderzoek uitgevoerd voor het ontwikkelingsproject Aarhof, te Alphen aan den Rijn. Het ontwikkelingsproject omvat een winkelcentrum met daarboven/omheen woongebouwen van gemiddeld 5 bouwlagen hoog en twee woontorens van circa 49 en 65 m hoog. Er is tevens een bovengrondse parkeergarage aanwezig.

Het windklimaat rond de Aarhof is inzichtelijk gemaakt met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties aan de hand van de methodiek die omschreven staat in de NEN8100 (1). Er is inzicht verschaft in het windklimaat op straatniveau in de directe omgeving van de ontwikkeling, de balkons, galerijen en op het parkeergebied op de 1<sup>e</sup> verdieping.

Een CFD simulatie geeft inzicht in de te verwachten luchtstromingen, rekening houdend met verschillende fysische verschijnselen. Bij een dergelijke simulatie wordt een geometrie voorzien van een rekengrid waarbinnen de massa-, energie- en impulsbalansen worden opgelost.

## 2 Onderzoeksdoel en beoordelingsmethodiek

Het doel van het onderzoek is het lokale windklimaat op straatniveau, de balkons, galerijen, het parkeergebied en de ingangen van de Aarhof inzichtelijk te maken. Daarnaast wordt het lokale windklimaat op straatniveau van de ontwikkeling vergeleken met de huidige situatie van de Aarhof.

Het lokale windklimaat is inzichtelijk gemaakt aan de hand van de methode omschreven in de NEN8100. De NEN8100 maakt gebruik van een classificatie tabel waarbij de boordeling van het windklimaat bij een activiteit wordt gedaan naar de frequentie dat de drempelwaarde (windsnelheid) per jaar wordt overschreden. De drempelwaarde voor windhinder is vastgesteld op 5 m/s. In Tabel 1 is deze classificatie weergegeven. De CFD simulaties zijn voor 12 windrichtingen uitgevoerd. De som van het aantal uren dat de drempelwaarde wordt overschreden, bepaalt de kwaliteitsklasse rondom het ontwikkelingsgebied. Deze beoordeling moet worden uitgevoerd op 1,75 m boven het maaiveld.

| Overschrijdingskans<br>In procenten van het aantal<br>uren per jaar | Kwaliteitsklasse | Activiteiten |           |                     |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------|---------------------|
|                                                                     |                  | Doorlopen    | Slenteren | Langdurig<br>zitten |
| <2.5                                                                | A                | Goed         | Goed      | Goed                |
| 2.5 – 5                                                             | B                | Goed         | Goed      | Matig               |
| 5 – 10                                                              | C                | Goed         | Matig     | Slecht              |
| 10 – 20                                                             | D                | Matig        | Slecht    | Slecht              |
| >20                                                                 | E                | Slecht       | Slecht    | Slecht              |

Tabel 1: Classificatie windhinder conform NEN8100.



De drempelwaarde voor windgevaar is in de NEN8100 vastgesteld op 15 m/s. In Tabel 2 zijn de overschrijdingskans en bijbehorende kwalificaties voor windgevaar gegeven.

| Overschrijdingskans p<br>In procenten van het aantal<br>uren per jaar | Kwalificatie   |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|
| $0,05 < p < 0,30$                                                     | Beperkt risico |
| $p > 0,30$                                                            | Gevaarlijk     |

Tabel 2: Kwalificatie tabel windgevaar conform NEN8100.

Situaties waarvoor een overschrijdingskans geldt van  $0,05 < p < 0,30$  mogen alleen worden geaccepteerd als deze vallen binnen de activiteitenklasse Doorlopen. Voor activiteitenklasse Slenteren en Langdurig zitten geldt de eis  $p \leq 0,05$ . Situaties met een overschrijdingskans van  $p \geq 0,30$  zijn evident gevaarlijk en behoren te allen tijde te worden vermeden; het publiek mag hier niet aan worden blootgesteld.

### 3 Uitgangspunten

#### 3.1 Geometrie

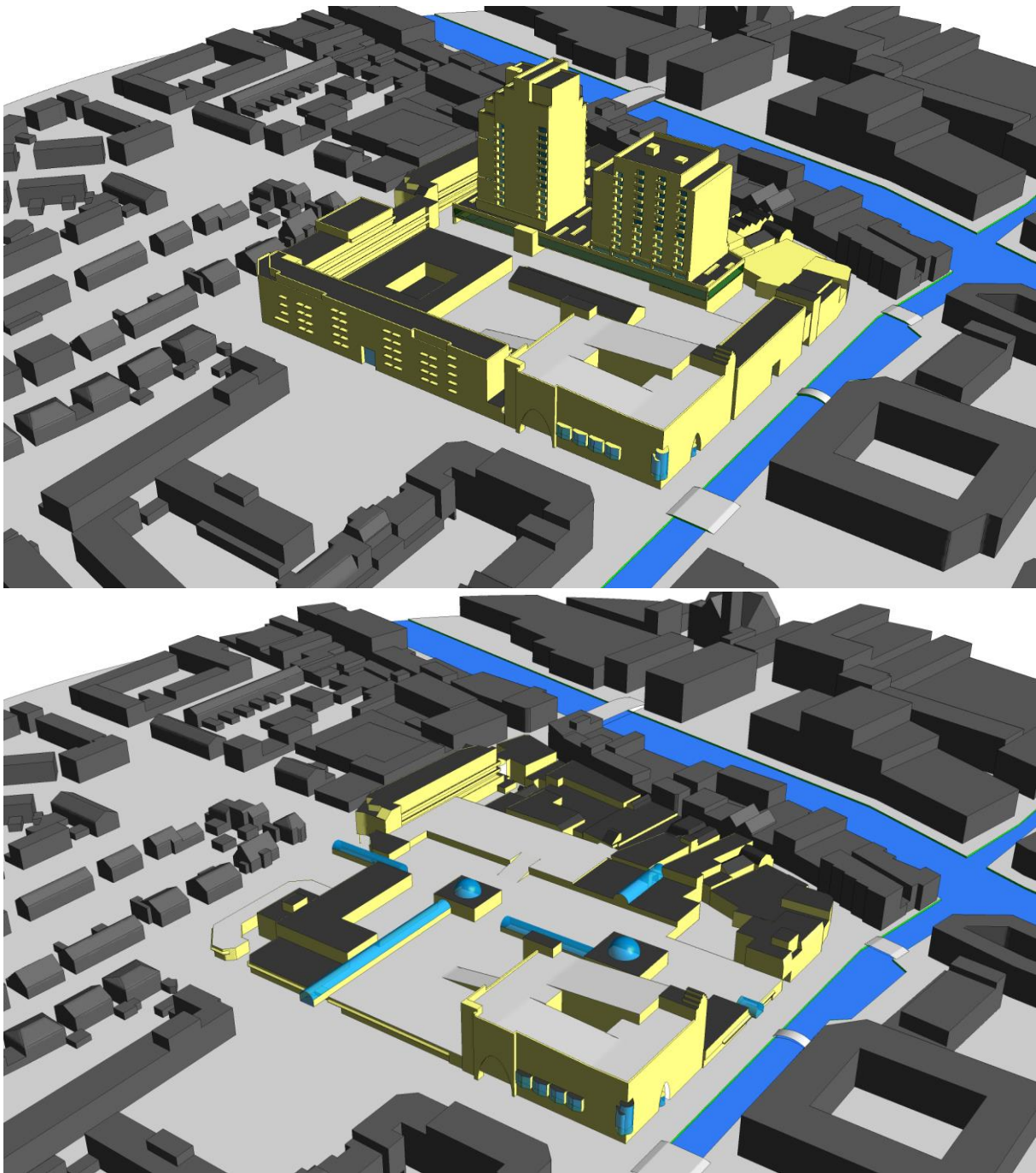
De Aarhof is een ontwikkeling in Alphen aan den Rijn, de ontwikkeling omvat een winkelcentrum met daarboven/omheen woongebouwen van gemiddeld vijf bouwlagen hoog en twee woontorens van circa 49 en 65 m hoog. Tevens wordt de bovengrondse parkeergarage verbouwd en wordt er onder de woontorens een extra stuk parkeergarage bijgebouwd.

Het 3D CFD model is gebaseerd op het aangeleverde 3D model, weergegeven in Tabel 3. Het 3D model voor de huidige Aarhof is gebaseerd op 3D Bag (2). Daarnaast is de omgeving gereconstrueerd aan de hand van het actueel Hoogtebestand Nederland (3).

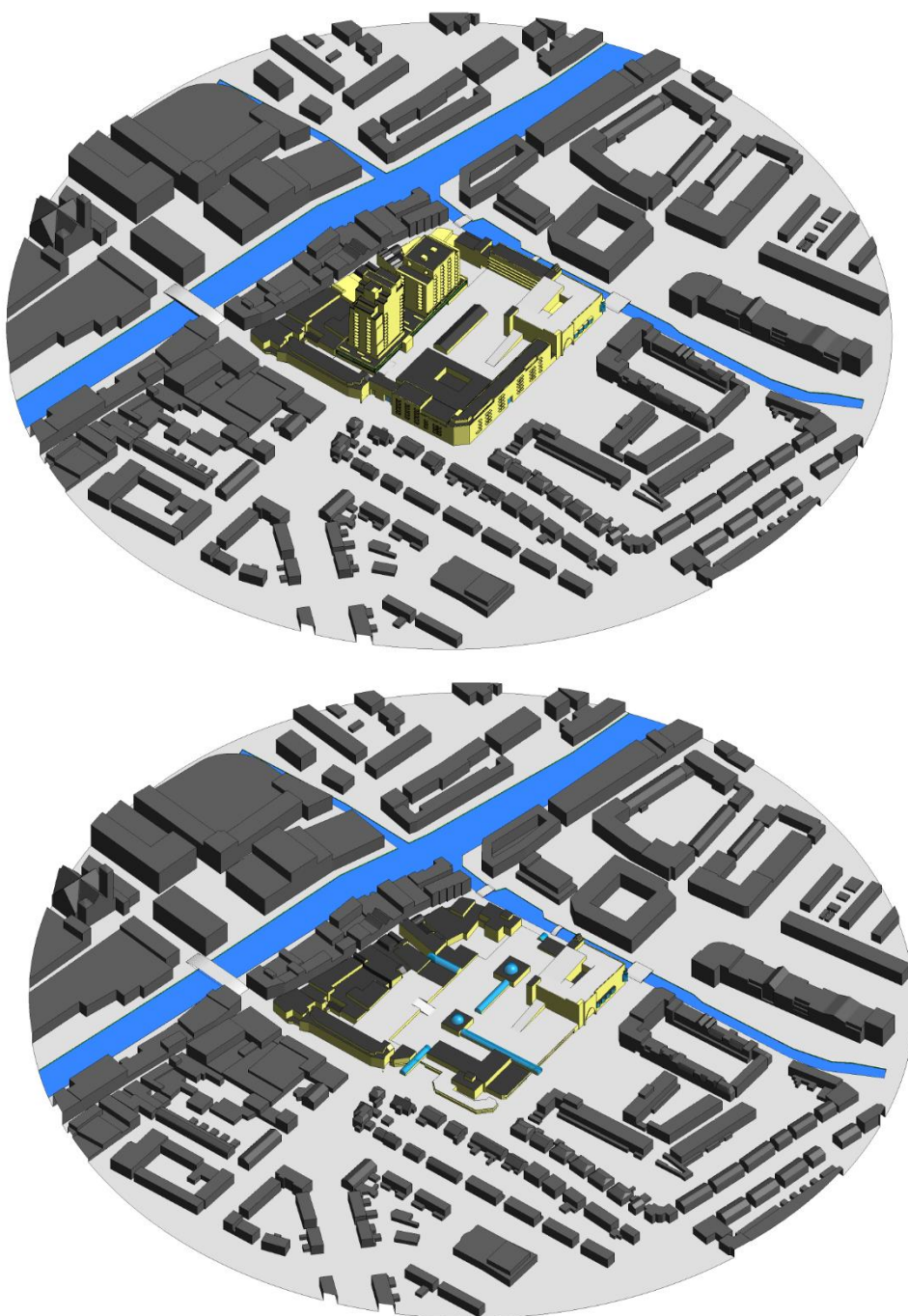
| Model/tekening                               | Omschrijving           | Ontvangen op |
|----------------------------------------------|------------------------|--------------|
| VO_19015_Aarhof_Central File.skp             | 3D model               | 02-11-2021   |
| 19015_211014_200_overzichtsplattegronden.pdf | Overzichtplattegrond   | 02-11-2021   |
| 19015_aarhof_blok E_CF                       | 3D model blok E        | 16-05-2023   |
| 19015_aarhof_blok F_CF                       | 3D model blok F        | 16-05-2023   |
| 19015_aarhof_D_winkelcentrum_CF              | 3D model winkelcentrum | 16-05-2023   |

Tabel 3: Modellen/tekeningen gebruikt als basis voor het CFD model.

In Figuur 1 is een impressie van het 3D CFD model voor de huidige en nieuwe situatie nabij de Aarhof weergegeven. In Figuur 2 is het volledige 3D model voor beide situaties weergegeven.



*Figuur 1: Overzicht van de nieuwbouwontwikkeling (boven) en huidige situatie (beneden) in het 3D CFD model.*

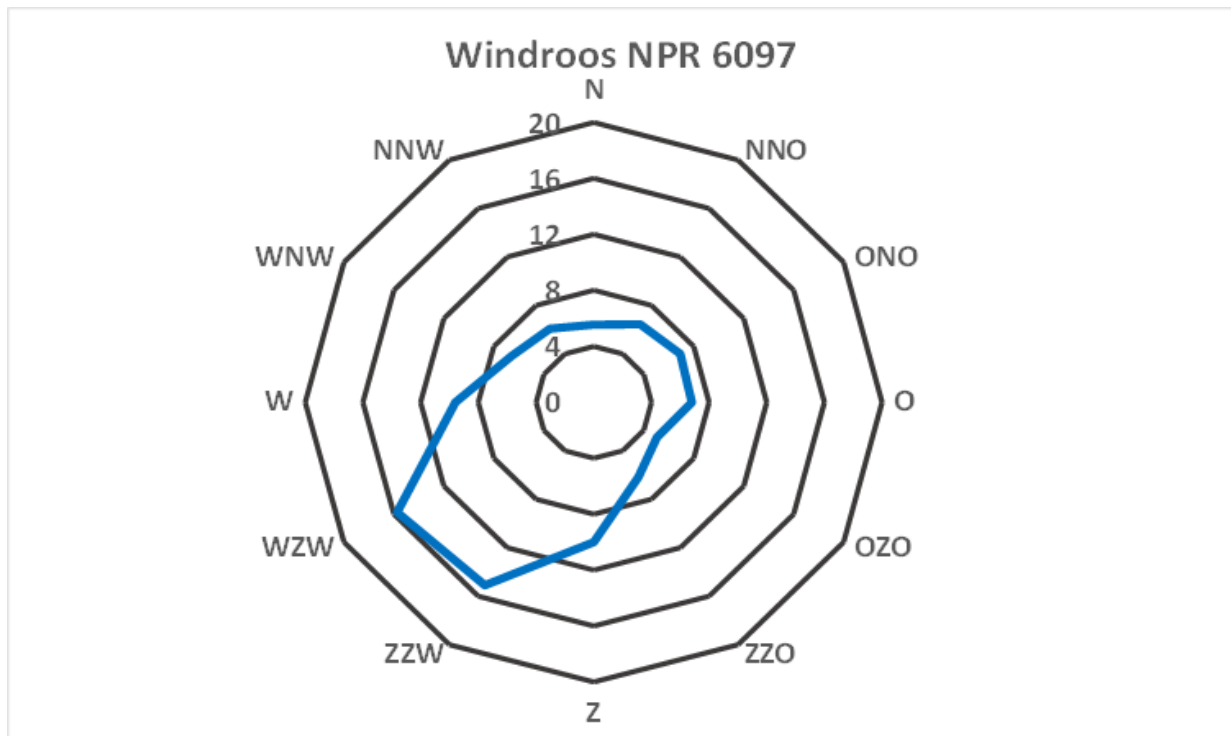


*Figuur 2: Overzicht van het 3D CFD model van de ontwikkeling (boven) en huidige situatie (beneden) met omliggende bebouwing.*

### 3.2 Windklimaat

Het windklimaat is gebaseerd op de Nederlandse praktijkrichtlijn (NPR) 6097. Deze richtlijn omschrijft de toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland over de jaren 1963 – 2002.

De simulaties zijn uitgevoerd voor de 12 windrichtingen zoals aangegeven in de windroos, zie Figuur 3.



*Figuur 3: Windroos ter plaatse van de Aarhof, volgens NPR 6097.*

Het aantal uren wind per windrichting en de windsnelheid hebben effect op het windklimaat. Middels de in de CFD berekende windfactor (verhouding van de lokale windsnelheid ten opzicht van een referentiewindsnelheid) wordt het lokaal aantal uren overschrijding met behulp van de windklimaat data berekend. Tabel 4 geeft de jaargemiddelde frequentie van de windsnelheid per richting over de periode 1963 – 2002.

| Richting    | 0     | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Snelheid    | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] | [uur] |
| 0,0 – 0,9   | 14.8  | 14.6  | 9.4   | 11.2  | 11.8  | 13.2  | 13.6  | 14.6  | 16.3  | 18.4  | 13.5  | 15.9  |
| 1,0 – 1,9   | 52.7  | 51.1  | 34.4  | 36.4  | 33.4  | 42.4  | 46.2  | 53.3  | 54.3  | 58.7  | 48.8  | 50.2  |
| 2,0 – 2,9   | 73.4  | 73.4  | 55.7  | 51.3  | 52    | 64.8  | 81.1  | 87.4  | 82.7  | 82.1  | 67.9  | 68.8  |
| 3,0 – 3,9   | 84.8  | 93.1  | 70.9  | 69.3  | 65.2  | 79.9  | 100.3 | 114.4 | 112.6 | 99.9  | 77.9  | 79.1  |
| 4,0 – 4,9   | 78.2  | 87.3  | 78.1  | 76.9  | 62.8  | 83.7  | 109.8 | 139.3 | 129.4 | 109.4 | 79.3  | 82.2  |
| 5,0 – 5,9   | 65.4  | 78.4  | 85.2  | 82.3  | 60.3  | 76.2  | 107.2 | 151.8 | 151   | 102.8 | 73.8  | 70.4  |
| 6,0 – 6,9   | 50.1  | 61.2  | 74.9  | 74.1  | 52.9  | 60.5  | 98.4  | 140.4 | 152.8 | 87.5  | 60.2  | 55    |
| 7,0 – 7,9   | 31.2  | 43.8  | 57.7  | 57.6  | 36.8  | 41.5  | 83.1  | 135.4 | 144.3 | 77.1  | 51.2  | 38.3  |
| 8,0 – 8,9   | 17.2  | 29.1  | 41.4  | 42.7  | 28    | 30.4  | 67.7  | 118.8 | 124.4 | 60    | 36.2  | 30    |
| 9,0 – 9,9   | 8.9   | 15.5  | 34    | 33.8  | 21.1  | 22    | 54.7  | 100.7 | 109.3 | 43.8  | 27.2  | 18.3  |
| 10,0 – 10,9 | 4.90  | 8.6   | 25.5  | 23.9  | 9.1   | 12    | 37.2  | 80.8  | 89.9  | 32.7  | 17.6  | 10.9  |
| 11,0 – 11,9 | 2.50  | 4.1   | 15.8  | 15.4  | 4.8   | 8.6   | 28.6  | 63.8  | 63.8  | 22.9  | 10.7  | 5.8   |
| 12,0 – 12,9 | 1.50  | 2.5   | 10.7  | 8.8   | 1.8   | 3.8   | 19.2  | 45.7  | 53.3  | 16.8  | 7     | 3.5   |
| 13,0 – 13,9 | 0.80  | 1     | 6.7   | 6.3   | 1.3   | 2     | 11.9  | 30.7  | 34.7  | 12.1  | 2.9   | 1.9   |
| 14,0 – 14,9 | 0.20  | 0.2   | 4.2   | 3.7   | 0.5   | 0.4   | 7.9   | 20    | 22.9  | 6.4   | 1.4   | 1     |
| 15,0 – 15,9 | 0     | 0.1   | 1.7   | 1.5   | 0.5   | 0.4   | 4.3   | 11.6  | 15.9  | 3.9   | 1.1   | 0.4   |
| 16,0 – 16,9 | 0     | 0     | 0.4   | 0.7   | 0.1   | 0.3   | 2.3   | 7.5   | 8.9   | 2.5   | 0.3   | 0.3   |
| 17,0 – 17,9 | 0     | 0     | 0.2   | 0.4   | 0.1   | 0     | 1     | 3.3   | 5     | 1.2   | 0.1   | 0.2   |
| 18,0 – 18,9 | 0     | 0     | 0.1   | 0.1   | 0     | 0     | 0.4   | 2.5   | 3     | 0.8   | 0.2   | 0     |
| 19,0 – 19,9 | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     | 0.5   | 1.3   | 2     | 0.3   | 0.1   | 0     |
| 20,0 – 20,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.3   | 0.8   | 1     | 0.2   | 0     | 0     |
| 21,0 – 21,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.2   | 0.5   | 0     | 0     | 0     |
| 22,0 – 22,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.3   | 0.1   | 0.1   | 0     |
| 23,0 – 23,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.2   | 0.1   | 0     | 0     |
| 24,0 – 24,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     |
| 25,0 – 25,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     |
| 26,0 – 26,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 27,0 – 27,9 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |

Tabel 4: Overzicht van de jaargemiddelde frequentie van de windsnelheid per richting bij de Aarhof volgens NPR 6097.



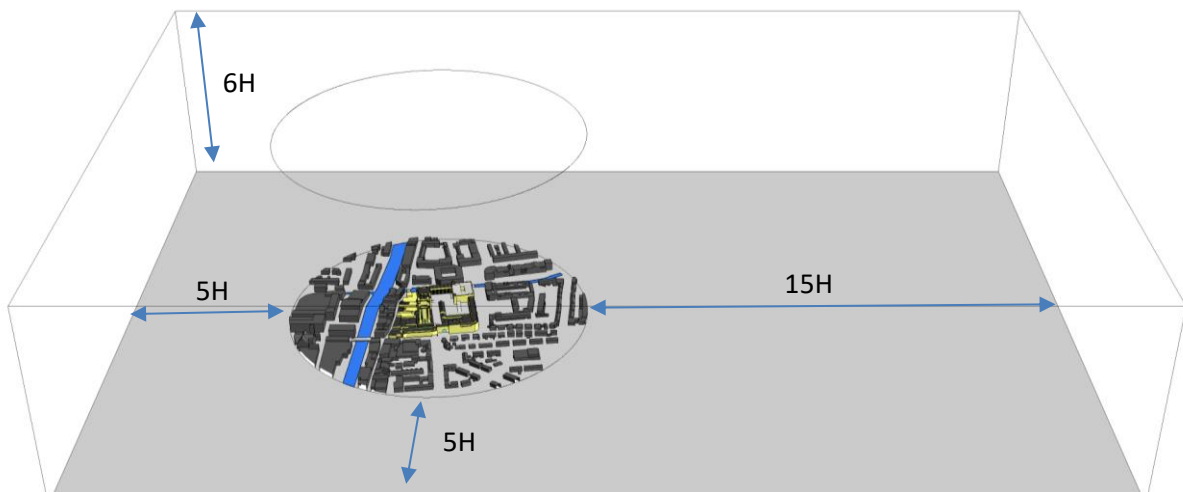
### 3.3 Windprofiel

De windsnelheid is afhankelijk van de hoogte boven het maaiveld. Ter hoogte van het maaiveld is de windsnelheid lager door de invloed van bebouwing en begroeiing. De mate van invloed wordt beschreven door de ruwheidslengte (4). De ruwheidslengte voor het gebied rondom de Aarhof is vastgesteld door middel van de NPR 6097 (5) op 1,6 m (stedelijk gebied). Het windprofiel dat behoort bij een ruwheidslengte van 1,6 m is opgegeven aan alle buitengrenzen van het CFD model.

Rondom de gemodelleerde bebouwing is een winddomein geplaatst. Aan de randen van dit winddomein wordt het windprofiel opgegeven. In het winddomein wordt het windprofiel behouden door volumetrische bronnen van momentum en turbulentie, afgestemd op de betreffende ruwheidslengte.

Door de buitengrenzen van het CFD model op afstand van het gebied van interesse te plaatsen wordt een zo realistisch mogelijke windstroom in de stad berekend. De afmetingen van het winddomein worden bepaald op basis van de hoogte (H) van het hoogste gebouw. De randen van het winddomein bevinden zich ten minste op 5H vanaf de rand van het gemodelleerde gebied. De totale hoogte van het domein is 6H. Het effect van de buitengrens van het CFD model is stroomafwaarts van grotere invloed en is daarom op 15H geplaatst. Door bovenstaande methodiek ontstaat een realistische windstroom in het gebied van interesse.

Het winddomein om het gemodelleerde gebied heen is weergegeven in Figuur 4 en kan worden gezien als een digitale windtunnel.



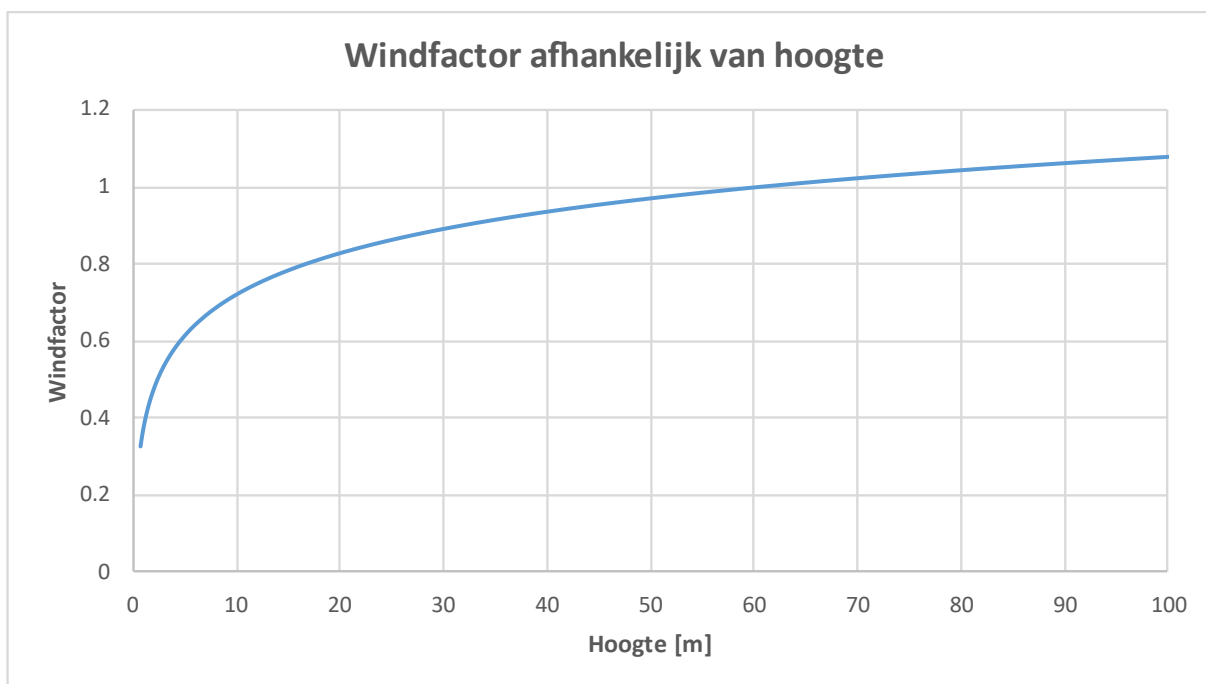
Figuur 4: Winddomein om het gemodelleerde gebied heen, ten behoeve van het windprofiel (digitale windtunnel).

Aan de hand van de referentiewindsnelheid, referentiehoogte en ruwheidslengte kan het windprofiel worden opgesteld. Het windprofiel wordt berekend met onderstaande logaritmische vergelijking en staat als windfactor profiel weergegeven in Figuur 5.

$$v_{wind} = v_{ref} \cdot \left( \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right)$$

Waar,

|            |                       |       |
|------------|-----------------------|-------|
| $v_{wind}$ | Windsnelheid          | [m/s] |
| $v_{ref}$  | Referentiesnelheid    | [m/s] |
| $z$        | Hoogte boven de grond | [m]   |
| $z_0$      | Ruwheidslengte        | [m]   |
| $z_{ref}$  | Referentiehoogte      | [m]   |



Figuur 5: Toegepast windprofiel.

### 3.4 CFD modellering

De simulaties voor de huidige en nieuwe situatie zijn uitgevoerd met behulp van het softwarepakket ANSYS CFX versie 2021 R1 en 2023 R1 respectievelijk. Dit softwarepakket is geschikt voor vele toepassingen en in ruime mate gevalideerd. In Bijlage C staat een omschrijving van de software en validatielijst voor deze toepassing.

Er is een 3D model gecreëerd van het gebied rondom de Aarhof. Vervolgens is het model opgedeeld in een grote hoeveelheid rekencellen. De standaard differentiaalvergelijkingen voor de stroming van een fluïdum worden voor elke cel opgelost. In Tabel 5 staan de belangrijkste toegepaste randvoorwaarden beschreven.

| Parameter                              | Beschrijving                                                                                                                                           |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cel type</b>                        | Hybride, combinatie van hexaëders, tetraëders, piramides en prisma's                                                                                   |
| <b>Cel grootte</b>                     | Dynamisch, variërend tussen 0,025 tot 1,0 m in de omgeving (vlakken) groeiend met een factor 1,2 tot maximaal 15 m in het vrije volume                 |
| <b>Aantal cellen</b>                   | 83.1 miljoen                                                                                                                                           |
| <b>Simulatie type</b>                  | Steady state                                                                                                                                           |
| <b>Convergentie criteria</b>           | RMS maximaal $1 \cdot 10^{-4}$                                                                                                                         |
| <b>Tijdstap</b>                        | 2,5 s                                                                                                                                                  |
| <b>Aantal iteraties</b>                | 1000                                                                                                                                                   |
| <b>Fluïde</b>                          | Lucht met constante eigenschappen                                                                                                                      |
| <b>Turbulentie model</b>               | RANS, RNG Kappa Epsilon model                                                                                                                          |
| <b>Wanden</b>                          | Glad met stilstaande lucht (no slip)                                                                                                                   |
| <b>Grondvlak (gemodelleerd gebied)</b> | Ruw met stilstaande lucht (no slip)<br>Wandruwheid: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0.050 m op straten</li> <li>- 0.001 m op water</li> </ul> |
| <b>Randen winddomein</b>               | Snelheids- en turbulentieprofiel                                                                                                                       |
| <b>Ruwheid winddomein</b>              | Gemodelleerd door toepassing van volumetrische bronnen voor momentum en turbulentie net boven het maaiveld                                             |
| <b>Balkonreling</b>                    | Volumetrische weerstandscoefficiënt: 0.15                                                                                                              |

Tabel 5: CFD modellering eigenschappen.



## 4 Resultaten windhinderonderzoek

Het aantal uren overschrijding van windhinder en windgevaar is voor 12 windrichtingen berekend. Het resulterende aantal uren overschrijding is op straat, in parkeergebieden en galerijen op voetgangersniveau (1,75 meter boven het grondvlak) en boven balkons (1 m boven de vloer) voor alle windrichtingen gesommeerd. Met deze resultaten wordt het percentage jaarlijkse overschrijding van windhinder en windgevaar berekend. De resultaten per windrichting zijn bijgevoegd in Bijlage A voor de huidige situatie en in Bijlage B voor de nieuwbouwontwikkeling.

### 4.1 Windhinder

In Figuur 6 en Figuur 7 wordt respectievelijk het percentage overschrijding van windhinder op jaarbasis weergegeven volgens de kwaliteitsklassen uit de NEN8100 op 1,75 m boven de grond en boven het parkeerdek. De bovenste figuur toont het resultaat voor de situatie met de ontwikkeling en de onderste figuur toont de huidige situatie. In Figuur 8 wordt het percentage overschrijding van windhinder op jaarbasis op 1,75 m boven de galerijen en 1 m boven balkons weergegeven voor de nieuwbouwontwikkeling.

Op Figuur 6 is te zien dat in de huidige situatie voornamelijk kwaliteitsklasse A waarneembaar is rondom de Aarhof, met gebieden van kwaliteitsklasse C langs de Aarkade en De Vest. In de nieuwe situatie is kwaliteitsklasse A voornamelijk aan de zuid- en westkant van de Aarhof te zien. De gebieden met kwaliteitsklasse B en C langs de Aarkade en De Vest zijn iets uitgebreid. De nieuwbouwontwikkeling zorgt voor een verandering van het windklimaat op straatniveau aan de noord en de zuidoostkant van het gebied. Op het parkeerdek is aan de zuidkant een verandering ten opzichte van de huidige situatie zichtbaar.

Aan de noordzijde van het ontwikkelingsgebied is een verandering te zien in de bevoorradingssteeg (Aarkade) naar kwaliteitsklasse C, dit is goed voor de activiteit doorlopen

Aan de zuidoostkant van de Aarhof zijn voornamelijk kwaliteitsklassen C en D waarneembaar met een relatief klein gebied met kwaliteitsklasse E. Dit is een gevolg van de veelvoorkomende windrichtingen 210 en 240 graden (zuidwestenwind). Bij deze windrichtingen stroomt de lucht langs de zuidzijde van de Aarhof en versnelt om de zuidoosthoek van het gebouw de straat de Vest in, weergegeven in Figuur 9. Ter verduidelijking van de grootte van dit gebied is een vergrote afbeelding in Figuur 10 weergegeven.

Aan de zuidkant, bij de inrit van het bevoorradingsgebied, is voornamelijk kwaliteitsklasse A waarneembaar voor de nieuwe situatie. Bij de huidige situatie is hier een groot gebied met kwaliteitsklasse B waarneembaar. De nieuwe opgaande gevel zorgt voor de verbetering van het windklimaat in dit gebied.

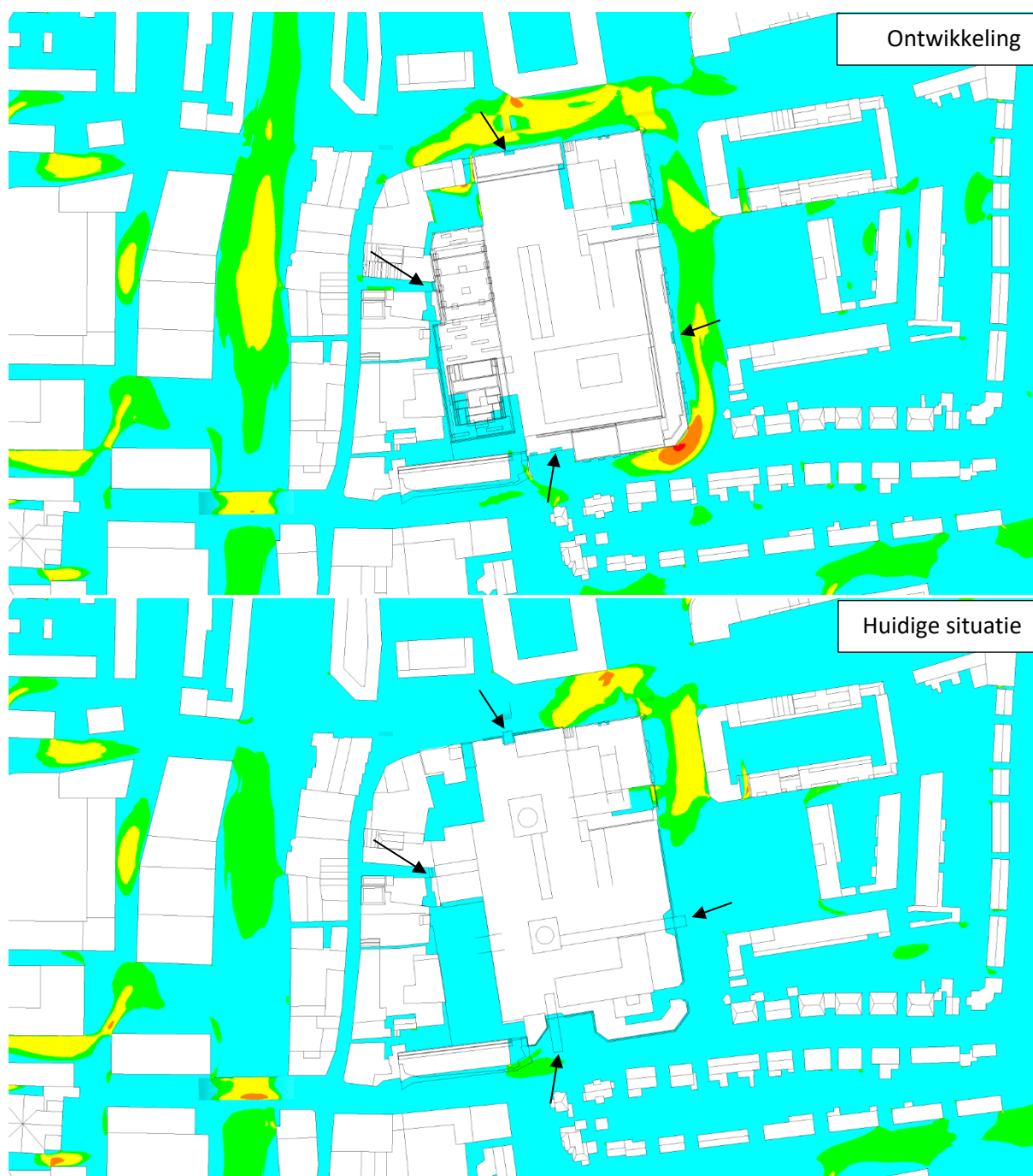
Aan de westkant van de Aarhof in de zijstraat Van Manderslootstraat naar het winkelcentrum, de Samuel aardewerksteeg en het doorloopgebied richting de bevoorrading is kwaliteitsklasse A waarneembaar voor de nieuwe en huidige situatie.

Op het parkeerdek ten oosten van de woontorens is op 1,75 m hoogte kwaliteitsklasse C of beter waarneembaar. Dit gebied wordt gemarkeerd als een doorloopgebied. Kwaliteitsklasse C betekent een goed windklimaat voor de activiteit doorlopen. Alleen aan de zuidkant is een klein gebied met kwaliteitsklasse E waarneembaar. Dit gebied zal echter worden gebruikt als parkeerplaats.

Nabij alle ingangen van het winkelcentrum is in de nieuwe situatie kwaliteitsklasse A waarneembaar. Dit is een goed windklimaat voor de activiteit langdurig zitten.

Op 1,75 m hoogte boven de galerijen is kwaliteitsklasse C of beter waarneembaar. Kwaliteitsklasse C markeert een goed windklimaat voor de activiteit doorlopen.

Op 1 m boven de balkons is voornamelijk op de balkons ten zuidwesten van de woontorens kwaliteitsklasse E waarneembaar. Dit wordt veroorzaakt doordat veelvoorkomende wind uit het zuidwesten langs en tussen de twee woontorens versnelt, weergegeven in Figuur 10. Door deze versnelling wordt de grenswaarde voor windhinder relatief vaak overschreden, waardoor een slecht windklimaat ontstaat. De balustrades van de balkons zijn open hekken die lucht nauwelijks tegenhoudt. Door deze balustrades gesloten te maken kan het windklimaat worden verbeterd.



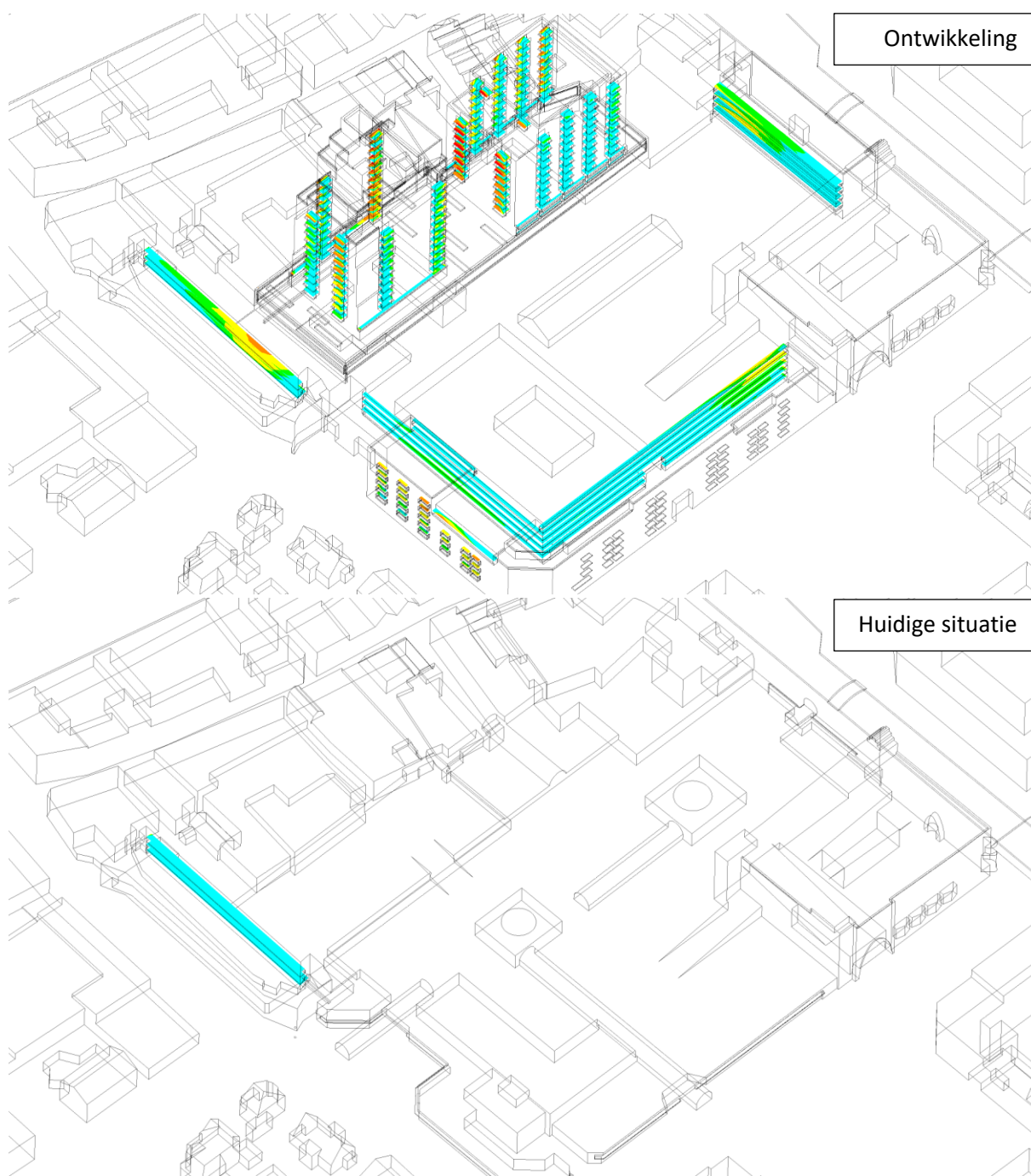
| Overschrijdingskans<br>In procenten van het aantal<br>uren per jaar | Kwaliteitsklasse | Activiteiten |           |                     |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------|---------------------|
|                                                                     |                  | Doorlopen    | Slenteren | Langdurig<br>zitten |
| <2,5                                                                | A                | Goed         | Goed      | Goed                |
| 2,5 – 5                                                             | B                | Goed         | Goed      | Matig               |
| 5 – 10                                                              | C                | Goed         | Matig     | Slecht              |
| 10 – 20                                                             | D                | Matig        | Slecht    | Slecht              |
| >20                                                                 | E                | Slecht       | Slecht    | Slecht              |

Figuur 6: Kwaliteitsklasse op 1,75 meter boven straatniveau volgens de NEN8100 rond de ontwikkeling (boven) en huidige situatie (onder). De pijlen geven de ingangen van het winkelcentrum aan.



| Overschrijdingskans<br>In procenten van het aantal<br>uren per jaar | Kwaliteitsklasse | Activiteiten |           |                     |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------|---------------------|
|                                                                     |                  | Doorlopen    | Slenteren | Langdurig<br>zitten |
| <2,5                                                                | A                | Goed         | Goed      | Goed                |
| 2,5 – 5                                                             | B                | Goed         | Goed      | Matig               |
| 5 – 10                                                              | C                | Goed         | Matig     | Slecht              |
| 10 – 20                                                             | D                | Matig        | Slecht    | Slecht              |
| >20                                                                 | E                | Slecht       | Slecht    | Slecht              |

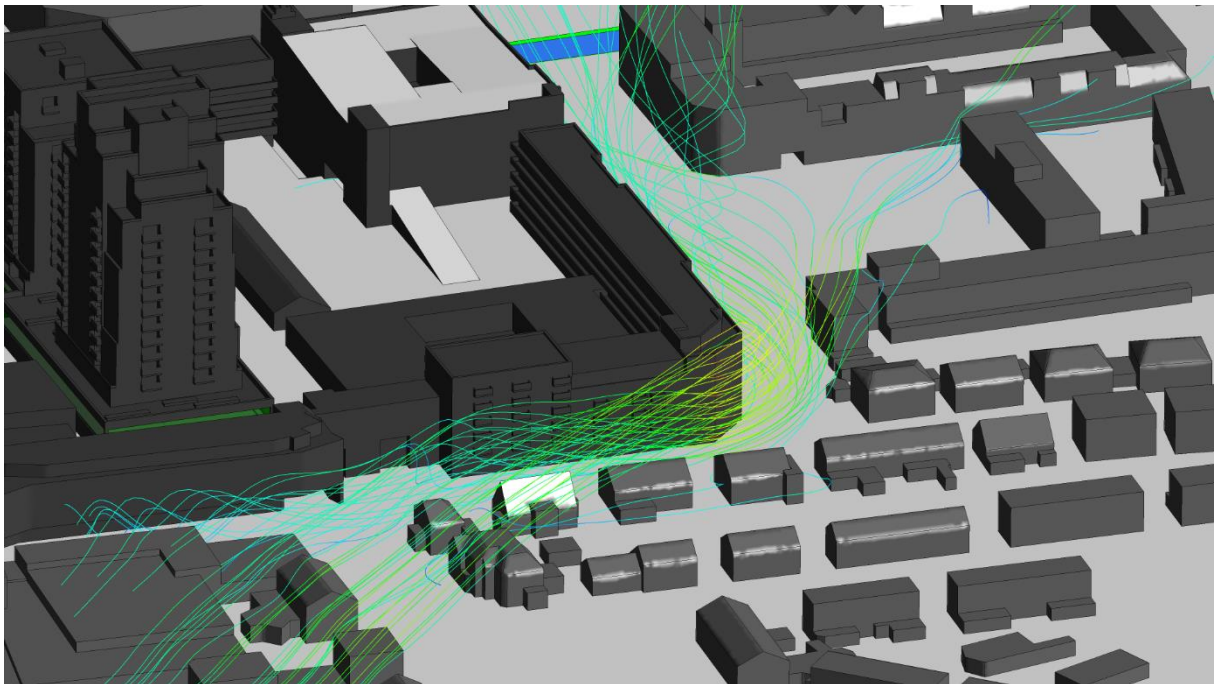
Figuur 7: Kwaliteitsklasse op 1,75 meter boven het parkeerdek volgens de NEN8100 rond de ontwikkeling (boven) en huidige situatie (onder). De pijlen geven de ingangen van het winkelcentrum aan.



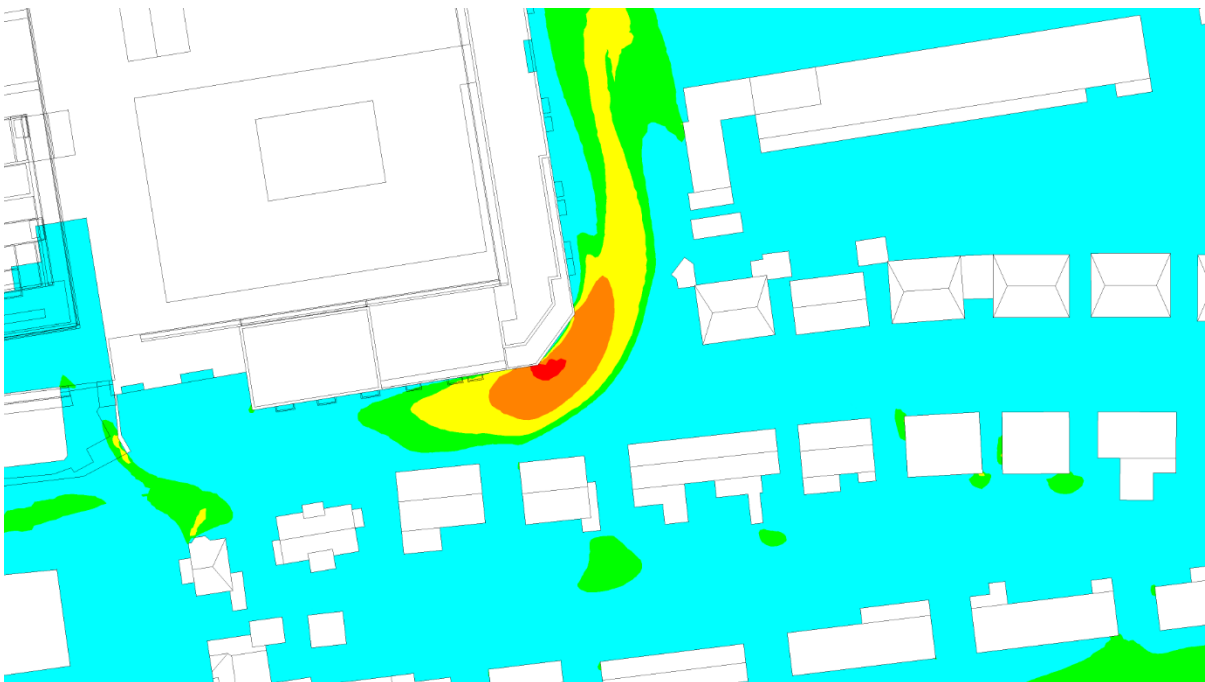
| Overschrijdingskans<br>In procenten van het aantal<br>uren per jaar | Kwaliteitsklasse | Activiteiten |           |                     |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------|---------------------|
|                                                                     |                  | Doorlopen    | Slenteren | Langdurig<br>zitten |
| <2,5                                                                | A                | Goed         | Goed      | Goed                |
| 2,5 – 5                                                             | B                | Goed         | Goed      | Matig               |
| 5 – 10                                                              | C                | Goed         | Matig     | Slecht              |
| 10 – 20                                                             | D                | Matig        | Slecht    | Slecht              |
| >20                                                                 | E                | Slecht       | Slecht    | Slecht              |

Figuur 8: Kwaliteitsklasse op 1,75 meter boven de galerijen en 1 meter boven de balkons voor de ontwikkeling(boven) en de huidige situatie (onder) volgens de NEN8100.

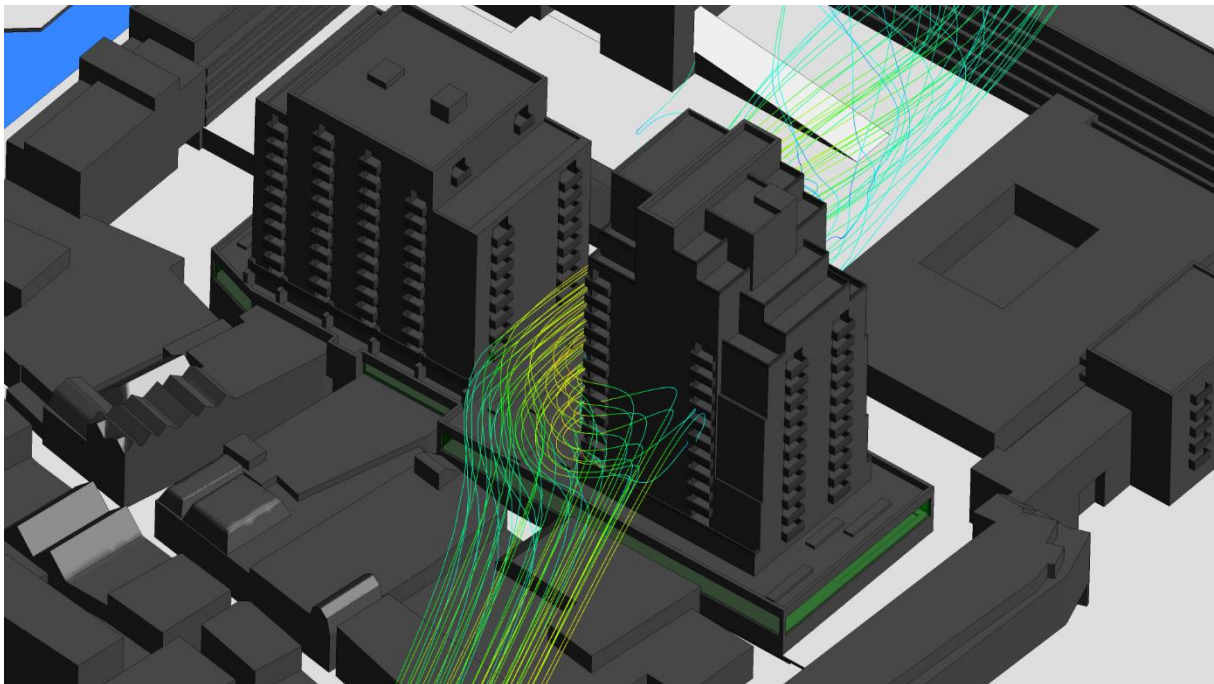




*Figuur 9: Stroomlijnen van de lucht die langs het de zuidoost gevel van de ontwikkeling langs de hoek versnelt. (windrichting 210).*



*Figuur 10: Vergrote weergave van de zuidoost zijde van de Aarhof in de nieuwe situatie (schaal volgens de NEN8100, zie Figuur 6), de contour is weergegeven op 1.75 m boven het maaiveld.*



*Figuur 11: Stroomlijnen van veelvoorkomende wind uit het zuidwesten die langs en tussen de twee woontorens versnelt (windrichting 240).*

## 4.2 Windgevaar

In de NEN8100 staat dat een percentage overschrijding van 0,30% per jaar gevaarlijk is en dat publiek hier niet aan mag worden blootgesteld. Daarnaast wordt in de NEN8100 gesteld dat situaties met een overschrijdingskans van 0,05% tot 0,30%, een beperkt risico, alleen mag worden geaccepteerd als dit binnen de activiteitenklasse doorlopen valt.

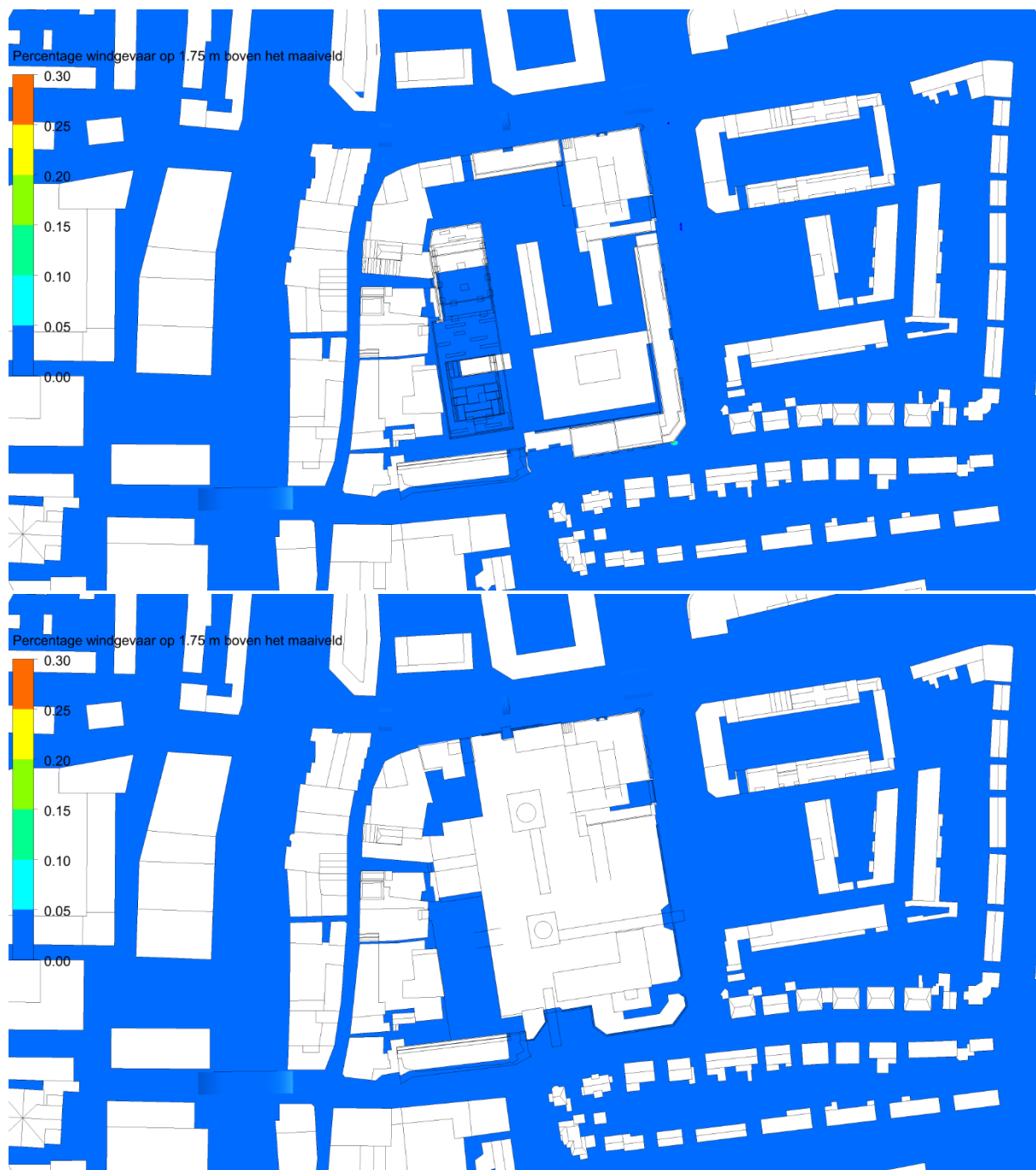
In Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14 wordt respectievelijk het percentage overschrijding van windgevaar op 1,75 m boven het grondvlak, boven het parkeerdek, boven de galerijen en 1 m boven de balkons op jaarbasis weergegeven volgens de boordeling uit de NEN8100 voor de ontwikkeling en de huidige situatie.

Te zien is dat rondom de ontwikkeling, het parkeerdek en boven de galerijen de grens voor windgevaar niet wordt overschreden met uitzondering van een klein gebied aan de zuidoostkant van de Aarhof. Dit is toegestaan als hier de activiteit doorlopen geldt.

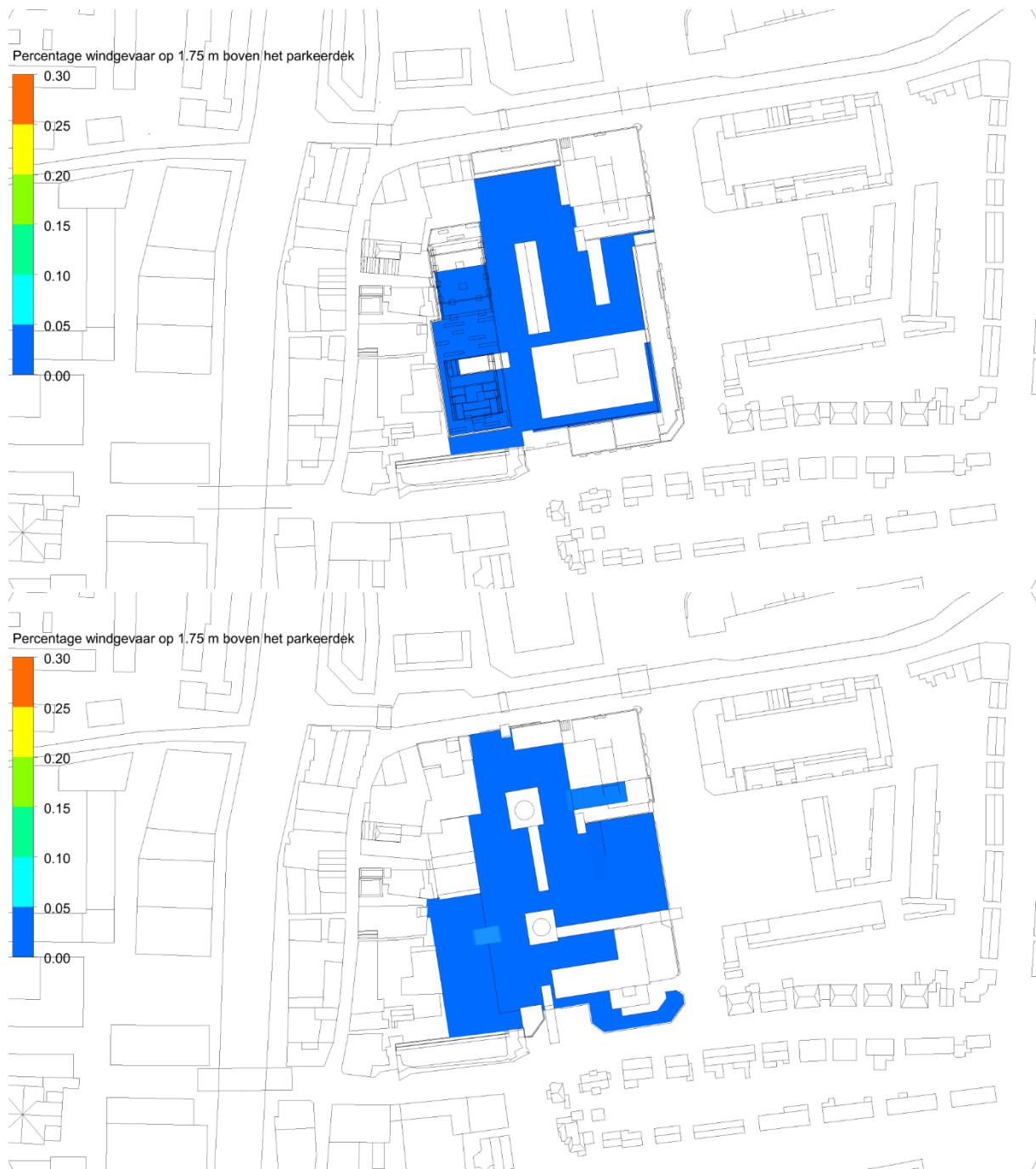
Een mogelijke verbetering kan worden behaald door het effect te onderzoeken van een luifel langs de zuidgevel van de nieuwbouw, waardoor wind die langs het gebouw naar beneden komt boven de stoep (op de luifel) om de nieuwbouw heen stroomt.

Aan de zuidwestkant van de woontorens wordt op een aantal balkons de grens van windgevaar overschreden. Er wordt geadviseerd maatregelen te treffen om het windklimaat op de balkons te verbeteren. Dit kan worden gerealiseerd door het plaatsen van verhoogde dichte balustrades.

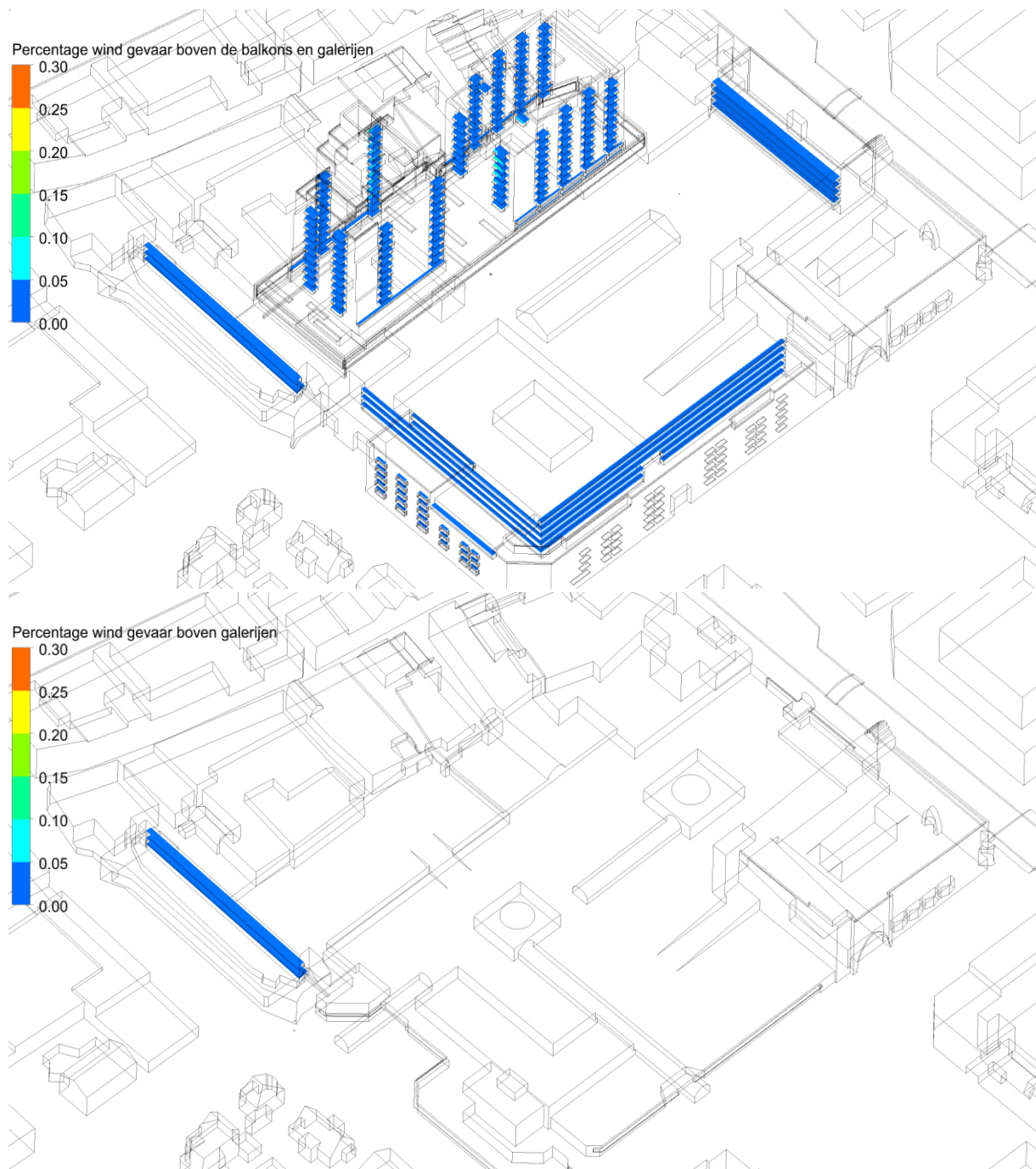




*Figuur 12: Percentage windgevaar per jaar op 1,75 m boven het maaiveld voor de ontwikkeling (boven) en de huidige situatie (onder).*



*Figuur 13: Percentage windgevaar per jaar op 1,75 m boven het parkeerdek voor de ontwikkeling (boven) en de huidige situatie (onder).*



*Figuur 14: Percentage windgevaar per jaar op 1,75 m boven de galerijen, en 1 m boven de balkons, voor de ontwikkeling (boven) en de huidige situatie (onder).*

## 5 Samenvatting

Op verzoek van Nelissen Ingenieursbureau is een windhinderonderzoek uitgevoerd voor het project De Aarhof, te Alphen aan den Rijn. De ontwikkeling omvat een winkelcentrum met daarboven en er omheen woongebouwen van gemiddeld vijf bouwlagen hoog en twee woontorens van circa 49 en 65 m hoog. Er is tevens een bovengrondse parkeergarage aanwezig.

Het windklimaat is inzichtelijk gemaakt met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties aan de hand van de methodiek die omschreven staat in de NEN8100 (1). Er is inzicht verschaft in het windklimaat op straatniveau rond de ontwikkeling, de balkons, galerijen en op het parkeerdek. Daarnaast wordt het lokale windklimaat op straatniveau van de ontwikkeling vergeleken met de huidige situatie van de Aarhof.

De resultaten tonen dat voornamelijk kwaliteitsklasse A waarneembaar is rondom de Aarhof, met gebieden van kwaliteitsklasse C langs de Aarkade en De Vest. In de nieuwe situatie is kwaliteitsklasse A voornamelijk aan de zuid- en westkant van de Aarhof te zien. De gebieden met kwaliteitsklasse B en C langs de Aarkade en De Vest zijn iets uitgebreid. De nieuwbouwontwikkeling zorgt voor een verandering van het windklimaat op straatniveau aan de noord en de zuidoostkant van het gebied. Op het parkeerdek is aan de zuidkant een verandering ten opzicht van de huidige situatie zichtbaar.

Aan de noordzijde van het ontwikkelingsgebied is een verandering te zien in de bevoorradingssteeg (Aarkade) naar kwaliteitsklasse C, dit is goed voor de activiteit doorlopen. Aan de zuidoostkant van de Aarhof is een klein gebied met kwaliteitsklasse E waarneembaar. Aan de westkant van de Aarhof in de zijstraat van de Van Manderslootstraat naar het winkelcentrum, de Samuel Aardewerksteeg en het doorloopgebied richting de bevoorrading is kwaliteitsklasse A waarneembaar voor de nieuwe en huidige situatie.

Op het parkeerdek ten oosten van de woontorens is op 1,75 m hoogte kwaliteitsklasse C of beter waarneembaar. Alleen aan de zuidkant is een klein gebied met kwaliteitsklasse E waarneembaar. Dit gebied zal echter worden gebruikt als parkeerplaats.

Nabij alle ingangen van het winkelcentrum (zie Figuur 6) is in de nieuwe situatie kwaliteitsklasse A waarneembaar. Dit is een goed windklimaat voor de activiteit langdurig zitten.

Op 1,75 m hoogte boven de galerijen is kwaliteitsklasse C of beter waarneembaar. Kwaliteitsklasse C markeert een goed windklimaat voor de activiteit doorlopen. Op 1 m boven de balkons is voornamelijk op de balkons ten zuidwesten van de woontorens kwaliteitsklasse E waarneembaar.

Rondom de ontwikkeling, het parkeerdek en boven de galerijen wordt de grens voor windgevaar niet overschreden, met uitzondering van een klein gebied aan de zuidoostkant van de Aarhof. Dit is toegestaan als hier de activiteit doorlopen geldt.

Op een aantal balkons wordt aan de zuidwestkant van de woontorens de grens van windgevaar overschreden. Er wordt geadviseerd maatregelen te treffen om het windklimaat op de balkons te verbeteren. Dit kan worden gerealiseerd door het plaatsen van verhoogde dichte balustrades.

## Referenties

1. NEN 8100 Windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving. Delft : Nederlands Normalisatie-instituut, februari 2006.
2. 3D Geoinformation research group. <https://3dbag.nl/>. [Online]
3. *Actueel Hoogtebestand Nederland*. [Online] <https://www.ahn.nl/en>.
4. Troen, Ib and Petersen, Erik Lundtang. *Roughness Classes and Roughness Length Table in "European Wind Atlas"*. Risoe , Denmark : Risoe National Laboratory, 1991. ISBN 87-550-1482-8.
5. Nederlandse Normalisatie-instituut. *Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland*. Delft : s.n., 2006. NPR 6097.

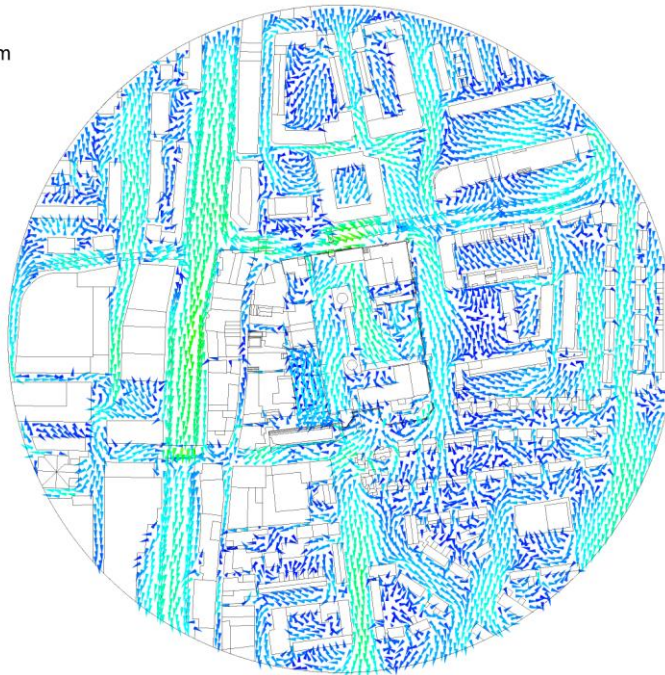
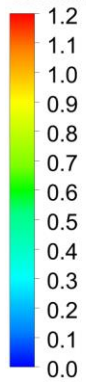
## **Appendix A – CFD simulatieresultaten per windrichting oude situatie**

Op de volgende pagina's worden de CFD simulatieresultaten per windrichting weergegeven op 1,75 m boven het grondvlak. Voor iedere windrichting is het volgende weergegeven:

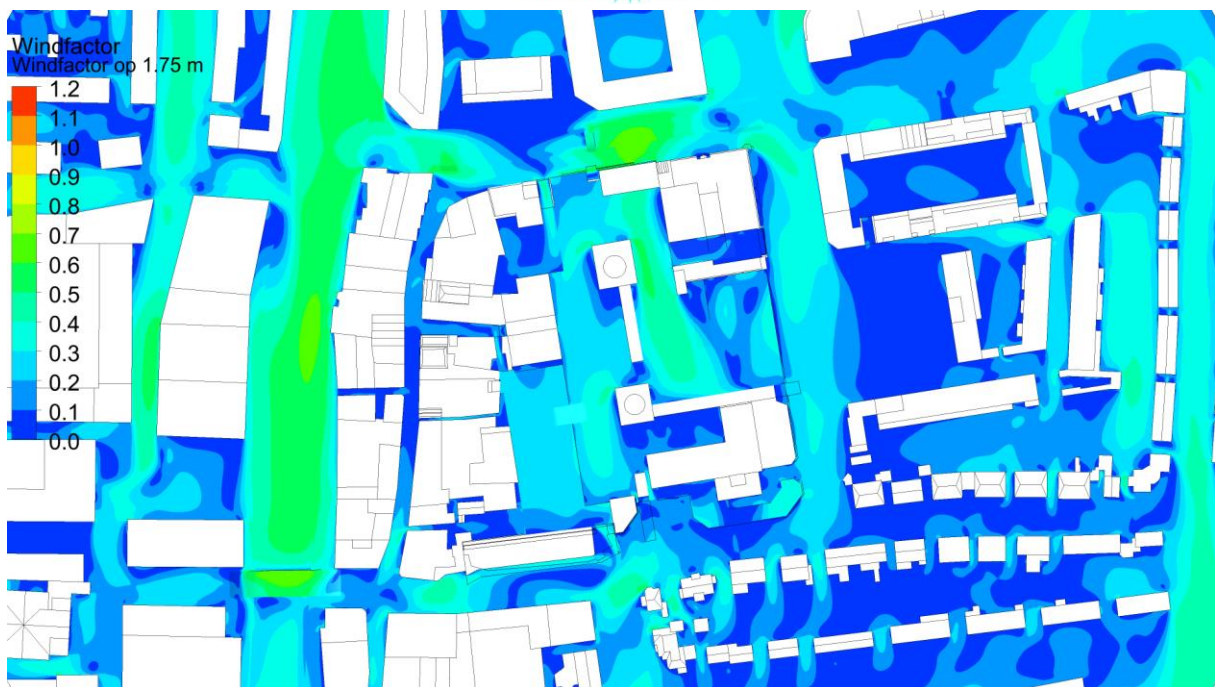
- Snelheidsvectoren gekleurd met windfactor
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de windfactor
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de uren windhinder per jaar
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de uren windgevaar per jaar



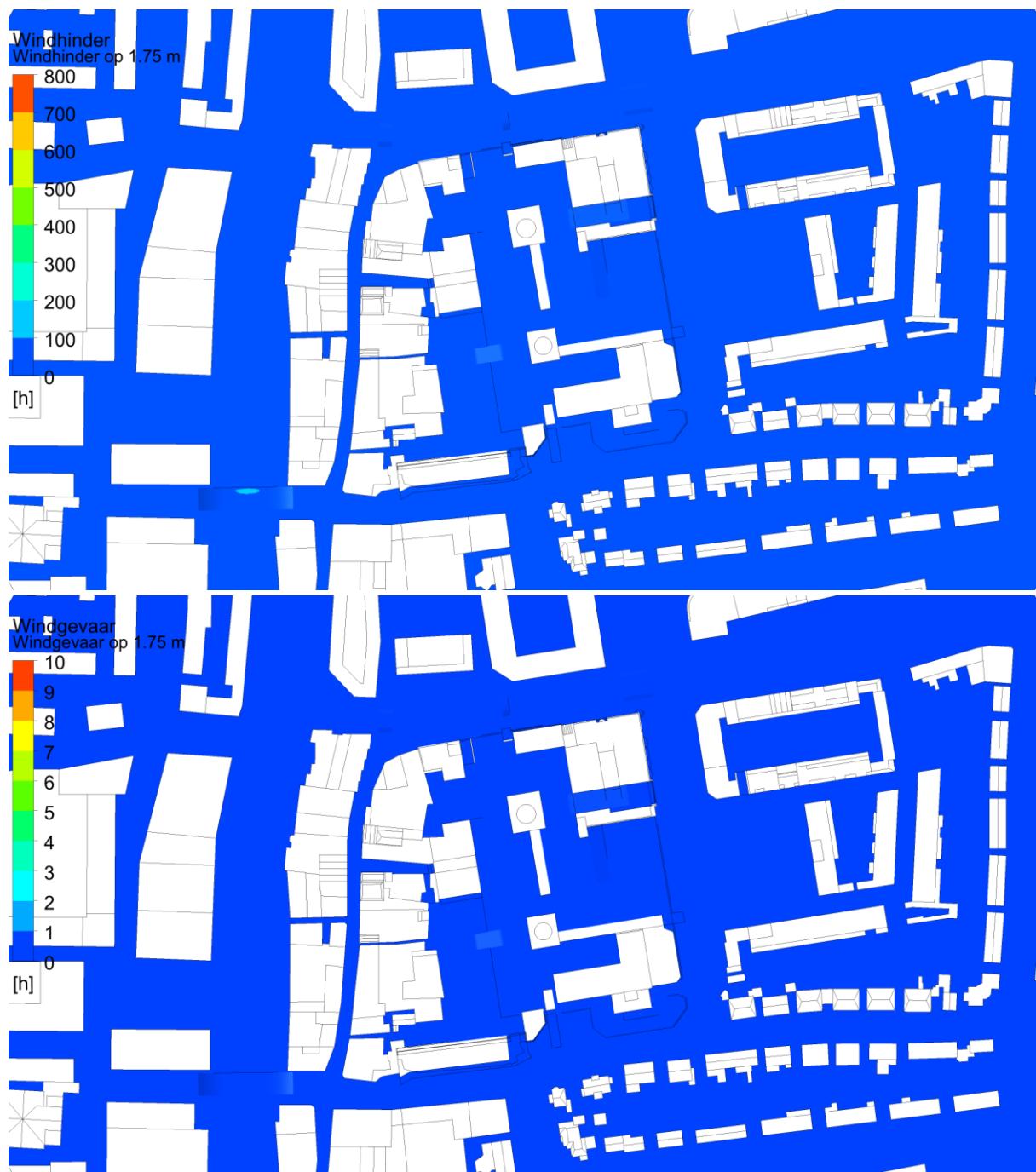
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



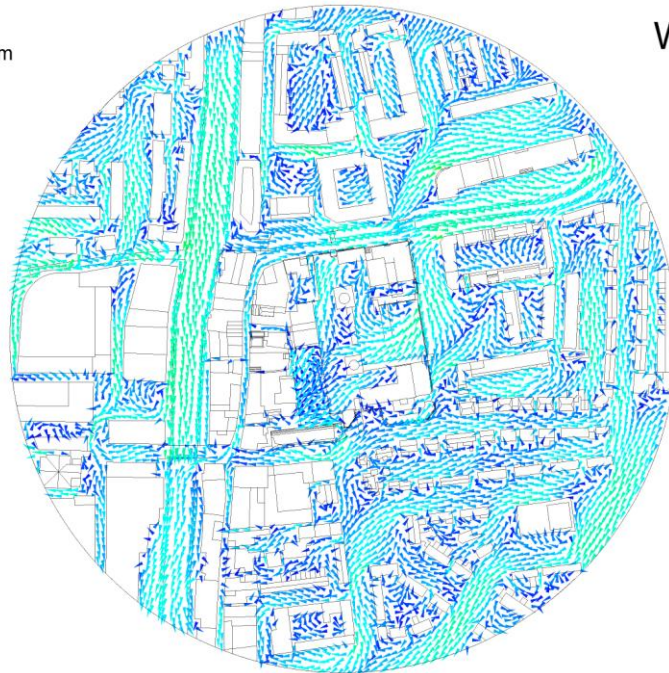
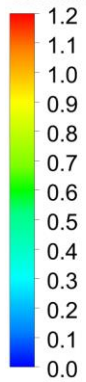
Windrichting = 0



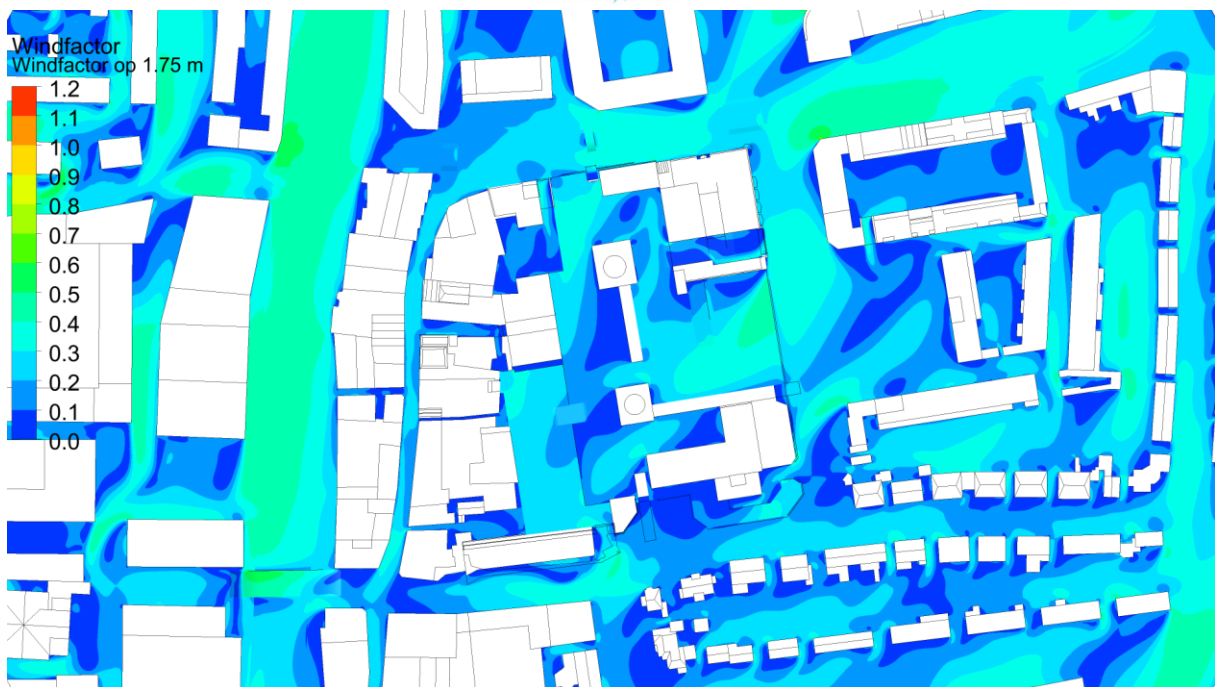


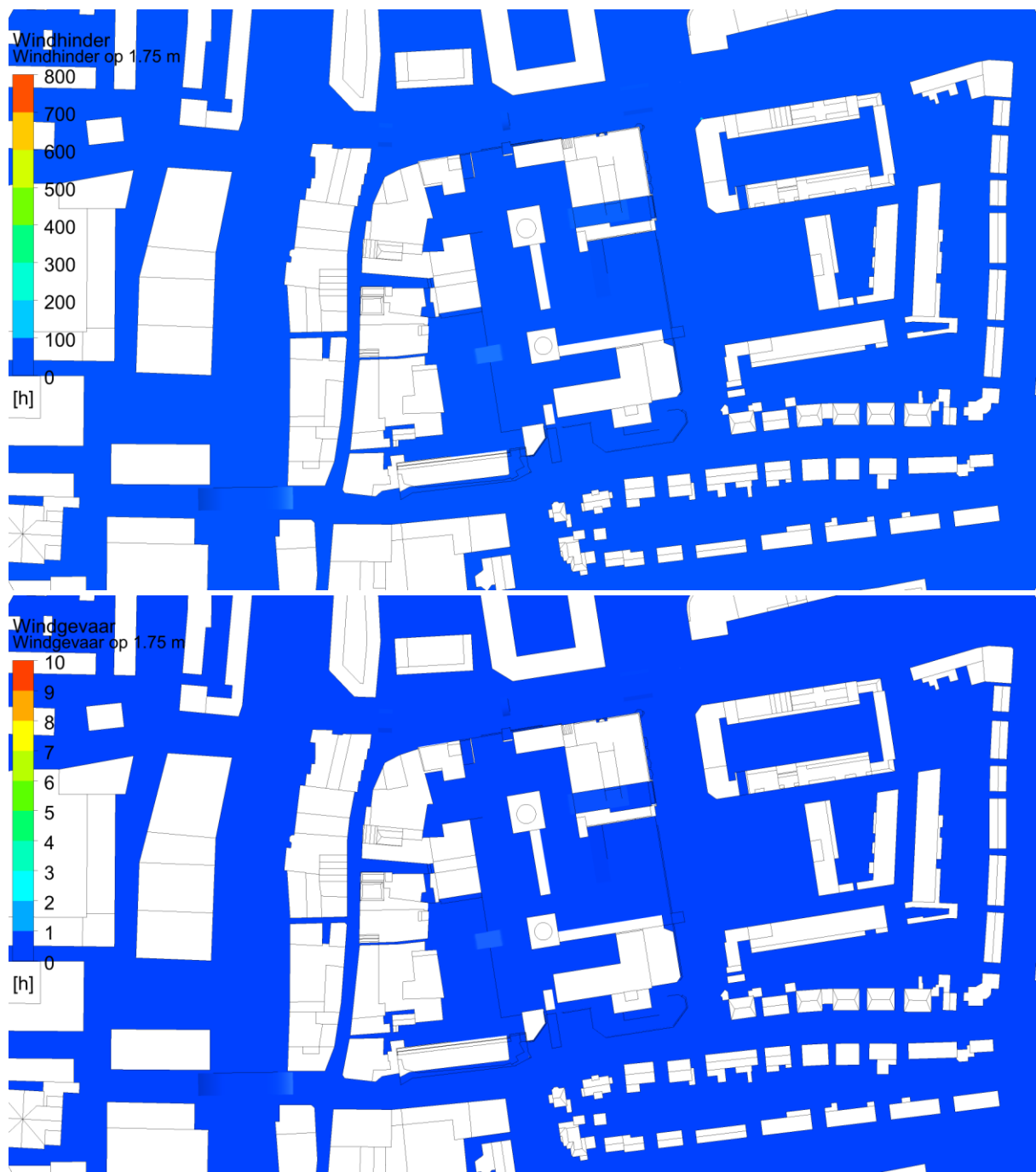


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

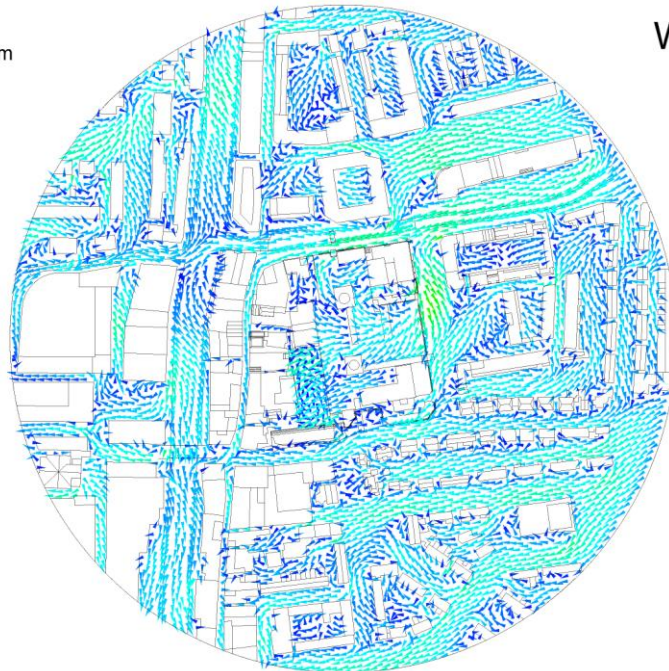
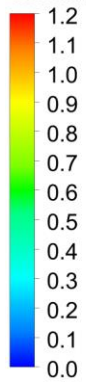


Windrichting = 30

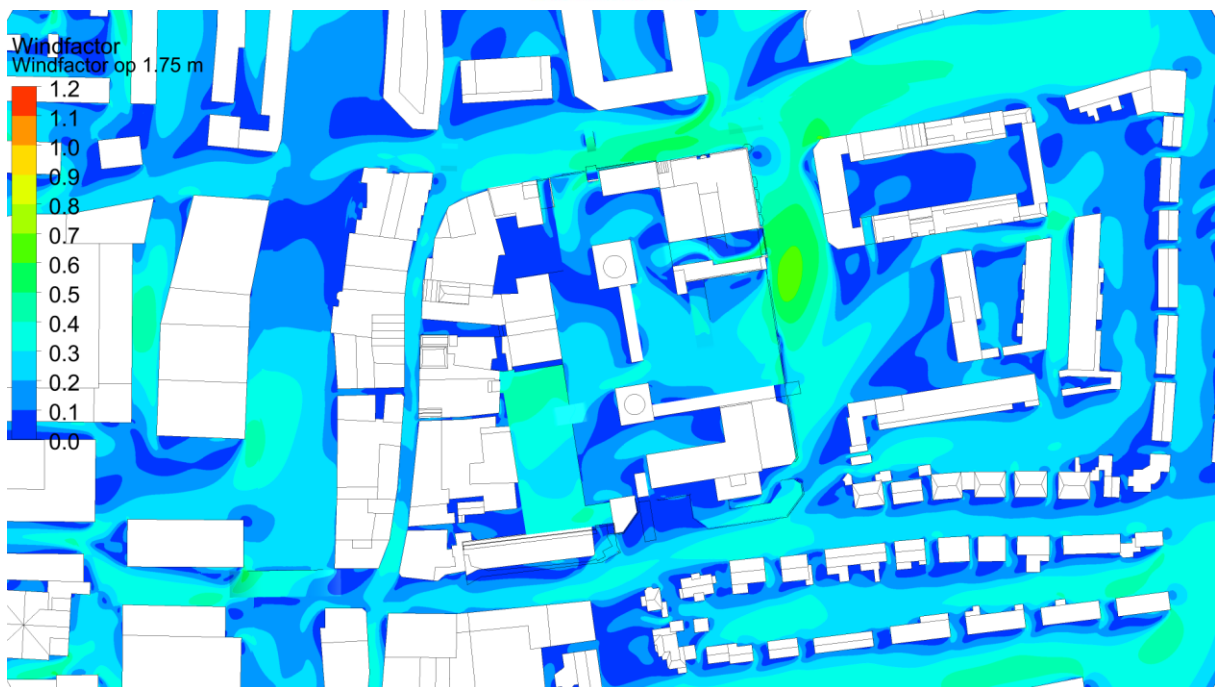


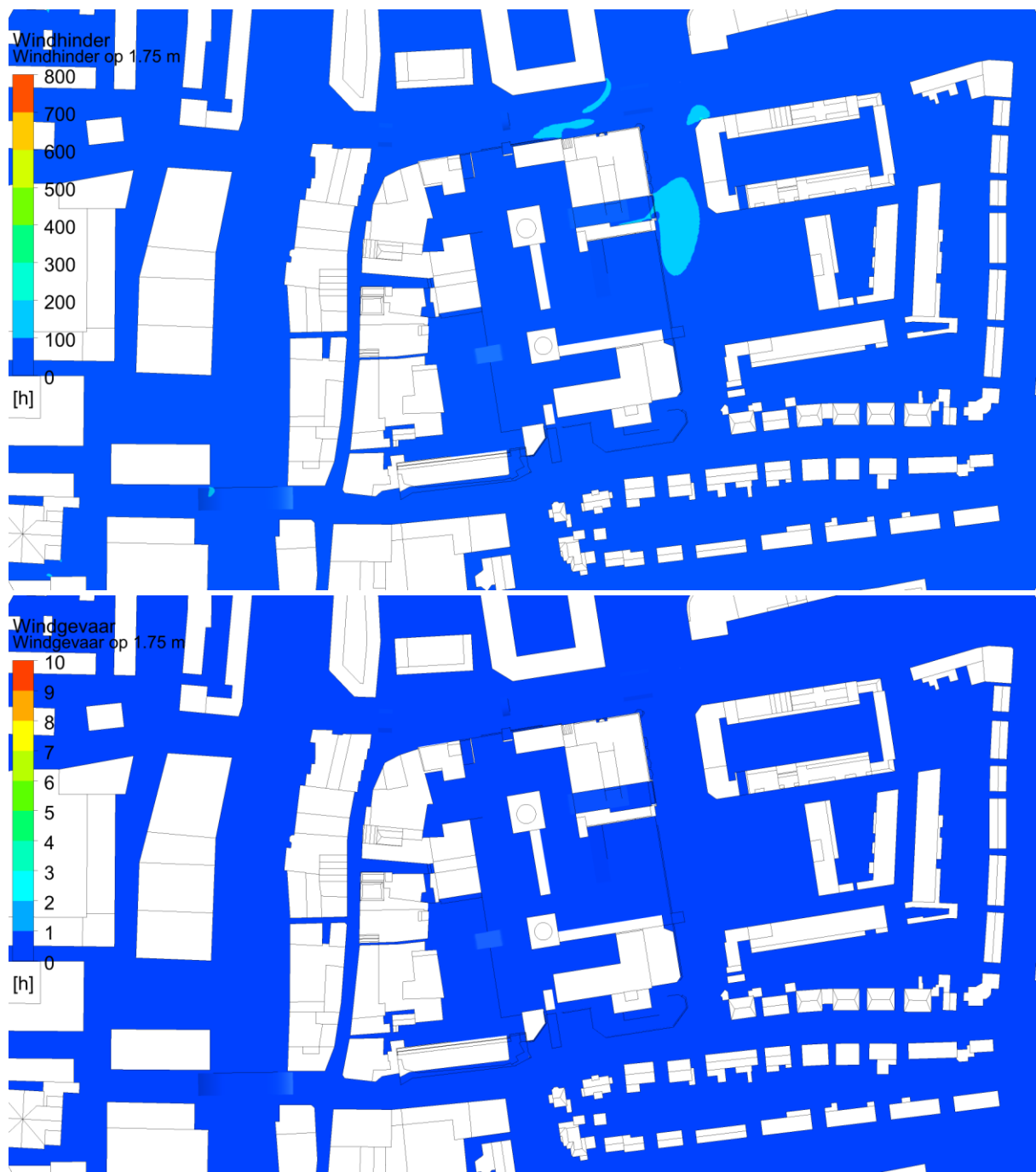


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



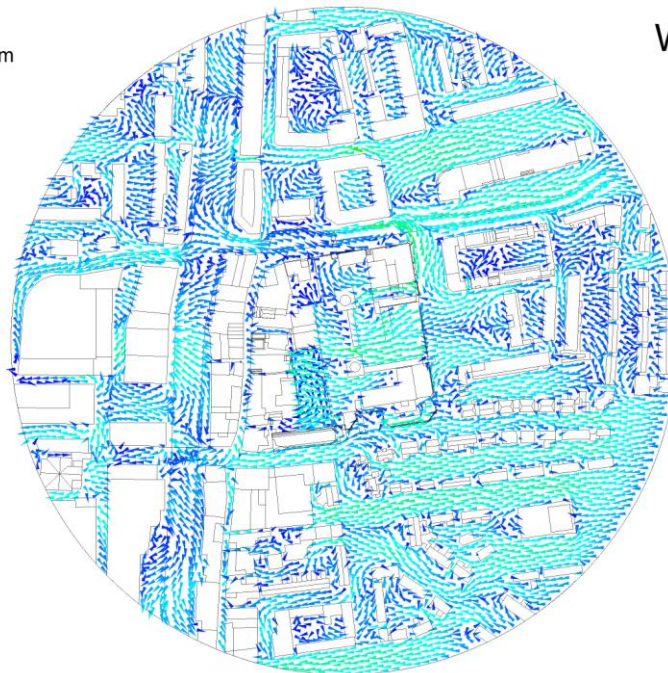
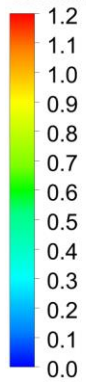
Windrichting = 60



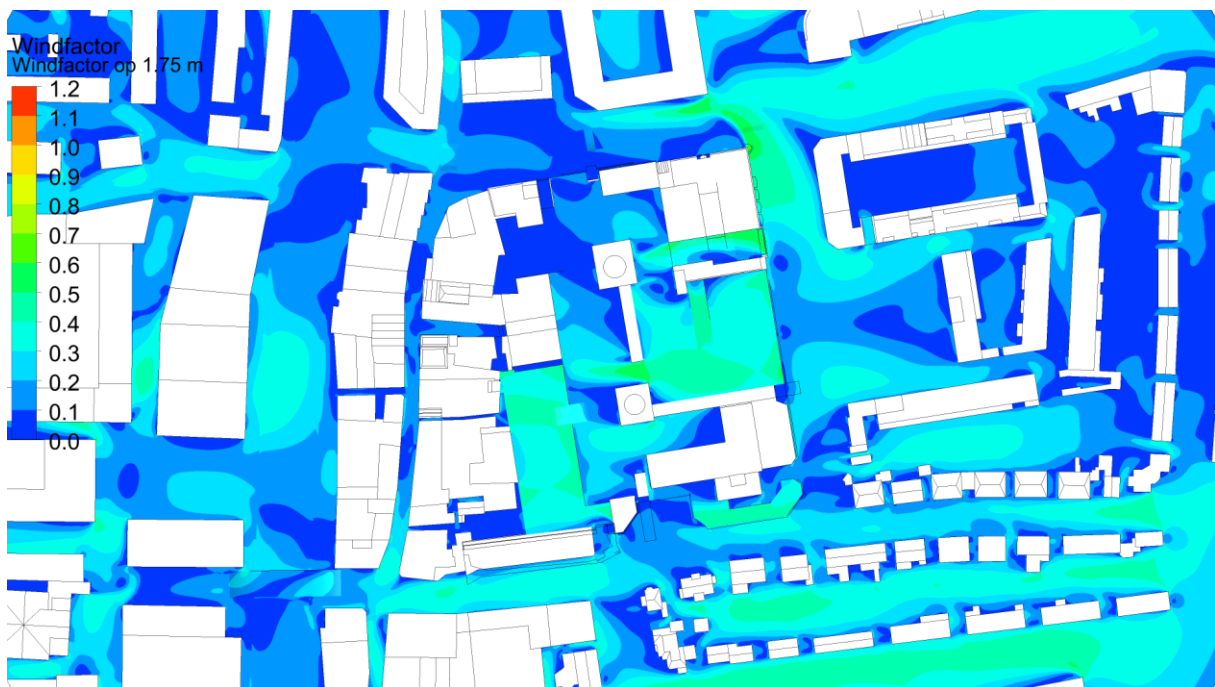




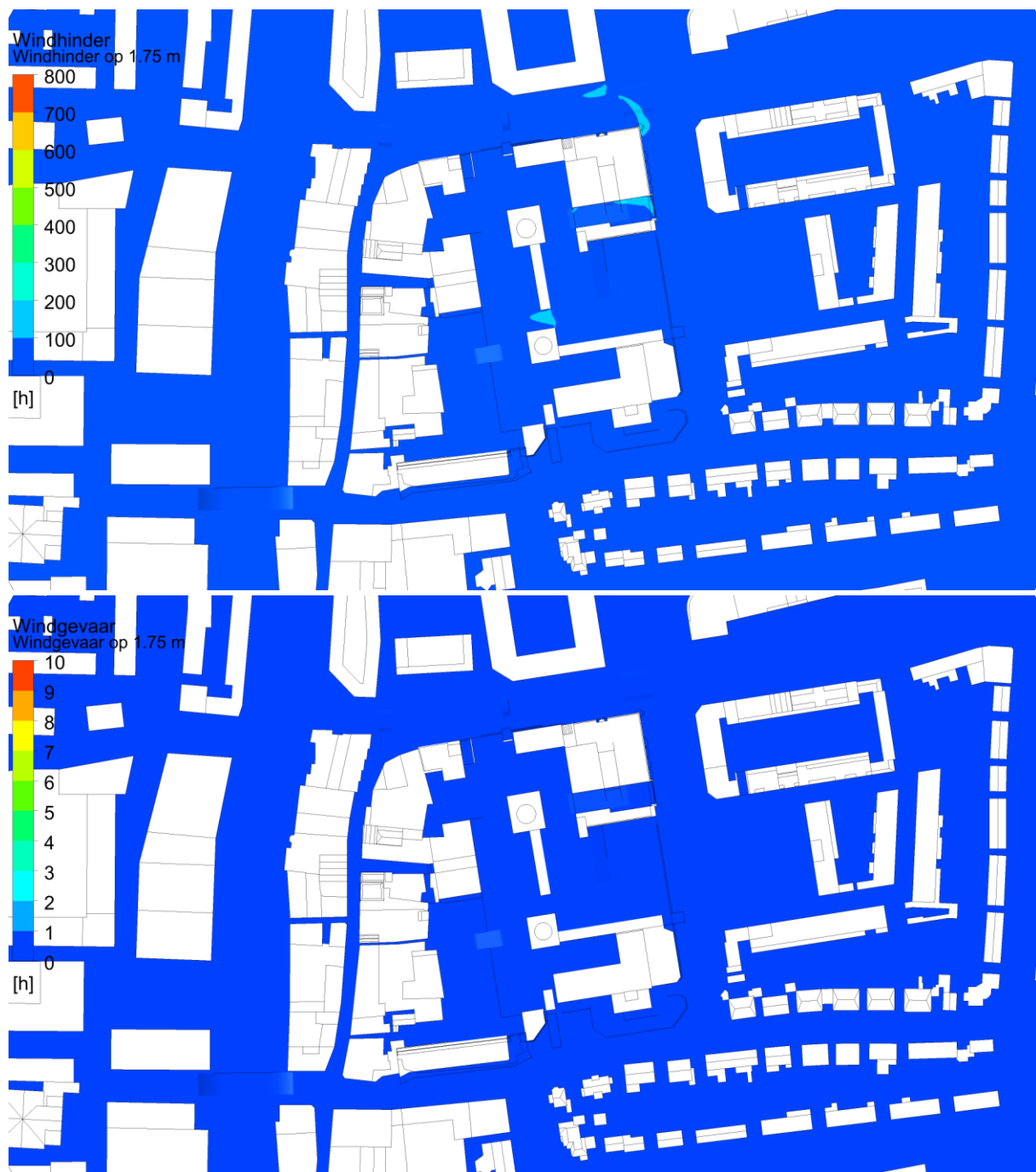
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



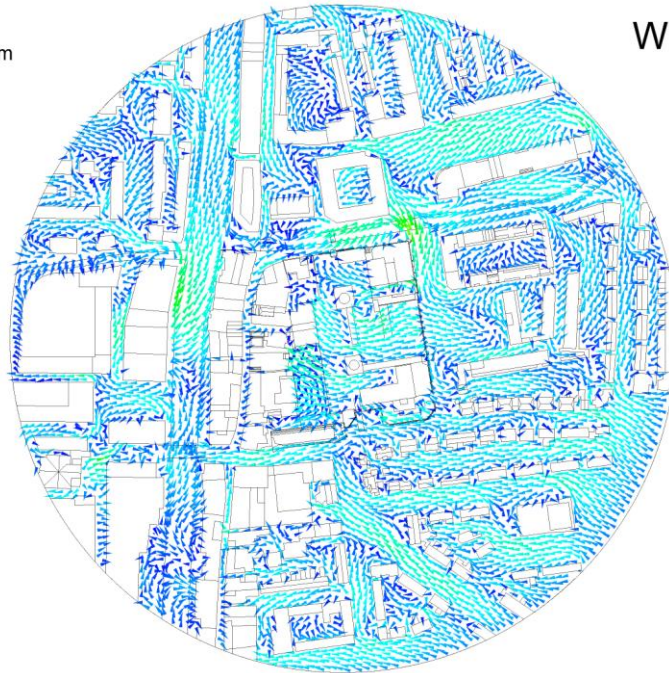
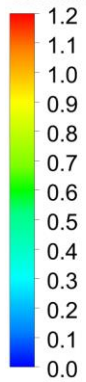
Windrichting = 90



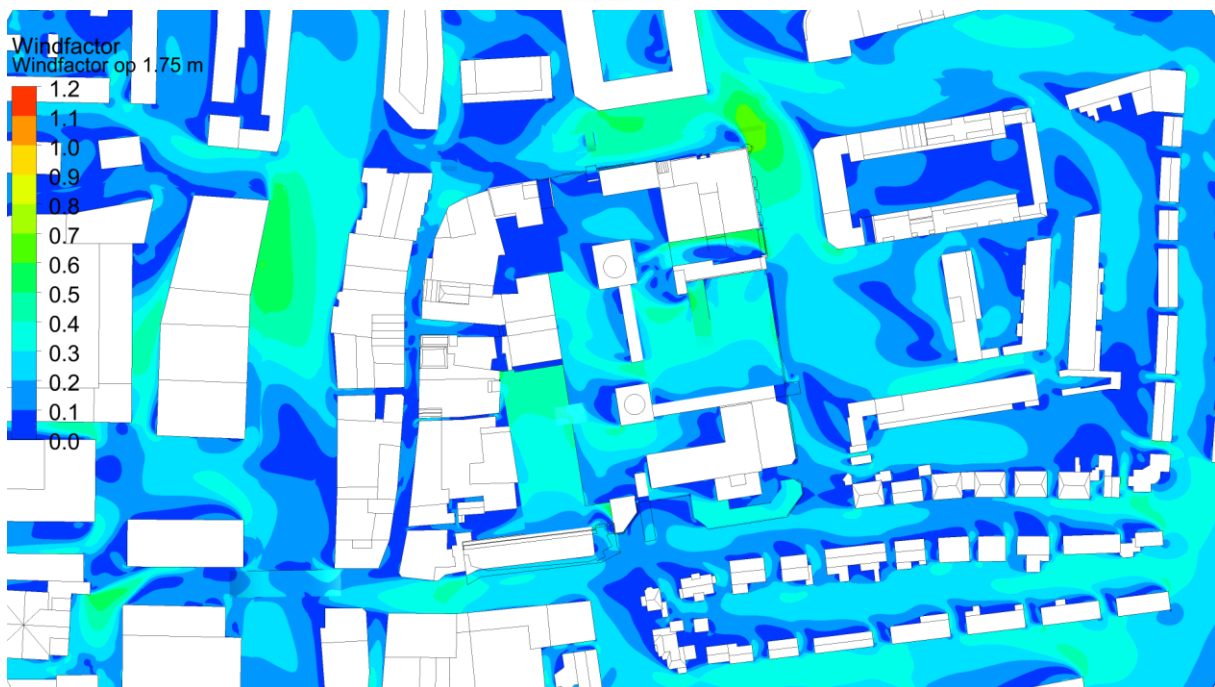


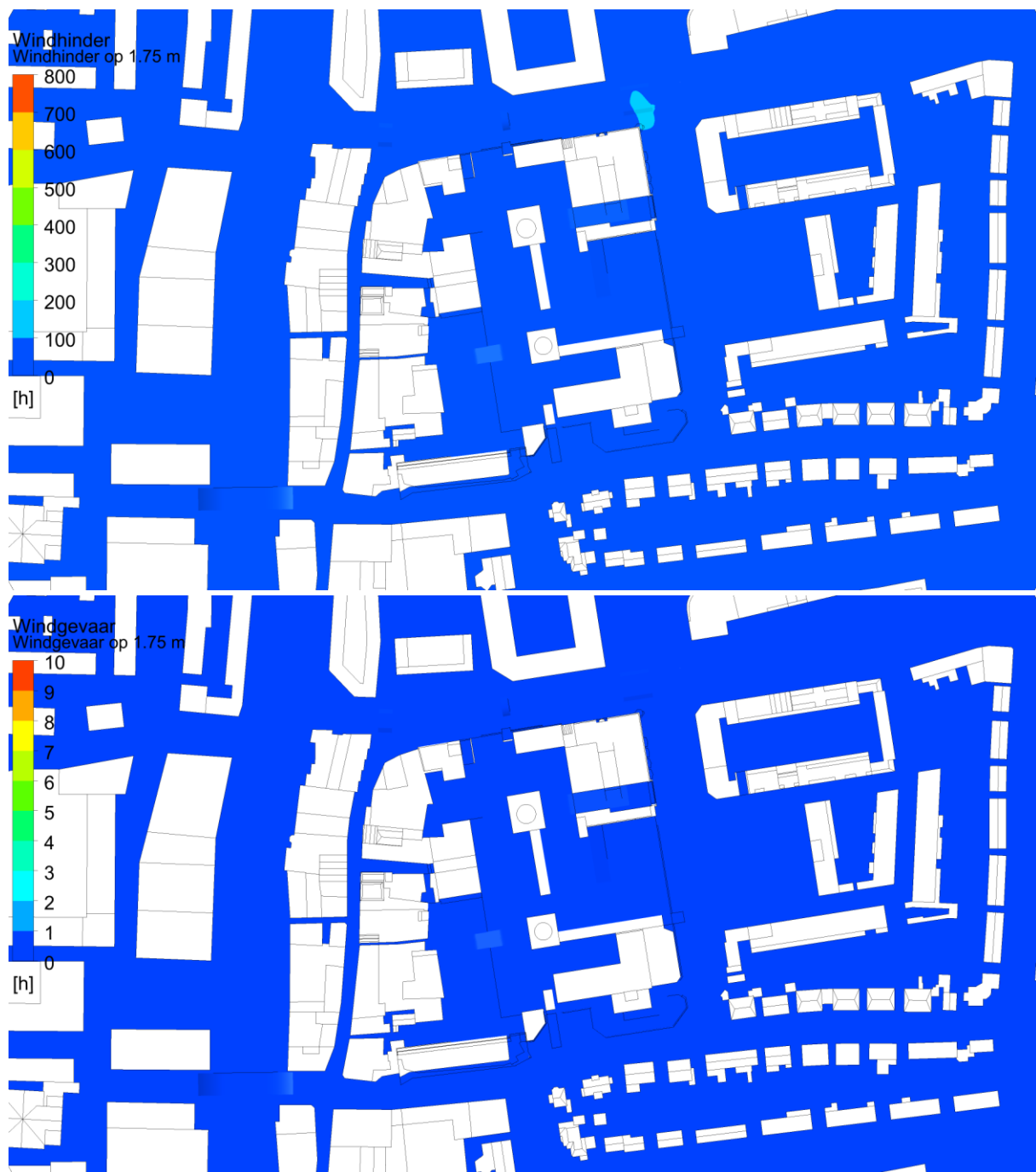


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

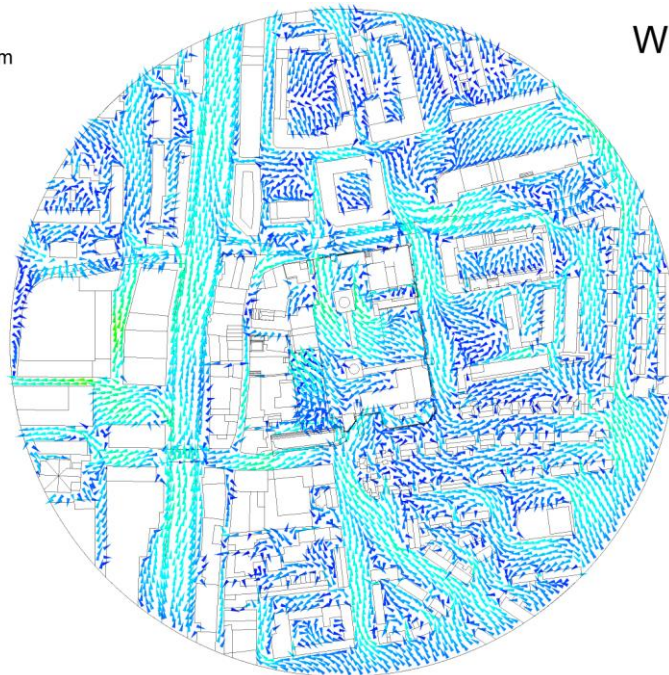
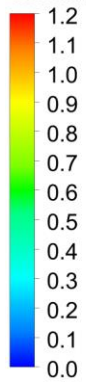


Windrichting = 120

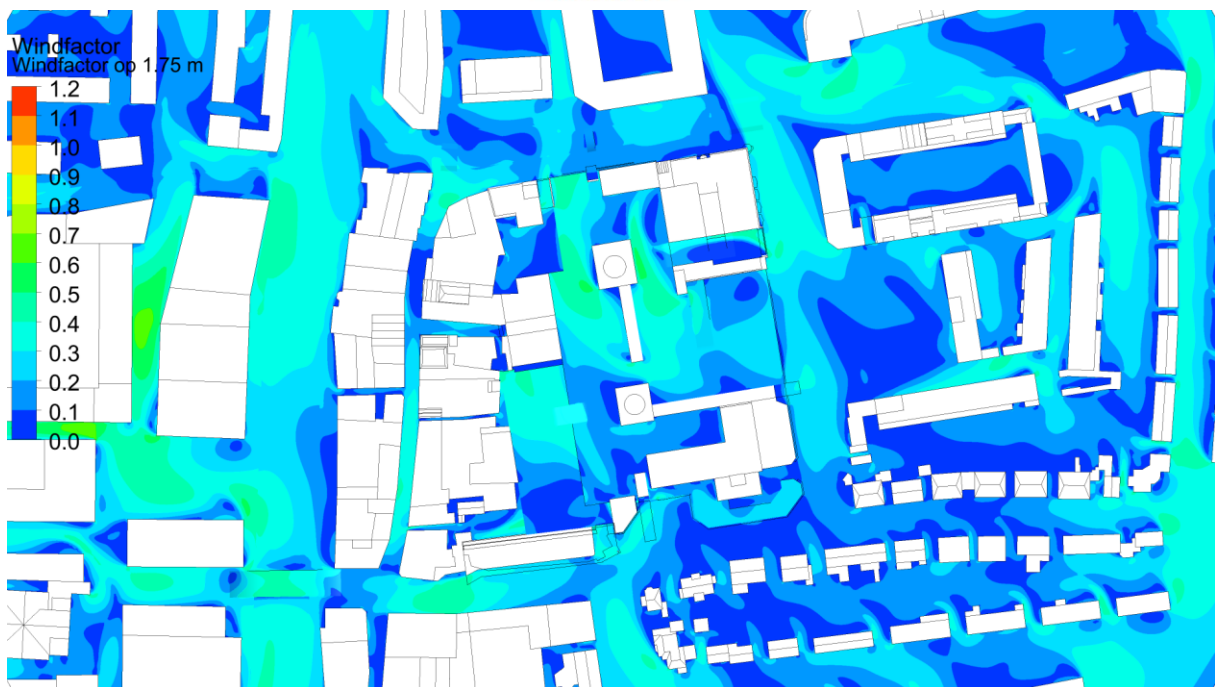


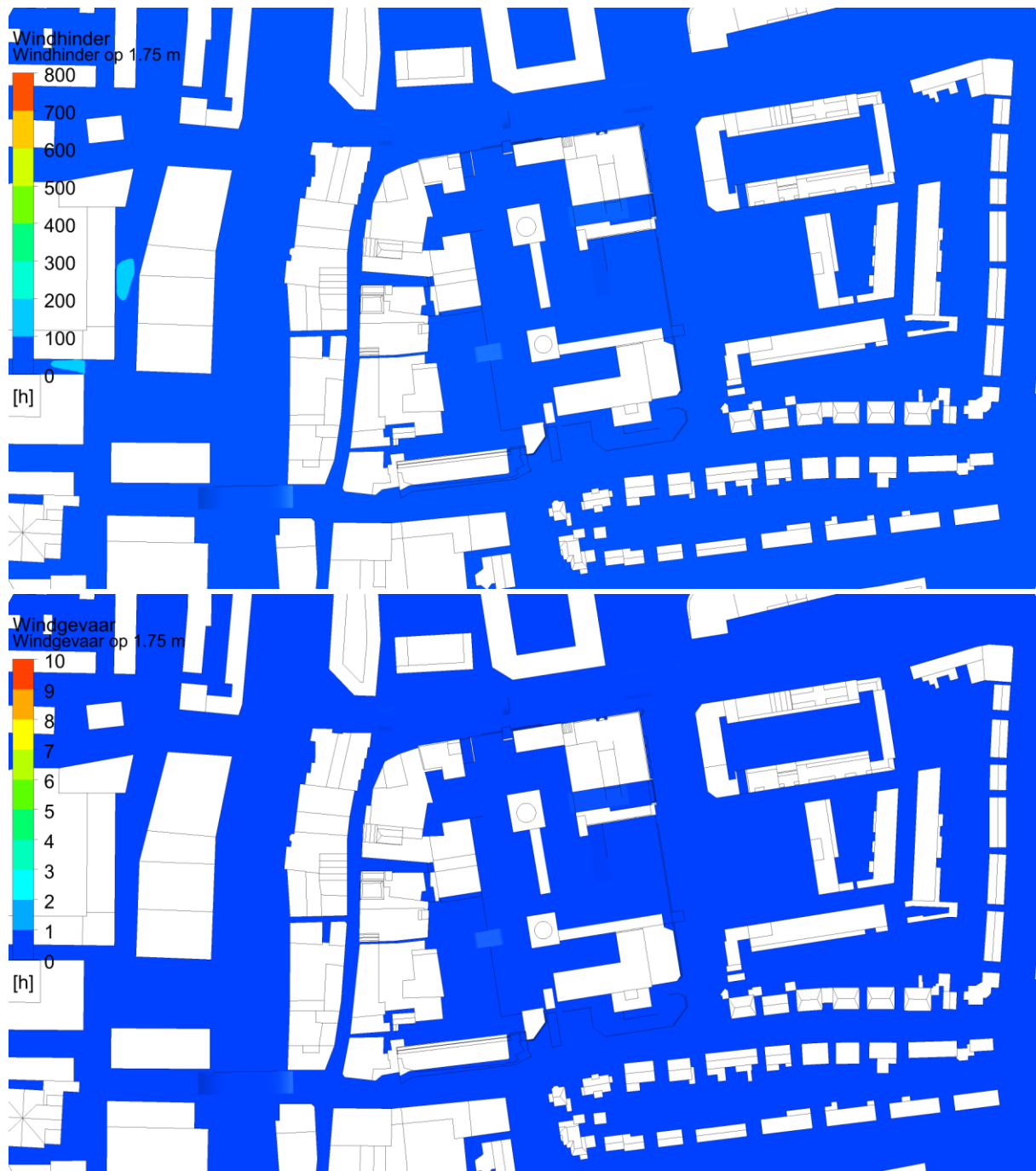


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



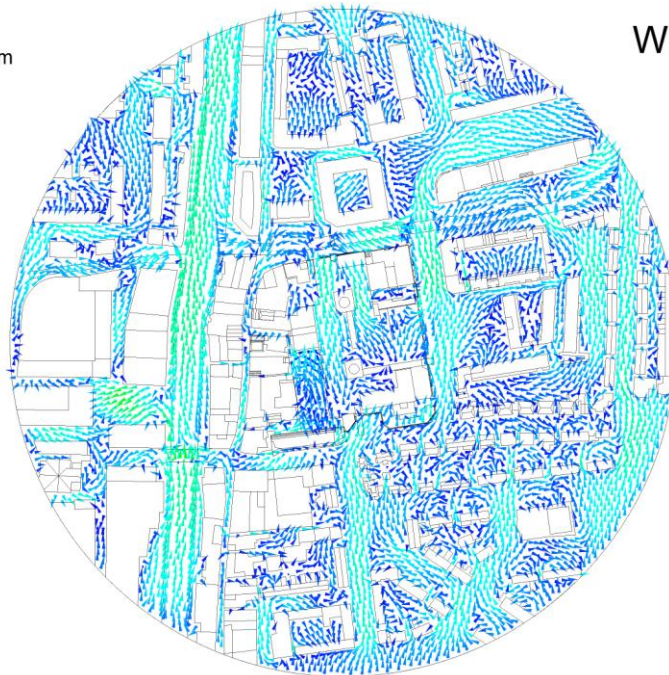
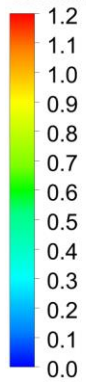
Windrichting = 150



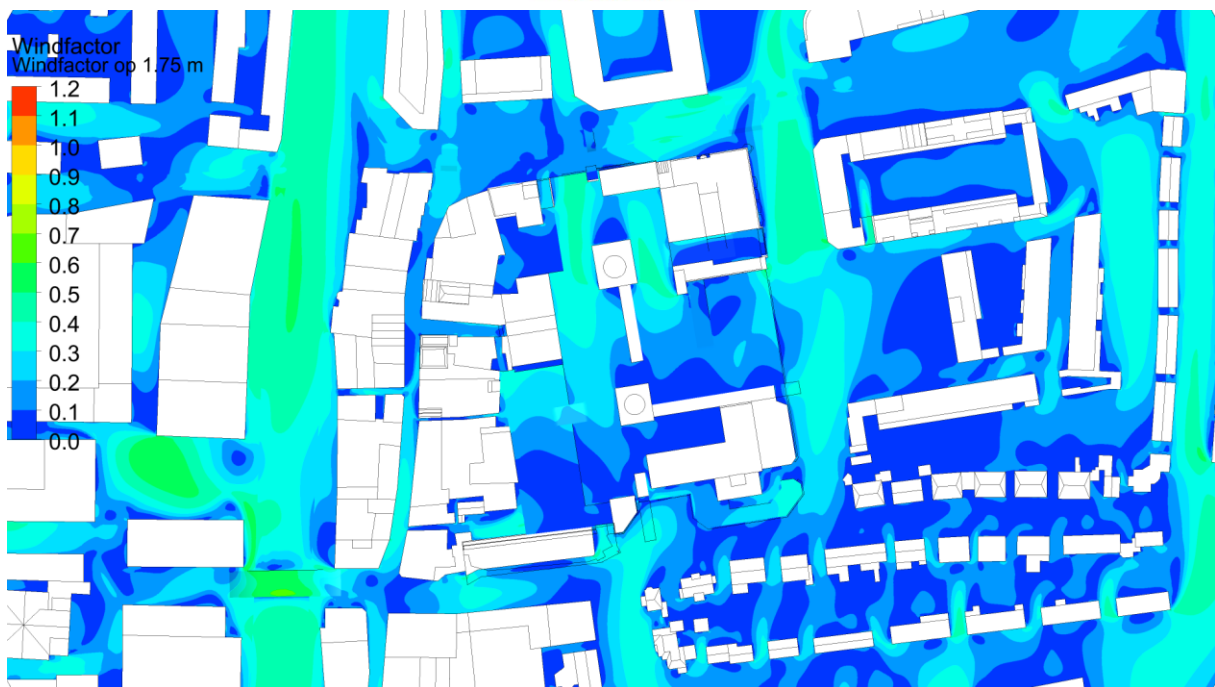




Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



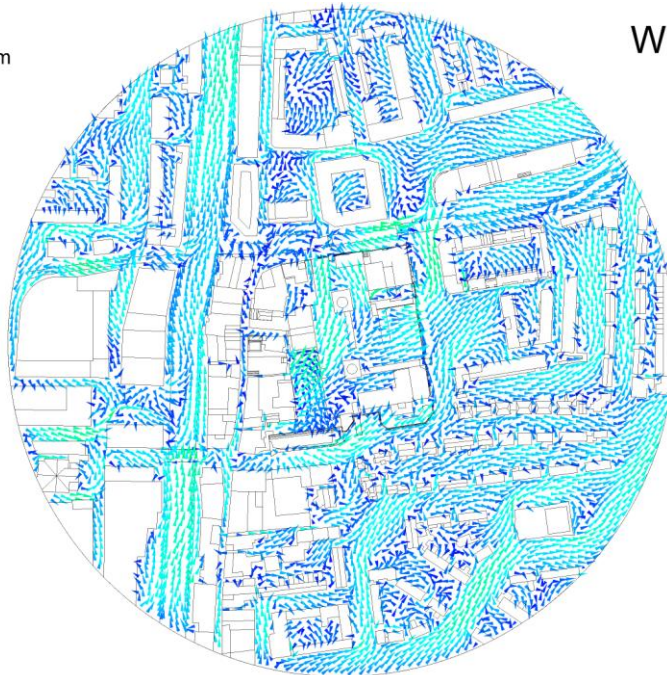
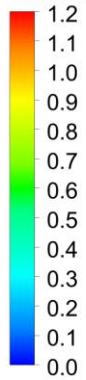
Windrichting = 180



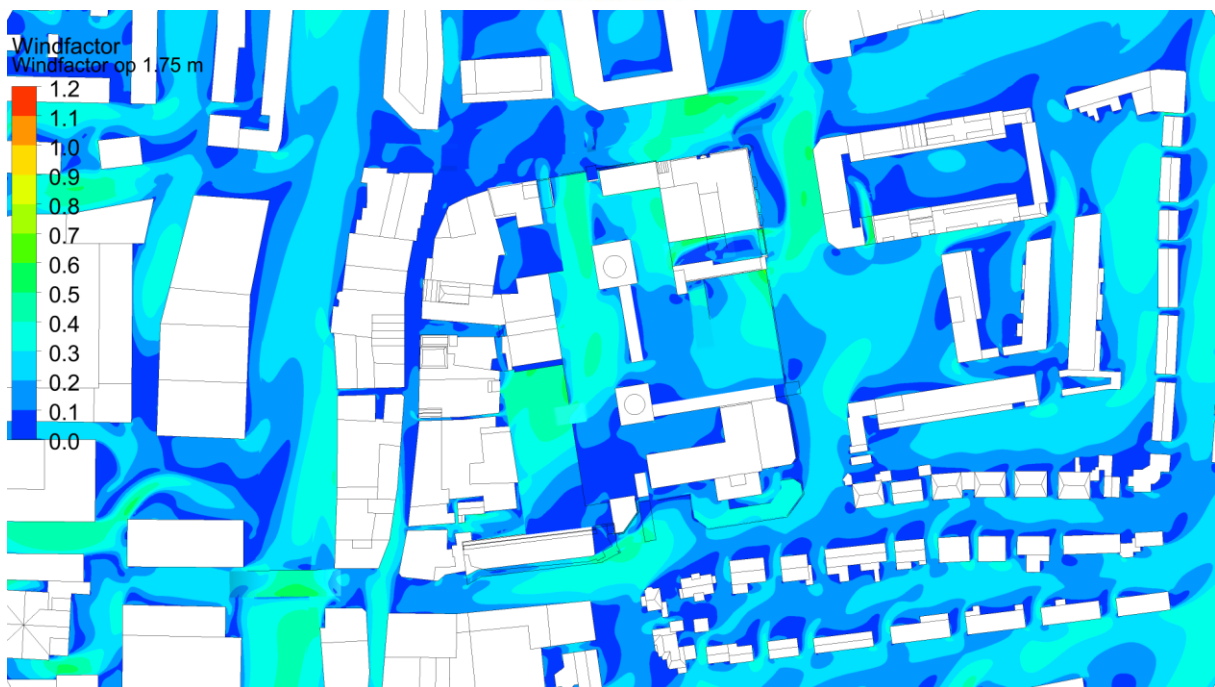


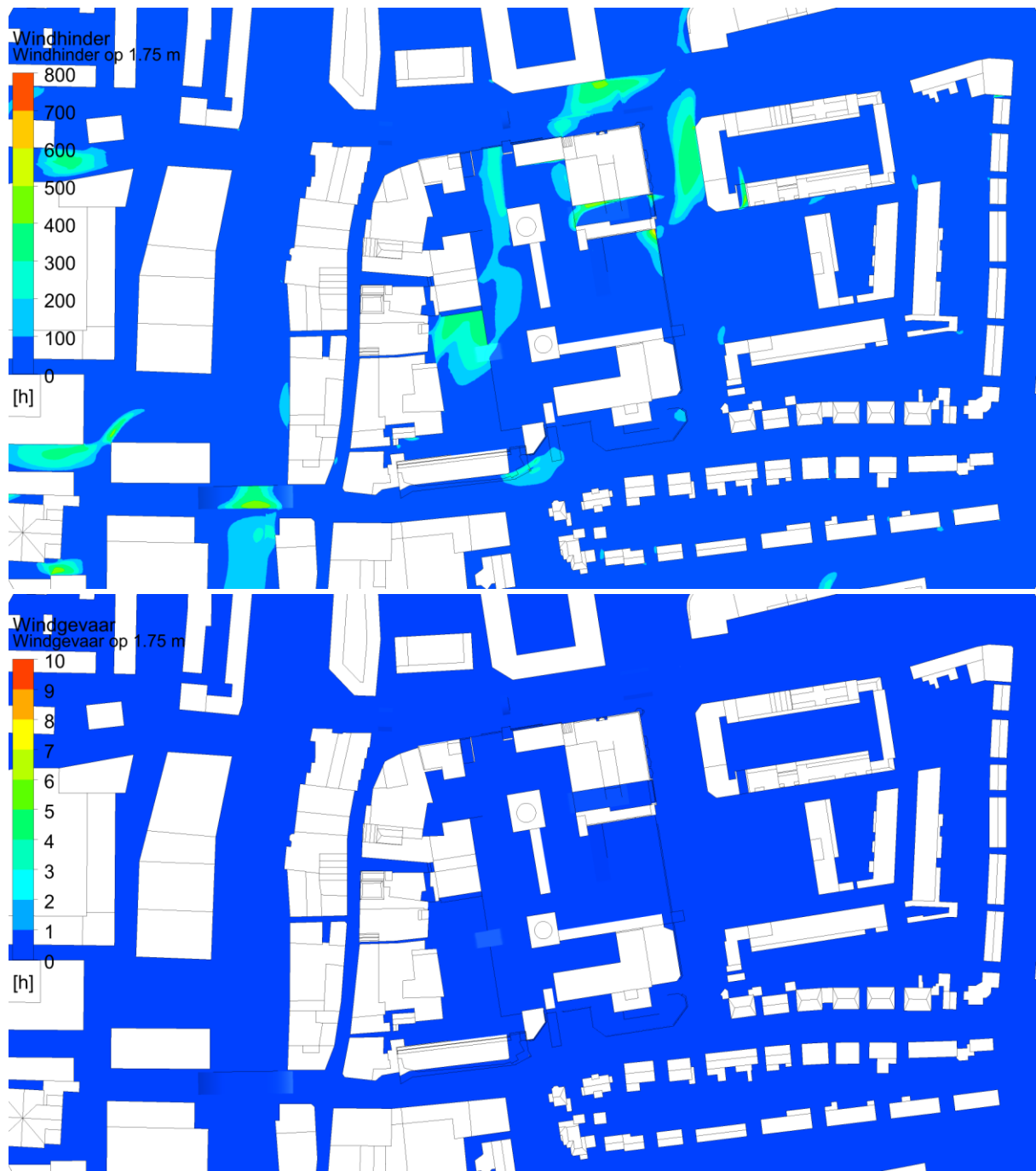


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

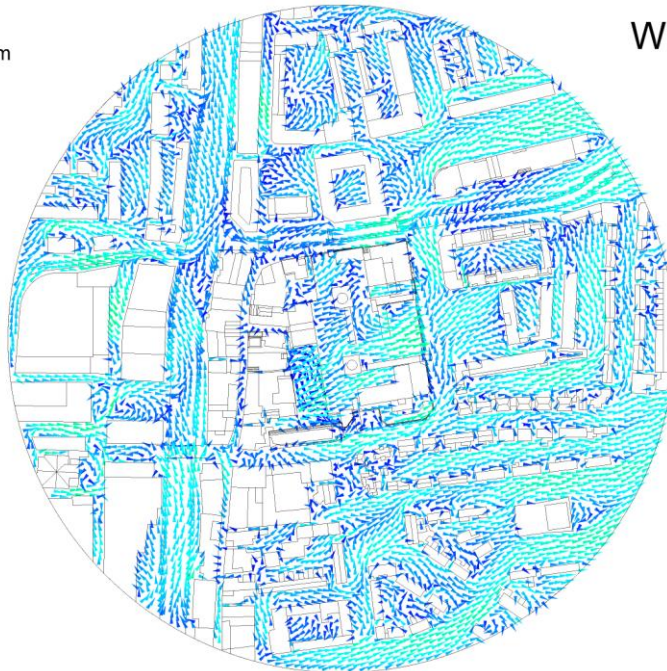
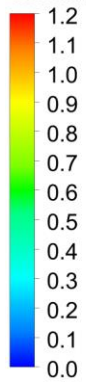


Windrichting = 210

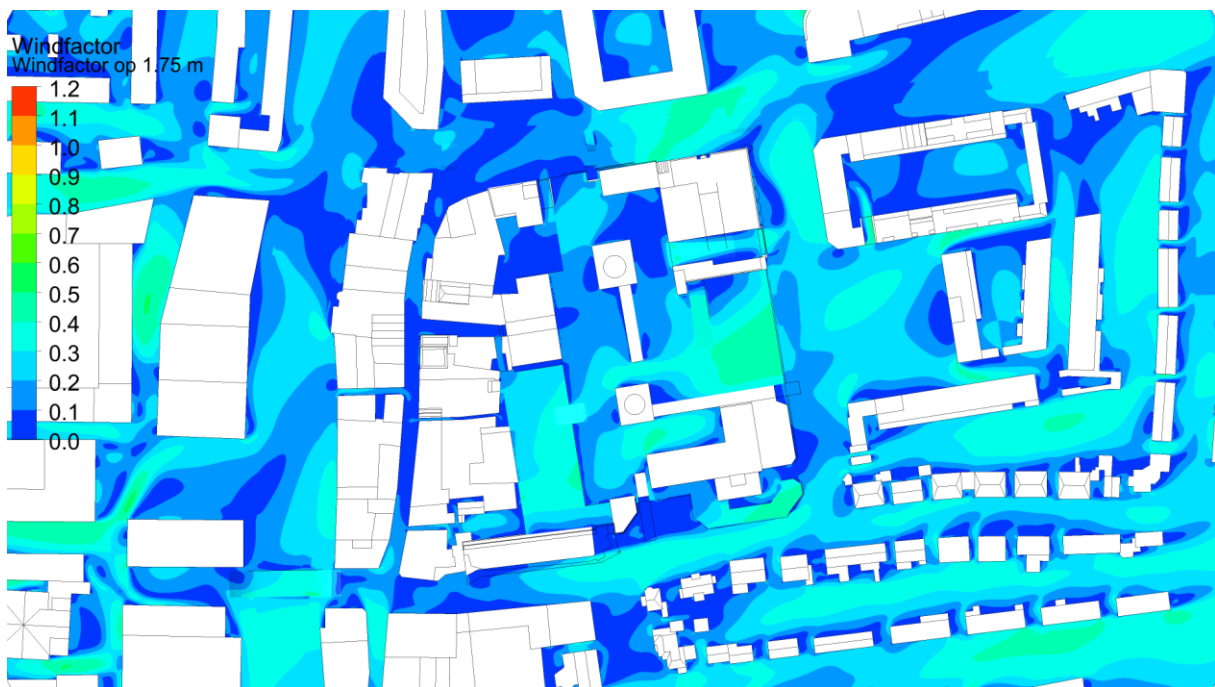




Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



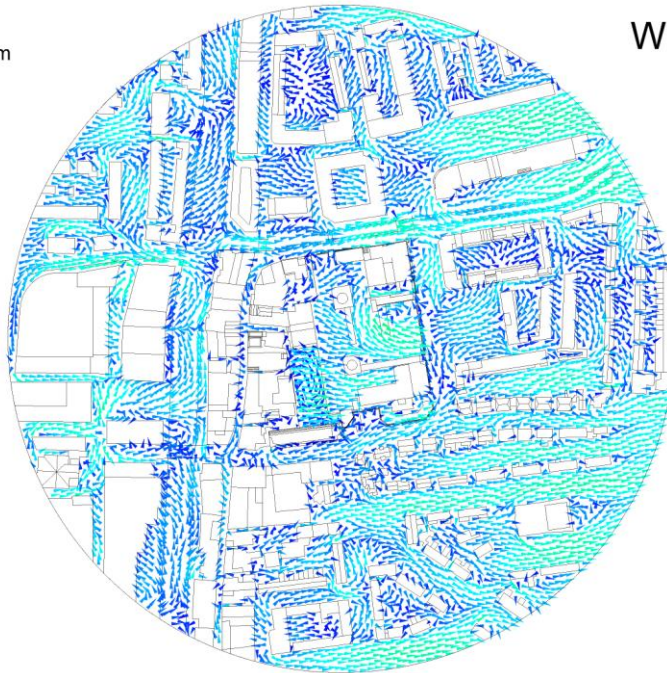
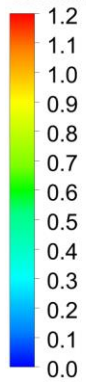
Windrichting = 240



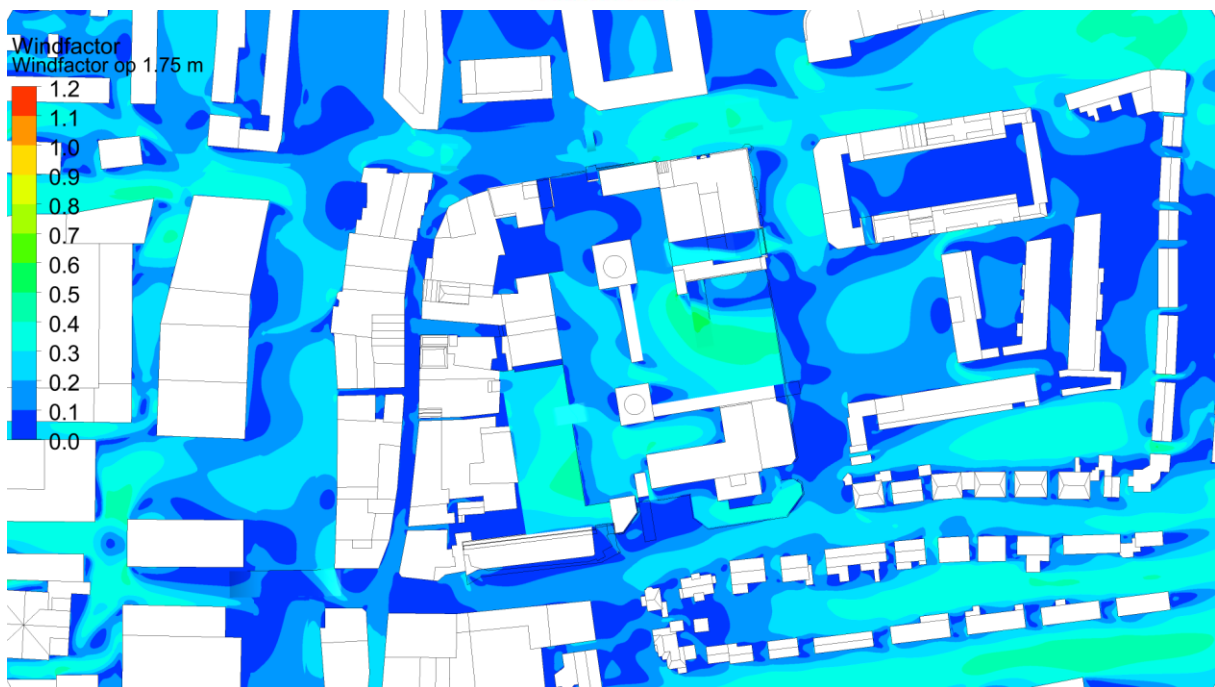




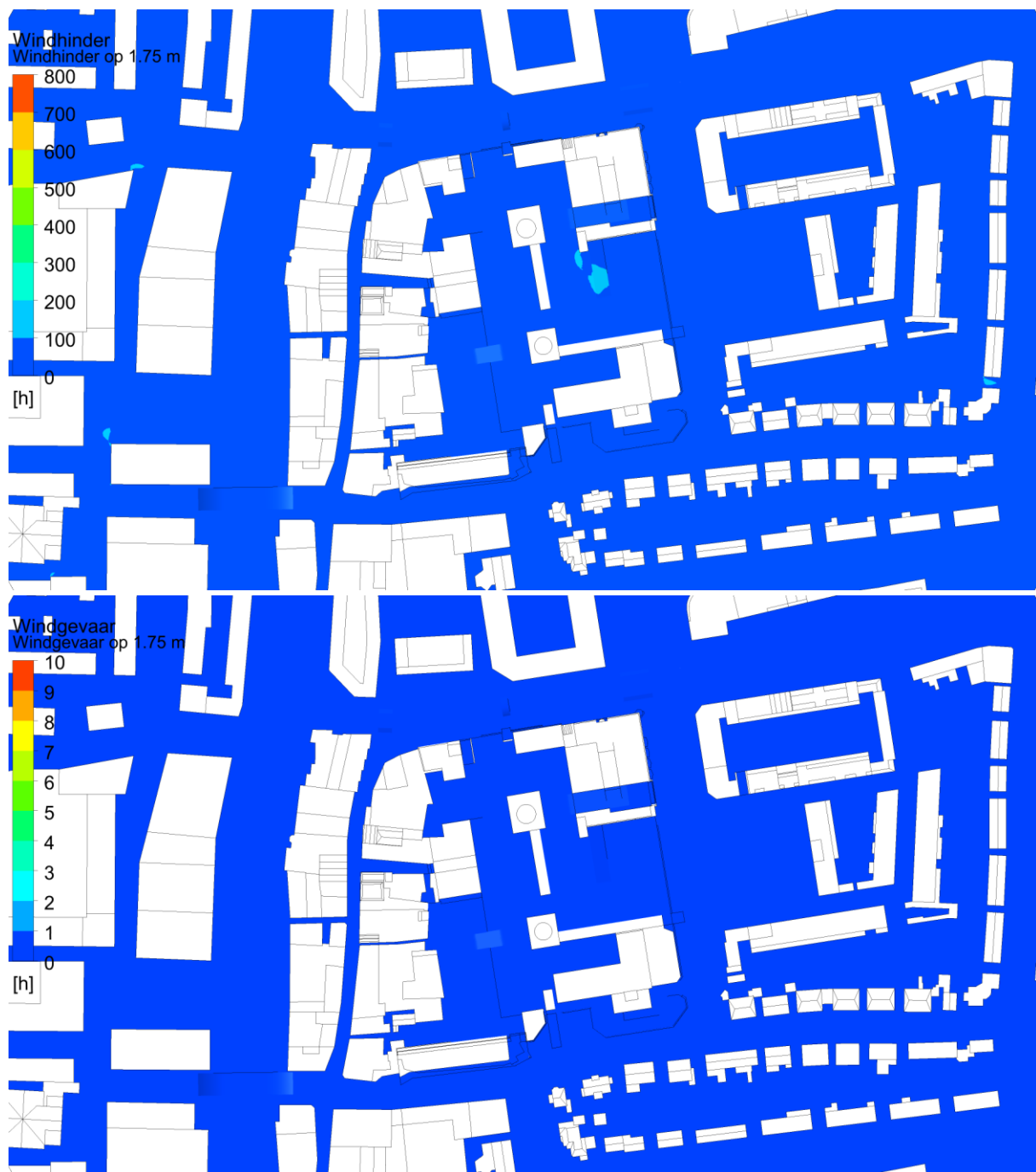
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



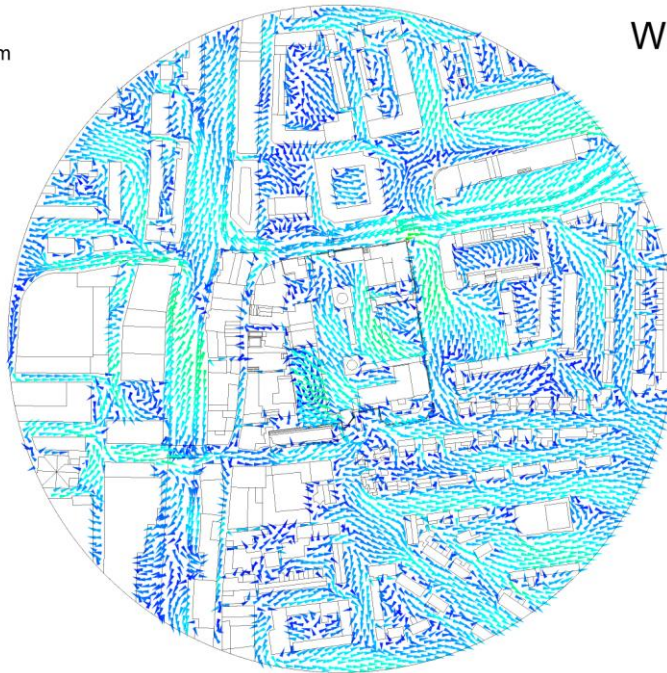
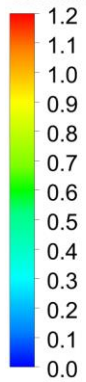
Windrichting = 270



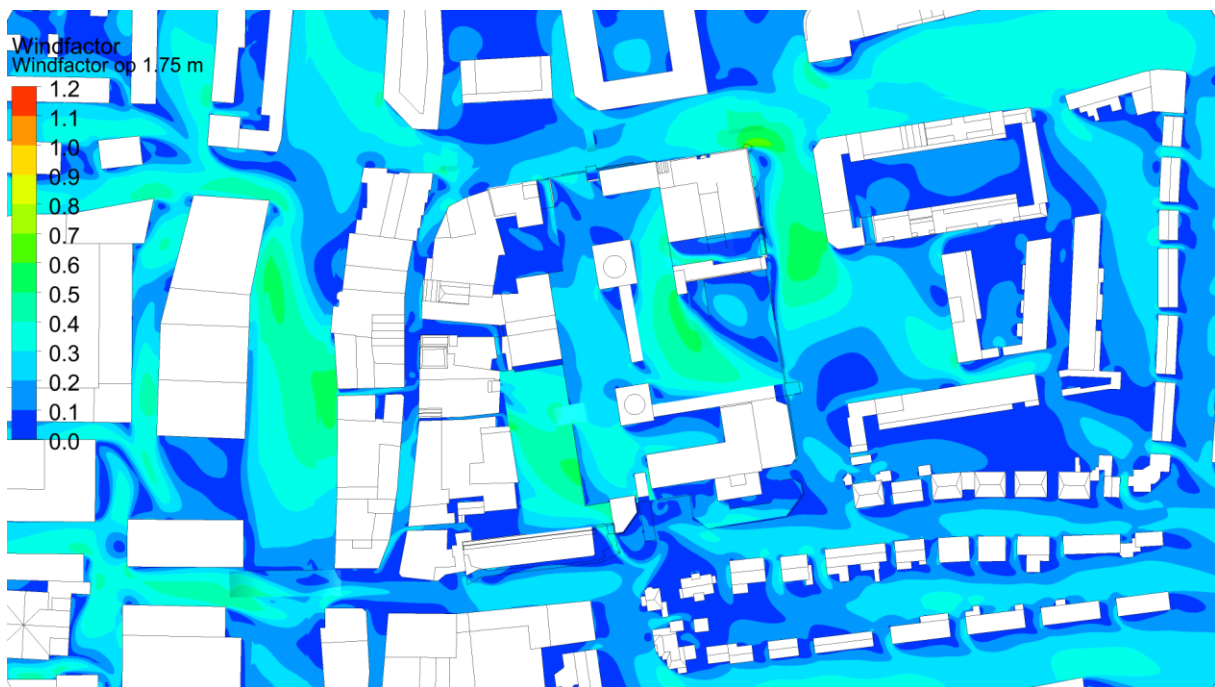


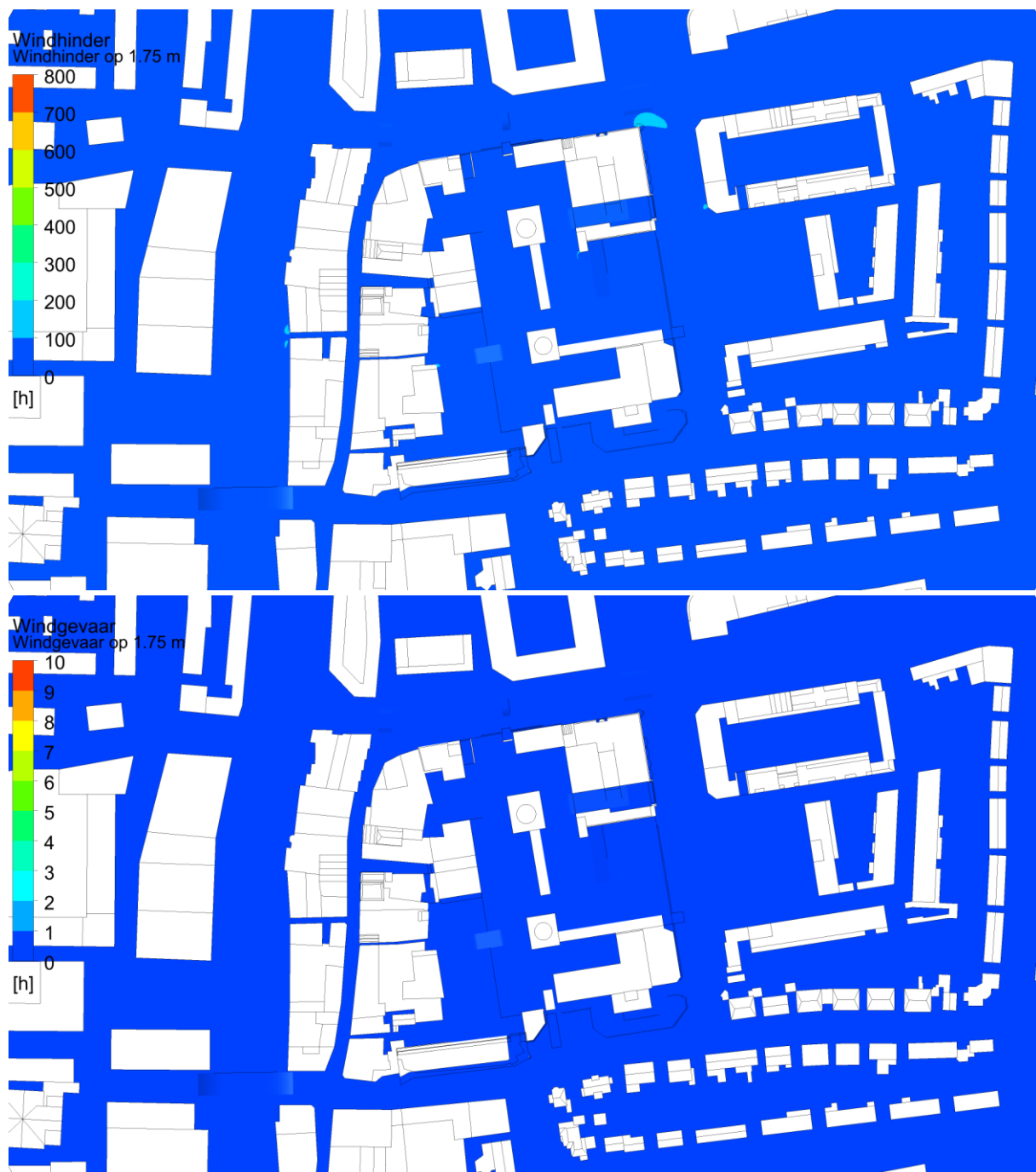


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

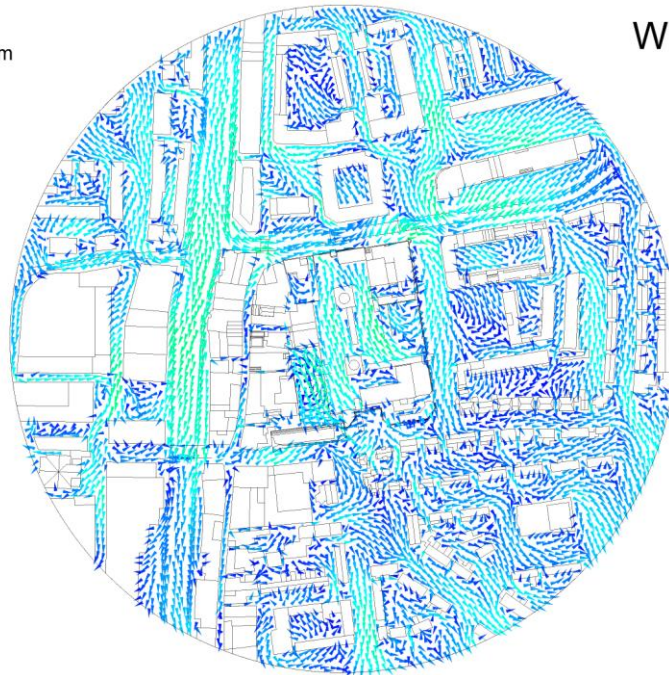
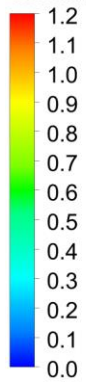


Windrichting = 300

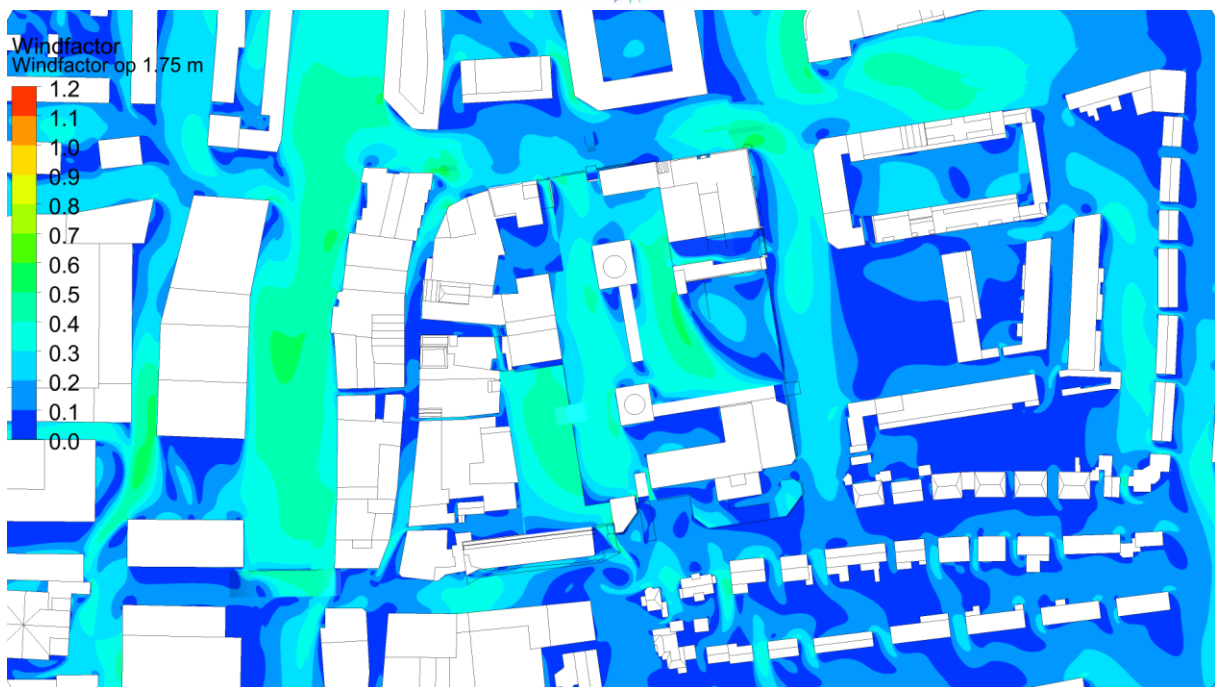


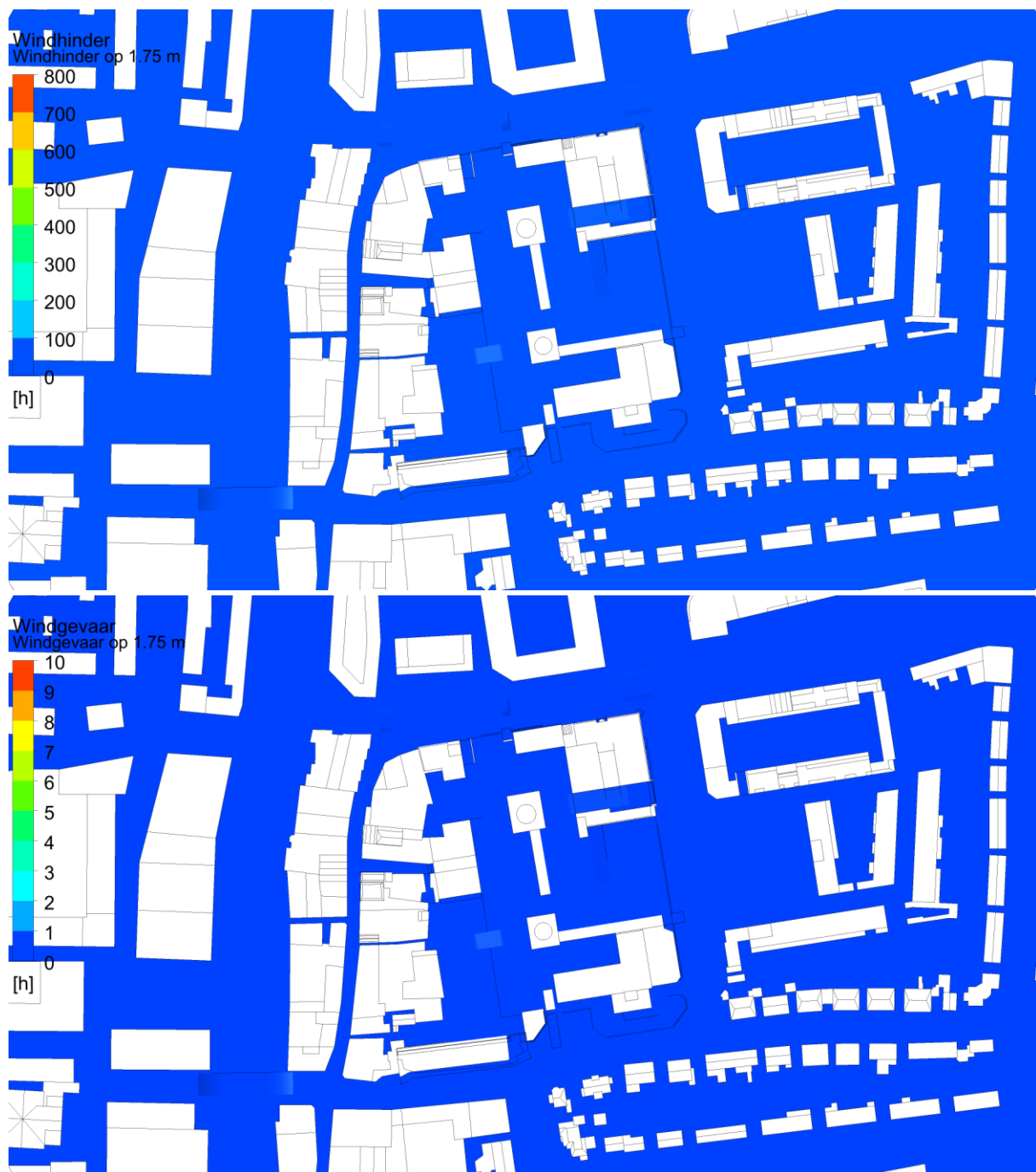


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



Windrichting = 330





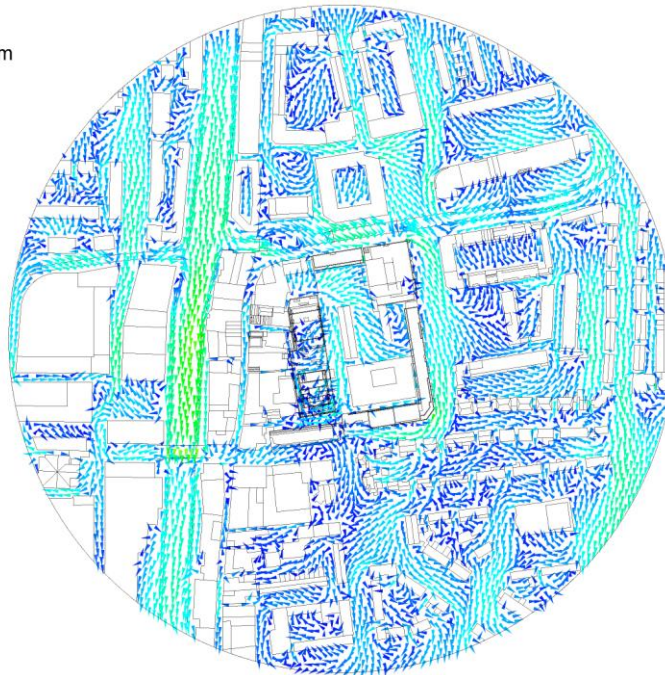
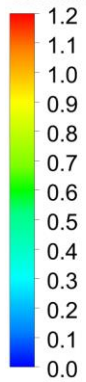


## **Appendix B – CFD simulatieresultaten per windrichting nieuwe situatie**

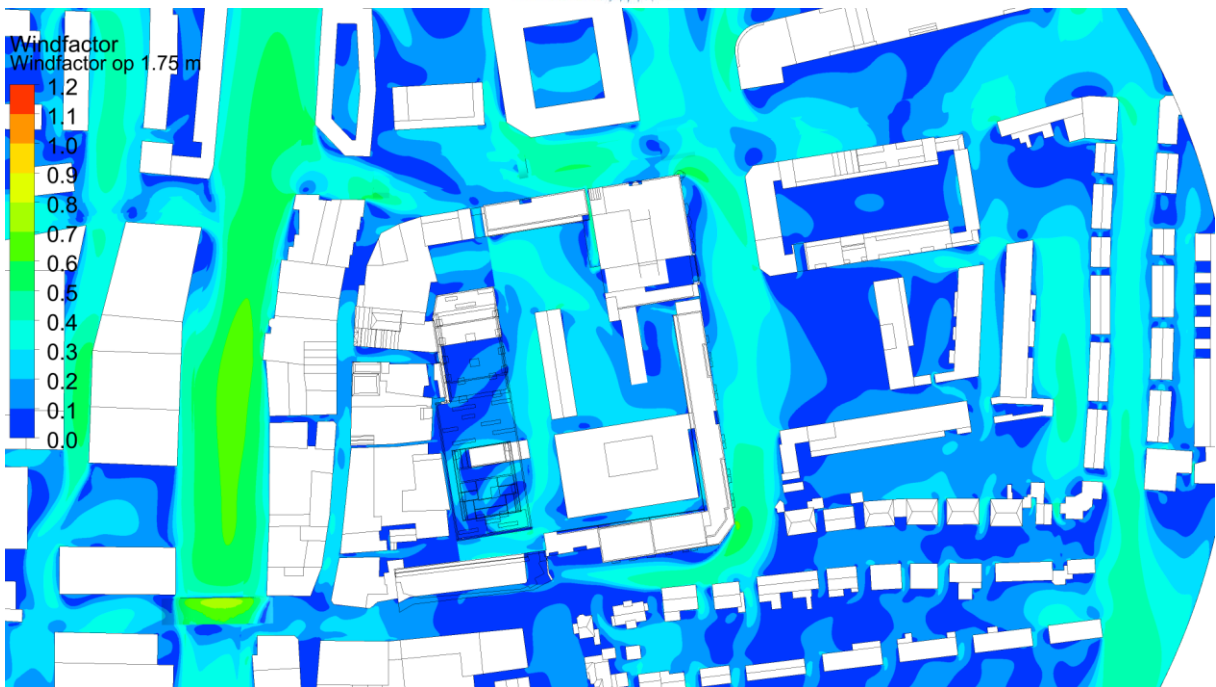
Op de volgende pagina's worden de CFD simulatieresultaten per windrichting weergegeven op 1,75 m boven het grondvlak. Voor iedere windrichting is het volgende weergegeven:

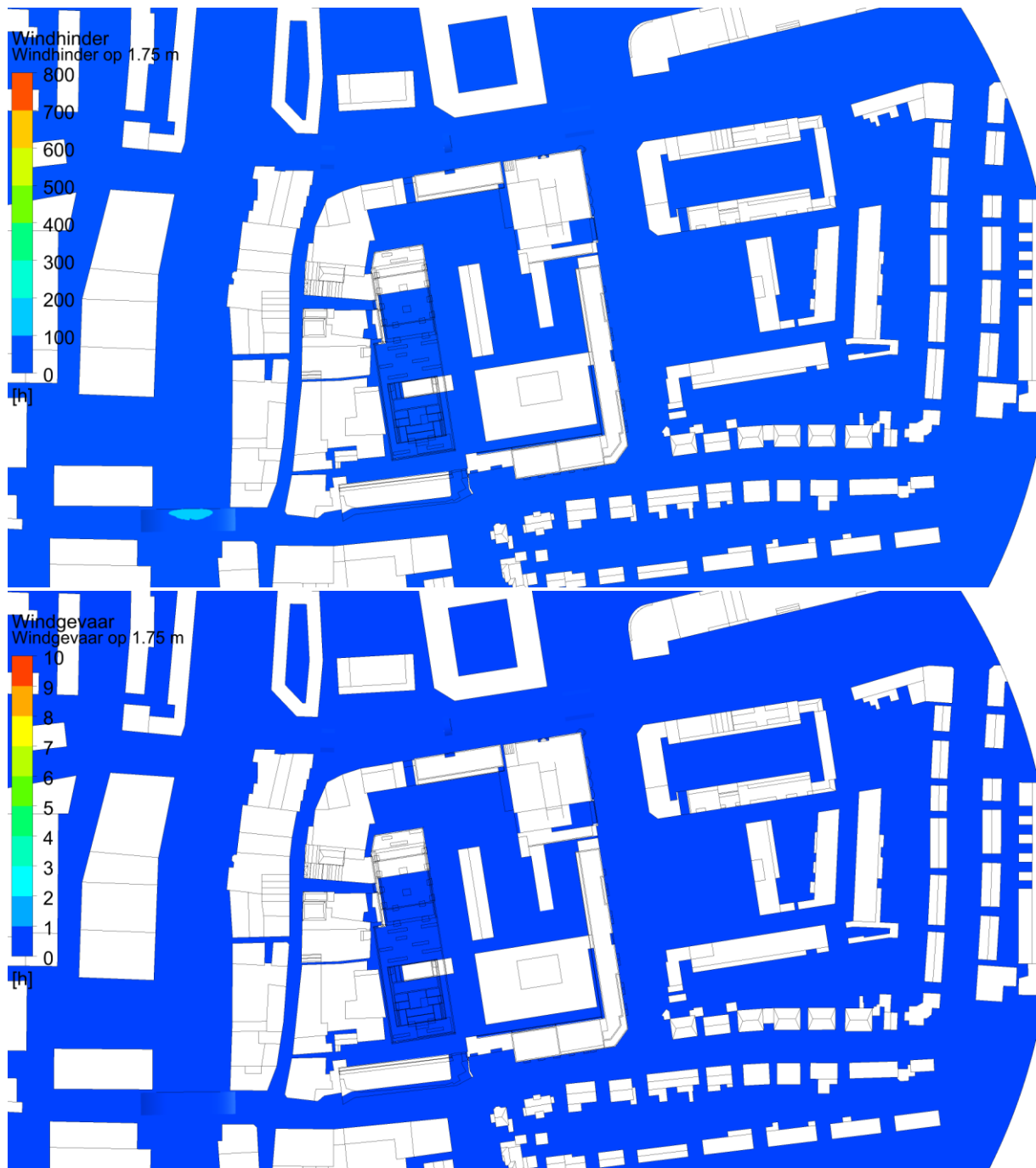
- Snelheidsvectoren gekleurd met windfactor
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de windfactor
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de uren windhinder per jaar
- Bovenaanzicht van een contour gekleurd met de uren windgevaar per jaar

Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

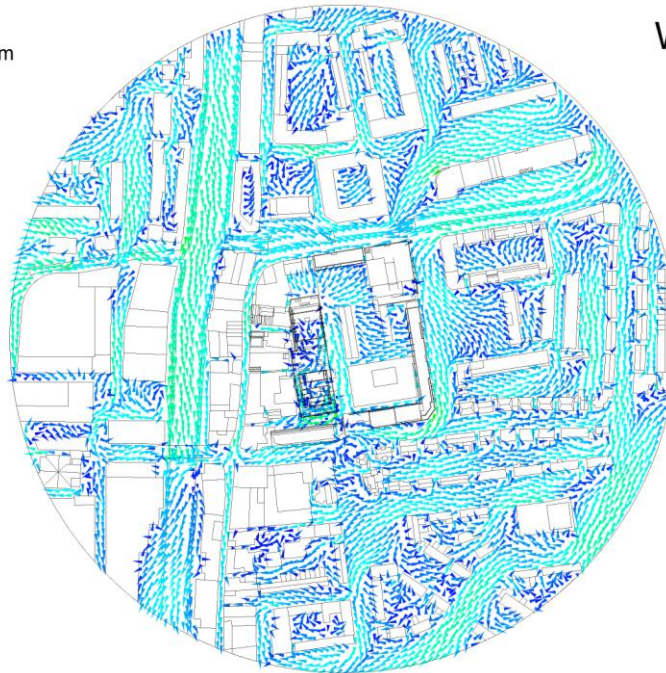
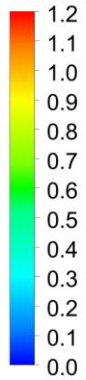


Windrichting = 0

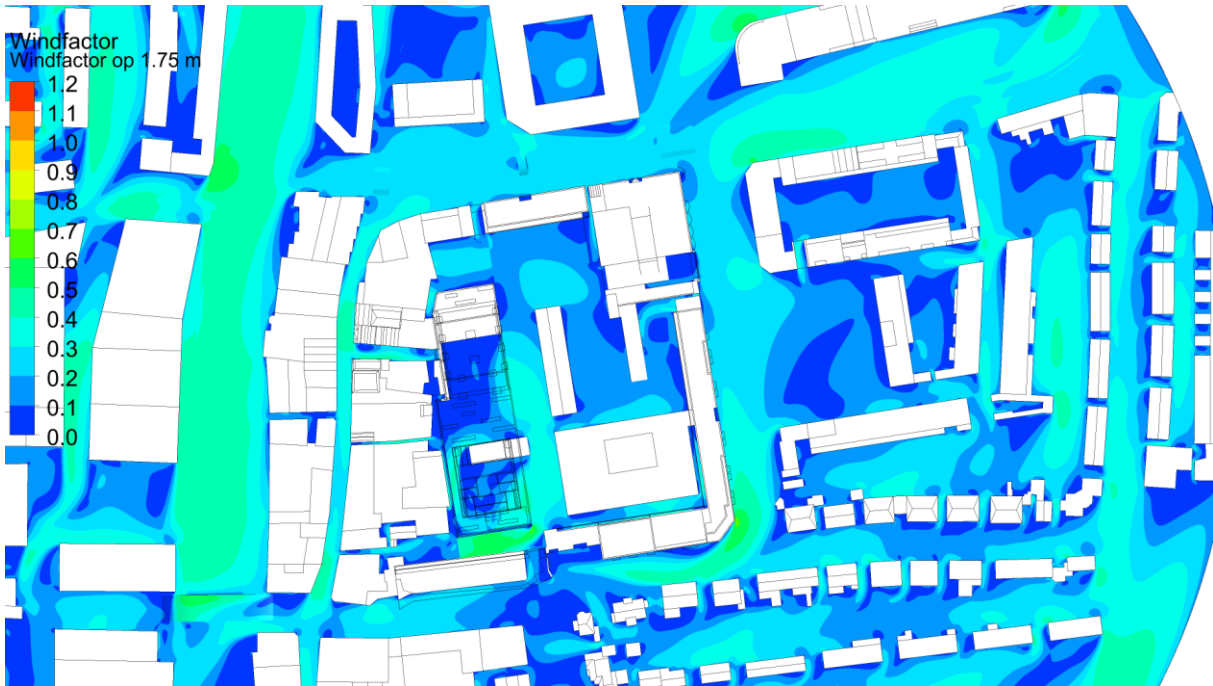


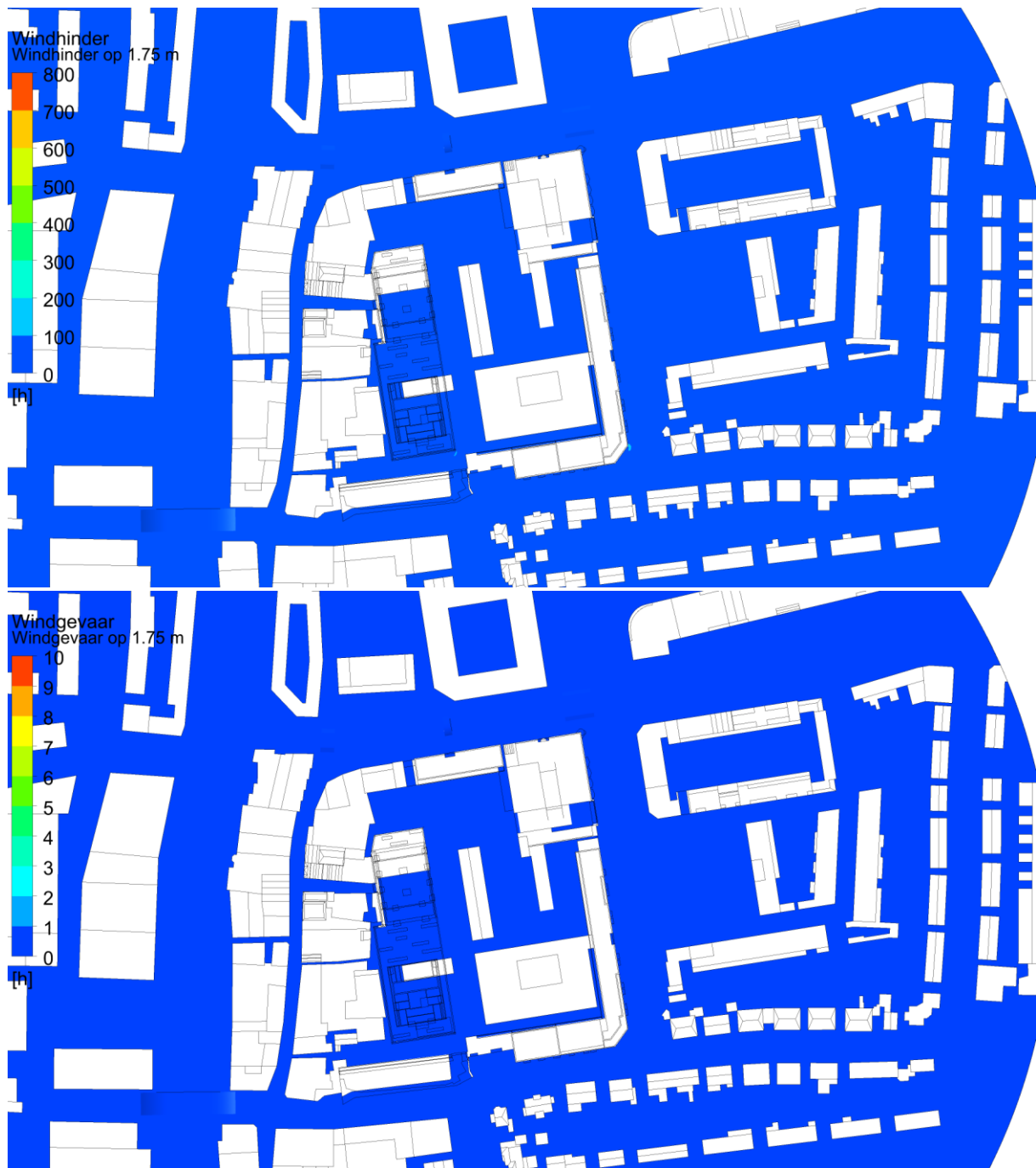


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



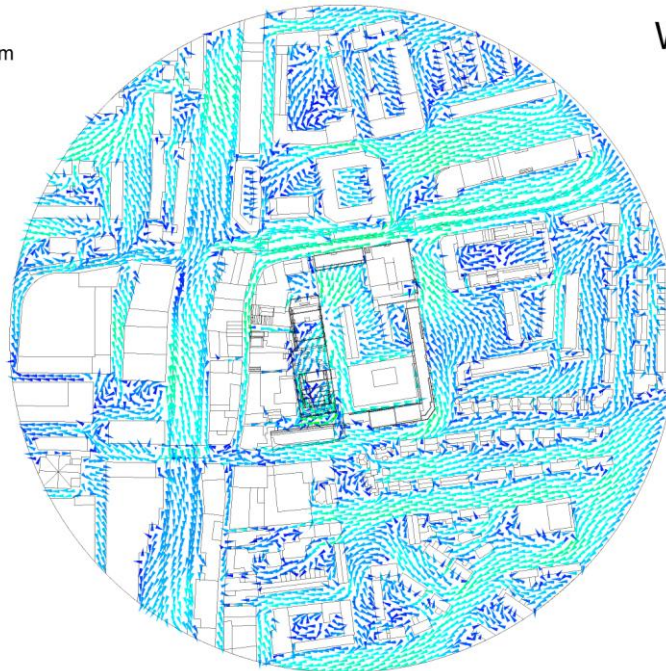
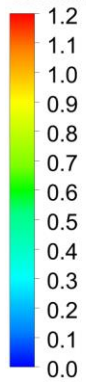
Windrichting = 30



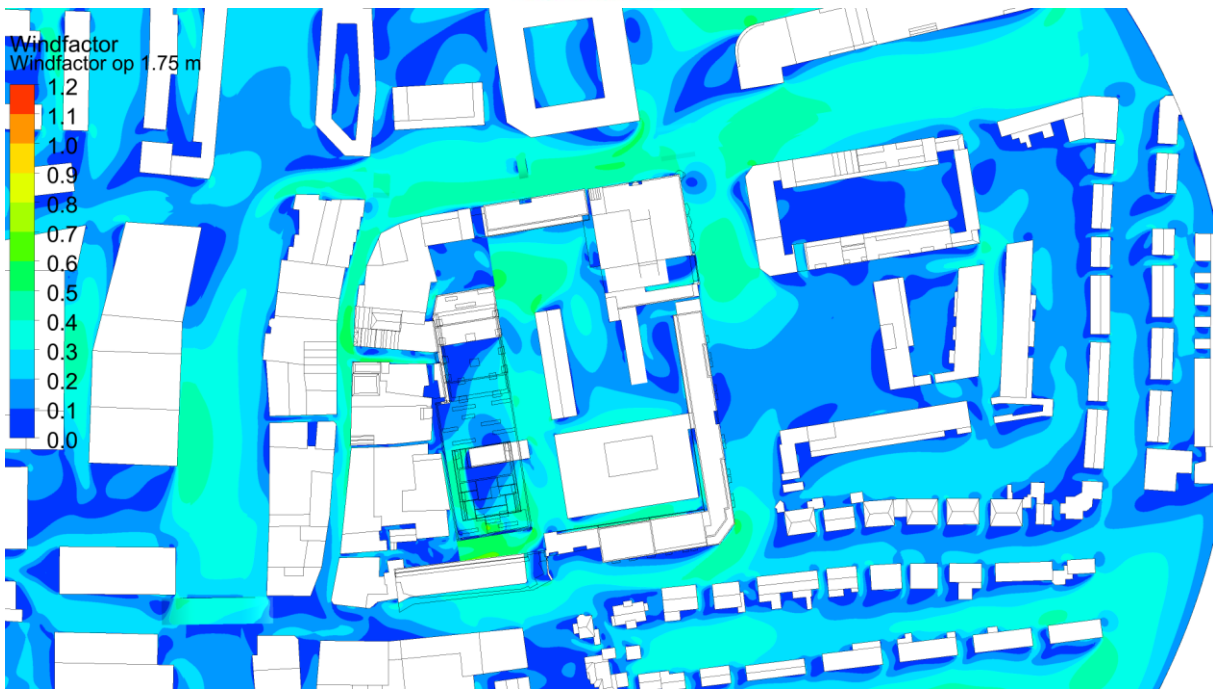


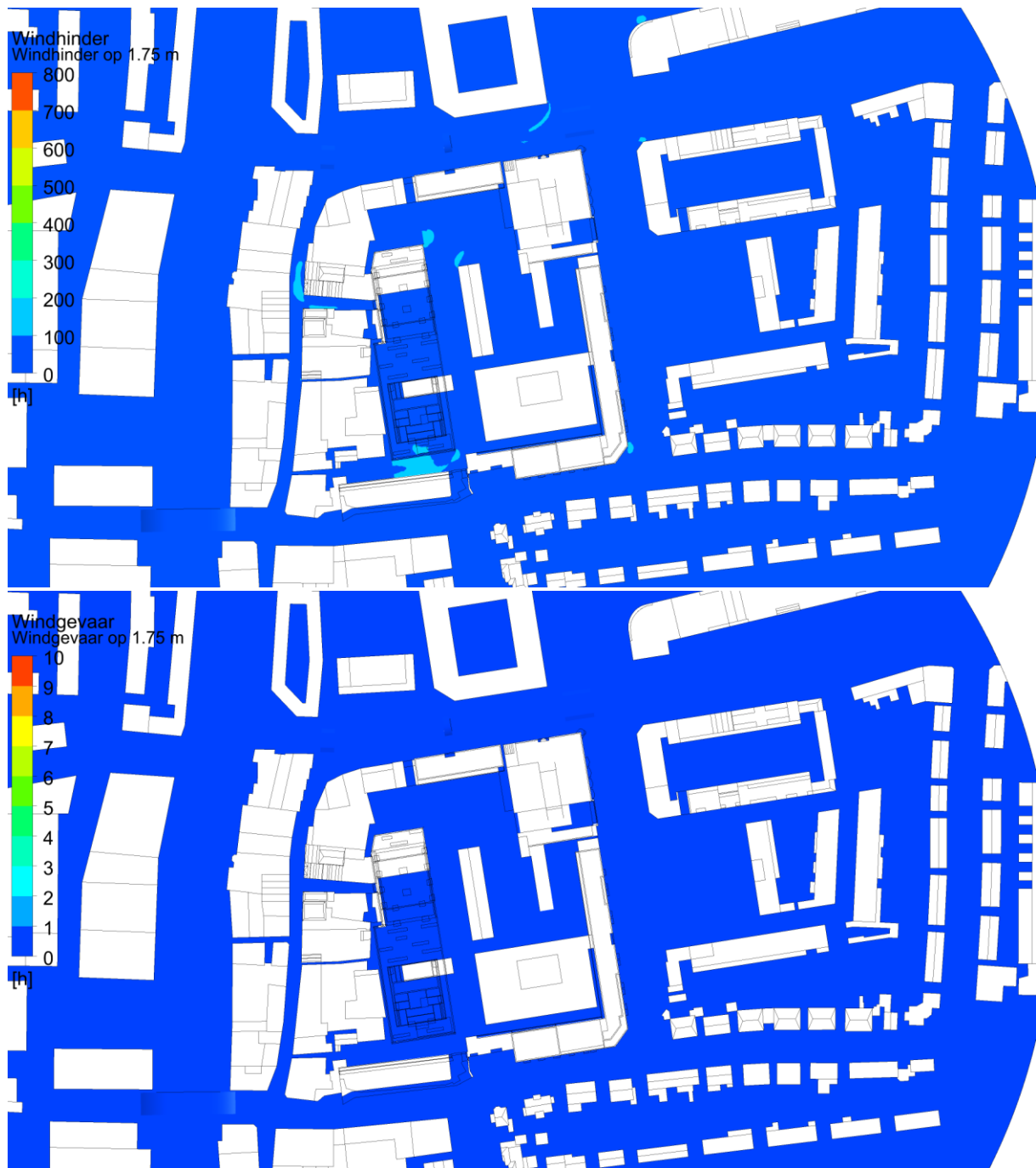


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

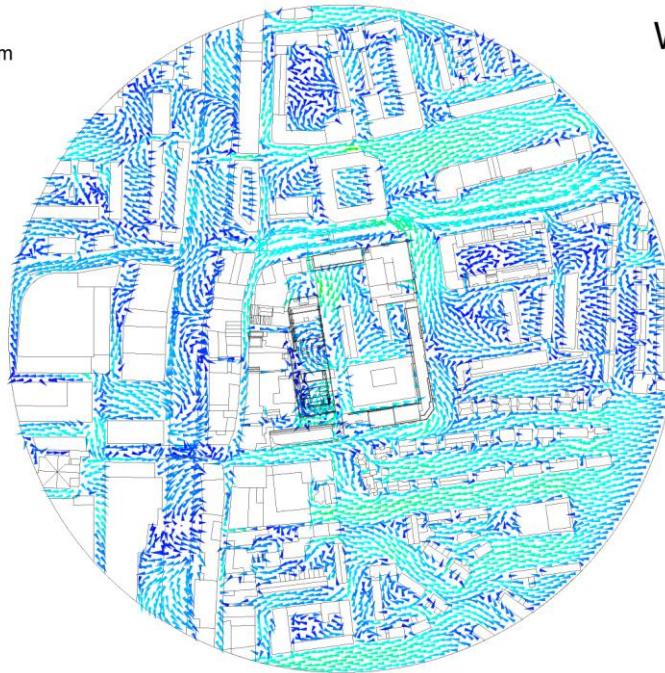
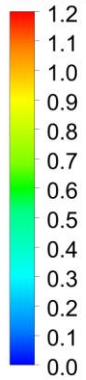


Windrichting = 60

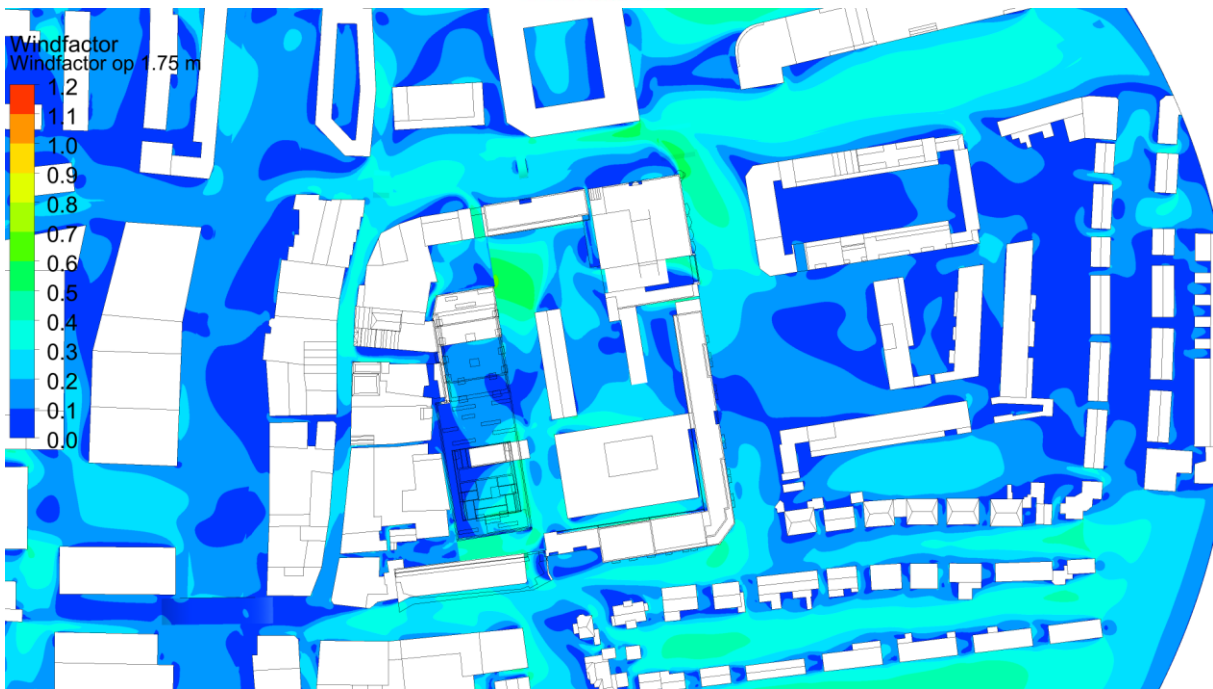


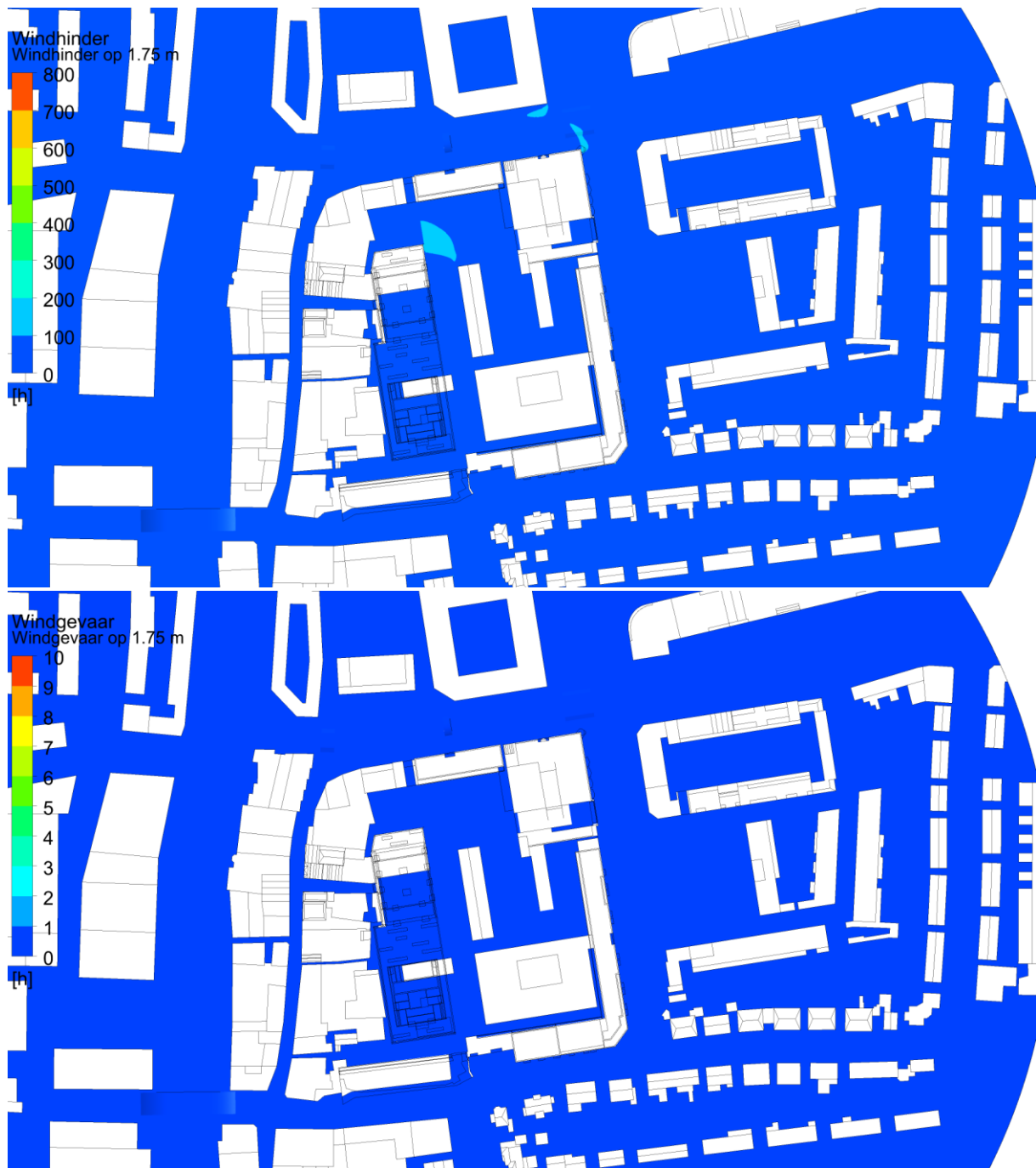


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



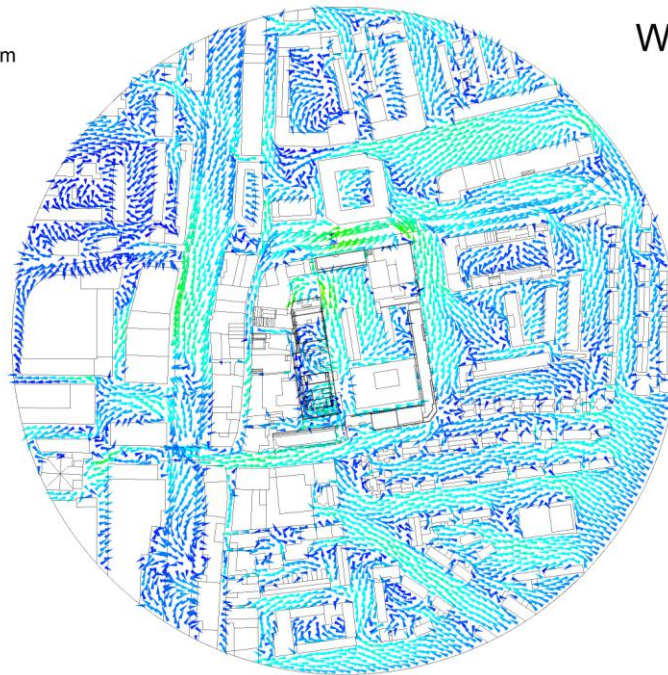
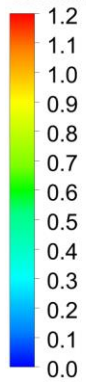
Windrichting = 90





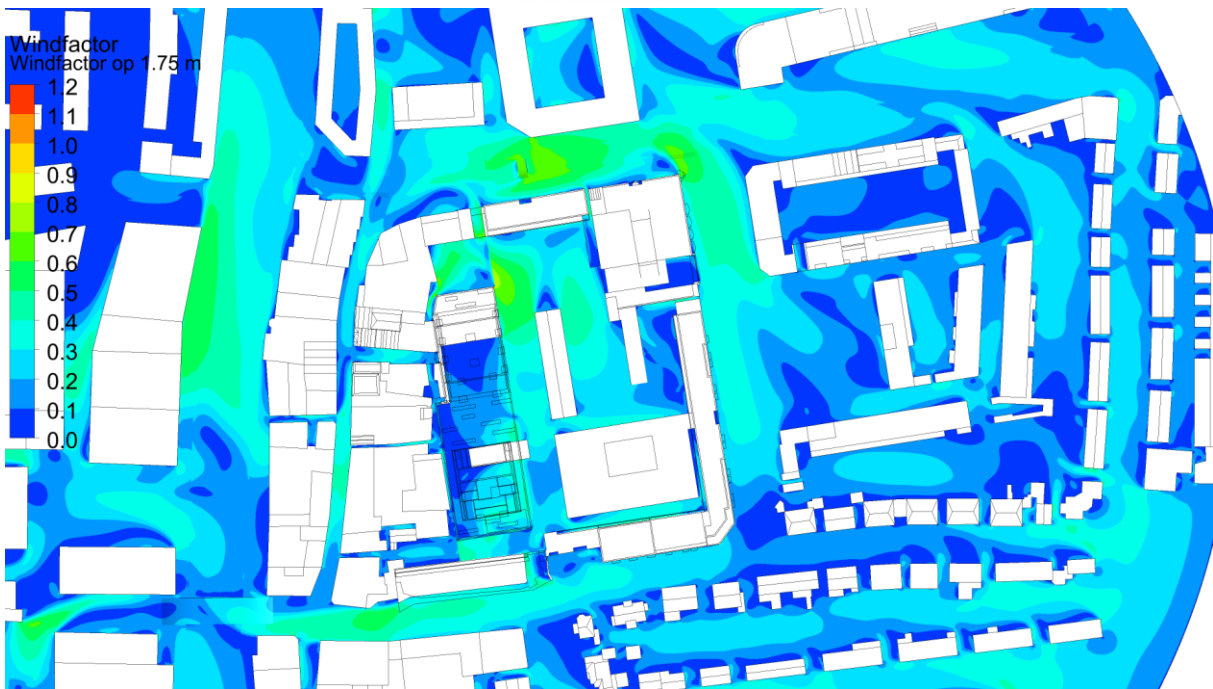
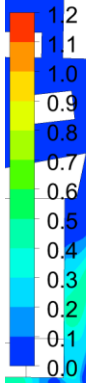


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

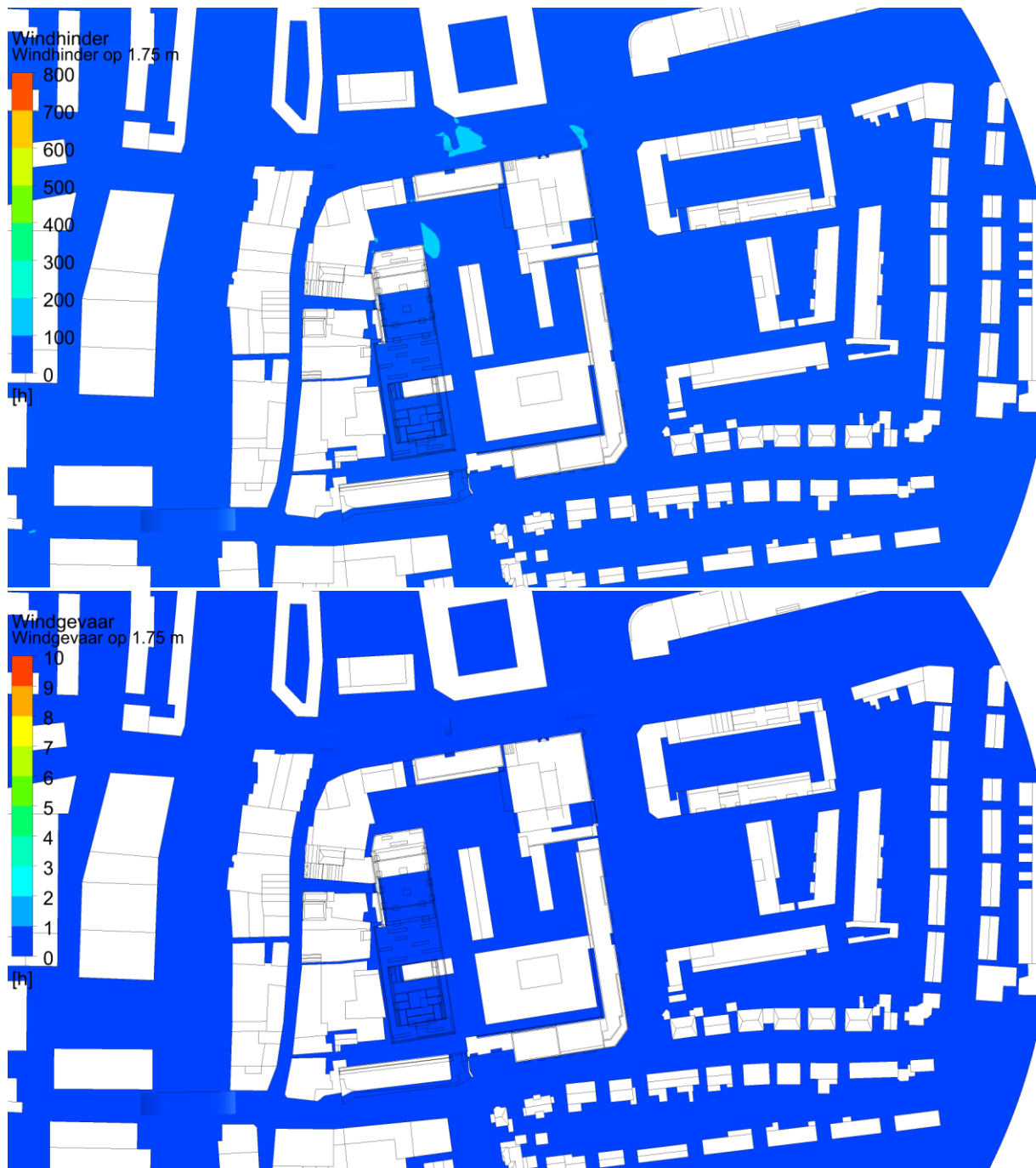


Windrichting = 120

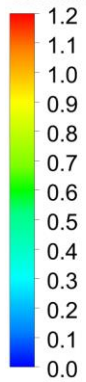
Windfactor  
Windfactor op 1.75 m



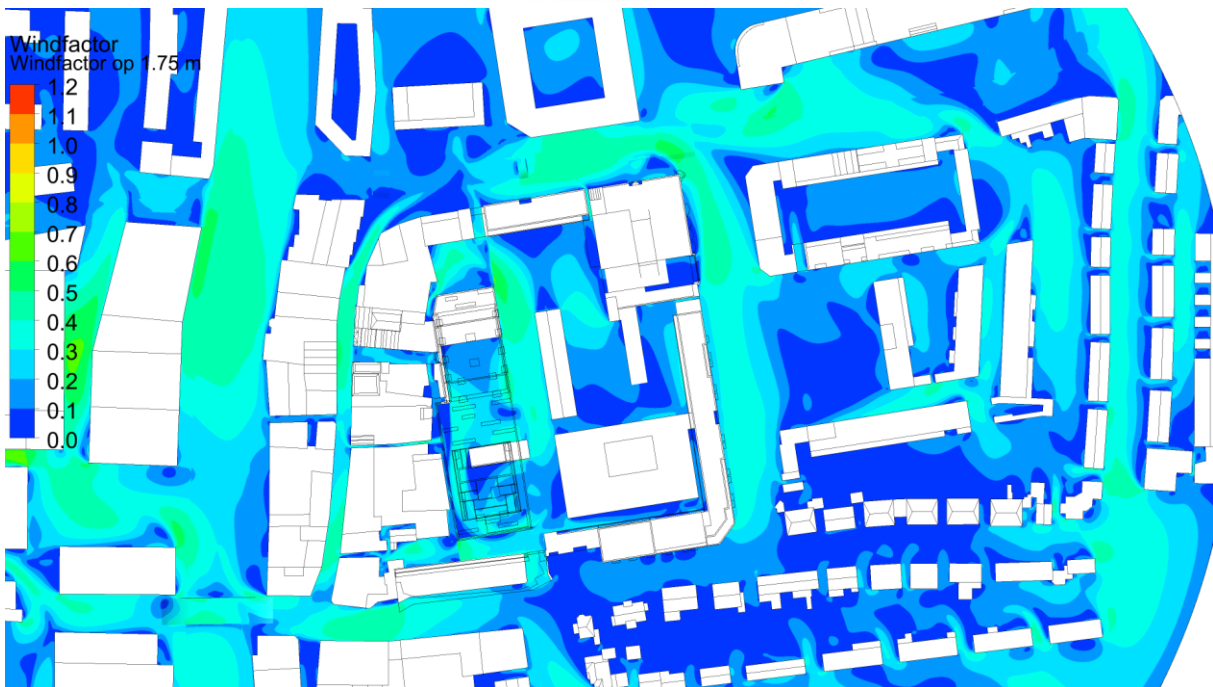


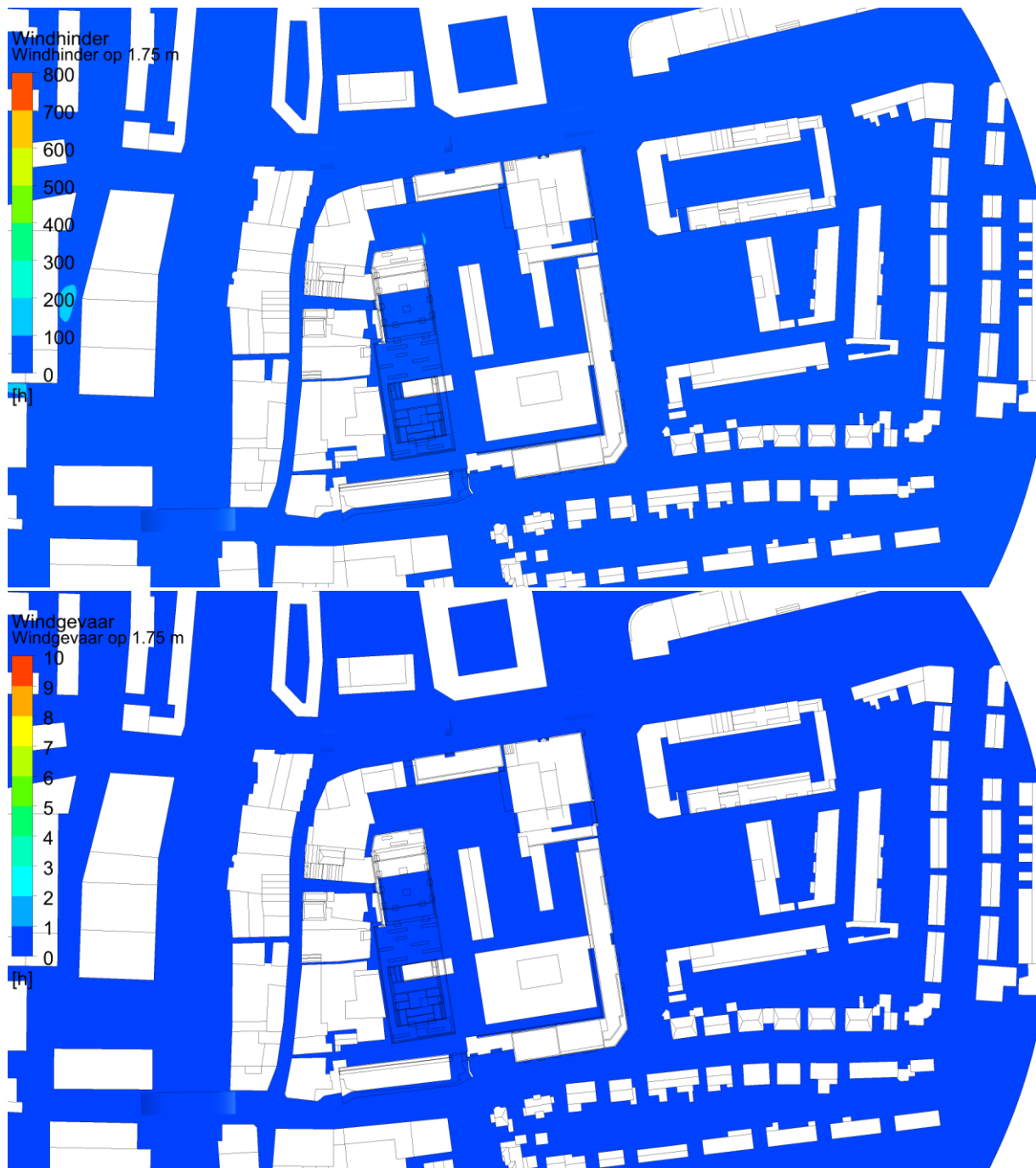


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

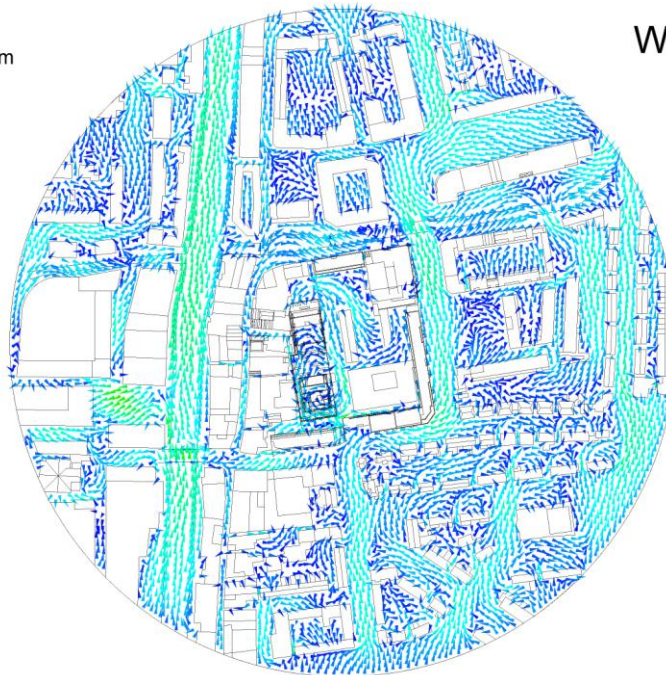
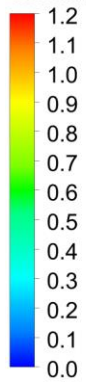


Windrichting = 150

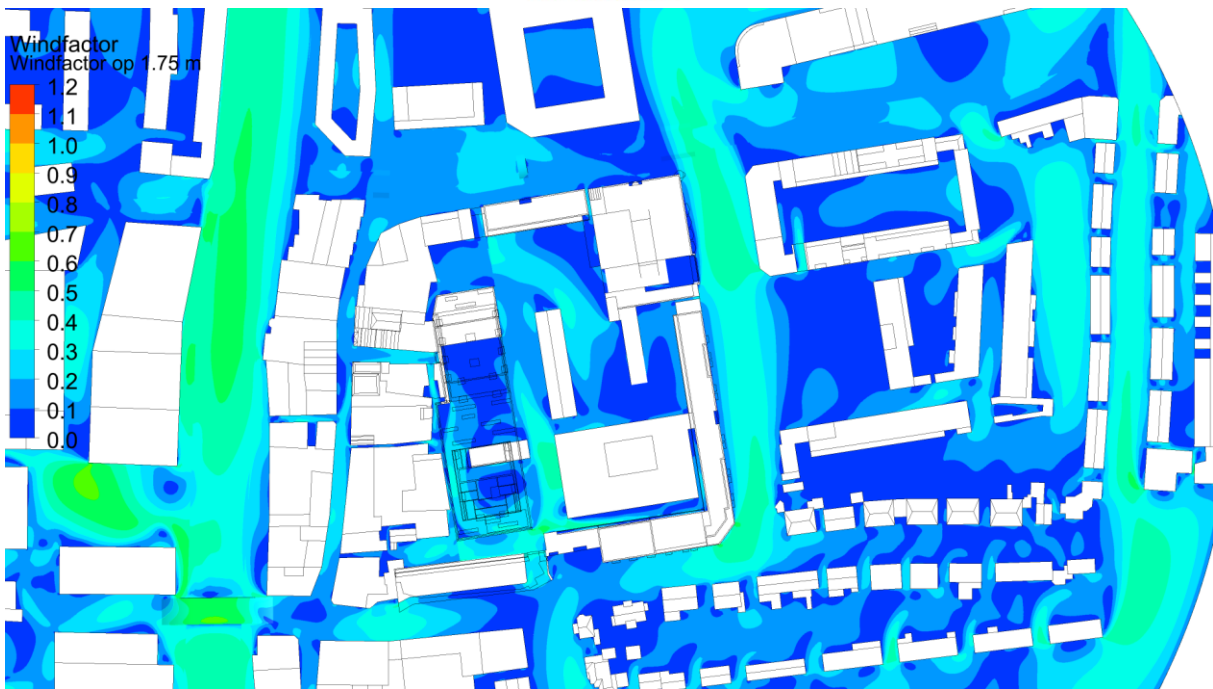




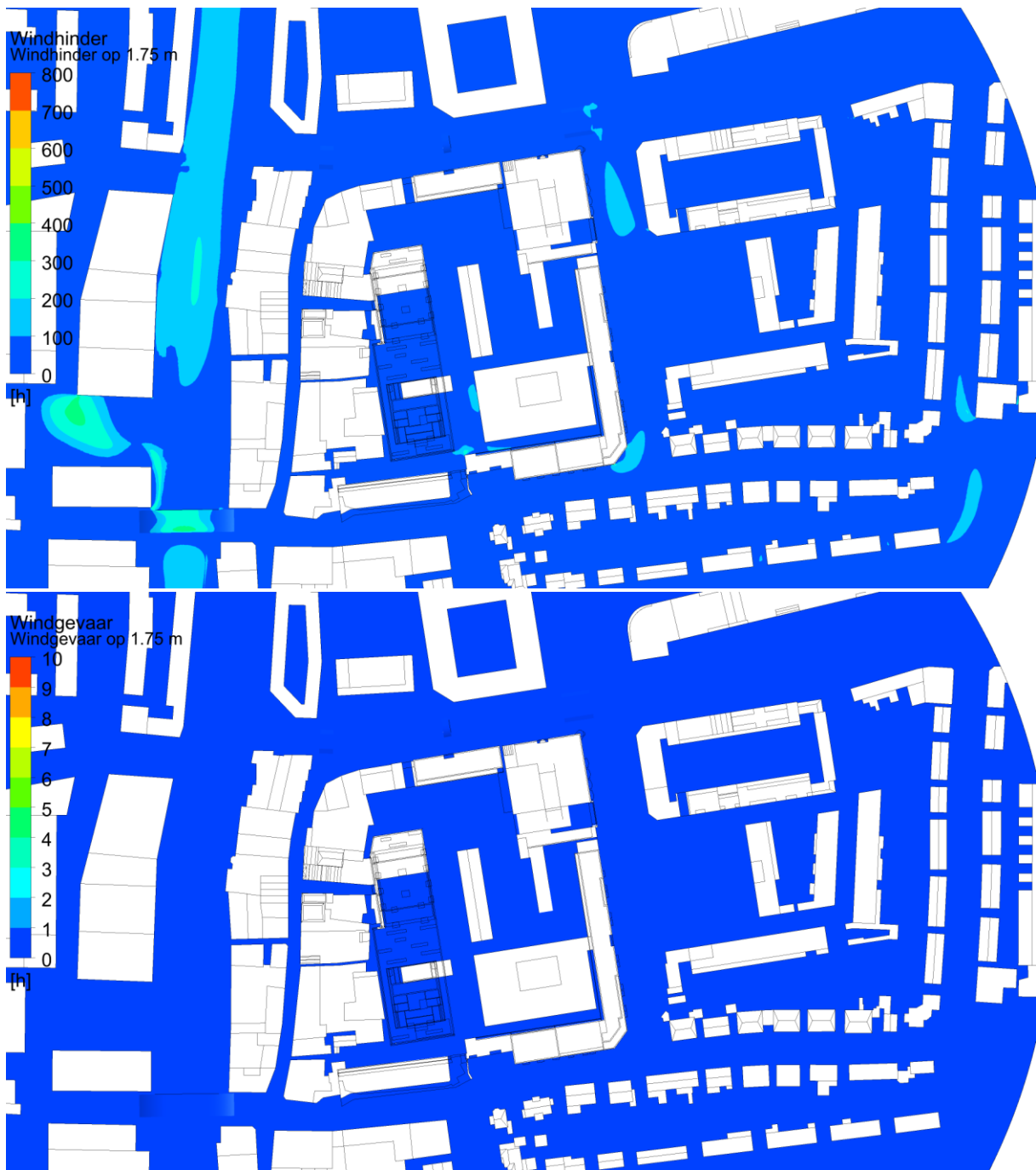
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



Windrichting = 180

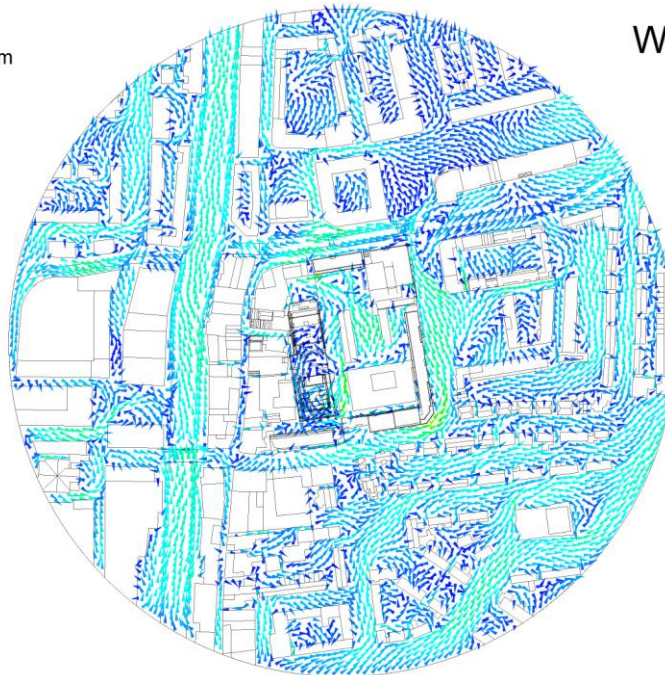
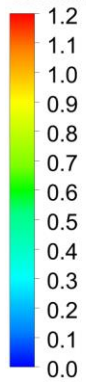




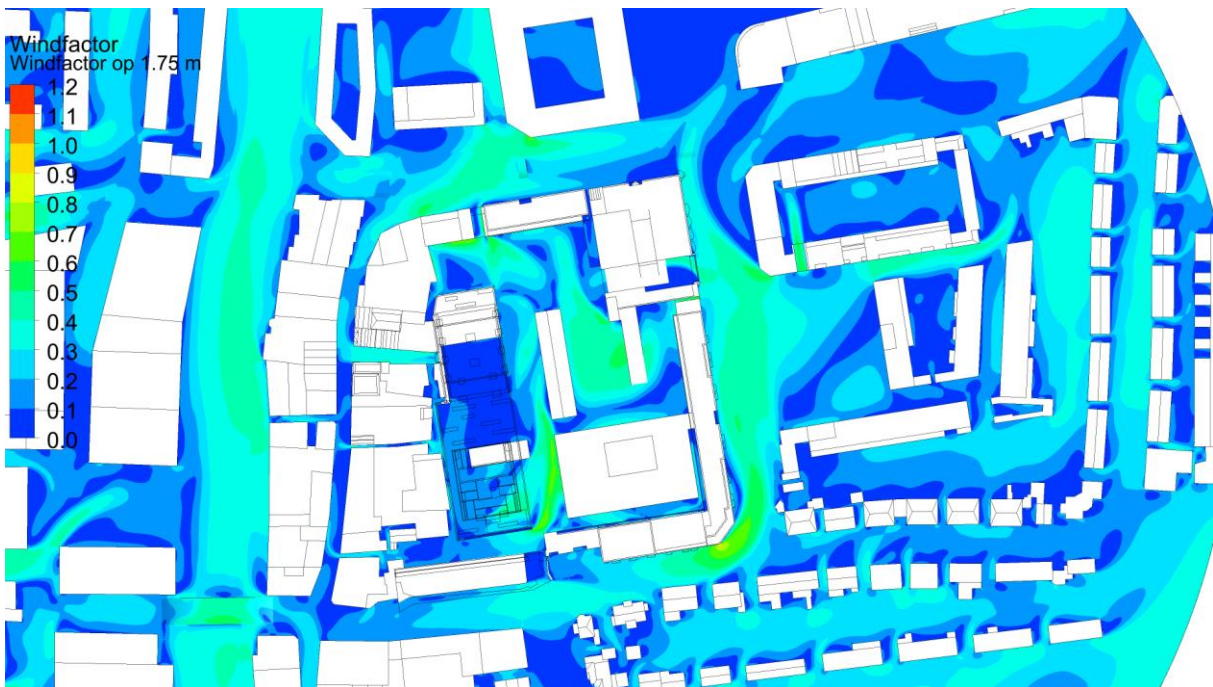


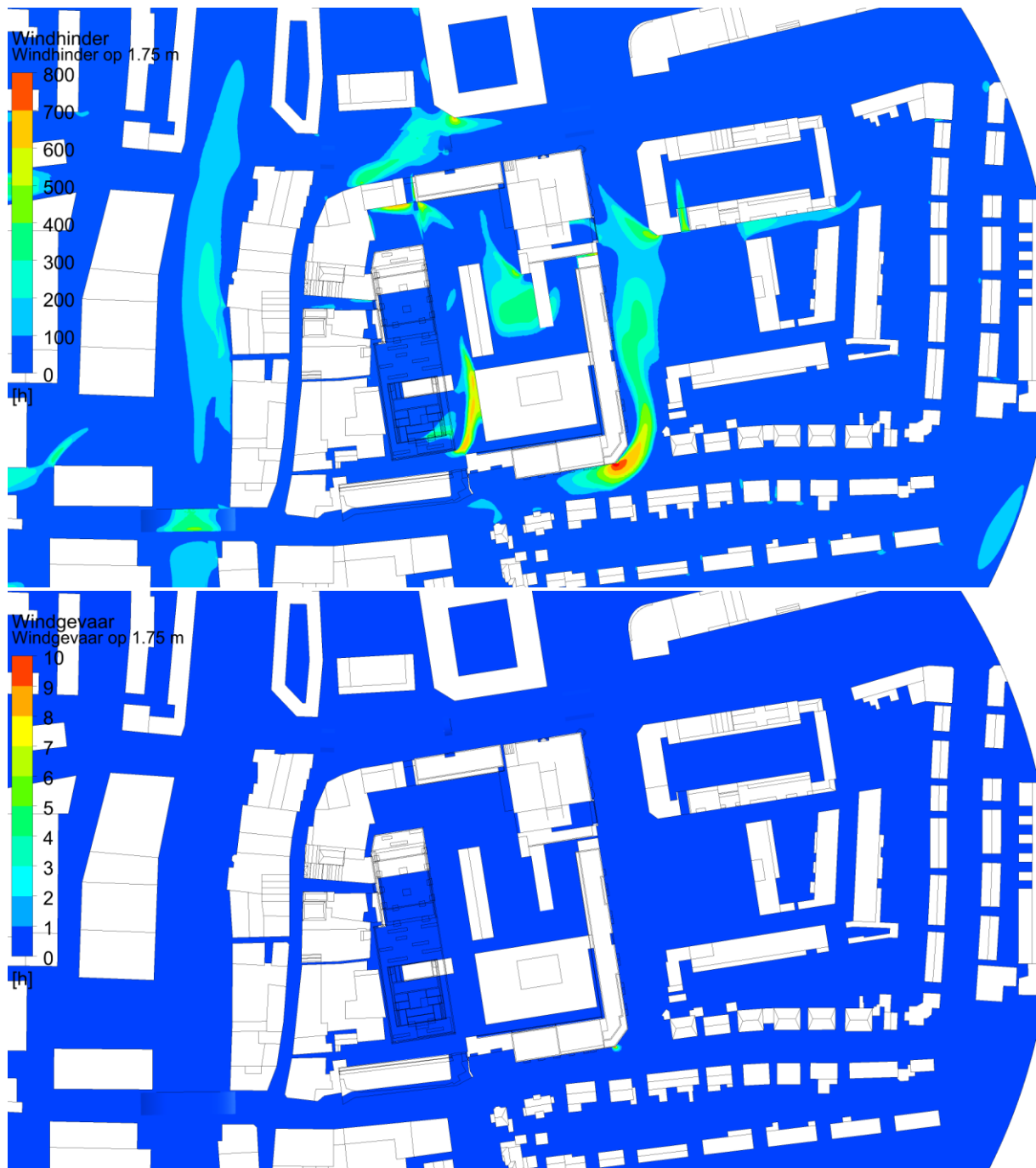


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m

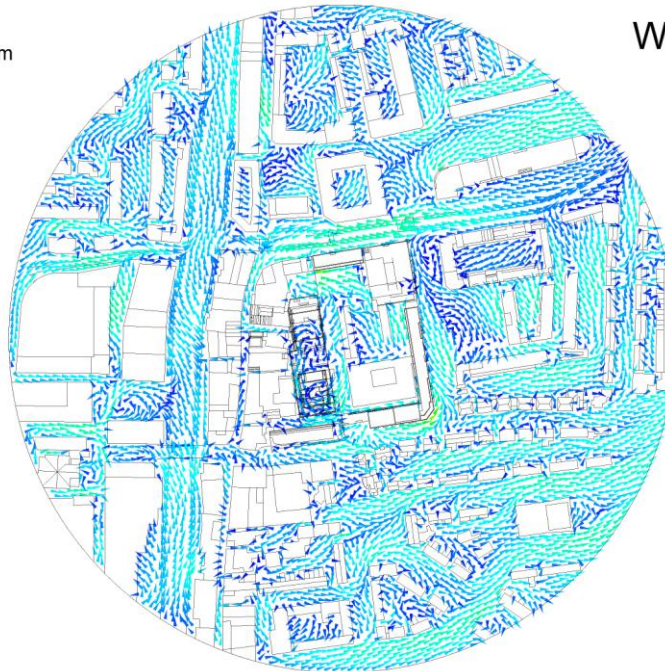
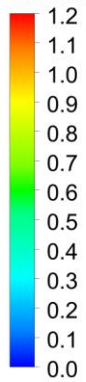


Windrichting = 210

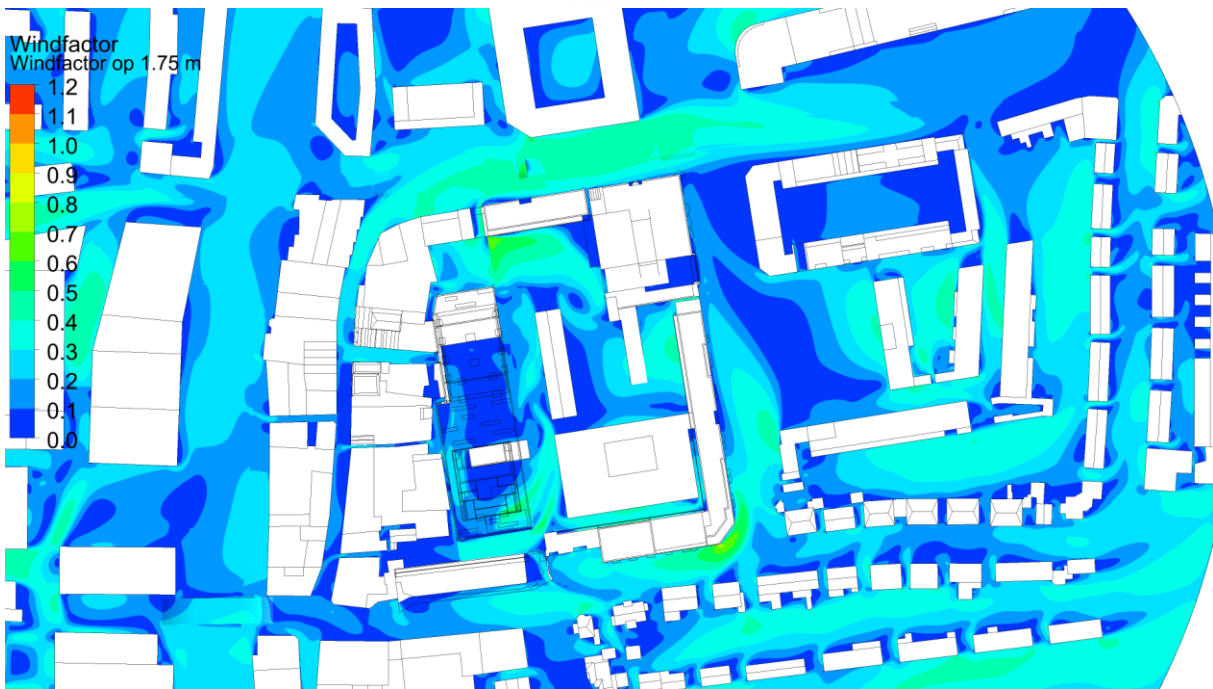




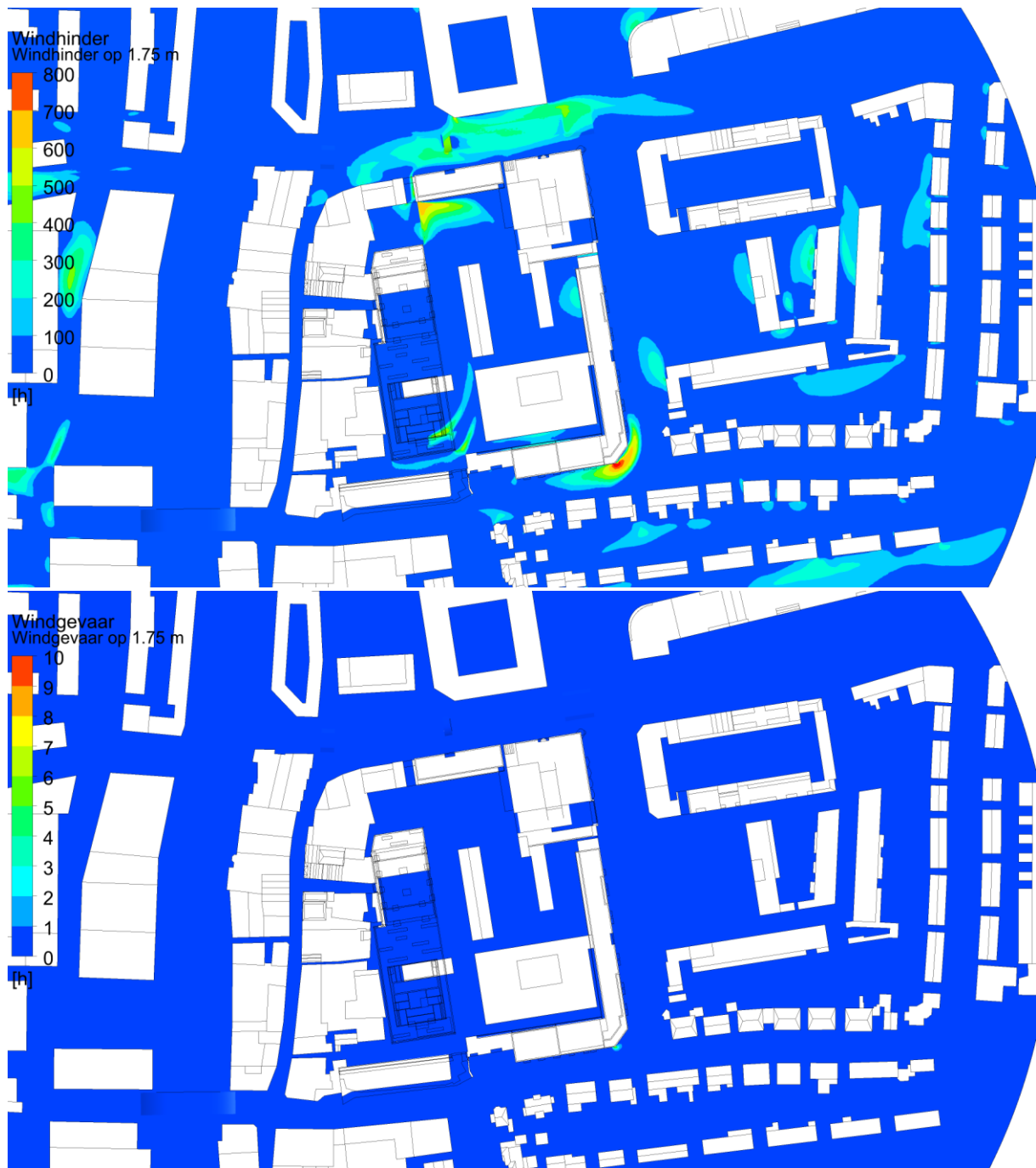
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



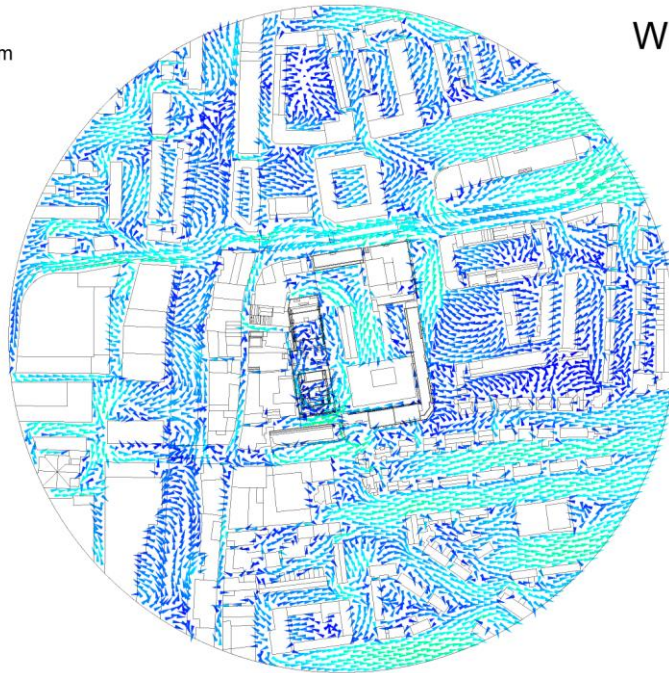
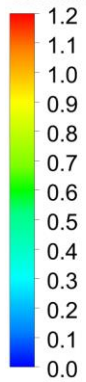
Windrichting = 240



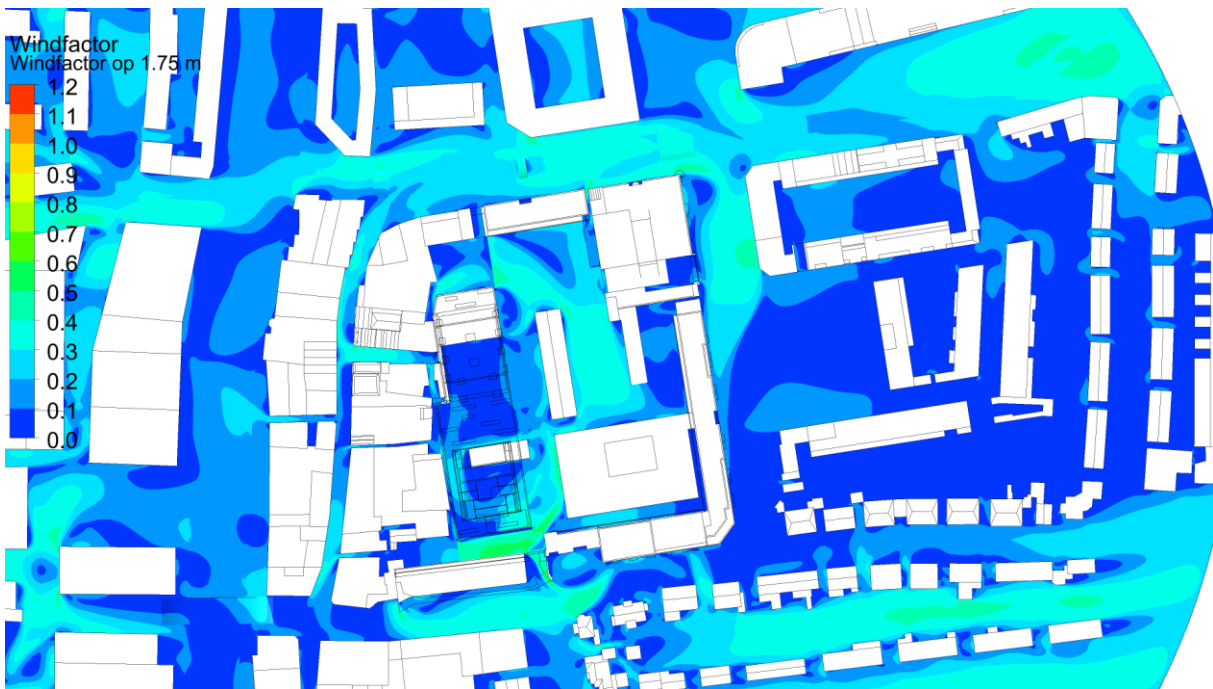




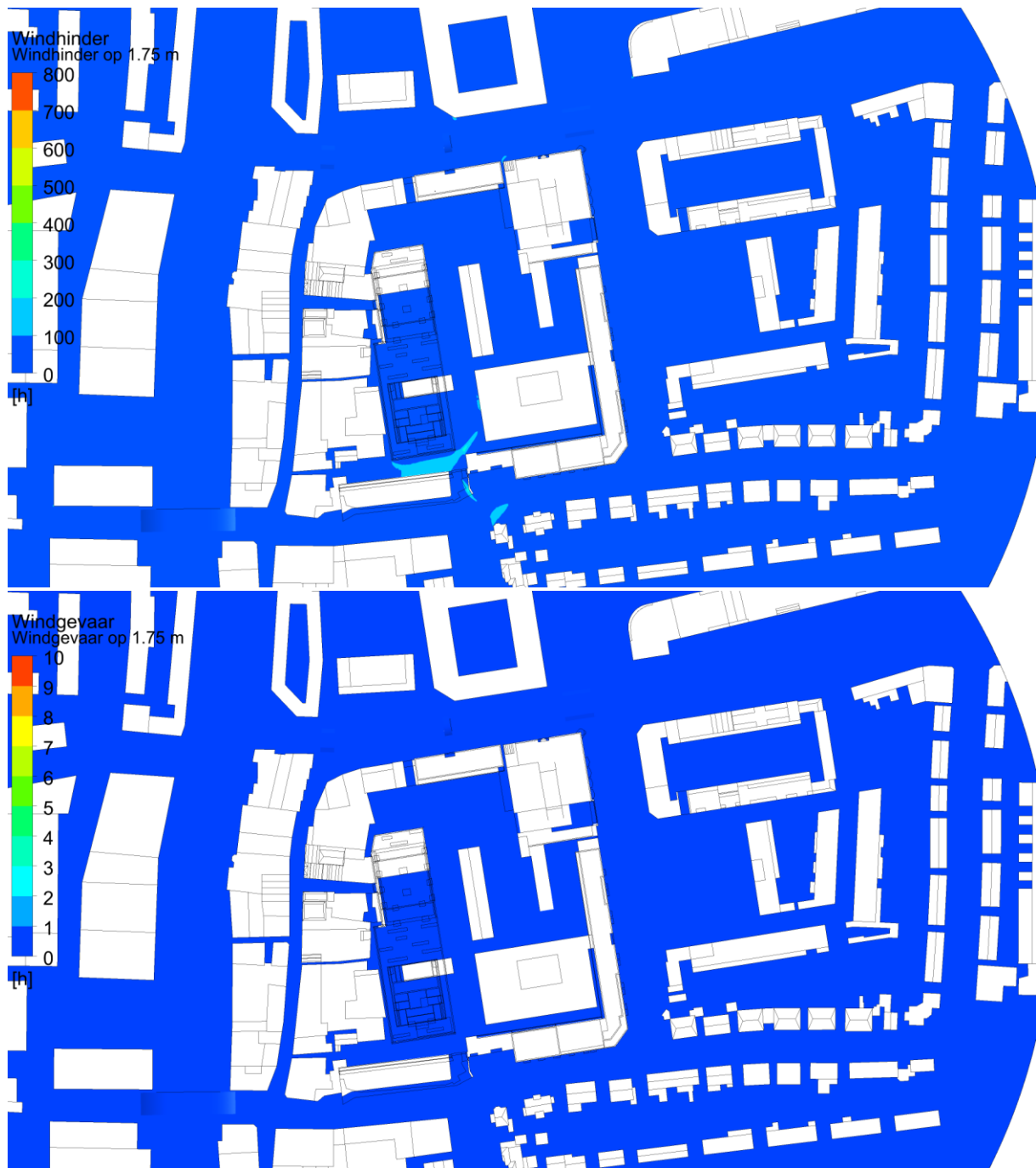
Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



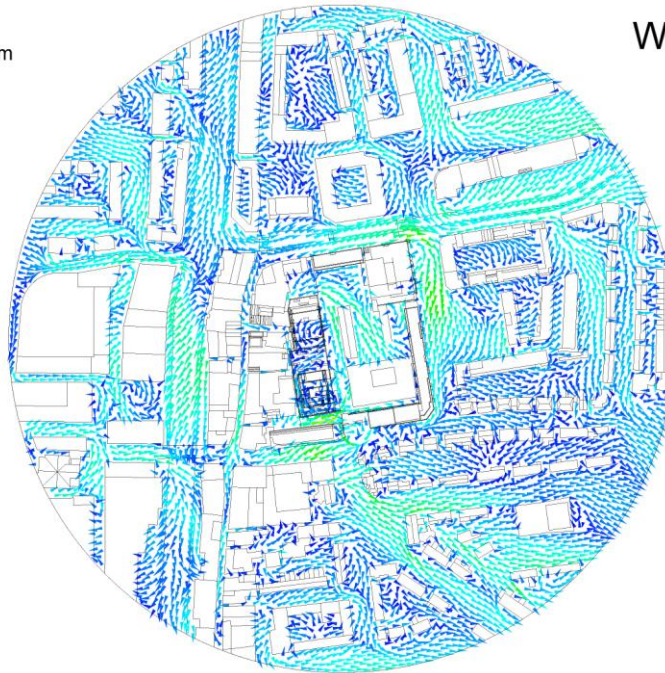
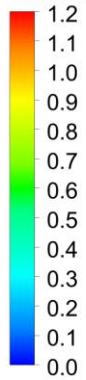
Windrichting = 270



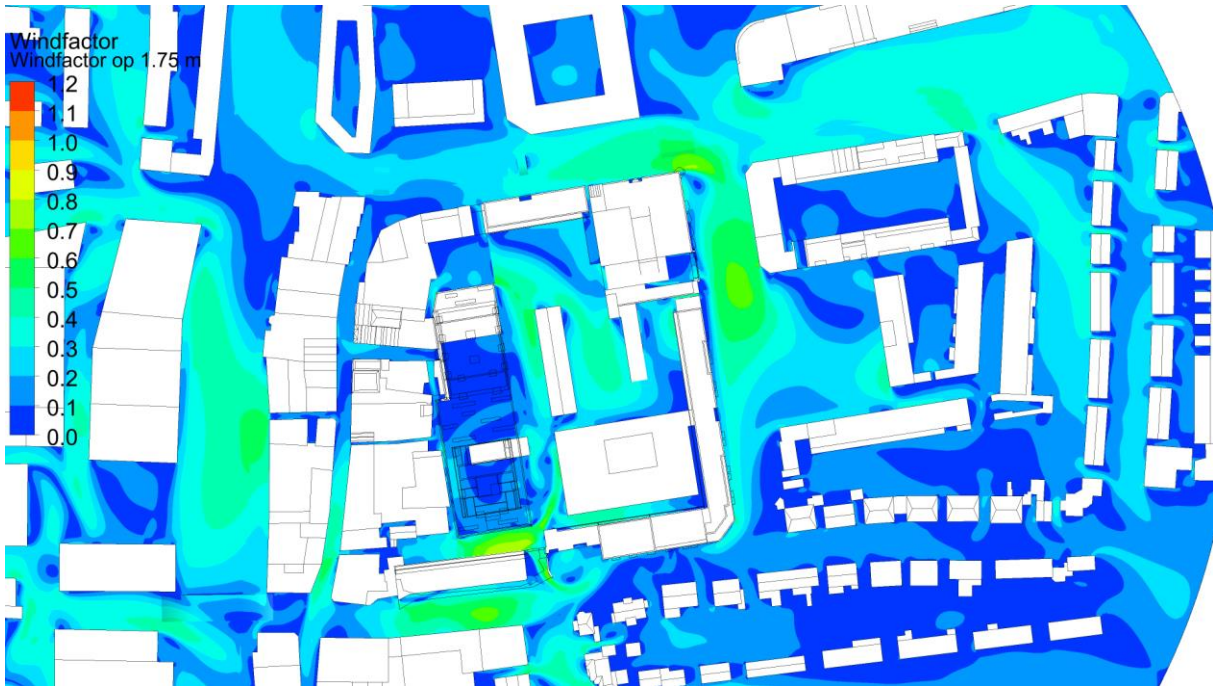


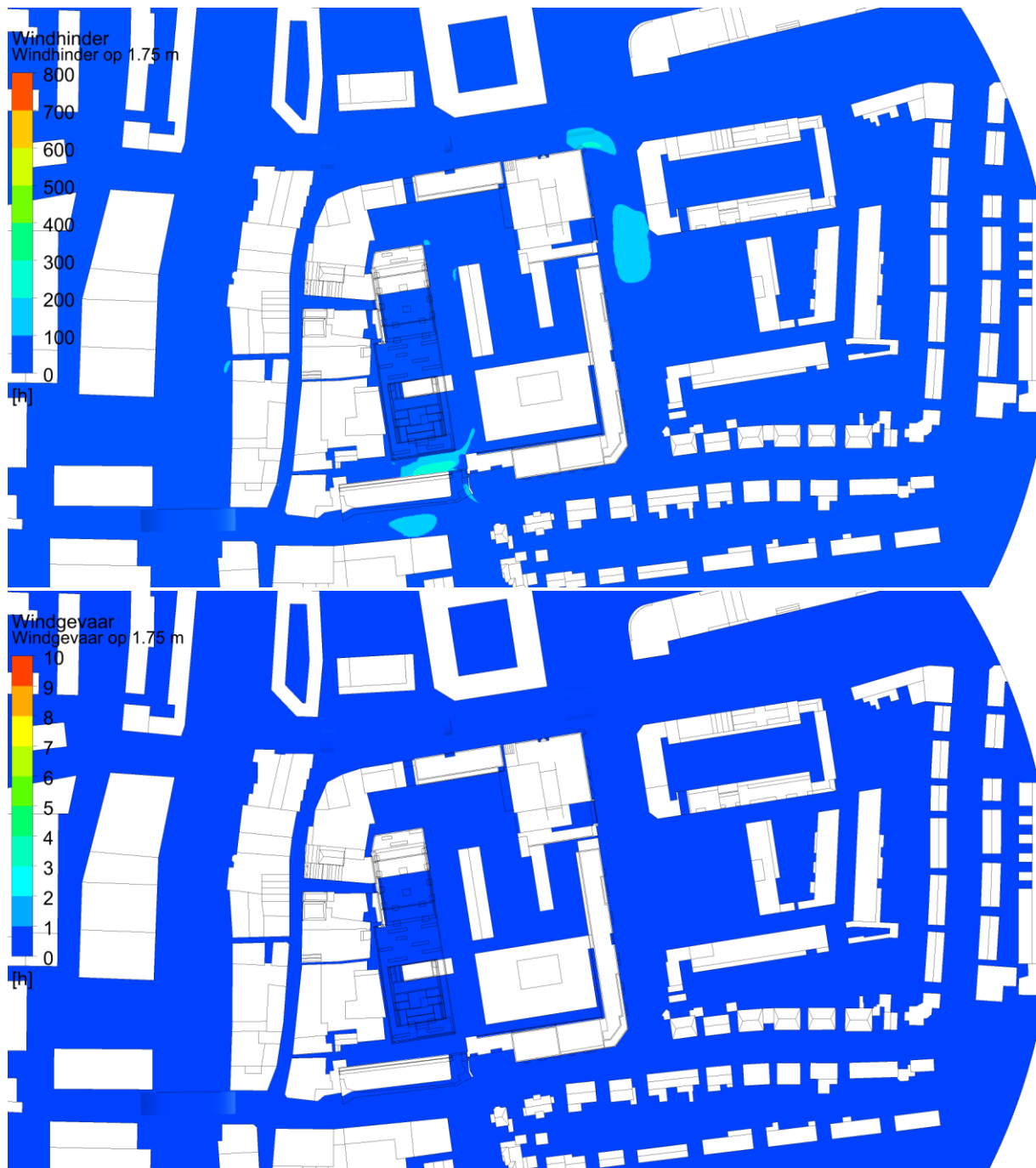


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



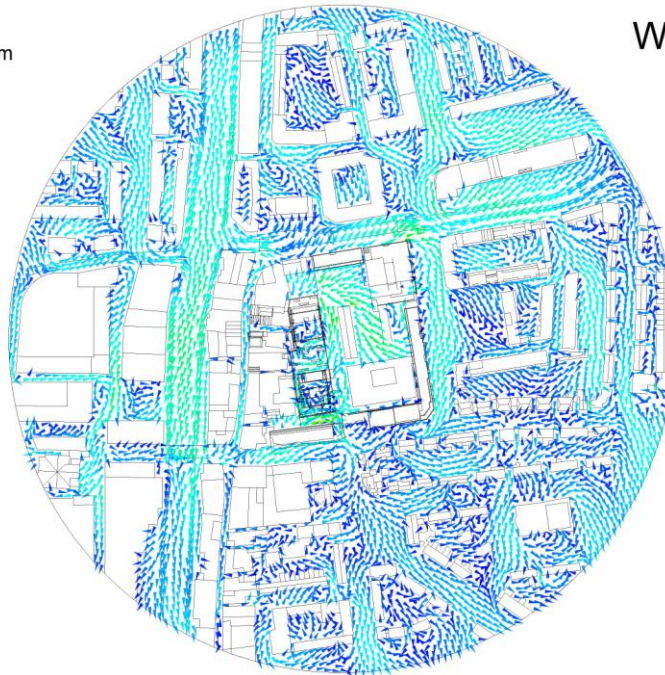
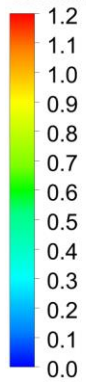
Windrichting = 300



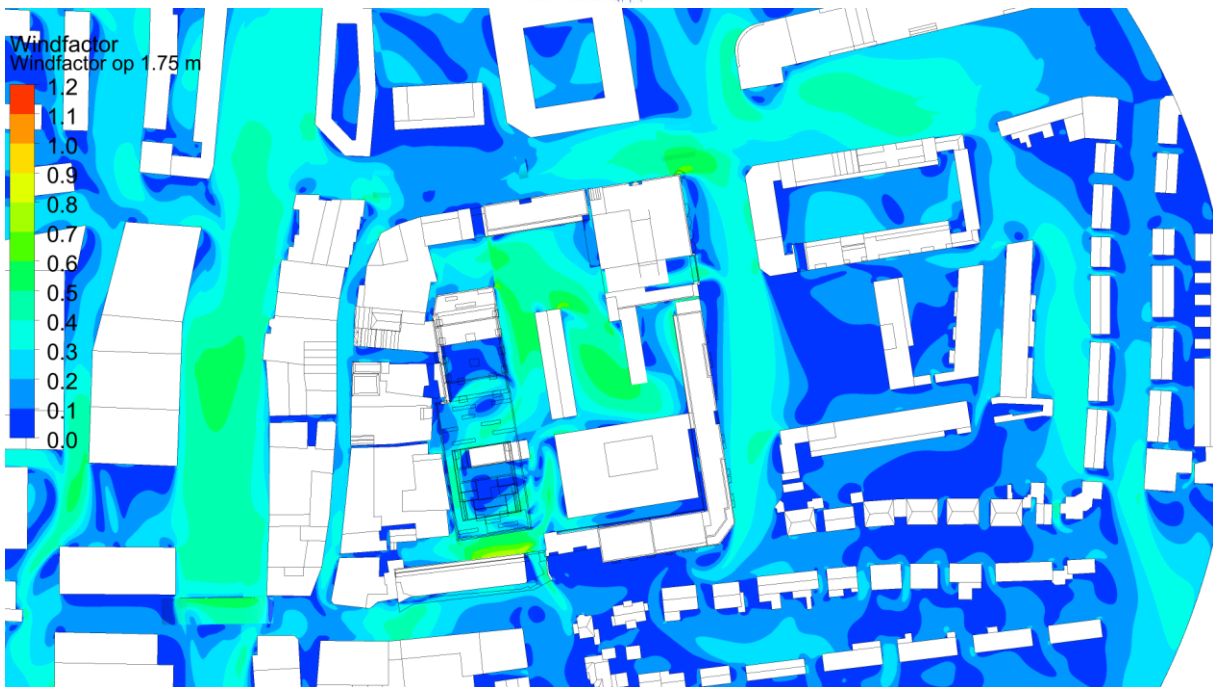


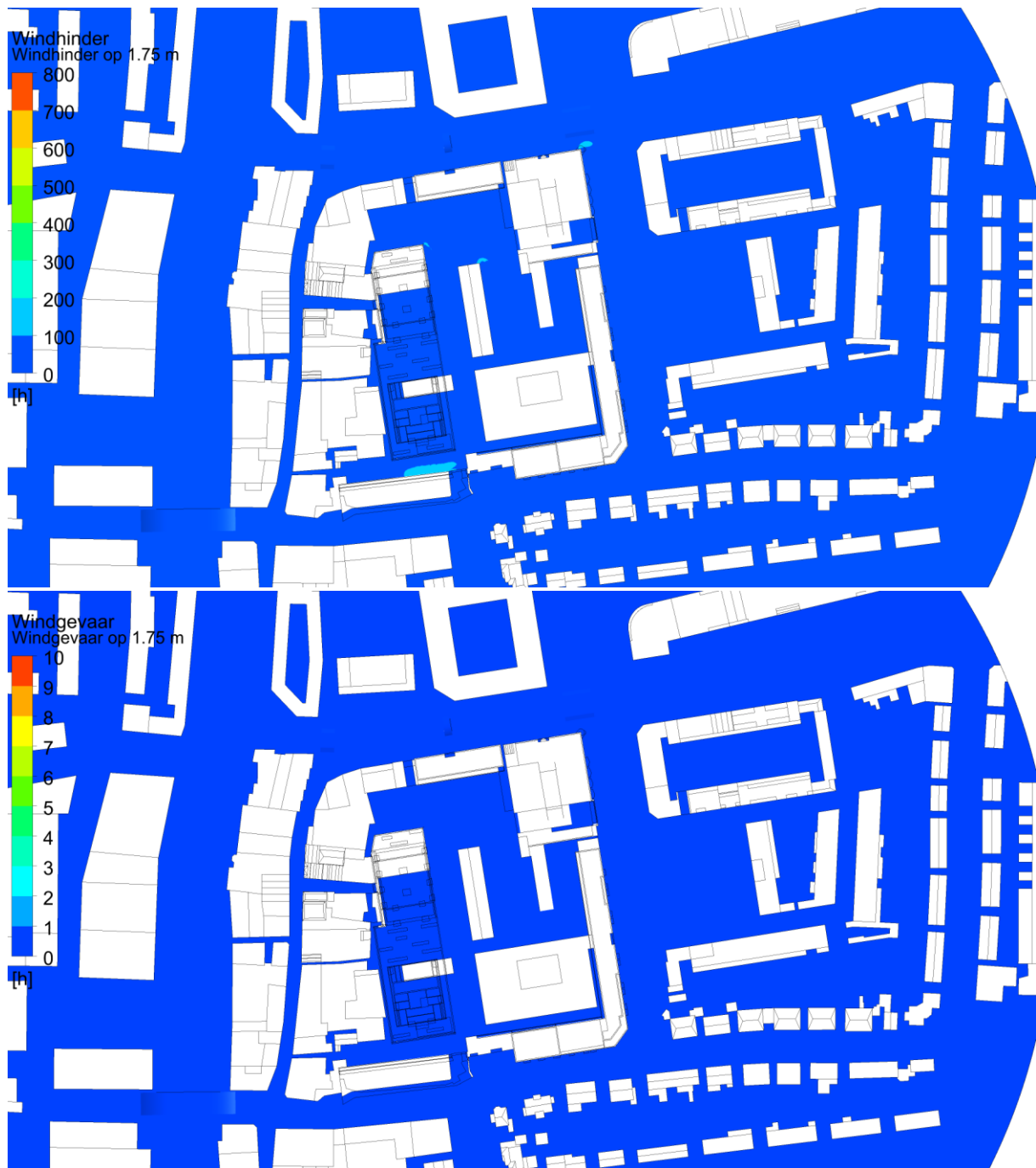


Windfactor  
Vectoren windfactor op 1.75 m



Windrichting = 330







## **Appendix C – Omschrijving software en validatielijst**

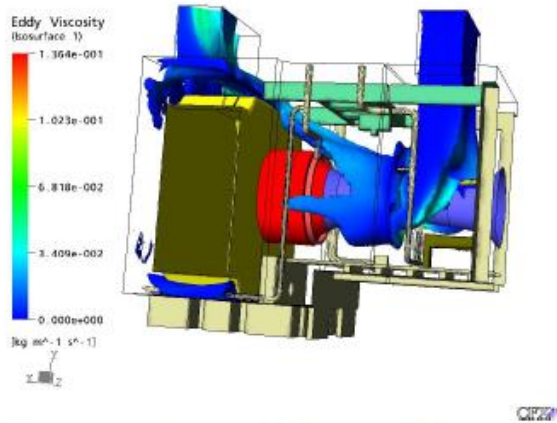


Figure 1: Ventilation and leaks in a turbine enclosure.

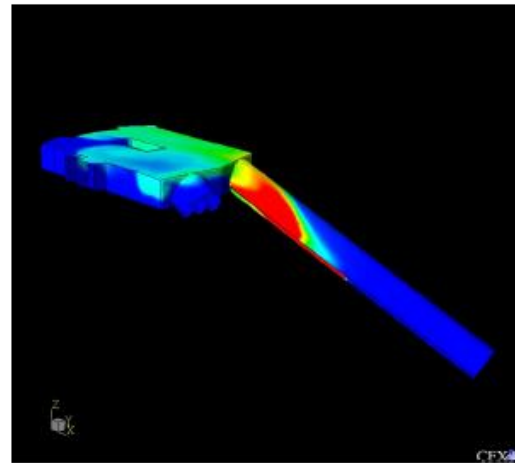


Figure 2: Forensic investigation of fire at King's Cross underground station. Wall temperature.

## 1 ANSYS' CFD Software in Safety, HVAC and Environment

ANSYS develops, sells and consults with its own CFD (Computational Fluid Dynamics) software packages named FLUENT and CFX. Other packages relevant to safety are AutoReaGas and AUTODYN. This document focuses on CFX. The software offers automatic, unstructured meshing, a coupled solver, and efficient performance in parallel. CFX is being actively used for the modelling of safety-related flows. This includes:

- Smoke movement calculations, and the so-called field modelling of fire, including the effects of ventilation and fire growth
- Jet and Pool fire calculations, to assess the effects of the flames upon neighbouring structures and the dispersion of products.
- Dispersion outdoors and indoors, to determine whether or not there may be a build up of toxic or flammable gases.
- Pressure and smoke concentration levels for the external flow around Temporary Refuges on offshore installations, to quantify smoke ingress into the refuge.

Sometimes, fire is modelled as a source of heat and combustion products, within an inert gas, when the fire engineer has some idea of these quantities for the scenario of interest. With the CFX software it is also possible to include the effects of combustion by computing the chemical reactions explicitly. Radiation can also be computed, as well as the influence of ventilation, whether by natural or active means (including wind effects). Modelling of deflagrations in confined regions, for application to industrial process plant safety, is usually done with AutoReaGas, and AUTODYN is normally used for blast phenomena.

## 2 ANSYS Europe's Track Record for Dispersion, HVAC and Fire

There are many organisations which use CFX for these topics. ANSYS Europe Ltd. itself has carried out a substantial number of studies on ventilation, gas dispersion, fire and environmental flows on behalf of customers. The most important of these was the work carried out in the late 1980s by ANSYS Europe at Harwell (in the UK) to investigate the reason for the rapid spread of the fire within King's Cross Underground Station in London. The team was then part of AEA Technology. The ANSYS work demonstrated that there was a 'new' phenomenon, the trench effect, which was responsible for the rapid fire spread. The work began with consideration of an inert, buoyant flow and later included combustion and radiation. The CFX predictions were confirmed by a series of experiments in a one-third scale model of the underground station, and were accepted in the official Fennell enquiry report as the correct explanation for the rapid fire spread. Despite the age of this work, it still arouses popular interest. For example, it was the subject of a documentary entitled 'Blaze' on the UK's Channel 4, and the Canadian Discovery Channel filmed material about it in December 2003.

Since the enquiry, the modelling has been enhanced and applied in diverse industrial sectors. CFX is of course also being used by our colleagues in other ANSYS offices, and by our clients.

A selection of ANSYS Europe Ltd. projects is shown below. The customer is given in brackets, although in some cases it is not possible to identify the customer due to confidentiality requirements.

- LNG fires (large gas company).
- HVAC in buildings and web-enabled CFD (ABB Ventilation Systems & Fläkt Woods).
- Ventilation and gas dispersion at gas-fired plant. Work has been carried out for National Power (Killingholme, Didcot, and others), HEPS, Powergen, Turbogas, Transco, BP, PGT, NEL Power, ABB, Alstom, Siemens, Costain, HSE.
- Wind-driven draughts in buildings (Royal Bank of Scotland).
- NO<sub>x</sub> dispersion in subway stations, allowing for train movement (Buro Happold).
- Ventilation and safety in the Greenwich Millennium Dome (Buro Happold and NMEC).
- Ventilation and thermal performance in the New Scottish (air traffic control) Centre, Prestwick.
- Diesel exhaust dispersion and wind loading at railway stations (Halcrow, Wates).
- Ventilation and toxicity assessment at an indoor sewage plant (Earthtec).
- Flow and heat transfer in window facades, including radiation and conjugate heat transfer (consulting engineers).
- Explosion risks from foam aerosol dispensers.
- Fire modelling (Brandskyddslaget & Brandkonsulten).
- Investigation of the fire at King's Cross, for the HSE. Presented in the Fennell Report.
- Follow-up to the King's Cross analyses (London Underground).
- Fires in tunnels (large international construction company).
- Fires on the HGV shuttle (HSE).

- Fires on the HGV shuttle, explosions and parallel processing (European Commission).
- Fire suppression & water spray interactions (UK Government).
- Validation for jet compartment fires, as part of the Blast and Fire Engineering for Topside Structures Phase 2 (managed by the Steel Construction Institute).
- Validation for 2-D heavy-gas dispersion (Shell).
- Validation for dispersion of buoyant plumes, fires in long structures, response of risers to nearby jet fires (large international oil companies).
- Fires on offshore platforms (European Commission).
- Fire and smoke movement on offshore platforms (large international oil companies).
- Marine oil dispersion and sea fires (Mobil North Sea Ltd.).
- Ingress of foreign bodies into turbomachinery (large power company).
- Ventilation of large compartment fires (Home Office).
- Ventilation, gas dispersion and remediation at a gas-fired power station (Hydro-Electric Production Services, Keadby). ANSYS' work in this area was shortlisted for the "TCE Excellence in Safety & Environment Awards 1998", organised by the UK's Institution of Chemical Engineers.
- Wind conditions at an airfield (Ferguson McIlveen).
- Heavy gas dispersion in a ventilated room (Gaz de France).
- LNG dispersion subject to wind (Gaz de France).
- Sea- and freshwater mixing at the Cardiff Bay barrage (Hyder Environmental).



## CFX VALIDATION - A SAMPLE LIST RELEVANT TO FIRE, HVAC & ENVIRONMENT

1. Burns A D and Jones I P, "Numerical predictions of turbulent three-dimensional jet flows in rectangular enclosures", AERE-R 11892, 1986.
2. Jayanti S and Hewitt G F, "Turbulent flow through a 90° bend of square cross-section", Proceedings of the Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, STANFORD, pages 255-265, Pineridge Press, 1991. See also S J Dewhurst, S R Martin, S Jayanti and G Costigan, "Flow measurements in a square section 90° bend", HTFS RS860, pages 457-467, 1990.
3. Witlox H W M, "Mathematical modelling of three-dimensional dense-gas dispersion problems", Proceedings of the Third I.M.A. Conference on Stably Stratified Flows, LEEDS, UNITED KINGDOM, pages 363-394, 1989.
4. Ciofalo M and Collins M W, "Predictive study of heat transfer to an incompressible fluid past a double symmetric flat duct expansion", Second United Kingdom National Heat Transfer Conference, pages 1057-1074, GLASGOW, SCOTLAND. 1988.
5. Ciofalo M and Collins M W, "Predictive study of heat transfer to an incompressible fluid past a downstream-facing step in turbulent flow", International Journal of Heat and Technology, Volume 6, pages 8-33, 1988.
6. Hawkins I R, Honecker A, Krus H, Shaw C T and Simcox S, "Numerical studies of vehicle aerodynamics", Proceedings of Fisita Conference, TURIN, ITALY, 1990. Also AERE CSS240.
7. Wilkes N S, Alderton J H and Macintosh L M, "A comparison of predictions with experimental data for a fire in a hospital ward. 1: Preliminary predictions", AERE-M3712, 1988.
8. Awoleski S T & Kokkalis A, "A Case Study on the Application of Measurements and Computer Simulation to the Ventilation and Airborne Contaminants Control Within a Workshop", Proc. BEPAC Conference, 1991.
9. Simcox S, Wilkes N S and Jones I P, "Fire at King's Cross Underground Station, 18 November 1987: Numerical simulation of the buoyant flow and heat transfer", Report No. AERE-G 4782, Harwell Laboratory, Harwell, UK, 1988.
10. Simcox S, Wilkes N S & Jones I P, "Computer Simulation of the Flows of Hot Gases from the Fire at King's Cross Underground Station", Fire Safety Journal, Vol.18, pp 49-73, 1992.
11. Hiley R A, "CFD Investigation of Wind Pressure on Buildings", AEA-InTec-0993, 1992.



12. McCaughey M and Fletcher D F, "Calculations of wind-induced pressure distribution on a model building", *Fire Safety Journal*, Vol 20, pages 189-205, 1993.
13. Ergin-Ozkan S, Mokhtarzadeh-Dehghan M R and Reynolds A J, "Two and three-dimensional finite volume predictions of flow in a stairwell and comparison with experiment", *International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, TOKYO, JAPAN, July 1992.
14. Sinai Y L, Owens M P, Askari A and Fry C J, "Field modelling of fire and smoke movement", *Proceedings Offshore Structural Design against Extreme Loads*, LONDON, UNITED KINGDOM, 3-4 November, 1993, ERA.
15. Johnson A E, Saunders C J & Fletcher B, "Measured and predicted flows in fume cupboards", *Staub-Reinhaltung der Luft*, Vol. 55, pp 417-422, 1995.
16. Sinai Y L and Owens M P, "Validation of CFD modelling of unconfined pool fires with cross-wind: Flame geometry", *Fire Safety Journal*, Vol. 24, pp 1-34, 1995. See also Sinai Y L and Owens M P, "CFD simulation of large-scale pool fires", *Second Seminar European Research in Industrial Fires*, CADARACHE, FRANCE, 16-19 May 1994, CEC, and Owens M P and Sinai Y L, "Comments on CFD modelling of pool fires", *Proceedings Tenth International Heat Transfer Conference*, SOUTHAMPTON, UNITED KINGDOM, 14-18 August 1994, IChemE.
17. Fry C J, "The Use of CFD for Modelling Pool Fires", presented at the 11th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 95), LAS VEGAS, USA, 1995.
18. Rhodes N, "CFD Prediction of Memorial Tunnel Fire Test No. 614", *Proc. Second International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, GRANADA, University of Dundee & ITC.
19. Biollay H, "Project Eureka 499: Simulations Numeriques de L'essai D'Heptane H32", *Journee de presentation de resultats de recherche a l'Arche de la defence*, Paris, January 1996.
20. Zhou X & Lea C J, "Applications of CFX for assessment of process hazards", *Proc. Third CFX International Users' Conference*, Latimer House, CHESHAM, UNITED KINGDOM, pp 199-224, October/November 1996.
21. Owczarek E, "Fires in tunnels: Study of the impact of various parameters on the critical ventilation speed (partial results)", *Proc. Third CFX International Users' Conference*, Latimer House, CHESHAM, UNITED KINGDOM, pp 225-244, October/November 1996.
22. Rhodes N, "Computer-aided analysis for fire safety in subways", *Proc. Third CFX International Users' Conference*, Latimer House, CHESHAM, UNITED KINGDOM, pp 191-198, October/November 1996.
23. Pritchard D K, Freeman D J & Guilbert P W, *Prediction of Explosion Pressures in Confined Spaces*, *J. Loss Prev. Process Ind.* Vol. 9 No. 3, pp 205-215, 1996.
24. Johnson A D, Ebbinghaus A, Imanari T, Lennon S P & Marie N, "Large-scale free and impinging turbulent jet flames - modelling and experiments", *Trans. IChemE*, Vol. 75, 1997.

25. Ungut A, Johnson A D, Phillips L & Berkel A I, "CFD calculation of combustion and radiation for a sonic syngas jet fire using a premixed flamelet turbulent combustion model", ICHMT International Symposium on Radiative Transfer, KUSADAI, TURKEY, 21-25 Jul 1997.
26. Lea C J, Owens M P & Jones I P, "Computational Fluid Dynamics Modelling of Fire on a One-Third Scale Model of a Channel Tunnel Heavy Goods Vehicle Shuttle", presented at 9<sup>th</sup> International Symposium Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels", 6-8 October 1997, AOSTA, ITALY.
27. Lea C J, Hambleton R T, Hawksworth S J, Sinai Y L and Owens M P, "Assessment of Gas Dispersion in CCGT Enclosures: Measurement and CFD Modelling Using the CFX Software", presented at "Prevention & Control of Gas Explosions in CCGT and Steam Plants", IMechE HQ, LONDON, UNITED KINGDOM, 8 October 1997.
28. Guilbert P W, Jones I P, Owens M P & Sinai Y L, "Advances in Hazard Analysis Using CFD", Proc. HAZARDS XIII Symposium, UMIST, MANCHESTER, UK, 22-24 April 1997, IChemE Symposium Series No. 141, IChemE.
29. Montavon C, "Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 74-76, pp 273-282, 1998.
30. Hagglund B, Werling P & Bengtson S, "An experimental study of the smoke spread in a two-plane compartment", Proc. "Third Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology", SINGAPORE, 10-12 June 1998.
31. Steel Construction Institute, Proceedings "Blast and Fire Engineering For Topside Structures, Phase 2", 18-19 February 1998, LONDON, UNITED KINGDOM, Section II p 26, SCI Publication Number 253, 1998. This deals with blind validation of CFX by AEA Technology and DNV for a compartment jet fire. See also FABIG Newsletter Issue No. 23, article R333 by A Huser, Y Sinai & R Wighus, pp 11-14, October 1998, for correspondence on this validation.
32. Wen J X, Huang L Y, Amin E M & Nolan P, "Modelling of sooting jet fires in a large-scale offshore compartment", Proc. 27<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, BOULDER, USA, 1998.
33. Wright N G & Easom G J, "Comparison of several computational turbulence models with full-scale measurements of flow around a building", Wind and Structures, Vol. 2, No. 4, pp 305-323, 1999.
34. Wright N G, Easom G J & Hoxey R, "Improved computational models for wind engineering", Proc. Tenth International Conference on Wind Engineering, Ed. A Larsen et al, COPENHAGEN, DENMARK, 21-24 June 1999, pp 1359-1365, A A Balkema, 1999.
35. Miles S, "A study of the operation of a novel naturally ventilated building using computational fluid dynamics", Proc. CIBSE National Conference, pp 338-345, CIBSE, 1999.

36. Jia F, Galea E R & Patel M K, "The numerical simulation of enclosure fires using a CFD field model coupled with a pyrolysis based solid fuel combustion submodel - a first approximation", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 9 No. 4, pp 1-17, 1999.
37. Jia F, Galea E R & Patel M K, "The numerical simulation of fire spread within a compartment using an integrated gas and solid phase combustion model", *Journal of Applied Fire Science*, Vol. 8 No. 4, pp 327-352, 1999.
38. Huang L Y & Wen J X, "Field modelling of large-scale compartment jet fires by constrained equilibrium method", *Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Fire Safety Science*, POITIERS, FRANCE, July 1999.
39. Sinai Y L, "Comments on the role of leakages in field modelling of under-ventilated compartment fires", *Fire Safety Journal*, Vol 33, pp 11-20, 1999.
40. Ribot B, Chasse P, Gay B & Rhodes N, "Numerical simulation of smoke extraction by roof vents in a tunnel: Comparison with experimental tests – analysis of physical phenomena", *Proc. International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, Lyon, France, 5-7 May 1999, pp 169-179, ITC, 1999.
41. Ingason H, Haggglund B & Werling P, "Effects of ventilation on smoke spread in tunnels", *Proc. International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, LYON, FRANCE, 5-7 May 1999, pp 407-416, ITC, 1999.
42. Haggglund B, Walmerdahl P, Delin M & Lundquist M, "Applied engineering calculations of smoke spread by zone- and CFD-models", FOA-R-00-01409-311-SE, January 2000, FOA, (in Swedish).
43. Klein R & Rehm W, "Models and Criteria for Prediction of Deflagration-to-Detonation Transition in Hydrogen-Air-Steam Systems under Severe Accident Conditions, Energy Technology Volume 9, Schriften des Forschungszentrums Julich, 2000.
44. Santon R C, Lea C J, Lewis M J, Pritchard D K, Thyer A M & Sinai Y L, "Studies into the role of ventilation and the consequences of leaks in gas turbine power plant acoustic enclosures and turbine halls", *Trans. IChemE*, Vol. 78, Part B, pp 175-182, May 2000. Also *Proc. HAZARDS XV*, UMIST, MANCHESTER, UK, 4-6 April 2000, IChemE.
45. Ammerman C N, Bernardin J D, Gregory W S, Hopkins S M & Zygmunt S P, "Thermal analysis of the thermally cooled vault within the Los Alamos nuclear materials storage facility", *Proc. ASME FEDSM'00*, ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 11-15 June 2000, Boston, Massachusetts, USA.
46. Rota R, Canossa L & Nano G, "Analysis of Air Draught Influence on the Local Ventilation Efficiency Through CFD Modelling", *Proc. Ventilation 2000*, 4-7 June 2000, Helsinki, pp 77-79, 2000, Finnish Institute of Occupational Health.
47. Sinai Y L, "Exploratory CFD modelling of pool fire instabilities without cross-wind", *Fire Safety Journal*, Vol. 35 No. 1, pp 51-61, July 2000.



48. Koskela H, "CFD Modelling of Active Displacement Air Distribution", ROOMVENT 2000, Proc. Seventh International Conference on Air Distribution in Rooms, READING, UK, 9-12 July 2000, Vol. 1, pp 577-582, Elsevier, 2000.
49. Nilsson H, Holmer I, Holmberg S & Sandberg M, "Thermal Climate Assessment in Office Environment – CFD Calculations and Thermal Manikin Measurements", ROOMVENT 2000, Proc. Seventh International Conference on Air Distribution in Rooms, READING, UK, 9-12 July 2000, Vol. 1, pp 107-112, Elsevier, 2000.
50. Hyun S & Kleinstreuer C, "Computational Exposure and Dose Assessment Analyses for Transient Turbulent Flow and Gaseous Pollutant Transport", ROOMVENT 2000, Proc. Seventh International Conference on Air Distribution in Rooms, READING, UK, 9-12 July 2000, Vol. 1, pp 119-124, Elsevier, 2000.
51. Ungut A, Bradley D, Gaskell P H & Gu X J, "Flamelet Simulation of a Large Propane Jet Fire and its Radiative Emission", presented Third International Symposium on Fire & Explosion Hazards, WINDERMERE, UK, 10-14 April 2000, University Central Lancashire, UK.
52. Koskela H, "Modelling of Active Displacement Air Distribution in Heating and Cooling Conditions – A Case Study", Proc. Sixth International Symposium on Ventilation and Contaminant Control, HELSINKI, FINLAND, November 2000, Vol. 1, pp 35-38, Finnish Institute of Occupational Health, 2000.
53. Sinai Y L, Stopford P J, Edwards M & Watkins S, "CFD Modelling of Fire Suppression by Water Spray: A Feasibility Study Examining a Pool Fire in a Simple Enclosure". Proc. Interflam 2001, 17-19 September 2001, Edinburgh, Vol. 2, pp 1445-1451, Interscience, 2001.
54. Saunders J, Ivings M, Johnson A, Fletcher B, Lea C & Connolly S, "A study of the natural ventilation of offshore modules using CFD modelling and on-site measurements", Paper 4.3, Proc. Major Hazards Offshore, London, 27-28 November 2001, ERA.
55. Koskela H & Heikkinen J, "Calculation of Thermal Comfort from CFD-Simulation Results", INDOOR AIR 2002, Proc. Ninth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, MONTEREY, USA, 2002.
56. Cook M J, Ji Y & Hunt G R, "CFD Modelling of Natural Ventilation: Combined Wind and Buoyancy Forces", Int. Journal of Ventilation, Vol. 1 No. 3, pp 169-180, 2003.
57. Sinai Y L, "Field Modelling of a Steckler Experiment: An Example of the Relationship Between the Level of Modelling and Accuracy", presented Fourth International Seminar on Fire & Explosion Hazards, Londonderry, UK, 8-12 September 2003, University of Belfast, 2003.
58. Sklavounos S & Rigas F, "Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles", Journal of Hazardous Materials, A108, pp 9-20, 2004.
59. Horvat, A., Sinai, Y., "Validation of CFD Predictions of a Forced Convection Jet and Buoyant Plume", Proc. 8th UK National Heat Transfer Conference in Oxford, UK, 2004.

60. Liu, Y., Moser, A. and Sinai, Y., "Comparison of a CFD Fire Model Against a Ventilated Fire Experiment in an Enclosure", International Journal of Ventilation, Vol. 3 No. 2, pp 169-182, 2004.
61. Gobeau N, Kelsey A, Saunders J & Sinai Y, "Thermal effects on the dispersion of a gaseous contaminant in a naturally-ventilated building", Proc. ROOMVENT 2004, Coimbra, Portugal, 5-8 September 2004.
62. Sinai Y L, Sykes N, Everitt P, Danielsson N, "Validation of a CFD model for several displacement ventilation geometries", Proc. ROOMVENT 2004, Coimbra, Portugal, 5-8 September 2004.
63. Ledin H S, Allen J T, Ivings M J & Bettis R J, "Evaluation of CFD modelling of smoke movement in complex spaces – Production of small-scale experimental data and assessment of CFD", CM/01/18, Health & Safety Laboratory, UK, 2002.
64. Dahlsveen J & Johnsen R, "LNG accident consequence modelling – a comparison study between simple models and CFD", Proc. Major Hazards Offshore & Onshore", London 2004, ERA Report 2004-0610, ERA, 2004.
65. Galgano A., Di Blasi C., Horvat A. & Sinai Y., "Experimental Validation of a Coupled Solid- and Gas-Phase Model for Combustion and Gasification of Wood Logs", Energy & Fuel, Vol. 20, No. 5, pp 2223-2232, 2006.
66. Deevey M. & Gobeau N., "CFD Modelling of Benchmark Test Cases for Flow Around a Computer Simulated Person", Health & Safety Laboratory Report CM/06/06, May 2006.
67. Horvat A. & Sinai Y.L., "Numerical simulation of backdraft phenomena", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp 200-209, 2007.
68. Sinai Y., Staples C., Edwards M. & Smerdon M., "CFD modelling of fire suppression by water mist", Proc. Interflam 2007, Vol. 1, pp 323-333, Interscience Communications, 2007.
69. Deevey M., Sinai Y., Everitt P., Voigt L. & Gobeau N., "Modelling the effect of an occupant on displacement ventilation with computational fluid dynamics", Energy and Buildings, Vol. 40, pp 255-264, 2008.
70. Horvat A., Sinai Y., Gojkovic D. & Karlsson B., "Numerical and Experimental Investigation of Backdraft", Combustion Science and Technology, Vol. 180, Issue 1, pp 45-63, 2008.
71. Horvat A., Sinai Y. and Tofilo P., "Semi-Analytical Treatment of Wall Heat Transfer Coupled to a Numerical Simulation Model of Fire", Numerical Heat Transfer, Part A, Volume 55 Issue 6, pp 517 – 533, 2009.