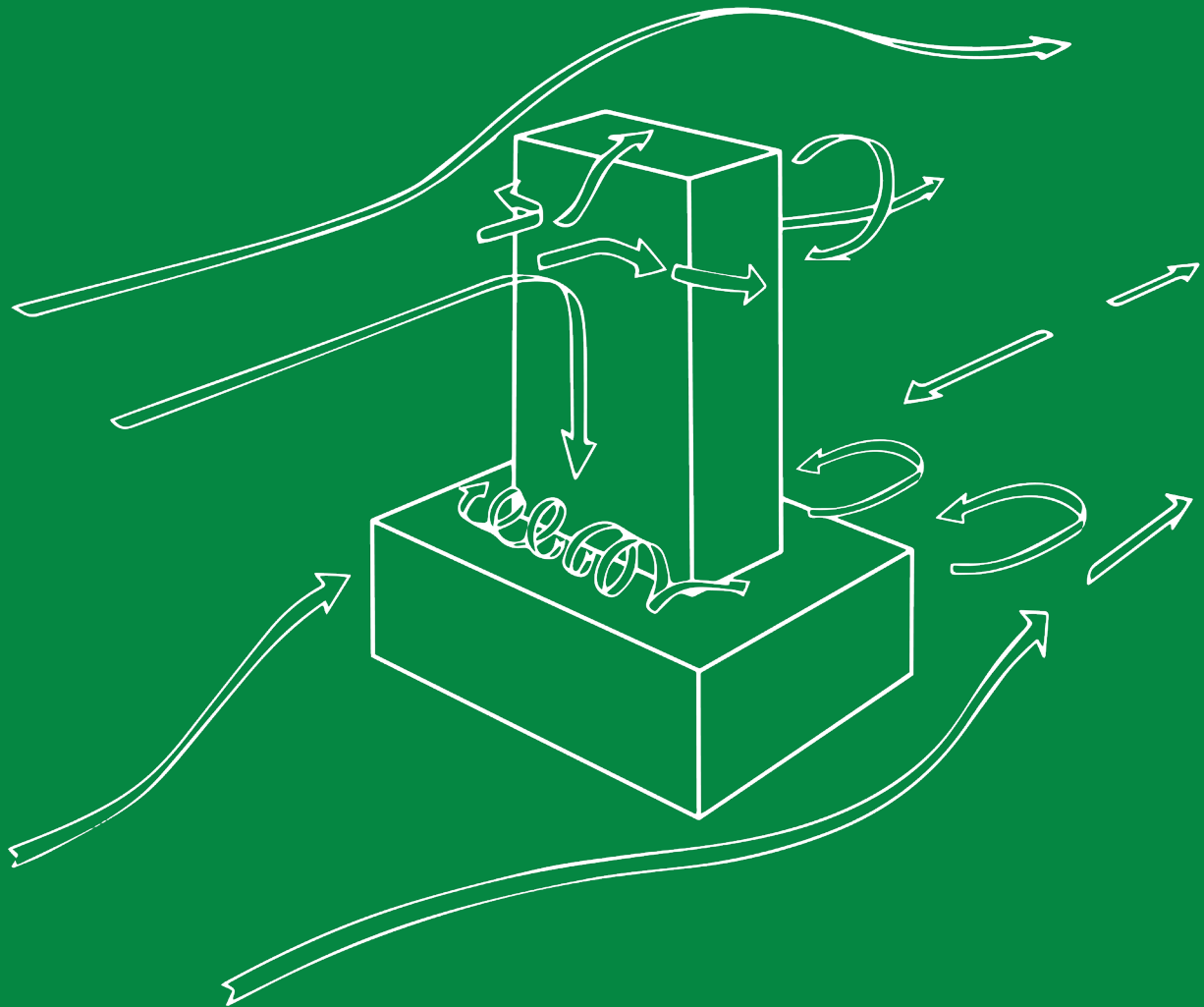


# Handleiding Windhinder & Windgevaar.



versie april 2023



Gemeente  
Rotterdam

## Colofon

Door Simone Tax en Emiel Arends

Afdeling Ruimte, Wonen & Milieu, Stadsontwikkeling, Gemeente Rotterdam

Versie april 2023

## Inhoud

	Samenvatting	03
	Inleiding	04
1.	Hoe werkt wind?	06
2.	In welke gevallen doe je windonderzoek?	10
3.	Hoe, wanneer en wat meet je met een windonderzoek?	11
4.	Kies je voor de windtunnel of voor CFD?	14
5.	Hoe interpreteer en vergelijk je windstudies?	17
6.	Hoe los je windproblemen op?	22
	Bronnen & bijlagen	28

# Samenvatting.



## Basiszaken:

- Ontwerpen met wind biedt kansen
- Wind is ingewikkeld
- Wind volgt niet je intuïtie
- Windbeleid in Nederland: NEN 8100
- Windbeleid in Rotterdam: hoogbouwvisie addendum 2022, windkwaliteitsklassenkaart (WKKK), NvU, bestemmingsplan, anterieure overeenkomst

## 1. Hoe werkt wind?

Het volume bepaalt 90%

Van alle ontwerpaspecten (vorm, gevel, reliëf, materiaal, vegetatie et cetera) heeft de vorm van een gebouw veruit de grootste invloed op het windklimaat.

Grootste problemen voor voetgangers

- Valwinden (> Onvoorspelbare wervels)
- Hoekstromen
- Kortsluiting door luchtdrukverschil

Wind in Rotterdam

- Optimaliseer gebouwen op basis van de dominante zuidwestelijke windrichting
- Hoge gebouwen vangen meer wind dan lage gebouwen

## 2. In welke gevallen doe je windonderzoek?

- Vanaf 70 m hoog: ja (verplicht in Rotterdam)
- Meer dan 2x zo hoog als bebouwing omgeving: ja (verstandig)
- Onbeschut gelegen op het Zuid-Westen: ja (verstandig)
- Hoger dan 30 m en hoge verblijfskwaliteit gewenst: ja (verstandig)

## 3. Hoe, wanneer en wat meet je met een windonderzoek?

Hoe

- Volgens de NEN 8100 methodes
- Windhinder en windgevaar allebei meten en op aparte kaarten tonen
- Kaartlegenda's volgen de voorschriften van de gemeente
- Te meten basisvarianten: nulmeting huidige situatie (altijd), huidige situatie + bouwplan (altijd), toekomstige situatie + bouwplan (indien relevant)

Wanneer

- Oriënterende windonderzoeken aan de voorkant van een gebiedsontwikkeling (testen van volumestudies/ masterplannen)

- Vóór het vaststellen van het VO van een gebouw testen en bijsturen (op vorm en hoogte)
- Laatste check op basis van het DO

Wat

- Windgevaar is nooit toegestaan
- Windhinderambities worden weergegeven op een windkwaliteitsklassenkaart (WKKK), die gebruikt wordt als afwegingskader

## 4. Kies je voor de windtunnel of voor CFD?

- Als je veel verschillende varianten wil meten (wat in een ontwerpproces handig is), is de windtunnel vaak de beste optie
- Als je maar één of enkele snelle check(s) wilt doen, is CFD vaak de beste optie
- Andere methodes dan de windtunnel en CFD zijn niet betrouwbaar genoeg
- Een bedrijf met specifieke expertise is noodzakelijk

## 5. Hoe interpreteer en vergelijk je windstudies?

- Check eerst een aantal basiszaken, zoals omgeving en vegetatie
- Gebruik (Rotterdamse) voorbeelden en vuistregels om in te schatten welke windkwaliteit je acceptabel vindt op welke plek
- Als de ambities niet gehaald kunnen worden (ondanks veel moeite), maakt de gemeente een integrale afweging met (in ieder geval) stedenbouw en landschap

## 6. Hoe los je windproblemen op?

Dit werkt wel:

- Oriënteer gebouwen slim ten opzichte van de dominante windrichting (Zuid-West)
- Laat gebouwen elkaar beschutting bieden
- Integreer set-backs of luifels om valwinden op te vangen
- Geef torens een aerodynamische vorm (afronden o.i.d.)
- Pas functies in de openbare ruimte aan aan het windklimaat (als dat kan)
- Windschermen of atria in de openbare ruimte kunnen helpen, maar zijn vaak esthetisch en/of functioneel ongewenst

Dit werkt niet/ willen we niet:

- Vegetatie is geen betrouwbare oplossing voor windproblemen die door gebouwen veroorzaakt worden
- Subtiële aanpassingen zoals materiaal en reliëf in de gevel zijn nauwelijks tot niet effectief

# Inleiding.



Iedereen die wel eens in Rotterdam is geweest, weet het: in deze stad waait het veel en hard. Maar hoe komt dat nou eigenlijk? En wat kunnen we hier als ontwerpers aan doen? Omdat het vakgebied 'gebouwaerodynamica' relatief jong is, hebben veel ontwerpers maar weinig kennis van het onderwerp wind in de stad. Deze kennis wordt echter steeds belangrijker, omdat Rotterdam ervoor heeft gekozen om te verdichten in de bestaande stad. Het toevoegen van hoogbouw is daarbij een van de oplossingen. Maar hoe hoger je bouwt, hoe groter de kans op windproblemen...

Deze handleiding behandelt en beantwoordt de zes meest gestelde vragen over wind in Rotterdam. Dit is geen vastgesteld document, maar een hulpmiddel. De handleiding is bedoeld voor ontwerpers, projectmanagers, ontwikkelaars en andere geïnteresseerden die aan onze stad werken. Het is een intern document, maar het mag gedeeld worden met externen. Graag zelfs, want hoe meer mensen deze basiskennis bezitten, hoe makkelijker we met elkaar kunnen communiceren en samenwerken aan een comfortabele stad!

## Wind als kans

Voor dat we beginnen is het belangrijk dat er een paar basiszaken duidelijk zijn. Ten eerste: wind kan zowel positief als negatief zijn. Een briesje is welkom tijdens een hete zomerdag, terwijl wind vervelend of zelfs gevaarlijk kan zijn in andere situaties. Een fijn briesje heeft een windsnelheid van ongeveer 2 m/s, maar windhinder begint pas bij 5 m/s en windgevaar bij 15 m/s. Het is zeker interessant om te ontwerpen voor stedelijke ventilatie, maar windhinder en zeker windgevaar wil je dus eigenlijk altijd voorkomen. Deze handleiding gaat over het voorkomen/beperken van windhinder en windgevaar.

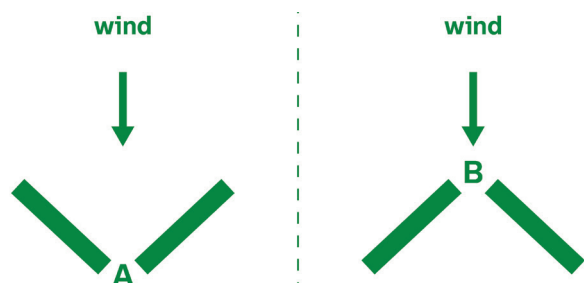
Dit levert niet alleen belemmeringen, maar ook kansen op. Het ontwerpen met wind is bijvoorbeeld een kans voor het creëren van een gevarieerde volume-opbouw en interessante architectuur. En het aller belangrijkste: het levert comfortabele, leefbare en veilige steden op. Dat willen we natuurlijk allemaal!

## Wind is ingewikkeld

Ten tweede: wind is ingewikkeld. Bezonningsstudies zijn voorspelbaar en kunnen we uitvoeren met simpele Sketch-upmodellen. Geluidsimulaties zijn iets ingewikkelder, maar er bestaan formules waarmee ingenieurs geluid vrij precies kunnen berekenen. Bij wind zit dit anders. De formules waarmee je windstromen kan berekenen, zijn wiskundig nog niet opgelost. Dit is één van de grootste wiskundige problemen ter wereld. Hierdoor is er heel veel specifieke expertise nodig om windstudies op een betrouwbare manier uit te voeren. Niet elke ingenieur kan dit, hier heb je echte windexperts voor nodig.

## Wind volgt niet je intuïtie

Ten derde: wind volgt niet je intuïtie. Kijkend naar het plaatje hieronder, verwachten de meeste mensen dat het in passage A harder waait dan in passage B, maar niets is minder waar. Je verwacht misschien dat wind hetzelfde beweegt als water. Maar omdat wind veel lichter is, beweegt het makkelijker omhoog. In het geval van passage A ontstaat er zo veel overdruk voor de gebouwen, dat de meeste wind over de gebouwen



stroomt in plaats van door de passage. Windstromen zijn vaak contra-intuïtief, waardoor het mis kan gaan wanneer je naar je 'boerenverstand' luistert. En het kan goed misgaan... Er bestaan er helaas voorbeelden van ernstige en zelfs dodelijke ongelukken door wind.

## Windbeleid in Nederland

Het vakgebied gebouwaerodynamica is pas iets meer dan 50 jaar oud. Vanaf de jaren '70 wordt er wereldwijd geëxperimenteerd met windtunnels en computersimulaties. Er is sindsdien veel kennis bijgekomen en nog steeds zijn er elk jaar weer nieuwe inzichten. Dat het vak nog niet zo oud is, is te merken aan het feit dat het nog niet goed ingebed is in het Nederlandse onderwijs en (mede daardoor) ook niet in de Nederlandse ruimtelijke praktijk.

In 2006 was Nederland echter wel het eerste land ter wereld met een norm voor het toetsen van het windklimaat bij het ontwerpen van gebouwen: de NEN 8100 'Windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving'. Deze norm beschrijft hoe windstudies moeten worden uitgevoerd. Wanneer de NEN 8100 gevolgd wordt, zijn de windstudies betrouwbaar en vergelijkbaar. Een kanttekening: de NEN 8100 is niet meer geüpdated na 2006, maar er zijn na die tijd wel nieuwe inzichten gekomen over bepaalde – voornamelijk technische – zaken. Het is dus van belang dat windexperts continu bijleren op basis van nieuwe inzichten. Onder Nederlandse windexperts wordt er gesproken over een mogelijke update van deze norm. Dit zal echter nog wel een aantal jaren duren.

## Windbeleid in Rotterdam

Rotterdam is als hoogbouwstad pionier in het maken van windbeleid. Terwijl de NEN 8100 beschrijft hoe windstudies moeten worden uitgevoerd, hebben we in het addendum op de Hoogbouwvisie Rotterdam (gemaakt in 2022) vastgelegd wanneer je windstudies doet en wat je moet meten. In dit addendum wordt verwezen naar de windkwaliteitsklassenkaart (WKKK), die aangeeft wat de ambities zijn van de gemeente op het gebied van windklimaat in de stad. De gemeente is verplicht een WKKK te maken voor gebieden waar hoogbouw plaatsvindt. De hoogbouwvisie wordt vastgesteld door de raad; de WKKK's worden vastgesteld door het college van B&W.

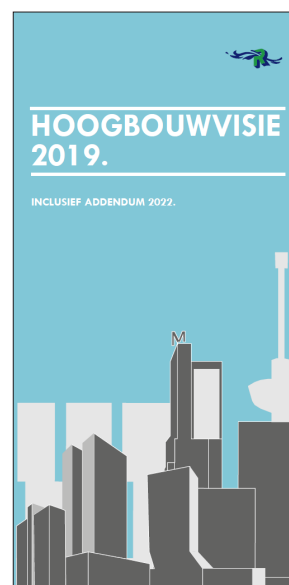
Naast het bovenstaande komt het onderwerp wind terug in Nota's van Uitgangspunten (NvU's), bestemmingsplannen, anterieure overeenkomsten, de Handleiding Hoogbouw en is het vertegenwoordigd in het Hoogbouwteam, waar je met plannen langs kan komen voor advies.

### Basiszaken:

- Ontwerpen met wind biedt kansen
- Wind is ingewikkeld
- Wind volgt niet je intuïtie
- Windbeleid in Nederland: NEN 8100
- Windbeleid in Rotterdam: hoogbouwvisie addendum 2022, windkwaliteitsklassenkaart (WKKK), NvU, bestemmingsplan, anterieure overeenkomst



NEN 8100



Hoogbouwvisie Rotterdam 2019; De lichtblauwe versie is inclusief het addendum wind en zon uit 2022

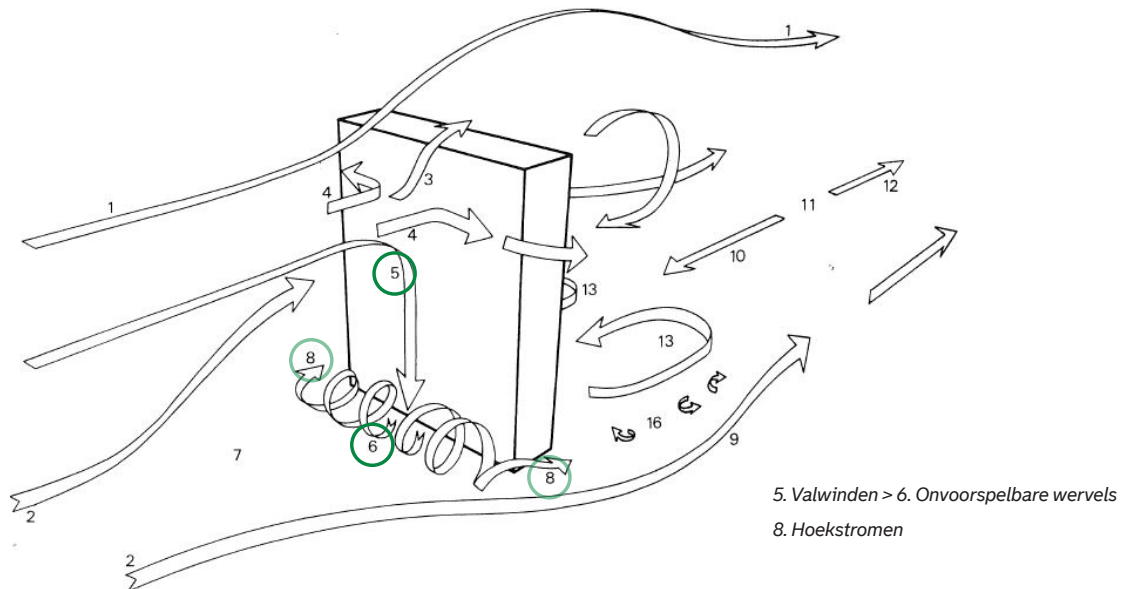
# 1. Hoe werkt wind?



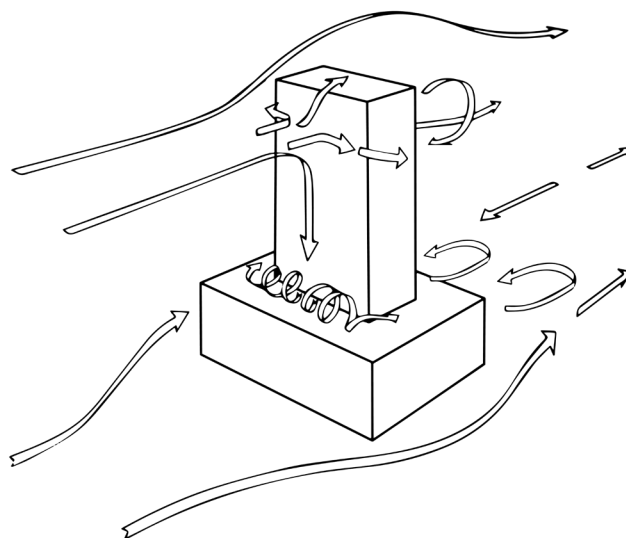
Er bestaat veel theorie over het onderwerp wind in de stad. Ontwerpers hoeven niet alles te weten, maar het is wel belangrijk dat ze de basisprincipes begrijpen, zodat ze mogelijke problemen kunnen herkennen en oplossen. In dit hoofdstuk staat de kern van het verhaal met Rotterdamse voorbeelden. In bijlage 3 staan de basisprincipes uitgebreider uitgelegd.

## Het volume bepaalt 90%

Van alle ontwerpaspecten (vorm, gevel, reliëf, materiaal, vegetatie et cetera) heeft de vorm van een gebouw veruit de grootste invloed op het windklimaat. Als de vorm niet goed is ontworpen op wind, is het heel moeilijk (of zelfs onmogelijk) om de problemen op te lossen met andere maatregelen. Het is daarom van groot belang om gebouwen en plannen op wind te testen en optimaliseren vóórdat de gebouwvormen vaststaan.



Windstromen rondom een vrijstaand gebouw; basisafbeelding die nog steeds veel gebruikt wordt (Beranek, 1984)



Tekening van Beranek vertaald naar de Rotterdamse situatie van een toren op onderbouw, een 'groundscraper' zoals voorgeschreven in de Hoogbouwvisie 2019

## De drie grootste problemen voor voetgangers

In de afbeelding op de vorige pagina zie je de windstromen rondom een vrijstaand gebouw, getekend door Beranek in 1984. Elke gebouwvorm levert andere windstromen op, maar in de basis zijn die altijd terug te leiden naar de stromen zoals hier getekend. De drie grootste problemen voor voetgangers zijn valwinden, hoekstromen en kortsluiting door luchtdrukverschil.

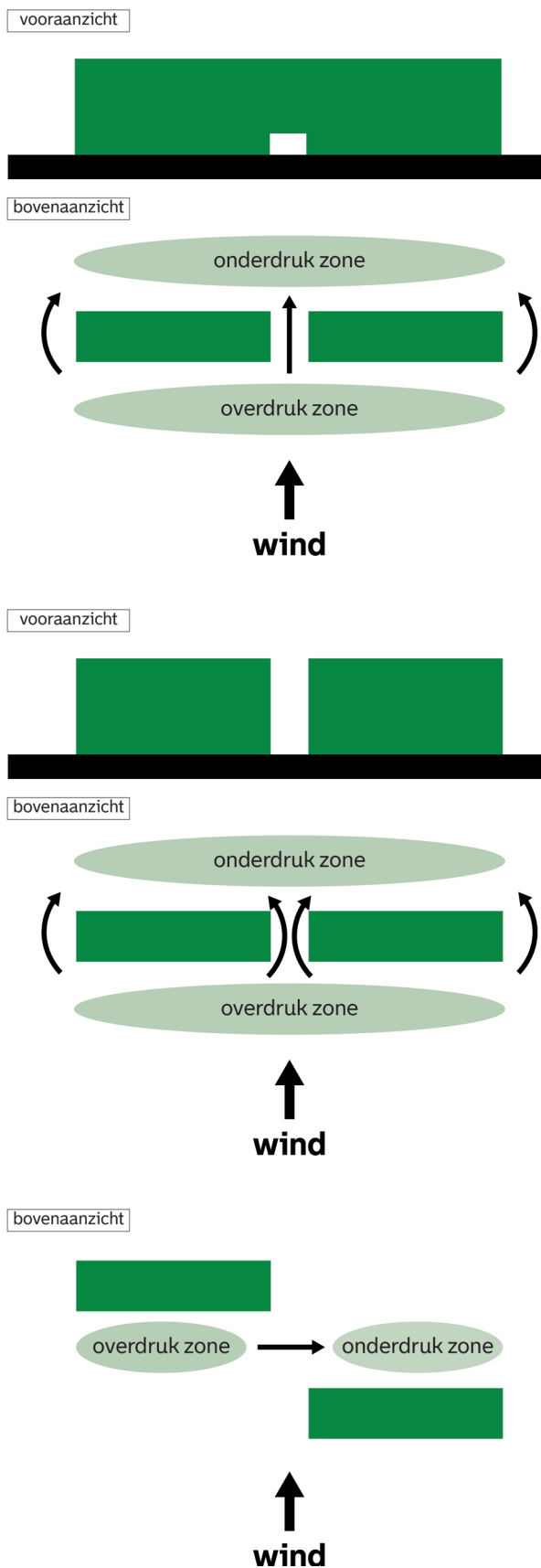
Als de wind tegen een gebouw aankomt gaat een deel van de wind over het gebouw heen, een deel gaat erlangs en een deel gaat naar beneden. Dat laatste noem je 'valwinden' (5 in Beraneks plaatje). Deze valwinden creëren onvoorspelbare wervelwinden voor het gebouw (6). Vervolgens vouwen deze wervels zich om de hoeken van het gebouw, wat resulteert in 'hoekstromen' (8). Deze wervels en hoekstromen kunnen hinderlijk of gevaarlijk zijn voor voetgangers en fietsers. Het derde probleem is kortsluiting door luchtdrukverschil. Dit komt bijvoorbeeld voor bij passages in of openingen tussen gebouwen. Als de wind tegen een gebouw met een passage aankomt, ontstaat er een lucht overdruk aan de ene kant van het gebouw en een lucht onderdruk aan de andere kant. Om dit luchtdrukverschil op te heffen, gaat er dan een harde wind waaien door de passage of opening.

## Wind in Rotterdam

In Rotterdam (en de rest van Nederland) is het zuidwesten de dominante windrichting. Dit betekent dat de wind het vaakst vanuit zuidwestelijke richting komt aanwaaien. Daarnaast is de zuidwestelijke wind gemiddeld ook het hardst. Dit is allemaal te zien in de windroos (zie afbeelding op pagina 8). Het is daarom vooral belangrijk om het gebouw voor wind te optimaliseren op basis van deze windrichting.

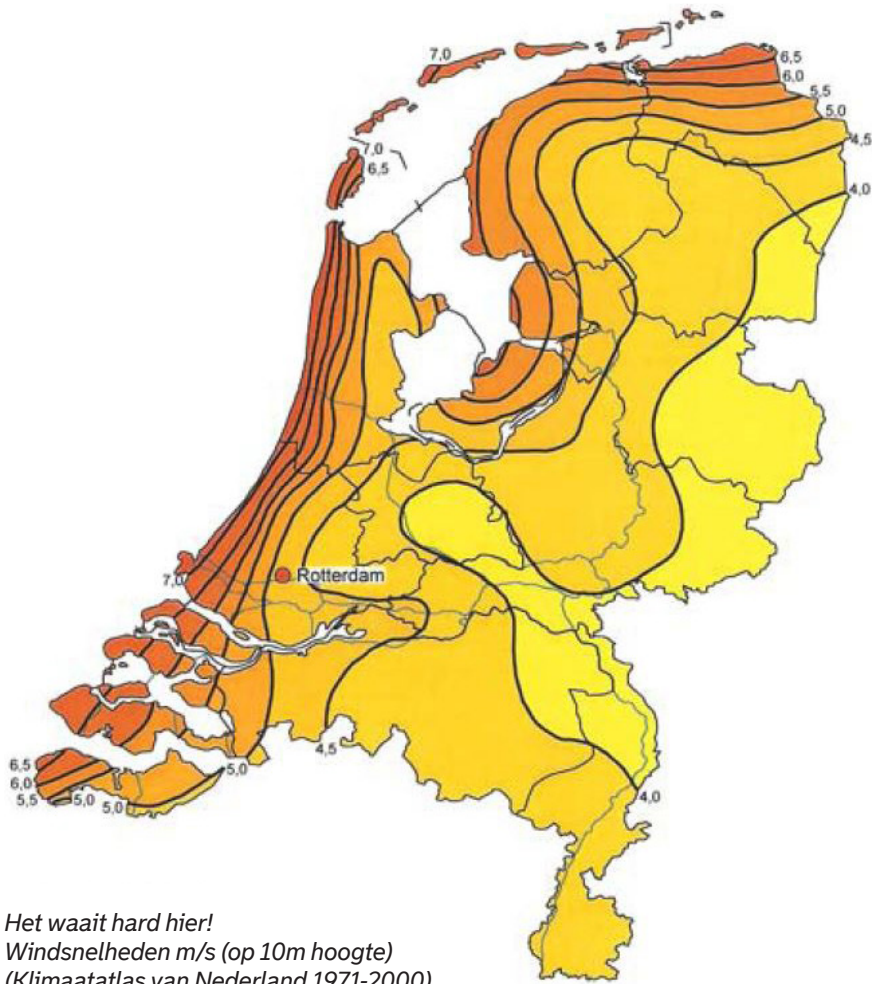
Daarnaast is het handig om te weten dat het in Rotterdam sowieso al behoorlijk hard waait. Door de ligging dicht bij de kust en het vele open land en water ten zuidwesten van Rotterdam, waait het hier gemiddeld bijna twee keer zo hard als in oostelijke steden, zoals Nijmegen, waar het Nederlandse landschap de wind al heeft afgeremd.

En dan hebben we in Rotterdam ook nog veel hoogbouw. Het spreekwoord is echt waar, hoge bomen vangen veel wind. In principe geldt dat hoe hoger je komt, hoe harder het waait. Dit komt doordat de wind dicht bij de grond afgeremd wordt door obstakels die het tegenkomt, bijvoorbeeld door gebouwen, vegetatie of heuvels. Een hoog gebouw vangt daarom meer én hardere wind dan een laag gebouw. Hierdoor zijn de

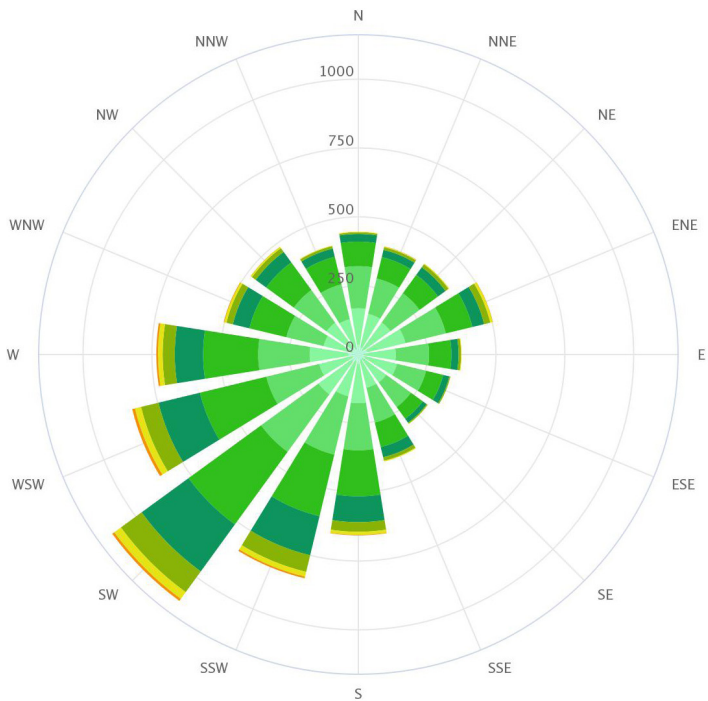


Kortsluiting door luchtdrukverschil in passages





Het waait hard hier!  
 Windsnelheden m/s (op 10m hoogte)  
 (Klimaatatlas van Nederland 1971-2000)



De meeste en hardste wind uit het zuidwesten  
 Windroos  
 (Meteoblue)



eerder genoemde valwinden, wervels en hoekstromen doorgaans een stuk groter bij hoge gebouwen.

In Rotterdam hebben we al veel bestaande voorbeelden van situaties waarin windproblematiek duidelijk voelbaar is. Bij de Maastoren voel je de valwinden, wervels en hoekstromen bijvoorbeeld duidelijk, ondanks dat er na de oplevering een grote luifel is toegevoegd aan dit gebouw. En in de Veemstraat waait het eigenlijk altijd door de kortsluiting door luchtdrukverschil. De Maastoren en Veemstraat zijn allebei geïntendeerd op de dominante zuidwestelijke windrichting. Wandelend over het Kruisplein en Stationsplein ervaar je een combinatie van valwinden, wervels en hoekstromen van verschillende gebouwen achter elkaar. Daarnaast fungeert de straat (geïntendeerd op het zuiden) als een soort kanaal, waar de wind doorheen geperst en versneld wordt. Dit effect heet 'kanalisatie'.

### Hoe werkt wind?

#### Het volume bepaalt 90%

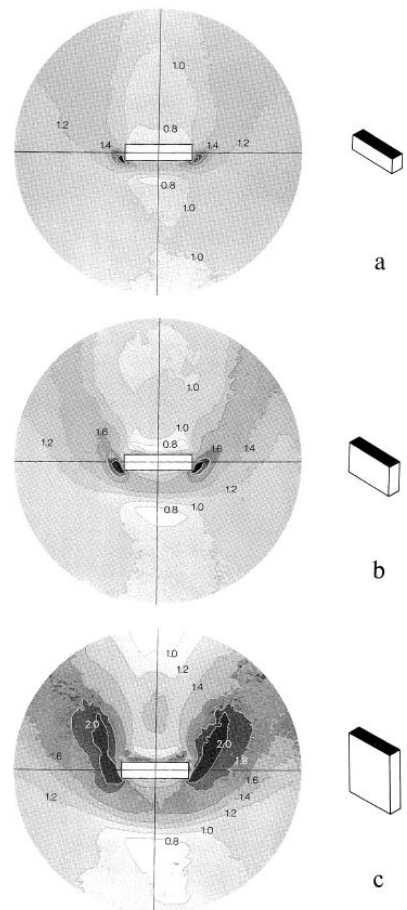
Van alle ontwerpaspecten (vorm, gevel, reliëf, materiaal, vegetatie et cetera) heeft de vorm van een gebouw veruit de grootste invloed op het windklimaat.

#### Grootste problemen voor voetgangers

- Valwinden (> Onvoorspelbare wervels)
- Hoekstromen
- Kortsluiting door luchtdrukverschil

#### Wind in Rotterdam

- Optimaliseer gebouwen op basis van de dominante zuidwestelijke windrichting
- Hoge gebouwen vangen meer wind dan lage gebouwen

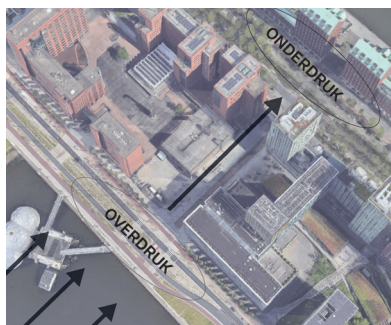


*Hoge bomen (en gebouwen) vangen veel wind; plattegronden van windstudies met bijbehorende gebouwvolumes (Beranek, 1984)*



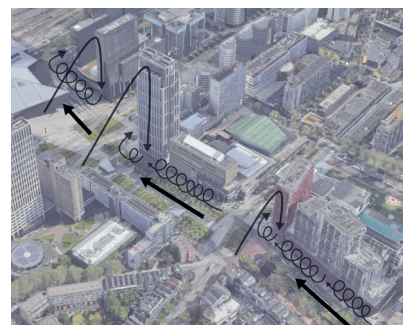
#### De Maastoren

- Valwinden
- Hoekstromen



#### De Veemstraat

- Kortsluiting door luchtdrukverschil



#### Stationsplein en Kruisplein

- Valwinden
- Hoekstromen
- Kanalisatie

# 2. In welke gevallen doe je windonderzoek?



De NEN8100 geeft handvatten om te beoordelen of windhinder en windgevaar onderzocht moeten worden op een locatie. Dit zijn geen wettelijke eisen, maar adviezen. Daarnaast zijn er uit de theorie vergelijkbare adviezen te halen. In Rotterdam hebben we deze adviezen vertaald in een aantal verplichtingen en vuistregels. In dit hoofdstuk wordt gesproken over gebouwen, maar daarmee kan ook een bouwgroep bedoeld worden.

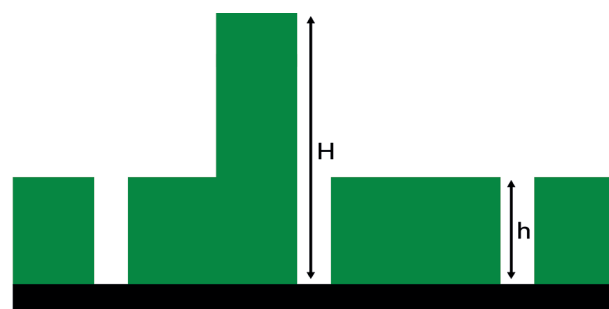
In het geval van hoogbouw zijn windonderzoeken altijd verplicht in Rotterdam. Dit wordt namelijk geëist in de Hoogbouwvisie 2019 (met het addendum uit 2022). Hoogbouw wordt gedefinieerd als een gebouw waarvan de hoogste verdiepingvloer op 70 m of hoger ligt.

Bij gebouwen die lager zijn dan deze grens, moet per project (door of in samenspraak met de gemeente) gekeken worden of er een windstudie gedaan moet worden of niet. De belangrijkste parameters om te bepalen of dit zo is, zijn de hoogte van het gebouw en de mate van beschutting van de locatie. De mate van beschutting hangt af van de omgeving. Als een gebouw aan het open water of aan een park ligt, is het bijvoorbeeld minder beschermd dan als het in een stedelijk weefsel van vergelijkbare hoogte staat. Een vuistregel die we hanteren is dat er een windstudie verstandig is als een gebouw onbeschermd ligt ten opzichte van de dominante windrichting in Nederland: Zuid-West. Dit is bijvoorbeeld het geval als er een groot open water of park aan de zuidwestelijke zijde van het gebouw ligt.

Daarnaast hanteren we ook een andere vuistregel uit de theorie: het is verstandig om een windstudie te doen als het gebouw meer dan twee keer zo hoog is als de gemiddelde hoogte van de gebouwen in de omgeving. Deze gemiddelde hoogte wordt in Rotterdam de 'Rotterdamse laag' genoemd en verschilt per wijk. De stedenbouwkundigen van de gemeente stellen vast wat de hoogte van de Rotterdamse laag is in een gebied.

Het is ook van belang om na te gaan welke kwaliteit er gewenst is in de aangrenzende openbare ruimtes. In een gebied waar maar weinig verblijfsactiviteiten plaatsvinden, is een goed windklimaat bijvoorbeeld minder belangrijk dan in een gebied met terrassen en speeltuinen. Bij een hoge gewenste verblijfskwaliteit kan het verstandig zijn om bij gebouwen vanaf 30 m windstudies te doen, zelfs als de eerdergenoemde vuistregels niet gelden.

In geval van twijfel is het aan te raden om een deskundige (van de gemeente of extern) om hulp te vragen. Mocht de uitkomst zijn dat er een windonderzoek nodig is, dan is het verstandig om dit als wens/eis op te nemen, bijvoorbeeld in een NvU en/of anterieure overeenkomst. Daarnaast is het onderwerp wind onderdeel van de goede ruimtelijke onderbouwing van het bestemmingsplan.



*Een windstudie is verstandig als het gebouw meer dan twee keer zo hoog is als de gemiddelde hoogte van de gebouwen in de omgeving;  $H > 2h$*

## In welke gevallen doe je windonderzoek?

- Vanaf 70 m hoog: ja (verplicht in Rotterdam)
- Meer dan 2x zo hoog als bebouwing omgeving: ja (verstandig)
- Onbeschermd gelegen op het Zuid-Westen: ja (verstandig)
- Hoger dan 30 m en hoge verblijfskwaliteit gewenst: ja (verstandig)

# 3. Hoe, wanneer en wat meet je met een windonderzoek?



De hoogbouwvisie beschrijft wanneer windonderzoeken gedaan moeten worden, hoe deze uitgevoerd moeten worden en wat we als stad wel en niet toestaan en/of ambiëren. Hoewel dit formeel alleen geldt voor hoogbouw, zijn dezelfde principes toepasbaar op gebouwen lager dan 70 m. Een samenvatting (met hier en daar een aanvulling):

## Hoe?

Windonderzoek moet altijd uitgevoerd worden volgens de methodes beschreven in de NEN 8100. Andere (snellere/ goedkopere) methodes zijn niet betrouwbaar genoeg en daarom niet bruikbaar om tot goede inzichten en/of afwegingen te komen. De NEN 8100 geeft twee opties: windtunnelonderzoek en CFD-onderzoek (computersimulaties). Beide methodes zijn in principe goed, maar het verschilt per vraagstuk welke van de twee geschikter is (zie hoofdstuk 4). Bij twijfel is het aan te raden om dit vooraf te bespreken met een deskundige (van de gemeente en/of extern).

In de NEN 8100 wordt onderscheid gemaakt tussen windhinder en windgevaar; deze worden allebei gemeten. Windhinder en windgevaar zijn gebaseerd op andere drempelwaarden en zijn daarom niet per se aan elkaar gerelateerd:

- De getoonde waarde van windhinder laat zien hoeveel procent van het aantal uren per jaar de drempelwaarde voor windhinder (5 m/s) wordt overschreden.
- De getoonde waarde van windgevaar laat zien hoeveel procent van het aantal uren per jaar de drempelwaarde voor windgevaar (15 m/s) wordt overschreden (meer informatie, zie hoofdstuk 5).

Voor de leesbaarheid worden windhinder en windgevaar in Rotterdam op aparte kaarten getoond en volgen de kaartlegenda's de voorschriften van de gemeente (zie hieronder). Bij zowel CFD- als windtunnelonderzoek is het wenselijk om, naast de kleurcodering, numerieke meetwaarden aan te geven op belangrijke plekken, vanwege de precisie en de leesbaarheid voor kleurenblinden.

Windkwaliteitsklasse	Activiteit		
	Doorlopen	Slenteren	Verblijven
A < 2,5% kans op windhinder (uren/jaar)	Goed	Goed	Goed
B 2,5 - 5%	Goed	Goed	Matig
C 5 - 10%	Goed	Matig	Slecht
D 10 - 20%	Matig	Slecht	Slecht
E > 20%	Slecht	Slecht	Slecht

Kaartlegenda windhinder (gebruik dus deze vijf kleuren!)

	Beoordeling
< 0,05% kans op windgevaar (uren/jaar)	Goed
0,05 - 0,3%	Beperkt risico
> 0,3%	Gevaarlijk

Kaartlegenda windgevaar (gebruik dus deze twee kleuren!)

Voor de vergelijkbaarheid tussen projecten is het van belang dat voor alle windstudies vergelijkbare uitgangspunten worden gehanteerd. Als vuistregel hanteren we dat het niet de bedoeling is dat windproblemen die veroorzaakt worden door gebouwen, in de studies opgelost worden met maatregelen in de openbare ruimte (zoals vegetatie, schermen etc.). Vegetatie (bomen, struiken etc.) en vaste objecten die aanwezig zijn in de huidige situatie mogen wel (op realistische wijze) worden meegenomen in de studie (dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 6).

Daarnaast moet er altijd een nulmeting gedaan worden van de huidige situatie, om zo de effecten van het nieuwe volume inzichtelijk te maken. Het is heel belangrijk dat de omgeving goed gesimuleerd wordt. De gemeente bepaalt hoe de omgeving gesimuleerd moet worden en levert een model aan. In sommige gevallen hoeft alleen de omgeving in de huidige situatie meegenomen te worden in de studie. Als er echter veel ontwikkelingen gepland zijn in de omgeving, kan het nuttig zijn om een aanvullende meting te doen met het bouwplan in de toekomstige situatie. Een vuistregel die bij eerdere projecten is gehanteerd, is dat in dat geval de bebouwing meegenomen wordt die naar verwachting in de komende 10 jaar gerealiseerd wordt. Het is niet nuttig om de volledige bestemmingsplanvolumes te gebruiken, omdat die vaak een onrealistisch negatief beeld opleveren. Samenvattend worden dus de volgende basisvarianten gemeten:

- Nulmeting huidige situatie (altijd)
- Huidige situatie + bouwplan (altijd)
- Toekomstige situatie + bouwplan (indien relevant)

Bij sommige ontwikkelingen is de gemeente opdrachtgever van de windstudie en bij andere is de ontwikkelaar dat. In principe is de initiatiefnemer van een project de opdrachtgever van de windstudie. Als de ontwikkelaar opdrachtgever is, wordt de studie altijd

in overleg voorbereid en begeleid door de gemeente. Er moet bijvoorbeeld goed worden afgestemd welke basisvarianten en verbetermaatregelen er doorgemeten worden.

**Let op!** Op plekken waar meerdere (hoogbouw) ontwikkelingen bij elkaar komen, moet aan de voorkant goed nagedacht worden over de manier van simuleren en meten. Als ontwikkelingen dicht bij elkaar staan, kunnen ze namelijk (grote) invloed op elkaar hebben. In sommige gevallen is het bijvoorbeeld nuttig om meerdere ontwikkelingen in één meting te combineren. Het is dan handig om ook de invloed van de ontwikkelingen afzonderlijk te meten, om te kunnen bepalen welke mogelijke problemen door welke ontwikkeling veroorzaakt worden.

### Wanneer?

In het geval van gebiedsontwikkelingen met hoogbouw zijn oriënterende windonderzoeken aan de voorkant van het ontwerpproces verplicht (volgens de Hoogbouwvisie 2019). Deze metingen worden op basis van volumestudies of masterplannen gedaan en geven een eerste beeld van waar zich mogelijke knelpunten bevinden. Er kan voor gekozen worden om dit ook te doen bij gebiedsontwikkelingen zonder hoogbouw. Tijdens het ontwerpproces van een gebouw worden vóór het vaststellen van een voorlopig ontwerp (VO) oriënterende windonderzoeken gedaan. Het is het beste om ruim voor het VO de eerste studies te doen, bijvoorbeeld al tijdens volumestudies bij de start van het initiatief/schetsontwerp (SO). Gebouwworm en hoogte (deze ontwerpaspecten hebben de grootste invloed op wind) kunnen op deze manier in een vroegtijdig stadium onderzocht worden en de uitkomsten kunnen worden meegenomen in het ontwerpproces en de businesscase. De laatste check gebeurt met een windonderzoek op basis van het definitief ontwerp (DO).





## Wat?

Het veroorzaken van windgevaar (plekken aangemerkt als 'gevaarlijk' volgens de NEN 8100) is in geen geval toegestaan. Wat betreft windhinder verschilt de ambitie per plek, gebaseerd op het (huidige of gewenste) gebruik. De ambitie van de gemeente wordt weergegeven op een windkwaliteitsklassenkaart (WKKK). De NEN 8100 beschrijft vijf verschillende windkwaliteitsklassen voor windhinder: A, B, C, D en E. Voor elke letter staat beschreven voor welke activiteiten (doorlopen, slenteren of verblijven) de klasse in welke mate comfortabel is (goed, gemiddeld of slecht). A staat voor het beste windklimaat en E voor het slechtste. In hoofdstuk 5 staat verder toegelicht wat deze klassen precies betekenen en wat acceptabel is voor verschillende functies.

Als de gemeente een windstudie verplicht stelt (zie hoofdstuk 2), moet de gemeente een WKKK maken en (indien mogelijk) aan de voorkant van het proces beschikbaar stellen. Voor hoogbouw staat dit verankerd in de Hoogbouwvisie 2019 (met het addendum uit 2022), maar dit geldt ook voor andere ontwikkelingen. De WKKK wordt gemaakt op gebiedsniveau of op gebouwniveau met een straal van 300 m om het gebouw. Deze kaart (met toelichting) kan onderdeel zijn van verschillende documenten, zoals een masterplan, stedenbouwkundig plan of NvU of hij kan apart vastgesteld worden door het college. Op de kaart wordt aangegeven wat de gewenste minimale kwaliteit voor wind is voor elke plek. De kaart (met toelichting) is een afwegingskader bij de verdere ontwikkeling van gebouwen en gebieden.

## Hoe, wanneer en wat meet je met een windonderzoek?

### Hoe

- Volgens de NEN 8100 methodes
- Windhinder en windgevaar allebei meten en op aparte kaarten tonen
- Kaartlegenda's volgen de voorschriften van de gemeente
- Te meten basisvarianten: nulmeting huidige situatie (altijd), huidige situatie + bouwplan (altijd), toekomstige situatie + bouwplan (indien relevant)

### Wanneer

- Oriënterende windonderzoeken aan de voorkant van een gebiedsontwikkeling (testen van volumestudies/ masterplannen)
- Vóór het vaststellen van het VO van een gebouw testen en bijsturen (op vorm en hoogte)
- Laatste check op basis van het DO

### Wat

- Windgevaar is nooit toegestaan
- Windhinderambities worden weergegeven op een windkwaliteitsklassenkaart (WKKK), die gebruikt wordt als afwegingskader



▲ Winkelcentrum Boulevard Nesselande aan het Maltplein in Rotterdam heeft volgens bewoners veel weg van een tochtgat. © Jan Kok | Boomerang Fotografie

## Winkelcentrum Nesselande is een tochtgat, maar overkappen lijkt geen optie

Winkelcentrum Boulevard Nesselande in Rotterdam kan wel een opknopbeurt gebruiken, vinden bewoners. Maar overkappen van het Maltplein is niet realistisch, aldus de beheerder, die ook nog eens met leegstand kampt.



▲ Het winkelgebied van de Nieuwe Emmasingel in Eindhoven. Op de achtergrond woontoren De Admirant. Archief foto

## Oplossing in zicht voor windhinder Admirant

EINDHOVEN - Een oplossing voor de hevige wind die het winkelgebied Rond de Admirant in de Nieuwe Emmasingel in Eindhoven in zijn greep houdt, wordt volgende week verwacht. Althans op papier. Het plan moet dan nader worden uitgewerkt.

Wat er kan gebeuren als je het onderwerp wind niet goed/optijd meeneemt in het ontwerpproces (artikelen AD en Eindhovens Dagblad)

# 4. Kies je voor de windtunnel of voor CFD?



Volgens de NEN 8100 zijn er twee mogelijke methodes om windstudies te doen: windtunnelstudies of CFD (Computational Fluid Dynamics; computersimulaties). Andere methodes dan deze twee zijn niet betrouwbaar genoeg en moet je dus niet gebruiken. Windtunnels en CFD doen in principe hetzelfde. Maar wat houden de methodes in en wanneer kies je welke?

## Windtunnel

Een windtunnel is een installatie die, onder zorgvuldig ingestelde condities, een echte windstroom langs de maquette blaast. Op deze maquette zijn meetpunten bevestigd die de windsnelheid meten. De maquette is rond en er wordt van alle twaalf de windrichtingen gemeten. Op basis van winddata van de afgelopen 30 jaar wordt vervolgens de windkwaliteitsklasse (inclusief exacte waarde) bepaald per punt. Er zijn maar weinig windtunnels in Nederland, omdat het grote, dure installaties zijn.

De opstartkosten van een windtunneltest zijn in principe hoger dan bij een CFD simulatie, maar je krijgt er veel voor terug. Als je kiest voor de windtunnel betaal je in principe één bedrag voor een meetdag inclusief maquette, het doorrekenen van ongeveer 5 varianten op een dag en de aanwezigheid van experts die ter plekke advies geven en de maquette aanpassen aan de gewenste maatregel. Hiervoor ga je een hele dag naar het bedrijf toe. In overleg met het bedrijf kan de maquette eventueel bewaard worden voor een volgende meetdag.

Wetenschappelijk gezien is de windtunnel de beste keuze. Windtunnels geven zeer nauwkeurig en betrouwbaar resultaat, omdat het echte wind is met echte turbulentie. Als gemeente zien we daarom graag windtunnelstudies. Als je veel verschillende varianten wil meten (wat in een ontwerpproces handig is), is de windtunnel vaak de beste optie. Je kan dan in één dag samen met de windexpert en de ontwerper de eventuele problemen bespreken en direct oplossen.

### Windtunnel

- + Zeer nauwkeurig en betrouwbaar resultaat, omdat het 'echte wind' is, met echte turbulentie.
- +/- Duurdere opstartkosten (maken van de maquette etc.), maar dan kan je wel in één dag meerdere varianten testen en de maquette eventueel bewaren voor latere studies
- Je hebt alleen data op de van tevoren bepaalde meetpunten
- De grootte van het gebied is beperkt

**Als je veel verschillende varianten wil meten (wat in een ontwerpproces handig is), is de windtunnel vaak de beste optie**

### CFD

- Minder nauwkeurig en betrouwbaar resultaat (maar voldoende), omdat de berekeningen windstromen versimpelen.
- +/- Goedkoper en sneller opgestart (maken van het model etc.), maar per extra variant kost het rekentijd en extra geld (kan zo 1 of 2 dagen duren per variant)
- + Je hebt data van het hele gebied, niet alleen van de meetpunten
- + De grootte van het gebied is onbeperkt
- Het resultaat is heel afhankelijk van het bepalen van de juiste parameters en de expertise van de gebruiker

**Als je maar één of enkele snelle check(s) wilt doen, is CFD vaak de beste optie**

Voor en nadelen van windtunnels en CFD

Een nadeel van de windtunnel is dat je alleen data krijgt op van tevoren bepaalde meetpunten, dus niet van het hele gebied, zoals bij CFD. Daarnaast heeft de windtunnel een beperkte grootte. De schaal van de maquette heeft een technische grens. Een gebiedsontwikkeling past er vaak wel op, maar niet als deze een heel groot gebied beslaat.

**Tip!** Zorg dat je de windtunnel op tijd reserveert, want kort van tevoren is deze vaak al volgeboekt.

## Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD is een methode om met de computer windstudies uit te voeren. Hiervoor heb je dus geen windtunnel nodig, maar alleen de juiste programma's, veel computerkracht en een goede expert. Er zijn veel meer partijen die dit aanbieden. Een CFD-simulatie bestaat uit verschillende stappen. De windexpert maakt eerst een model op basis van de omgeving en het ontwerp dat aangeleverd is. Vervolgens maakt hij/zij een 'grid' om het model heen, waarin heel veel cellen zitten. Dit is een belangrijke en complexe stap. Dan worden alle parameters bepaald, die bijvoorbeeld aangeven hoe de wind precies moet waaien. Dit heet de 'input' van het model en dit wordt ingevoerd door de windexpert. Als dit klaar is, wordt de simulatie aangezet en heeft de computer vaak minimaal een hele dag nodig om de resultaten te berekenen in alle cellen van het grid. Tot slot worden er plaatjes gemaakt van de resultaten. Dit zijn vaak mooie kleurenplaatjes met data van het hele gebied.

CFD is vaak goedkoper en sneller om op te starten dan een windtunnelstudie. Per extra variant kost het echter opnieuw geld en rekentijd. Het doorrekenen kan zo één of twee dagen duren per variant. Als je maar één of enkele snelle check(s) wilt doen, is CFD vaak de beste optie, maar als je in korte tijd veel varianten wil testen, is de windtunnel vaak handiger. Daarnaast is het handig dat je bij CFD data krijgt van het hele gebied, niet alleen van de meetpunten, zoals bij de windtunnel. De grootte van het gebied is in principe onbeperkt. Deze is

afhankelijk van de rekenkracht van de computer en de beschikbare tijd en geld.

Een nadeel van CFD is dat het resultaat over het algemeen minder nauwkeurig en betrouwbaar is dan bij een windtunnel. Dit is het geval omdat de computerberekeningen windstromen versimpelen en dus geen echte wind en echte turbulentie gebruiken. Daarnaast is het resultaat van CFD heel afhankelijk van het invoeren van de juiste parameters en van de expertise van de gebruiker. Indien goed uitgevoerd, is CFD echter een acceptabele optie. Op pagina 16 staan een aantal toetsbare criteria voor een goede CFD-studie.

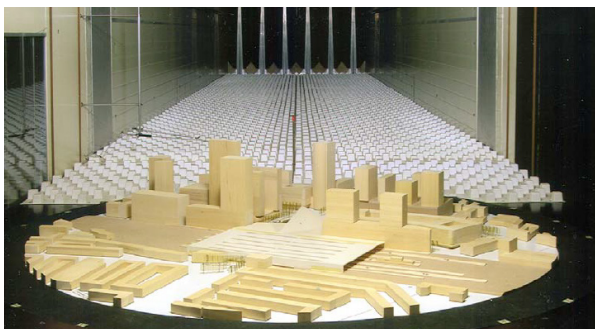
## Expertise

Beide methodes vereisen veel expertise om ze zorgvuldig en betrouwbaar uit te voeren. Een bedrijf met specialisten op het gebied van wind is dus noodzakelijk. Wees zeker bij CFD kritisch op de keuze voor het bedrijf.

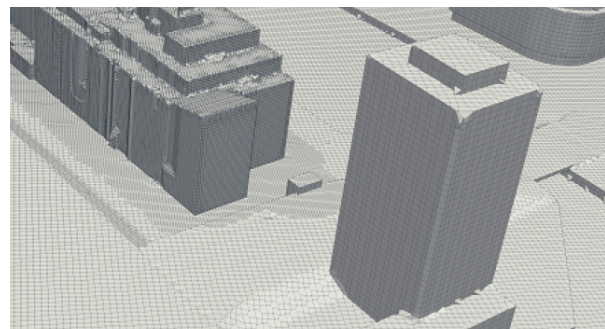
**Let op!** Er zijn bedrijven die andere, vaak snellere en goedkopere, methodes hebben ontwikkeld om windstudies te doen. Deze methodes kunnen mogelijk enige inzichten bieden tijdens het ontwerpproces, maar ze zijn wetenschappelijk gezien niet betrouwbaar genoeg om vanuit te kunnen gaan. Voor officiële momenten en belangrijke keuzes in het ontwerpproces is een studie conform de NEN 8100 noodzakelijk.

## Kies je voor de windtunnel of voor CFD?

- Als je veel verschillende varianten wil meten (wat in een ontwerpproces handig is), is de windtunnel vaak de beste optie
- Als je maar één of enkele snelle check(s) wilt doen, is CFD vaak de beste optie
- Andere methodes dan de windtunnel en CFD zijn niet betrouwbaar genoeg
- Een bedrijf met specifieke expertise is noodzakelijk



Stationsgebied Rotterdam in de windtunnel van TNO



Grid voor een CFD-simulatie door Peutz



## Toetsbare criteria voor een goede CFD-studie

De ene CFD-studie is de andere niet. Soms komen er CFD-studies langs die niet representatief zijn. Anders gezegd; die niet voldoen aan de voorwaarden voor een goede CFD-studie.

Hieronder staan een aantal toetsbare eigenschappen waar een goede CFD studie aan moet voldoen. Om meer zekerheid te krijgen over de betrouwbaarheid van de studie, is het verstandig om aan het bedrijf dat de windstudie uitvoert te vragen of ze deze dingen duidelijk zichtbaar willen maken in hun rapport. De lijst is opgesteld in samenwerking met onderzoekers van de TU Eindhoven.

### Het CFD-rapport volgt de volgende documenten en verwijst ernaar:

Nederlandse normen en standaarden:

- NEN 2006a. Wind comfort and wind danger in the built environment, NEN 8100 (in Dutch) Dutch Standard.
- NEN 2006b. Application of mean hourly wind speed statistics for the Netherlands, NPR 6097:2006 (in Dutch). Dutch Practice Guideline.

Best practice guidelines (onderwerp: hoe voer je een betrouwbare CFD-studie uit?):

- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST Action 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, Janssen WD, 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 & Software* 30: 15-34.
- Bert Blocken, *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*, *Building and Environment*, Volume 91, 2015, Pages 219-245.

Het is niet per se nodig dat een studie naar al deze bovenstaande richtlijnen refereert, omdat de belangrijkste aspecten van de inhoud overeenkomen.

Bij voorkeur refereert het CFD-rapport naar de meest recente richtlijnen (de onderste twee van het lijstje), omdat deze het meest up-to-date zijn met de snel veranderende kennis.

### Het CFD-rapport laat de volgende dingen zien:

- Uitleg over de gebruikte windversnellingsfactor en windstatistiek (vraag eventueel om afbeeldingen).
- Rekenraster/grid (vraag om afbeeldingen van het model en raster):
  - Gemaakt op basis van een gevoeligheidsstudie
  - Minimaal 10 cellen over de breedte van een façade
  - Minimaal 3 cellagen onder voetgangersniveau (1,75 m)
- Rekendomein afmetingen (vraag om afbeeldingen en afmetingen van het domein):
  - Minimaal 6H hoog, waarbij H de hoogte van het hoogste gebouw in het domein is.
  - Minimaal 5H tussen het gemodelleerde gedeelte en de inlaat van het domein.
  - Minimaal 15H tussen het gemodelleerde gedeelte en de uitlaat van het domein.
  - Gebouwen in een straal van 1 à 2H rondom het interessegebied dienen expliciet gemodelleerd te worden.
  - In alle richtingen dient minimaal één bouwblok rondom het interessegebied expliciet gemodelleerd te worden.
- Uitleg bij/aantonen dat de goede randvoorwaarden en instellingen zijn gebruikt:
  - Atmosferisch windprofiel aan de inlaat waarbij de ruwheid van de omgeving mee is genomen.
  - Gebruik van ruwheidsparameters in het gebied stroomopwaarts/afwaarts van het expliciet gemodelleerde gebied. (Deze ruwheidsparameters moeten overeenkomen met het atmosferisch windprofiel aan de inlaat.)
  - Het gebruik van minimaal tweede-orde discretizatie schema's.
  - De simulaties dienen geheel convergeerd te zijn; standaardwaarden in software zijn vaak niet laag genoeg.
- Let op: bij windtunnels worden de resultaten weergegeven in meetpunten, maar bij CFD-studies niet. Het is juist een groot voordeel van CFD dat je een kleurenplaatje van het hele veld te zien krijgt. Het is dus vreemd als er meetpunten worden gebruikt.

# 5. Hoe interpreteer en vergelijk je windstudies?



Het interpreteren van een windstudie is niet makkelijk, zeker niet als je daar weinig ervaring mee hebt. Sommige mensen kunnen bijvoorbeeld schrikken als een plek niet klasse A heeft, terwijl het een beetje overdreven is om dat te eisen voor elk gebied. Een ander kan denken dat klasse D wel goed genoeg is, omdat dit niet rood kleurt op de kaart. Als een gebied echter een belangrijk slenter- of verblijfsgebied is, is D helemaal niet voldoende. Om de ambities van de gemeente vooraf duidelijk te maken, hebben we de windkwaliteitsklassenkaarten (WKKK) geïntroduceerd (zie introductie). Het kan echter nog wel eens voorkomen dat het (na veel testen en meten) écht niet mogelijk blijkt om de ambities uit deze kaart te behalen en tegelijkertijd andere wensen en eisen overeind te houden. In dat geval moet er een afweging gemaakt worden, waarbij de beslissing bij de gemeente ligt. Tot slot kan het ook nog wel eens voorkomen dat er een aantal basiszaken in de windstudie niet goed meegenomen zijn. Een check hierop is dus belangrijk. Dit hoofdstuk geeft handvatten voor hoe je om kan gaan met dit soort situaties.

## Allereerst: check een aantal zaken

Er zijn een aantal zaken waar je goed op moet letten om te beoordelen of de windstudie op de goede manier is uitgevoerd en dus betrouwbare resultaten oplevert:

- Het is heel belangrijk dat de omgeving goed gesimuleerd wordt, want deze heeft een grote invloed op de resultaten (zie hoofdstuk 3). Dit geldt voor de volumes, maar ook voor eventuele luifels en overkragingen. Controleer dit dus goed!
- Als vuistregel hanteren we dat de vegetatie uit de huidige situatie meegenomen wordt in de windstudies. Maar het aandragen van extra vegetatie wordt door de gemeente niet geaccepteerd als oplossing voor problemen veroorzaakt door (nieuwe) gebouwen (de redenen

hiervoor worden verder toegelicht in hoofdstuk 6). Let er dus goed op dat dit niet gebeurt. Controleer daarnaast ook of de eventuele vegetatie uit de huidige situatie op realistische wijze wordt gemodelleerd, dus op de goede plek, met de goede grootte en niet als solide volumes, maar met een realistische doorlaatbaarheid. Het toevoegen van extra vegetatie kan eventueel getest worden om boven de gevraagde ambitie uit te komen, maar niet om de ambitie zelf te halen. In andere woorden: eventuele extra vegetatie brengt het windklimaat niet van onvoldoende naar voldoende, maar alleen van voldoende naar goed/uitmuntend. Kanttekening: het advies in deze alinea geldt alleen als het gaat om onderzoek naar de invloed van een gebouw(groep) op het windklimaat. Je kan ook specifiek windstudies doen voor inrichtingsplannen voor de openbare ruimte, waarbij de omliggende bebouwing niet verandert. In dat geval, geldt dit advies niet.

Let op! We gaan er in dit document vanuit dat mensen die zichzelf windexpert noemen en windstudies uitvoeren bij bedrijven vakbekwaam zijn. Dat is namelijk heel belangrijk bij deze complexe studies (zie hoofdstuk 4). Helaas hebben we ook wel eens meegemaakt dat studies technisch gezien niet goed uitgevoerd waren waardoor de resultaten onbetrouwbaar zijn. Gelukkig komt dit niet vaak voor, maar het is toch handig om even op te letten, zeker als je het bedrijf niet goed kent. Er zijn een paar zaken die direct opvallen. Het is bijvoorbeeld raar als er een CFD studie is gedaan, maar de resultaten alleen in meetpunten worden weergegeven. Hierdoor lijkt het namelijk alsof degene die de studie uitgevoerd heeft nadelige plekken opzettelijk weglaat of niet de voordelen kent van CFD ten opzichte van een windtunnel (zie hoofdstuk 4). Vraag in het geval van CFD ook altijd om goede afbeeldingen van het gebruikte model en het grid dat gebruikt is voor de berekening. Vraag bij windtunnelstudies om goede foto's van de windtunnel en de maquette. Bij twijfel: vraag het even na aan ons. Zie hiervoor ook pagina 16.

## Wat is acceptabel en wat niet?

Welke windkwaliteitsklasse acceptabel is op welke plek, hangt af van verschillende factoren. Ten eerste is het natuurlijk afhankelijk van de (toekomstige) functie van de plek. Maar het hangt ook af van het soort gebied. Aan het open water verwachten mensen bijvoorbeeld meer wind, dus dan is een beetje wind minder storend. Tegelijkertijd moet je op deze plekken met nieuwe ontwikkelingen juist extra opletten, omdat het snel heel onprettig of zelfs gevaarlijk kan worden. En bij plaatsen die bedoeld zijn voor kwetsbare groepen (zoals bejaarden, mindervaliden en kleine kinderen) kunnen hogere ambities verstandig zijn.

De NEN 8100 definieert windgevaar (drempelwaarde 15 m/s, zie hoofdstuk 3) als het *'optreden van een zodanig hoge windsnelheid dat bij personen in ernstige mate problemen optreden bij het lopen. Hiermee wordt bedoeld evenwichtsverlies, waardoor het voor mensen onmogelijk wordt zich staande te houden of lopend voort te bewegen'* (pagina 7). Gezonde volwassenen kunnen dan dus omvergeblazen worden. Bij de beoordeling 'gevaarlijk', treedt dit relatief vaak op (meer dan 0,3% van de tijd; 26 uur per jaar), ook op dagen waarop het in de rest van de stad helemaal niet zo hard waait. De gemeente acht dit in alle gevallen onacceptabel. Bij de beoordeling 'beperkt risico' treedt dit in principe alleen op als het sowieso al een zeer winderige dag is (0,05-0,3% van de tijd; 4-26 uur per jaar). De gemeente kan een afweging maken om dit lokaal toe te staan. Op locaties aan het water is dit in sommige gevallen bijvoorbeeld nauwelijks te voorkomen.

Windhinder (drempelwaarde 5 m/s, zie hoofdstuk 3) wordt gedefinieerd als het *'ondervinden van hinder ten gevolge van wind. (...) het haar verwaait, kleding en paraplu's worden door de wind bewogen, en met toenemende windsnelheid heeft men steeds meer moeite om regelmatig te blijven lopen en het evenwicht te bewaren'* (pagina 7, 10). De grens komt overeen met windkracht 3 of 4 op de schaal van Beaufort (respectievelijk 3,4 m/s tot 5,4 m/s en 5,5 m/s tot 7,9 m/s). *'Het KNMI geeft hierbij de beschrijving: bladeren en twijgen bewegen voortdurend (3 Beaufort) en kleine takken beginnen te bewegen, stof en papier dwarrelt op (4 Beaufort)'* (pagina 10). De NEN 8100 beschrijft vijf verschillende windkwaliteitsklassen voor windhinder: A, B, C, D en E. Voor elke letter staat beschreven voor welke activiteiten (doorlopen, slenteren of verblijven) de klasse in welke mate comfortabel is (goed, gemiddeld of slecht). A staat voor het beste windklimaat en E voor het slechtste. Bij elke letter hoort een percentage van het aantal uren per jaar waarin de drempelwaarde voor

windhinder wordt overschreden; zie de tabel op de volgende pagina. Dit werkt dus ongeveer hetzelfde als bij windgevaar, maar dan is de drempelwaarde anders. Het is belangrijk om op te merken dat het op plaatsen met een hoge klasse soms dus ook (te) hard kan waaien, maar dit komt slechts een zeer klein deel van de tijd voor.

Er moet lokaal gekeken worden welke kwaliteitsklasse acceptabel is voor welke plek. In een park of speeltuin is een rustiger windklimaat en dus een hogere klasse gewenst dan op een parkeerplaats. Het is echter onrealistisch om voor elke buitenruimte die veel gebruikt wordt klasse A of B te eisen. Rotterdam is van zichzelf al een vrij winderige stad (zie hoofdstuk 1) en zeker bij de toevoeging van hoogbouw is een verslechtering waarschijnlijk. Om gevoel te krijgen bij de betekenis van de klassen in de praktijk, zijn op de volgende pagina's een aantal windstudieresultaten van de huidige situatie weergegeven, op verschillende plekken in de stad. Deze kan je als referentie gebruiken van wat de verschillende windkwaliteitsklassen betekenen in de praktijk. Als een studie wijst op klasse A, kan je bijvoorbeeld een vergelijkbaar windklimaat verwachten met de Lijnbaan (in de huidige situatie 2022); een prettige, windstille plek, perfect om te slenteren of een drankje te doen op een terras. Als je studie klasse D uitwijst, kan je verwachten dat de situatie vergelijkbaar wordt met het windklimaat bij de tramhaltes op het Centraal Station. Als je daar vaak moet wachten op de tram, weet je dat je daar echt niet langer dan een paar minuten wil staan. De studie van Boston-Seattle laat zien dat je op zich best een terras kan maken op een plek waar een mix van A, B en C is. Je moet dan alleen wel verwachten dat er hoge windschermen komen te staan, niet alleen haaks op de gevel, maar ook parallel eraan. Als vuistregel kan je hanteren dat je vanaf klasse C/D rekening moet houden met de groeicondities van je bomen. Sommige soorten groeien dan niet goed.

In de standaard toelichtingstekst bij de WKKK staan een aantal vuistregels aangegeven over waar je naar zou moeten streven voor welke plekken:

- De belangrijkste verblijfsplekken in de stad hebben in principe klasse A als ambitie.
- De belangrijkste straten waar wordt geslenterd of kortstondig wordt verbleven, krijgen klasse B als ambitie. Denk hierbij bijvoorbeeld aan winkelgebieden of parken. Naast voor deze slentergebieden geldt windkwaliteitsklasse B ook voor windgevoelige functies, zoals entrees en terrassen.
- Voor alle overige gebieden geldt

windkwaliteitsklasse C als ambitie. Dit betekent dat er voor doorlopen nog steeds sprake is van een goed windklimaat.

- En tot slot streven we naar een gelijkmatig windklimaat (dus bijvoorbeeld geen klasse A en D naast elkaar) op plekken waar veel gelopen of gefietst wordt, omdat er anders gevaarlijke verkeerssituaties kunnen ontstaan door onverwachte windstoten.

In de toelichtingstekst wordt ook aangegeven dat het bestaande windklimaat in Rotterdam in de huidige

situatie niet overal even goed is. Reeds bestaande gebouwen beïnvloeden – soms in grote mate – het windklimaat. Bij nieuwe windstudies wordt er daarom altijd een nulmeting gedaan van de huidige situatie.

In het geval dat de resultaten van de nulmeting lokaal onder de ambitie van de WKKK uitkomen, wordt op die specifieke plek de waarde van de nulmeting als gewenste minimale kwaliteit aangehouden. Dit geven we aan omdat het over het algemeen lastig is om het windklimaat te verbeteren met nieuwe hoogbouw en omdat we geen onmogelijke zaken willen eisen.

### Windkwaliteitsklassen (windhinder huidige situatie 2022 Rotterdam)



Rotterdamse voorbeelden van windkwaliteitsklassen op verschillende plekken in de stad (huidige situatie, 2022); zie de volgende pagina's voor de volledige studies

Windkwaliteitsklasse	Activiteit		
	Doorlopen	Slenteren	Verblijven
A < 2,5% kans op windhinder (uren/jaar)	Goed	Goed	Goed
B 2,5 - 5%	Goed	Goed	Matig
C 5 - 10%	Goed	Matig	Slecht
D 10 - 20%	Matig	Slecht	Slecht
E > 20%	Slecht	Slecht	Slecht

Kaartlegenda windhinder (als hulpmiddel: 2,5% betekent  $365 \times 24 \times 0,025 = 219$  uren per jaar)



## Het maken van een afweging

Het kan gebeuren dat het (na veel testen en meten) écht niet mogelijk blijkt om de ambities uit de WKKK te behalen en tegelijkertijd andere wensen en eisen overeind te houden. In dat geval moet er een afweging gemaakt worden. Dit wordt ook mogelijk gemaakt in de toelichtingstekst bij de WKKK. Maar hoe maak je deze afweging?

Allereerst is het belangrijk om te kijken of er inderdaad voldoende verbeteropties zijn getest. Als vuistregel hanteren we een hiërarchie van oplossingen, die uitgelegd staat in hoofdstuk 6. Het testen en aanpassen is vaak een iteratief proces. Als de gemeente vaststelt dat het met het betreffende project inderdaad niet mogelijk is om de ambities uit de WKKK te halen, moet de gemeente een afweging maken. Een klein vlekje C in een gebied waar je eigenlijk B wil, zou je eventueel kunnen accepteren als er anders echt te grote aanpassingen gedaan moeten worden. Een

heel klein vlekje D zou in sommige gevallen ook nog wel kunnen, maar kijk dan wel goed waar dit vlekje zit. Op een terras of belangrijk zebrapad is dit onwenselijk, maar op een trambaan is het misschien geen drama. Op het moment dat je bijvoorbeeld een grote vlek D hebt in een slentergebied, moet je je wel even achter je oren krabben, zeker als alle opties voor volumeveranderingen al zijn geprobeerd. Ga je dan eisen dat het volume of de hoogte toch radicaal anders moet? Of ga je het gebruik van de openbare ruimte aanpassen, waardoor het toch een doorloopstraatje wordt in plaats van een slentergebied? Of kies je er zelfs voor om het straatje te veranderen in een atrium, met alle overige gevolgen die dat met zich meebrengt. Deze afweging wordt in alle gevallen integraal en door de gemeente gemaakt. Gezien het karakter van wind is het niet per se raar of erg als je af en toe een beetje moet afwijken, maar betrek de relevante disciplines en motiveer je keuze goed.

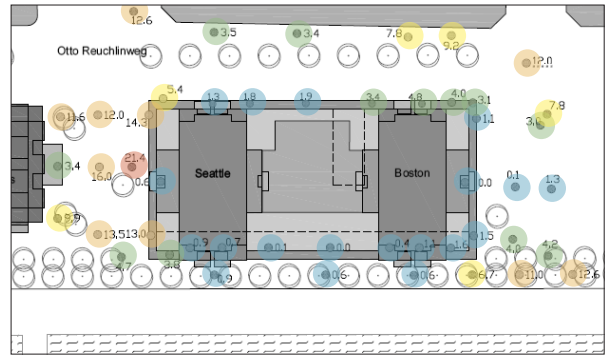


Collage van resultaten van windhinderstudies in het RCD-XL gebied (let op: eigenlijk kan je deze studies niet zomaar aan elkaar plakken. Op de randen van de gebieden zijn de resultaten daarom iets minder betrouwbaar.)

**Let op!** Windproblemen worden voornamelijk veroorzaakt door gebouwvolumes (in Rotterdam vooral de verantwoordelijkheid van de stedenbouwkundige), terwijl de problemen voornamelijk optreden in de openbare ruimte (ook de verantwoordelijkheid van de landschapsarchitect). Er kan dus niet vaak genoeg benadrukt worden dat samenwerking tussen de stedenbouwkundige en de landschapsarchitect essentieel is. Zij moeten samen tot afwegingen komen. Bijvoorbeeld: wat vinden we belangrijker in de binnenstad: verdichting en het mogelijk maken van hoogbouw of het 'city lounge'-gevoel in de openbare ruimte? En hoe stemmen we dit samen af?

### Hoe interpreterer en vergelijk je windstudies?

- Check eerst een aantal basiszaken, zoals omgeving en vegetatie
- Gebruik (Rotterdamse) voorbeelden en vuistregels om in te schatten welke windkwaliteit je acceptabel vindt op welke plek
- Als de ambities niet gehaald kunnen worden (ondanks veel moeite), maakt de gemeente een integrale afweging met (in ieder geval) stedenbouw en landschap



Resultaat windhinder windtunnelstudie, gebouwde situatie Boston Seattle, Kop van Zuid, door Peutz, 2014



Resultaat windhinder windtunnelstudie, huidige situatie in 2021 de Sax, Kop van Zuid, door Peutz, 2021



Resultaat windhinder windtunnelstudie, gebouwde situatie Zalmhaventoren, Centrum, door Peutz, 2015

# 6. Hoe los je windproblemen op?

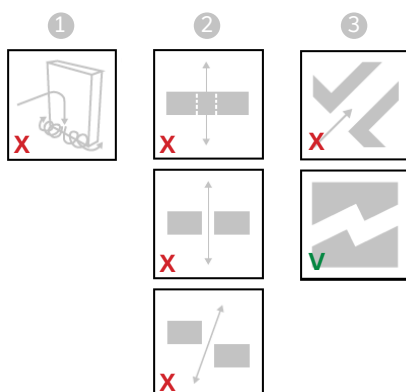


Er zijn verschillende manieren om windproblemen geheel of gedeeltelijk op te lossen. Het beste is natuurlijk om de stedenbouwkundige opzet zo te ontwerpen dat er geen windproblemen ontstaan. Dit is echter niet altijd mogelijk, zeker niet in bestaande gebieden. Gelukkig zijn er ook oplossingen mogelijk op gebouwniveau.

## Slimme oriëntatie

Allereerst is de oriëntatie van je gebouw belangrijk, voornamelijk de oriëntatie ten opzichte van de dominante windrichting: Zuid-West.

1. Plaats geen grote, schijfvormige gebouwvolumes loodrecht op de dominante windrichting, want deze vangen veel wind. Plaats deze liever parallel.
2. Oriënteer eventuele passages of openingen tussen gebouwen niet op de dominante windrichting, want dan ontstaat er kortsluiting door luchtdrukverschil (zie hoofdstuk 1). Als dit onvermijdelijk is, kan je de openingen zo smal maken dat de wind er moeilijk doorheen kan.
3. Let bij stedenbouwkundige ontwikkelingen op de oriëntatie van je straten. Er ontstaan vaak windproblemen in straten georiënteerd parallel aan de dominante windrichting. Het is tegen windproblemen beter om de oriëntatie loodrecht of schuin te maken. Dit 'kanalisatie'-effect in straten kan ook voorkomen worden door een knik in je straat te maken. Let wel op: voor stedelijke ventilatie (tegen hittestress en luchtkwaliteitsproblemen) is het juist wel fijn als de wind je straat in komt. Dit moet afgewogen worden.



(afbeeldingen uit de thesis van Simone Tax)

## Beschutting bieden

Als je een stuk stad ontwerpt, is het verstandig om rekening te houden met de beschutting die gebouwen elkaar en de openbare ruimte bieden.

1. Het is bijvoorbeeld verstandig om je gebouw niet te hoog te maken in verhouding tot de gebouwen in de omgeving. Als het gebouw meer dan twee keer zo hoog is als de gemiddelde hoogte in de omgeving, is de kans op windproblemen groot.
2. Als je heel veel hoge gebouwen op een kluitje zet, kunnen ze elkaar uit de wind houden. Dit heet het 'Manhattan effect'. De dichtheid moet dan wel heel hoog zijn, bijvoorbeeld zoals in Manhattan. De hoogtes van de torens kunnen bijvoorbeeld geleidelijk oplopen vanaf de dominante windrichting, het liefst met minder dan 30% hoogteverschil per stapje. In de Wijnhaven in Rotterdam bestaat een voorbeeld waarin dit Manhattan effect ervoor zorgt dat een nieuw gebouw het windklimaat in de omgeving significant verbetert.
3. Houd rekening met de verhouding tussen de breedte van de straat of het plein (W) en de hoogte van de bebouwing er omheen (H). Bij een verhouding  $H/W < 0,35$  biedt de bebouwing nauwelijks beschutting en komt vrijwel alle wind je straat/plein op. Bij  $H/W > 0,65$  gaat juist de meeste wind over de bebouwing heen en valt deze niet in je straat/plein. Tussen de 0,35 en 0,65 komt de wind deels je straat in en gaat het deels over de bebouwing heen. Deze waarden houden rekening met een dominante windrichting loodrecht op je straat. Nogmaals: dit moet wel afgewogen worden tegen het belang van stedelijke ventilatie.
4. Het is verstandig om pleinen te omringen met bebouwing. Als meer dan 25% van de pleinrand open is, wordt de kans op windhinder op je plein groter. Openingen op de dominante windrichting worden sterk afgeraden.

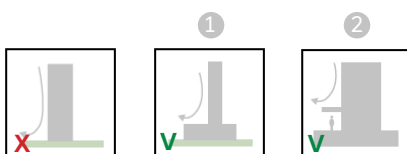




## Set-backs en luifels

Vrijstaande torens worden op basis van windproblematiek (en andere zaken) zeer sterk afgeraden in de literatuur. Vrijstaande torens veroorzaken valwinden die op het maaiveld vallen (zie hoofdstuk 1). Set-backs en luifels kunnen deze valwinden opvangen. Het is daarbij wel belangrijk dat deze set-backs en luifels aan de goede kant zitten: georiënteerd op de dominante zuidwestelijke windrichting.

1. Set-backs zijn de beste optie, omdat deze mooi te integreren zijn in het gebouw en ook andere voordelen hebben, zoals een beter gevoel van de menselijke maat op straat. In Rotterdam staan torens daarom altijd op een sokkel. Dit staat nadrukkelijk in de hoogbouwvisie 2019, waarin het concept van de 'groundscraper' voorschrijft dat maximaal 50% van het plot bebouwd mag zijn. Set-backs zijn hierdoor verplicht bij hoogbouwontwikkelingen, maar ze zijn zeker ook aan te bevelen bij gebouwen onder de 70 meter. Een set-back is pas effectief bij voldoende grootte. Een vuistregel is dat een set-back bij een gebouw van 100 meter pas effectief is als deze minimaal 5 meter diep is.
2. Luifels zijn ook een optie, maar deze zijn minder optimaal. Luifels stoppen vaak op een punt waar de wind dan vanaf de luifel als nog het maaiveld opkomt. Daarnaast is er bij luifels ook het risico dat ze averechts werken omdat er ook juist wind onder kan blijven hangen, die anders misschien naar boven, over het gebouw heen zou stromen.

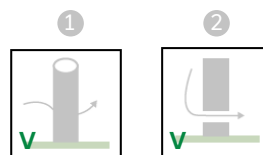


**Let op!** Als je toch een grote set-back of luifel moet maken, is het natuurlijk verleidelijk om daar een mooie, groene daktuin te ontwerpen. Het nadeel is echter dat de valwinden die je opvangt met de set-back/luifel dan op de daktuin terechtkomen. Het is verstandig om dit inzicht mee te nemen in het ontwerp.

## Aerodynamisch maken

Naast het opvangen van valwinden is het ook mogelijk om de valwinden te verminderen door meer wind langs of door het gebouw te laten stromen.

1. Gebouwen kunnen bijvoorbeeld een meer aerodynamische vorm krijgen ten opzichte van de dominante windrichting. Er stroomt dan meer wind langs het gebouw, dus er 'valt' minder wind naar het maaiveld. Bij de Rijnhavenontwikkeling in Rotterdam is dit effectief gebleken.
2. Daarnaast kunnen openingen in het gebouw helpen. De wind kan dan door de opening stromen voordat deze op maaiveld 'valt'. Maak de opening groot en open genoeg (een vuistregel is ongeveer 3 verdiepingen en écht heel open) en maak hem niet te laag of te hoog, want dan werkt het niet. Bij de Maastoren in Rotterdam is de parkeergarage boven de plint met een open gevel uitgevoerd om dit effect te creëren. Helaas werkt dit nauwelijks, omdat de 'open' verdiepingen niet doorlaatbaar genoeg zijn en te laag zitten.



**Let op!** Als je een verbetering van het windklimaat wil bereiken, kan dat alleen met relatief grote veranderingen in het volume. Subtiele aanpassingen, zoals materiaal en reliëf van de gevel zijn nauwelijks tot niet effectief (zie ook hoofdstuk 1). Een balkonschil kan in sommige gevallen bijvoorbeeld zelfs averechts werken omdat de wind in de balkons stilvalt waardoor er hier een overdruk ontstaat en de wind er niet meer naartoe beweegt. Het resultaat is dat de balkonschil hetzelfde werkt als een verdikking van het hele volume, waardoor de windproblemen op maaiveld alleen maar groter worden.

## Aanpassingen in de publieke ruimte, zoals vegetatie en schermen (doen we in principe niet!)

Het is niet de bedoeling dat windproblemen die veroorzaakt worden door gebouwen, opgelost worden met maatregelen in de openbare ruimte. Dit is (vaak)

niet haalbaar, constant en effectief genoeg. In het geval van schermen is de reden hiervoor voornamelijk van esthetische aard en daarnaast kunnen schermen sociale veiligheid en bewegingsvrijheid negatief beïnvloeden. Mooi ingepaste schermen rond terrassen of naast entrees kunnen in sommige gevallen wel een oplossing bieden of zelfs noodzakelijk zijn, maar goede sturing door ontwerpers van de gemeente is hierbij belangrijk. In zeer uitzonderlijke gevallen, als de situatie het toelaat en de gemeente het acceptabel acht, kan er onderzocht worden of een straat overkapt kan worden met een atrium, omdat de windproblemen op andere wijze niet oplosbaar blijken. Dit is bijvoorbeeld gedaan bij het gebouw FIRST in Rotterdam. Deze maatregel moet zeer zorgvuldig worden afgewogen tegen de mogelijke nadelen van het (deels) afsluiten van publieke ruimte.

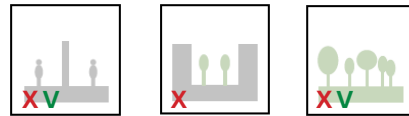
Vegetatie wordt niet geaccepteerd als oplossing voor windproblemen die door gebouwen worden veroorzaakt. De redenen hiervoor zijn als volgt:

- Een gebouw staat er in principe voor 100 jaar, de openbare ruimte verandert sneller. Het windklimaat kan daarom niet afhangen van de openbare ruimte. Bomen kunnen bijvoorbeeld doodgaan of (door de wind) niet goed groeien.
- We kunnen geen windkwaliteitsgaranties bieden aangezien beheer, klimaat etc. allerlei factoren zijn die geen continuïteit garanderen.
- Als vegetatie nodig is om een gebouw te vergunnen is de vegetatie in juridische zin onderdeel van het gebouw. Dit is om bovengenoemde redenen niet mogelijk.
- De groenstructuur is met een gedachte ontworpen en wordt beheerd. Hierbij spelen meer zaken een rol dan alleen wind.
- Vegetatie werkt alleen als het zeer gesloten volumes betreft. In veel gevallen is dit niet realistisch of verliezen bomen juist in de meest winderige periodes van het jaar (winter) hun blad.

In windstudies kan het toevoegen van extra vegetatie eventueel getest worden om boven de gevraagde ambitie uit te komen, maar niet om de ambitie zelf te halen. Anders gezegd: eventuele extra vegetatie brengt het windklimaat niet van onvoldoende naar voldoende, maar alleen van voldoende naar goed/ uitmuntend.

Bomen en schermen kunnen, net als luifels, ook een negatief effect hebben op het windklimaat. Bomenrijen kunnen er bijvoorbeeld voor zorgen dat ze windstromen 'kanaliseren', waardoor het juist harder gaat waaien. Daarnaast kan vegetatie soms wel helpen bij windproblemen die niet door gebouwen worden veroorzaakt. In parken aan het water kunnen grote, dichtbegroeide boomgroepen bijvoorbeeld de

aankomende windstromen breken, voordat deze de gebouwen bereiken. Dit werkt alleen als de vegetatie goed volgroeid, dicht genoeg en bladhoudend is. Maatregelen in de openbare ruimte kunnen soms dus wel nuttig zijn om te testen, maar alleen op de juiste manier en samen met landschapsarchitecten.



## Funcies openbare ruimte aanpassen aan windklimaat

Als een windprobleem niet oplosbaar blijkt, kan de gemeente er in uitzonderlijke gevallen voor kiezen om de functie van de openbare ruimte te veranderen. Op de Kop van Zuid zijn bijvoorbeeld kunstwerken geplaatst op plekken waar windgevaar optreedt, zodat hier geen mensen kunnen komen. Het verplaatsen van terrassen, speeltuinen of entrees is ook een optie. Je kan hier beter van tevoren over nadenken dan dat je er achteraf achterkomt dat er niemand in je speeltuin speelt omdat het te hard waait. Goede samenwerking tussen de stedenbouwkundige en de landschapsarchitect is hierbij essentieel.



## Hiërarchie van oplossingen

In Rotterdam hanteren we als vuistregel een hiërarchie van oplossingen. Deze is bedoeld om te zorgen dat eventuele windproblemen zo effectief mogelijk in de kern worden aangepakt. De hiërarchie is als volgt (je begint bij 1 en pas als het echt niet lukt om de ambities uit de WKKK hiermee te halen, ga je een stap verder):

1. Eerst wordt gekeken naar oplossingen in de volumes van het stedenbouwkundig plan;
2. Vervolgens wordt gekeken naar het gebouwvolume, hier vallen zaken onder als afrondingen en set-backs;
3. Als het daarmee niet op te lossen is, worden er maatregelen zoals luifels overwogen;
4. Mocht het dan nog steeds niet lukken, dan wordt er gekeken naar maatregelen in de buitenruimte op eigen terrein, zoals schermen (geen vegetatie).
5. Pas als dat niet gaat, kan er gekeken worden naar maatregelen in de publieke buitenruimte, zoals schermen (geen vegetatie).

Mocht het na het doorlopen van deze stappen nog steeds niet mogelijk zijn om de ambities uit de WKKK te halen, dan moet er door de gemeeneen afweging worden gemaakt (zie hoofdstuk 5).

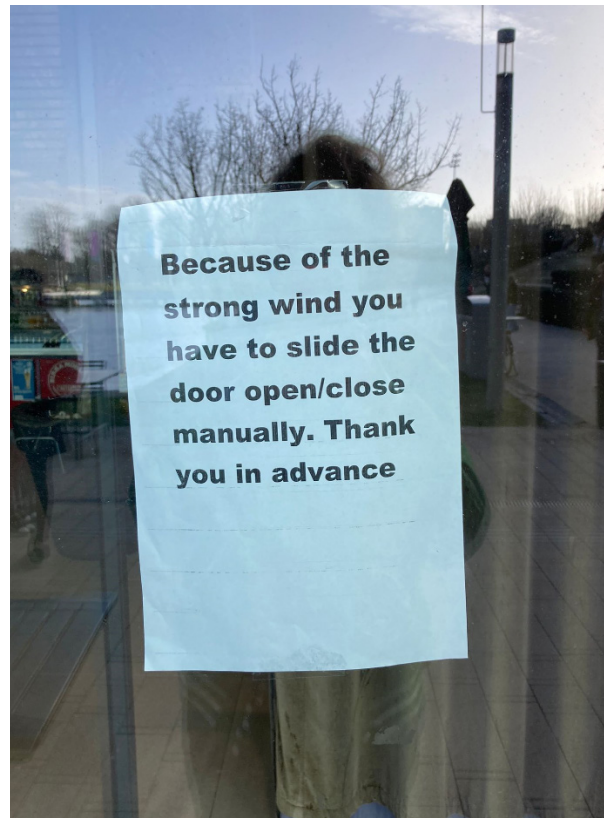
## Hoe los je windproblemen op?

### Dit werkt wel:

- Oriënteer gebouwen slim ten opzichte van de dominante windrichting (Zuid-West)
- Laat gebouwen elkaar beschutting bieden
- Integreer set-backs of luifels om valwinden op te vangen
- Geef torens een aerodynamische vorm (afronden o.i.d.)
- Pas functies in de openbare ruimte aan aan het windklimaat (als dat kan)
- Windschermen of atria in de openbare ruimte kunnen helpen, maar zijn vaak esthetisch en/of functioneel ongewenst

### Dit werkt niet/ willen we niet:

- Vegetatie is geen betrouwbare oplossing voor windproblemen die door gebouwen veroorzaakt worden
- Subtiële aanpassingen zoals materiaal en reliëf in de gevel zijn nauwelijks tot niet effectief



Briefjes op deuren die niet meer normaal open kunnen



Bij gebouw First was wind vooraf als opgave meegegeven aan de architect, die een slim, effectief atrium integreerde (afbeelding van Duurzaamgebouwd)

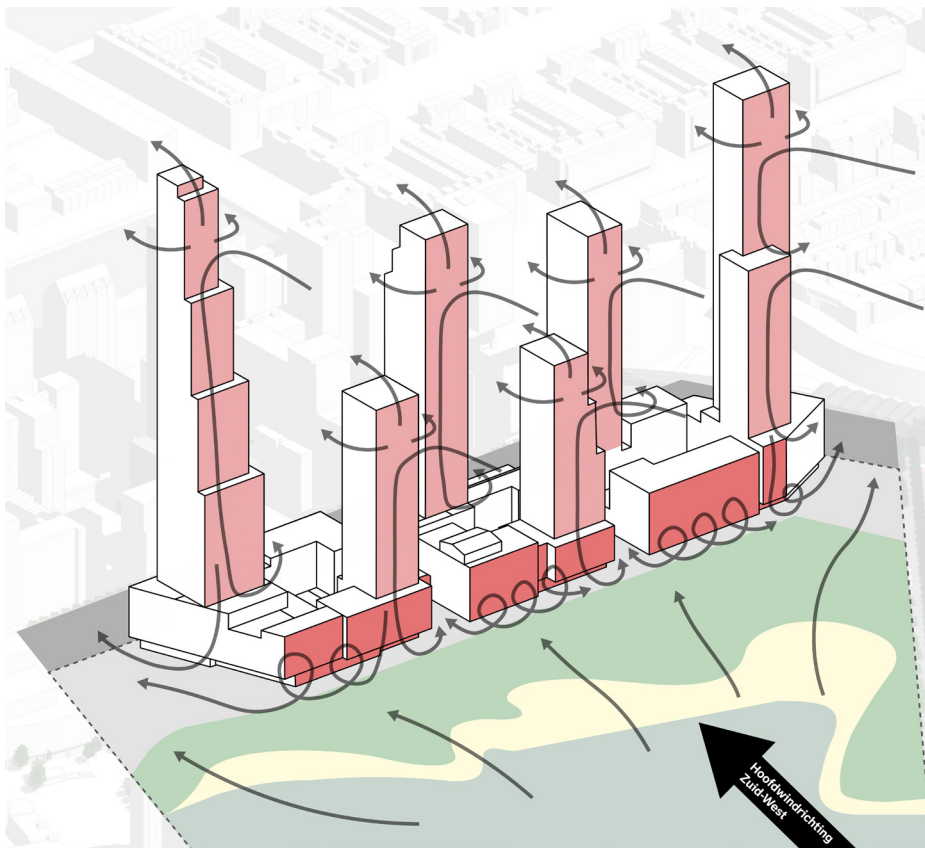


Klein gebleven boompjes en omgewaaide fietsen op de Wilhelminapier



Dit pleintje bij Calypso is een van de meest winderige plekken in Rotterdam. De boompjes hadden de wind moeten opvangen, maar deze zijn, mede door de wind, nooit groot genoeg geworden (afbeelding van Google Maps)





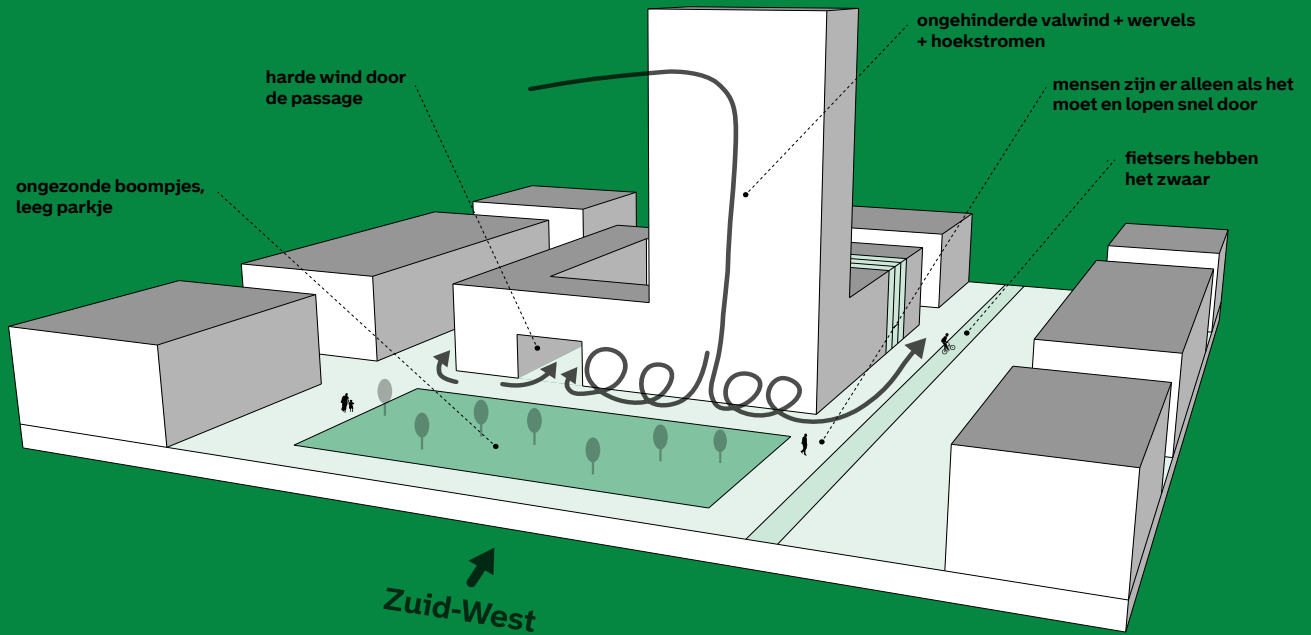
Voorbeeld: In het Stedenbouwkundig Plan (SP) Rijnhaven was een groot windprobleem. Dit is grotendeels opgelost door de bouwblokken op een aantal strategische punten te verlagen, zodat de wind eroverheen kan stromen. Daarnaast zijn de valwinds verminderd door de torens in meer of mindere mate af te ronden (zie hoofdstuk 'Wind' in het SP Rijnhaven).

Links: oude situatie met valwinds door de torens en kortsluiting door luchtdrukverschil door de combinatie van massieve bouwblokken en torens.

Onder: nieuwe situatie met maatregelen.

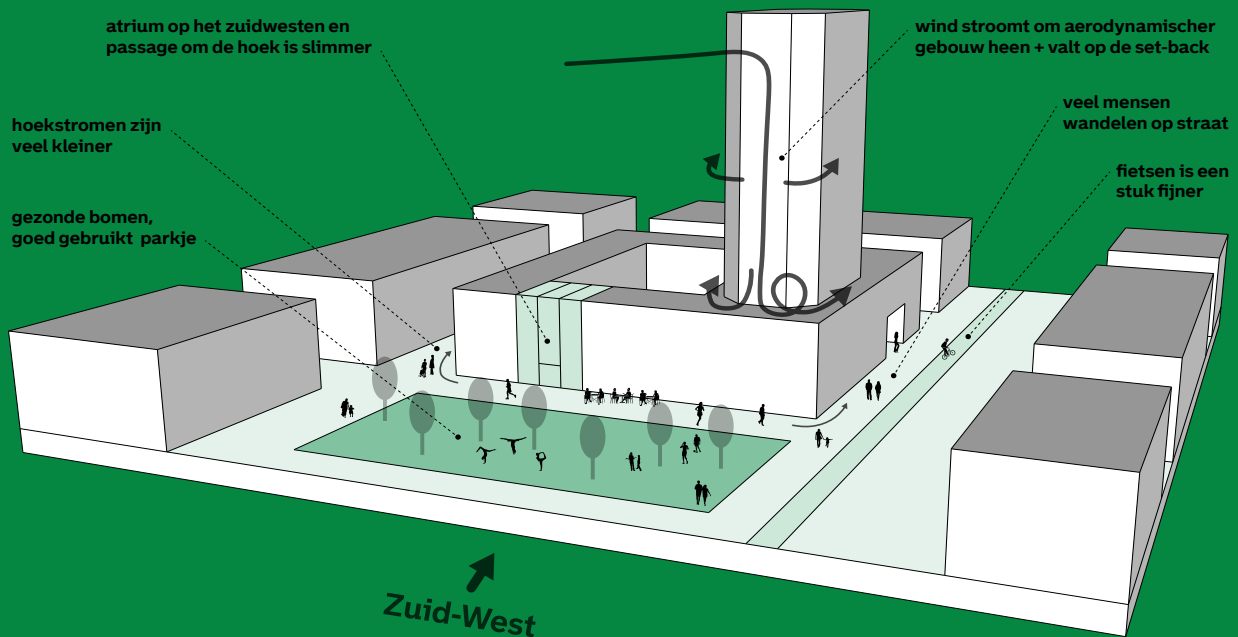


# X



Voorbeeld van het toevoegen van een bouwblok met toren in een bestaande wijk: hoe je het beter niet kan doen

# V



Voorbeeld van het toevoegen van een bouwblok met toren in een bestaande wijk: hoe het beter kan

# Bronnen.

- Eigen ervaring op basis van gevallen in Rotterdam
- Thesis Simone Tax, hoofdstuk 'Wind' (zie bijlage 3)
- Notities uit de colleges van Bert Blocken, professor Building Aerodynamics aan de Technische Universiteit Eindhoven

# Bijlagen.

## Beleid in Rotterdam:

- Windhoofdstuk addendum hoogbouwvisie 2022 (**externe bijlage 1**) deze bijlage komt beschikbaar zodra hij vastgesteld is.
- Windkwaliteitsklassenkaart (WKKK) RCD-XL (**externe bijlage 2**) deze bijlage komt beschikbaar zodra hij vastgesteld is.

## Extra informatie:

- Hoofdstuk 'Wind' uit de thesis van Simone Tax: People-centered and Climate-oriented Urbanism (**externe bijlage 3**)
- Filmpje: Wind in the City, a Walk by Emiel Arends  
*Te vinden op de schijf: K:\SO\RW\Algemeen\HOOGBOUW\04\_Hoogbouw en Windklimaat\05\_Aanvullende informatie wind*
- Filmpje: Wind in de Rijnhaven, door Simone Tax  
*Te vinden op YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=T\\_XpYAcXd8I](https://www.youtube.com/watch?v=T_XpYAcXd8I)*
- Boek: Het Weer in de Stad, door Sanda Lenzholzer  
*Te koop via internet: <https://www.naibooksellers.nl/het-weer-in-de-stad-hoe-ontwerp-het-stadsklimaat-bepaalt-sanda-lenzholzer.html>*
- Online cursus: Sports and Building Aerodynamics, door Bert Blocken (vrij technisch verhaal)  
*Gratis te volgen via: <https://www.coursera.org/learn/sports-building-aerodynamics>*