



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Post HBO Opleiding Bouwfysica

Windklimaat in de gebouwde omgeving

ir. A. Plaisier, dr. ir. L. Aanen
cursus 2016-2017



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Voorwoord

Deze reader is voor een groot deel het werk van Arjan Plaisier, die jarenlang het gezicht was van het onderdeel Stedenbouwfysica van de Post HBO opleiding Bouwfysica. Door technische ontwikkelingen zijn er een aantal onderdelen die om wijzigingen vroegen. Bij het onderdeel normen is de behandeling van de oude TNO-norm geminimaliseerd en wordt er meer aandacht gegeven aan de officiële norm de NEN 8100. Bij de onderzoeksmethoden is de tool Knowind geschrapt en wordt er meer aandacht gegeven aan CFD berekeningen. Verder zijn er een aantal afbeeldingen en foto's vervangen door recentere exemplaren.



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Contents

1.Inleiding.....	5
2.Theoretische achtergronden.....	6
2.1.De atmosferische grenslaag of de menglaag.....	6
2.2.De wind.....	12
2.3.Wind bij gebouwen.....	18
2.3.1.Stromingen rond gebouwen.....	18
2.3.2.Windklimaat bij (meerdere) gebouwen.....	21
2.3.3.Winddrukken op gebouwen.....	32
3.Normen.....	33
3.1.Achtergronden en historie.....	33
3.2.Normen volgens NEN 8100.....	35
3.2.1.Beslismodel.....	35
3.2.2.Windhinder.....	36
3.2.3.Het gevaarcriterium.....	37
3.2.4.Meteorologische gegevens.....	37
4.Onderzoeksmethoden.....	40
4.1.Analytisch onderzoek.....	40
4.2.Windtunnelonderzoek.....	42
4.3.Computational Fluid Dynamics (CFD).....	42
5.Windtunnelonderzoek.....	43
5.1.Vorbereiding.....	43
5.2.Windtunnelmetingen: windklimaat op looppniveau.....	44
5.2.1.Tunnel.....	44
5.2.2.Maquette.....	45
5.3.Welke onderzoeken nog meer in de windtunnel?.....	48
5.4.Rapportage.....	48
5.5.Leren (van fouten).....	49



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

6.CFD onderzoek.....	50
6.1.Theorie.....	50
6.2.CFD-pakketten.....	51
6.3.CFD-berekeningen aan het windklimaat.....	52
7.Maatregelen ter verbetering van het windklimaat.....	53
7.1.Fundamentele aanpassingen.....	53
7.1.1.Stedebouwkundig plan.....	53
7.1.2.Individuele gebouwen.....	53
7.2.Maatregelen bij gebouwen waarvan het ontwerp “vast” ligt.....	54
7.2.1.Verplaatsen kritische gebieden.....	54
7.2.2.Plaatselijk verbeteren windklimaat.....	54



1. Inleiding

Het vakgebied van de windtechnologie in het bouwproces heeft in de eerste plaats betrekking op het windklimaat op loopniveau rondom gebouwen. Hoge gebouwen, maar ook gebouwen van 5 of 6 bouwlagen met een grote lengte, kunnen de luchtsnelheden op loopniveau belangrijk beïnvloeden. Hoge en minder hoge gebouwen kunnen zo gelegen zijn ten opzichte van elkaar, dat de stedenbouwkundige situatie leidt tot een ongewenst windklimaat. Dit is ook mogelijk voor gebouwen die afzonderlijk beoordeeld niet tot een slecht windklimaat zouden leiden. Vooral doorgangen tussen gebouwen kunnen tot hinder leiden, evenals onderdoorgangen. Al bij normale gebouwhoogten geven gebouwvingangen die in (tussen- of) onderdoorgangen zijn gelegen vaak aanleiding tot problemen. De gebouwvorm is daarbij eveneens van grote invloed op het voorkomen van verslechtingen van het windklimaat. Ook de bestemming van het gebouw kan van invloed zijn op het voorkomen van windhinder. Het windklimaat rondom gebouwen waar oude of invalide mensen komen is kritischer; evenzo bij winkels, waar het wenselijk is dat mensen voor de etalage blijven staan. Extra kritisch zijn die winkels waar de ondernemer zijn (kwetsbare) handelsvoorraad deels buiten etaleert (kledingzaken, maar vooral bloemenwinkels).

Naast bestudering van de invloed die het windklimaat op loopniveau ondervindt van hoge en grote gebouwen heeft de windtechnologie in het bouwproces betrekking op:

- de windkrachten op gebouwen en constructies,
- de ventilatie van het gebouw (vooral bij natuurlijke ventilatie),
- winddrukken ter plaatse van de roosters voor de toe- en afvoer van de (mechanische) ventilatie,
- verspreiding van verontreinigingen.

Incidenteel wordt aandacht gegeven aan lawaai ten gevolge van wind. In deze cursus wordt vooral aandacht gegeven aan het eerste aspect: het windklimaat op loopniveau.

Bij vele grote projecten, waarbij het windklimaat op loopniveau onderwerp van studie wordt, wordt in het ontwerpstadium hieraan al (enige, vaak onvoldoende) aandacht gegeven. Wanneer je er als adviseur in dit vroege stadium bij betrokken bent, kun je mogelijk invloed uitoefenen op het gebouwontwerp (de massastudie). Met een gebouwontwerp waarbij rekening is gehouden met het aspect wind kunnen problemen vaak voorkomen worden: voorkomen is beter dan verhelpen.

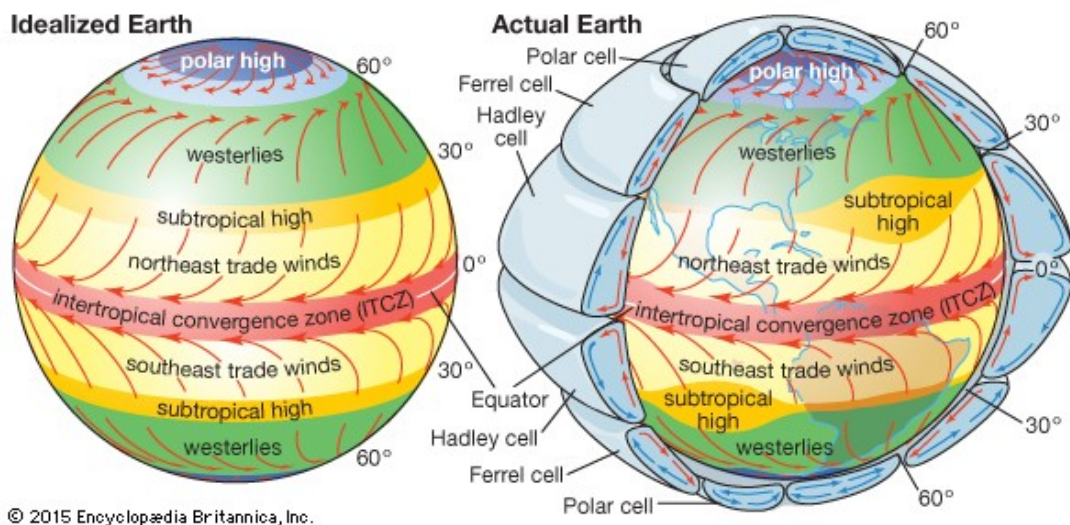
Literatuur

algemeen: zie Aynsley e.a.: Architectural Aerodynamics [1], SBR-publicaties [2] en [3].

2. Theoretische achtergronden

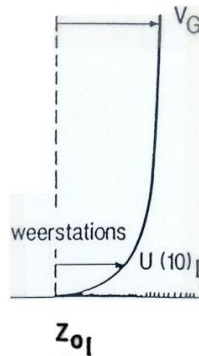
2.1. De atmosferische grenslaag of de menglaag

De atmosfeer is de laag rond de aarde die uit gassen bestaat. De atmosfeer heeft een dikte van enkele duizenden kilometers, maar de meeste ‘lucht’ bevindt zich in de onderste laag: de massa neemt met toenemende hoogte af. De onderste laag van de atmosfeer, de troposfeer, is een laag met een dikte van 10 km bij de polen tot ongeveer 17 km bij de evenaar. In deze laag bevindt zich 90% van de massa van de gassen waaruit de atmosfeer bestaat. In de onderste 5 km van de troposfeer bevindt zich ongeveer 50% van de eerder genoemde massa van de atmosfeer. Het weer zoals dat op de aarde wordt ervaren wordt gevormd in de troposfeer: dat - in verhouding tot de diameter van de aarde - heel dunne laagje lucht. De windstromingen die in de atmosfeer voorkomen zijn het gevolg van luchtdrukverschillen die over grote afstanden zijn ontstaan. De stroming vindt plaats van een hogedrukgebied naar een lagedrukgebied. Luchtdrukverschillen zijn vooral het gevolg van een verschil in opwarming van de lucht. Bij opwarming zet lucht uit. Voor meer achtergrondinformatie: zie Wieringa en Rijkoort [4]. Op grotere hoogte boven het aardoppervlak kan de lucht vrij bewegen onder invloed van de luchtdrukverschillen. Wel wordt de luchtstroming daar beïnvloed door opstijgende luchtstromingen en door de aardrotatie, figuur 1.



Figuur 1: Luchtstromingspatroon op groter hoogten in de atmosfeer

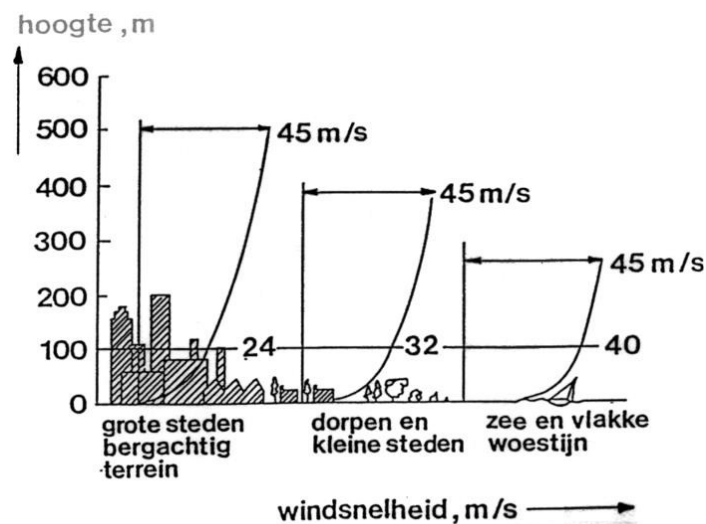
Direct boven het aardoppervlak wordt de windsnelheid door de bodem afgeremd: zowel door begroeide en bebouwde oppervlakken, als door weilanden of door een wateroppervlak van een meer of van de zee. Afremming vindt ook plaats door obstakels - door bomen en struiken, bossen, vrijstaande gebouwen en steden - en door verschillen in de hoogte van het maaiveld, o.a. door dijken, heuvels en bergen. De afremming van de luchtsnelheid is het sterkst direct boven de bodem, en neemt af met de hoogte. Er ontstaat een snelheidsprofiel, waarbij de luchtsnelheid toeneemt met de hoogte, figuur 2.



Figuur 2: snelheidsprofiel in aardse grenslaag

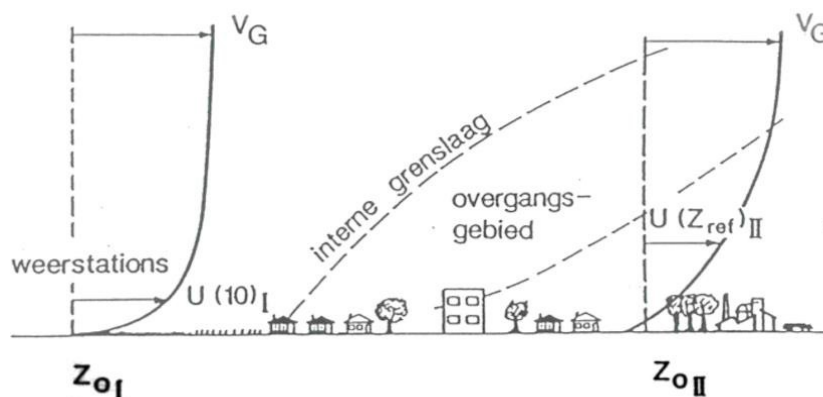
Door de ruwheid van het aardoppervlak is de turbulentie op kleine hoogte groot. Hoe groter de hoogte, hoe meer de turbulentie afneemt. Het turbulentieprofiel is dus afwijkend van het snelheidsprofiel. De hoogte van de luchtlaag waarin de stroming beïnvloedt wordt door de ruwheid van het aardoppervlak, wordt de atmosferische of aardse grenslaag genoemd. Deze hoogte is afhankelijk van de ruwheid van het aardoppervlak en bedraagt zo'n 250 tot 500 m. In deze dunne laag is de menging van de lucht redelijk goed: je zou het kunnen beschouwen als de lucht die we gebruiken: de lucht waarin de stad of de regio een of meerdere dagen ademt. In deze laag komen de uitlaatgassen terecht, met de lucht uit de atmosferische grenslaag of de menglaag.

Boven een gladde zee is de atmosferische grenslaag het kleinste, boven een grote stad met veel hoogbouw (New York) het grootste. Bij een dunne atmosferische grenslaag (in de polder en, bij aanlandige wind: aan het strand) zal de luchtsnelheid op loophoogte groter zijn dan bij een dikke grenslaag (de grote stad), figuur 3.



Figuur 3: windsnelheidsprofiel voor verschillende terreinruwheid

Natuurlijk is er over een behoorlijke afstand een zekere terreinruwheid nodig, voordat de bij die ruwheid behorende grenslaag is ingesteld. Bij verandering van de terreinruwheid zal het snelheidsprofiel (en de hoogte van de grenslaag) zich pas na die afstand hebben ingesteld. Bij iedere ruwheidsovergang ontstaat een zogenaamde interne grenslaag, waarin de stroming zich geleidelijk aanpast aan de nieuwe terreinruwheid, zoals gegeven in figuur 4.



Figuur 4: Verandering van het snelheidsprofiel bij een ruwheidsovergang

Ook de verticale luchtstromingen bij sterke opwarming van het aardoppervlak zijn op de dikte van de grenslaag van invloed. Daarom wordt over het algemeen de dikte van de grenslaag gegeven bij atmosferische stabiliteit. Windhinder ontstaat vooral bij harde wind. Door de turbulentie ontstaat dan een zodanige menging van de lucht over de hoogte, dat er geen verticale temperatuursgradiënt van belang meer aanwezig is.

Het windsnelheidsprofiel (het verloop van de windsnelheid met de hoogte) kan als volgt beschreven worden:

$$U_z = u^*/k \cdot \ln\{(z-d)/z_0\} \quad (1)$$

met:

U_z windsnelheid op hoogte z

u^* wrijvingsnelheid

k constante van Von Karman: 0,40

z hoogte boven het aardoppervlak

z_0 ruwheidslengte, afhankelijk van het terrein

d verschuivingslengte

Het hiervoor gegeven verband tussen de windsnelheid op hoogte z en de hoogte geldt indien:

$$z > 20 z_0 + d$$

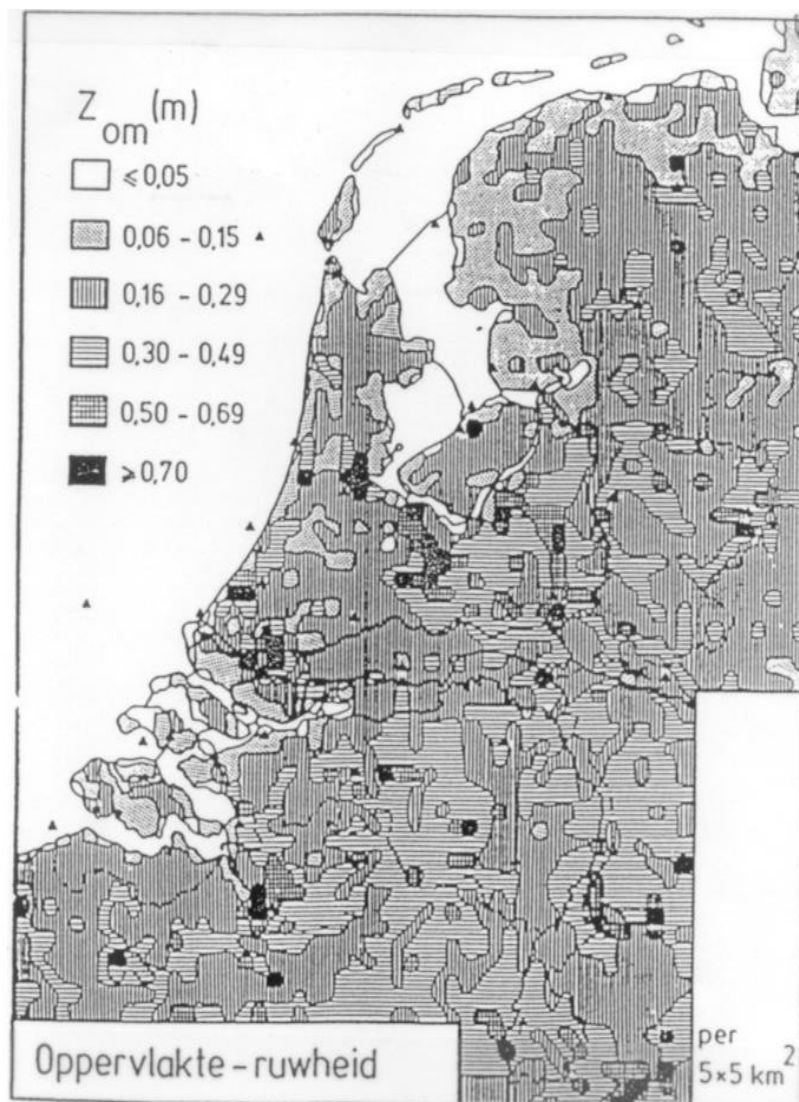
en

$$z \ll z_m$$

met z_m de hoogte van de menglaag boven het aardoppervlak: de menghoogte. Boven een stad zal de hoogte van

deze menglaag of atmosferische grenslaag nog bepaald zijn door de ruwheid van de omgeving (stroomopwaarts) buiten de stad. Tot een hoogte van $20 z_0 + d$ wordt de snelheid bepaald door de straten, pleinen, gebouwen en bomen: deze laag wordt de ‘stedelijke laag’ of ‘urban canopy’ genoemd.

De ruwheidslengte z_0 is een stromingsparameter, geen geometrische factor die uit de hoogte van een obstakel kan worden afgeleid. In tabel 1 wordt voor een aantal terreintypen de ruwheidslengte gegeven. Een indicatie van de oppervlakteruwheid, als gemiddelde voor vakken van 5 bij 5 km, is gegeven in figuur 5.



Figuur 5: ruwheidslengte



Afgeleid kan worden dat de verhouding van de windsnelheid op twee hoogten gegeven wordt door:

$$U_1 / U_2 = \ln\{(z_1-d)/z_0\} / \ln\{(z_2-d)/z_0\} \quad (2)$$

met:

U_1, U_2 windsnelheid op hoogte 1 resp. 2

z_1, z_2 hoogte 1 resp. 2

z_0 ruwheidslengte, afhankelijk van het terrein

d verschuivingslengte

De hier gegeven formule voor de berekening van de verhouding van de windsnelheid op twee hoogten wijkt af van de formule uit SBR 65, pag. 21. Deze laatste formule, een empirische machtswet, leidt, met name op grotere hoogte, tot een minder juiste uitkomst. Er zijn echter landen waar de machtswet nog steeds gebruikt wordt in de officiële normen op het gebied van bijvoorbeeld windbelasting.

Tabel 1: Beschrijving van de (door Wieringa en Rijkooft gewijzigde) ruwheidsklassen van Davenport

Landschap type	Ruwheidslengte [m]	verschuivingslengte [m]	beschrijving
zee	0,0002	0	open zee of plas, met vrije strijklengte van ten minste 1 km
glad	0,005	0	landoppervlak zonder merkbare obstakels of begroeiing, bijvoorbeeld: wad, strand, ijsvlakte, sneeuwlandschap zonder bomen
open	0,03	0	vlak land met alleen oppervlakkige begroeiing (gras) en soms geringe obstakels, bijvoorbeeld: startbanen, weidelandschap zonder singels, braakliggend bouwland
ruwweg open	0,1	0	bouwland met regelmatig laag gewas, of weideland met sloten die minder dan 20 slootbreedten van elkaar liggen. Verspreide obstakels (lage heggen, enkelvoudige rijen kale bomen, alleen liggende boerderijen) kunnen voorkomen op onderlinge afstanden van ten minste 20 x hun eigen hoogte
ruw	0,25	0,7	bouwland met afwisselend hoge en lage gewassen. Grote obstakels (rijen bebladerde bomen, lage boomgaarden) met onderlinge afstanden van ca. 15 x hun hoogte. Wijngaarden, maisvelden e.d.
zeer ruw	0,5	0,7 h	Obstakelgroepen (grote boerenhofsteden, stukken bos) gescheiden door open ruimten van ca. 10 x hun hoogte. Verspreid struikgewas, jong dicht opeen gepland bos, boomgaarden
gesloten	1,0	0,8 h	Bodem regelmatig en volledig bedekt met vrij grote obstakels, met tussengelegen ruimten niet groter dan een paar obstakelhoogten. Grote bossen, laagbouw in dorpen en kleine steden
stadskern	≥ 2	0,8 h	Centrum van grote stad met afwisselend hoog- en laagbouw. Bossen met grote bomen en veel onregelmatige open plekken



In een stedelijk gebied kan de windsnelheid over de eerste hoogte vanaf maaiveld (in de stedelijke laag) niet worden beschreven met bovenstaande formule. Het 'windveld' tussen de gebouwen is zeer complex en wordt - zoals eerder aangegeven - bepaald door de gebouwen en de stedenbouwkundige situatie. De hiervoor gegeven formule is slechts toepasbaar vanaf een zekere hoogte: de verplaatsingshoogte, ook wel de verschuivingslengte genoemd. Bij benadering is de verplaatsingshoogte $\frac{1}{2}$ à $\frac{2}{3}$ van de gemiddelde hoogte van de obstakels ($20 z_0+d$). Voor steden en bossen is deze hoogte in ieder geval meer dan de hoofdhoogte, waarop de windsnelheid in verband met windhinder wordt bepaald.

De turbulentie is:

$$T = \sigma_U \quad (3)$$

met:

T turbulentie

σ_U standaard afwijking in de snelheid

De turbulentie-intensiteit I :

$$I = T/U \quad (4)$$

met:

U gemiddelde windsnelheid

Voor het verticale turbulentieprofiel wordt wel aangehouden:

$$I_z = \sigma_{Uz}/U_z \approx 0,96/\ln(z/z_0) \quad (5)$$

met:

I_z turbulentie-intensiteit op hoogte z

σ_{Uz} standaardafwijking in de snelheid

U_z gemiddelde windsnelheid op hoogte z

z hoogte

z_0 ruwheidslengte

Tabel 2 geeft voor een hoogte van circa 30 m de turbulentie-intensiteit in %.

Tabel 2: turbulentie-intensiteit in %

Landschap type	ruwheidslengte [m]	turbulentie-intensiteit [%]
zee	0,0002	8
open	0,03	14
ruwweg open	0,1	17
zeer ruw	0,5	23
gesloten	1	28

Stroming is turbulent indien het Reynoldsgetal groot is: $Re > 3000$.

Voor het getal van Reynolds geldt:

$$Re = UL/v \quad (6)$$

met:

Re reynoldsgetal

U snelheid

L lengtemaat

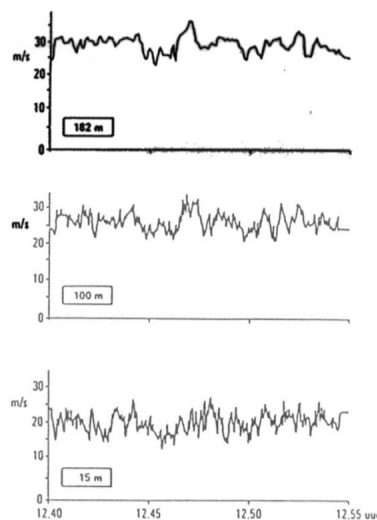
v kinematische viscositeit

Voor de lengtemaat kan bijvoorbeeld de hoogte van een gebouw worden genomen. Ook de menglaag is een turbulente stroming. Hierbij is de hoogte van de menglaag de lengtemaat.

Boven de atmosferische grenslaag of menglaag is de stroming niet meer turbulent, terwijl het getal van Reynolds toch groot is. De stroming is in dat geval zo ver van het aardoppervlak verwijderd, dat het getal van Reynolds geen goede maat meer is voor de bepaling of de stroming laminair of turbulent is.

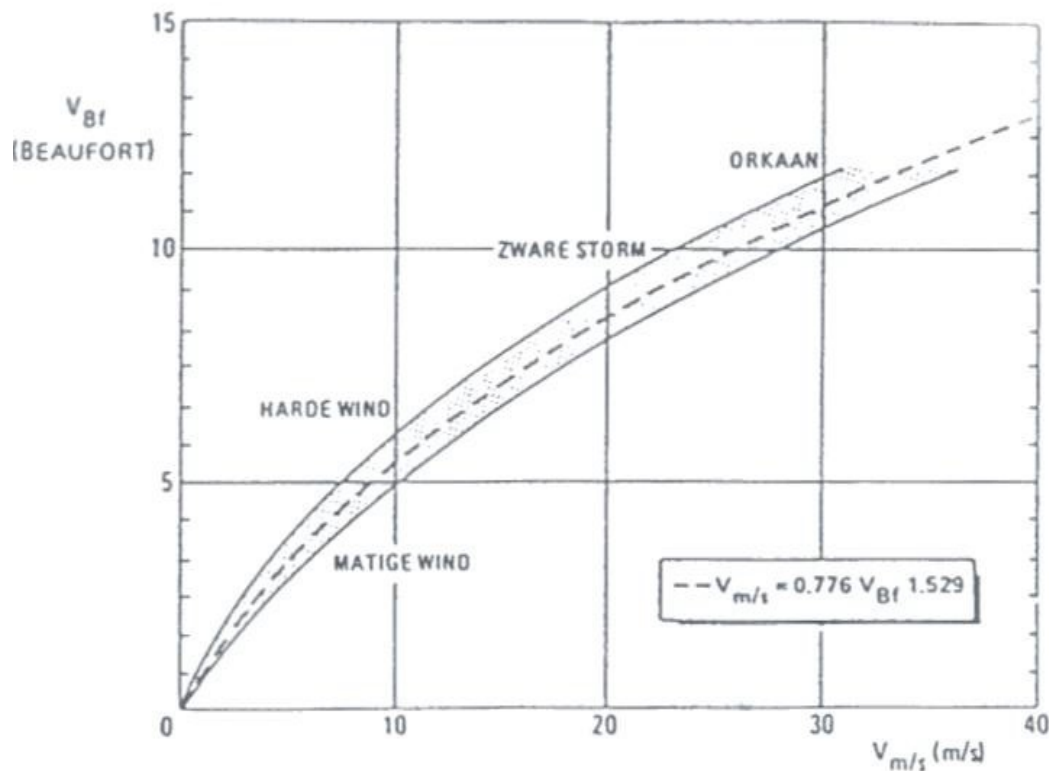
2.2. De wind

De windsnelheid en ook de windrichting variëren met de tijd. Dit geldt bijvoorbeeld als gelet wordt op een grote tijdschaal: een jaar. Bekend is dat er in het voor- en najaar gemiddeld meer en zwaardere stormen voorkomen dan in de zomer. Ook op kleinere schaal, een etmaal, is die variatie bekend: de gemiddelde windsnelheid aan het eind van de dag is gewoonlijk lager: de wind gaat 's avonds vaak liggen. Op de uurschaal is er ook een behoorlijke variatie in de windsnelheid. Figuur 6 geeft de windsnelheid op een drietal hoogten boven maaiveld, waarbij te zien is dat de turbulentie op grote hoogte minder is dan op kleine hoogte.



Figuur 6: In hoogte en tijd variërende windsnelheid

Bij het KNMI worden de uurgemiddelde windsnelheden geregistreerd, evenals de windrichting. Deze metingen vinden plaats op 10 m hoogte. De bekende indeling van de windsnelheid door Beaufort is gegeven in tabel 3. De door Beaufort gegeven indeling geeft een niet-lineair verband tussen windsnelheid en de windsterkte in 'Beaufort', figuur 7. De windsnelheid op de Beaufortschaal heeft betrekking op een hoogte van 10 m, evenals de registratie door het KNMI en de opgaven die het KNMI doet. De windsnelheid op loophoogte is in het vrije veld (open landschap) dan circa 70% van deze snelheid.



Figuur 7: Relatie tussen windsnelheid in m/s en in Beaufort

Doordat de wind zo sterk tijdsafhankelijk is, moet voor een statistische benadering worden gekozen. Gebruikelijk is dat de uurgemiddelde windsnelheid en de uurgemiddelde windrichting worden geregistreerd. De gemiddelde afwijking van de windsnelheid op ieder moment ten opzichte van de uurgemiddelde windsnelheid is de turbulentie. Deze gemiddelde afwijking gedeeld door de gemiddelde windsnelheid is de turbulentie-intensiteit (vereenvoudigde beschouwing). De windsnelheid varieert niet alleen in de stromingsrichting, maar ook in de (twee) richtingen daar loodrecht op.

In de aardse grenslaag is de gemiddelde windsnelheid horizontaal gericht, de turbulentie veroorzaakt ondermeer de verticale bewegingen. Wind kan van grote hoogte- waar en grotere snelheid heerst - omlaag worden getransporteerd. Hierdoor kan boven het aardoppervlak een kortstondige toename van de windsnelheid optreden: de windvlagen. Deze windvlagen, die in duur en in sterkte kunnen variëren, zijn belangrijk voor de al dan niet ondervonden windhinder.

Tabel 3: windsnelheid naar Beaufort.

wind- kracht	gemiddelde windsnelheid		benaming in weerbericht	omschrijving
	m/s	km/h		
0	0 - 0,2	0 - 1	windstil	rook stijgt recht omhoog
1	0,3 - 1,5	1 - 5	zeer zwakke wind	kalme, onopgemerkte wind, richting alleen aan de rook te zien
2	1,6 - 3,3	5 - 12	zwakke wind	wind goed herkenbaar aan rookpluimen, wind even merkbaar voor het gevoel, bladeren beginnen te ritselen, windvanen kunnen bewegen
3	3,4 - 5,4	12- 20	vrij matige wind	bladeren en twijgen zijn voortdurend in beweging; een lichte vlag ontplooit zich in de wind
4	5,5 - 7,9	20 - 29	matige wind	stof en papier beginnen van de grond op te dwarrelen; kleine takken beginnen te bewegen
5	8,0 - 10,7	29 - 39	vrij krachtige wind	kleine bebladerde takken beginnen te zwaaien; er vormen zich gekuifde golven op meren en kanalen
6	10,8 - 13,8	39 - 50	krachtige wind	grote takken bewegen; men hoort de wind in de telegraafdraden fluiten; paraplu's kunnen slechts met moeite vastgehouden worden
7	13,9 - 17,1	50 - 62	harde wind	gehele bomen bewegen; de wind is hinderlijk bij het lopen
8	17,2 - 20,7	62 - 75	stormachtige wind	twijgen breken af; het voortgaan wordt ernstig belemmerd
9	20,8 - 24,4	75 - 88	storm	veroorzaakt lichte schade aan gebouwen (schoorsteenkapen en dakpannen worden afgerukt)
10	24,5 - 28,4	88 - 102	zware storm	ontwortelde bomen; aanzienlijke schade aan gebouwen enz. (komt op land zelden voor)
11	28,5 - 32,6	102 - 117	zeer zware storm	veroorzaakt uitgebreide schade. Komt op land zeer zelden voor
12	> 32,6	> 117	orkaan	idem

De momentane windsnelheid kan worden beschreven als:

$$u = U + u' \quad (7)$$

met:

u de momentane windsnelheid langs de x-as in de gemiddelde windrichting

U de uurgemiddelde windsnelheid in die richting

u' de momentane afwijking van de uurgemiddelde windsnelheid



Onder de aanname dat de momentane afwijkingen van de uurgemiddelde snelheid u' normaal verdeeld zijn rond U , kunnen de variaties beschreven worden met de standaarddeviatie σ .

In het vrije veld, in een open landschap geldt:

$$U_{1,75} / U_{10} = 0,7 \text{ (leidt af met formule 2)}$$

$$\sigma_{10} = 0,17 U_{10} \text{ (leidt af met formule 3)}$$

$$\sigma_{1,75} = 0,25 U_{1,75} \text{ id.}$$

Windhinder wordt niet zozeer bepaald door de gemiddelde windsnelheid, maar door de windvlagen (vlagerigheid of buigigheid van de wind). Door de meeste onderzoekers wordt als windhindercriterium een effectieve windsnelheid U_{eff} gebruikt.

$$U_{eff} = U + k \sigma = U (1 + k I) \quad (8)$$

met:

U_{eff} effectieve windsnelheid

U uurgemiddelde windsnelheid

k gewichtsfactor, die aangeeft hoe zwaar de vlagerigheid mee wordt gerekend

σ standaarddeviatie voor de windsnelheidsvariaties in de richting van de uurgemiddelde windsnelheid

I turbulentie-intensiteit

NB. diverse auteurs houden voor de drempel waarboven de effectieve windsnelheid U_{eff} als windhinder wordt aangemerkt verschillende waarden aan. Veel wordt gebruikt $U_{eff} < 5$ m/s, maar ook $U_{eff} < 6$ m/s. Ook voor k worden verschillende waarden aangehouden. De waarde van $k=3$ wordt veel gehanteerd en geeft een effectieve windsnelheid voor een 3 secondenvlaag.

Ter herinnering:

statistiek, normale of Gaussische verdeling:

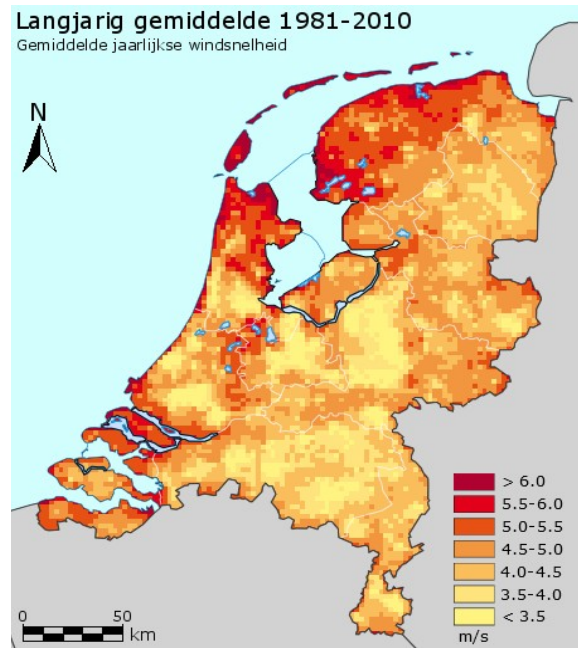
$$k=0: 50\%, \quad k=1: 17\%, \quad k=2: 2,5\%; \quad k=3: 0,13\%.$$

Wanneer we een effectieve windsnelheid van 6 m/s toestaan, leidt dit tot een toelaatbaar uurgemiddelde windsnelheid van 3,5 m/s op een hoogte van 1,75 m, en van 5,0 m/s op een hoogte van 10 m(!).

De drempelsnelheid die wordt aangehouden voor de toetsing van het comfortcriterium in de Nederlandse regelgeving is 5 m/s op een hoogte van 1,75 m., zie hoofdstuk 3.

De gemiddelde windsnelheid aan de kust is veel hoger dan in het binnenland, zie ook de klimaatatlas [8] en figuur 8. In de klimaatatlas is ook de seizoensvariatie van de windsnelheid duidelijk af te lezen. Figuur 9 geeft de jaargemiddelde windsnelheid boven Den Haag. De overheersende windrichting, in Nederland ruwweg tussen zuid en west, kan uit de windroos van de verschillende meteo-stations afgeleid worden, zie daarvoor ook [8]. Figuur 10 geeft de windroos voor De Bilt.

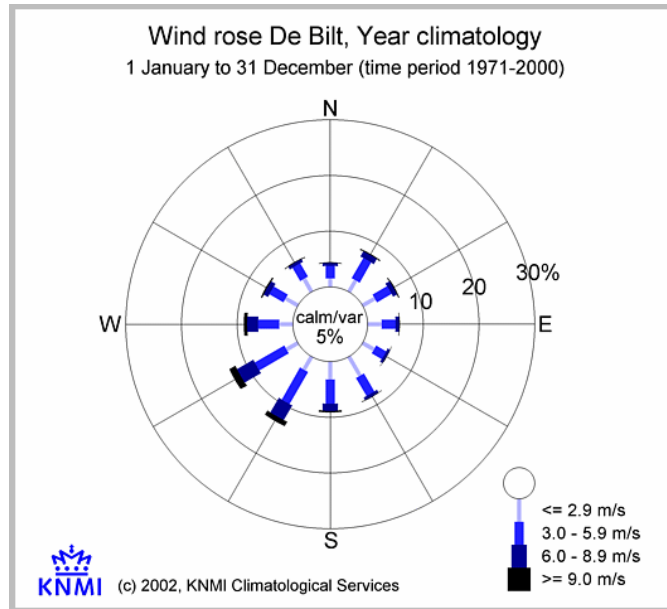
Metingen bij de meteo-stations moeten volgens internationale afspraak boven vlak weiland (ruwheid 0,03) geschieden, op 10 m hoogte, met een voldoende grote strijklengte van het open voorland. In de praktijk komt bij sommige meteo-stations toch beschutting voor. Voor deze beschutting kan gecorrigeerd worden. Het meetveld van het station De Bilt ligt echter zo beschut, dat daar sterk gecorrigeerd diende te worden.



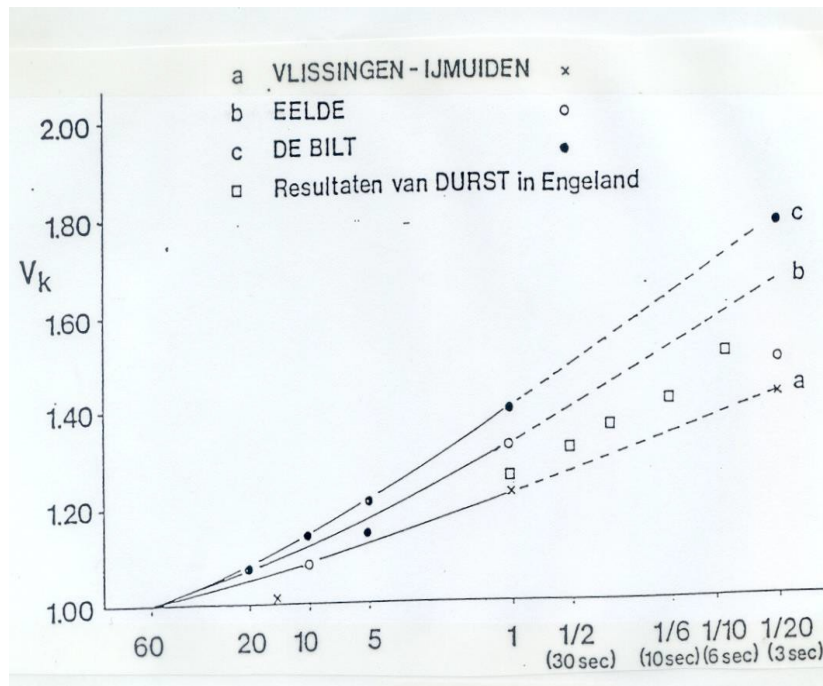
Figuur 8: gemiddelde windsnelheid op 10 m, in m/s (bron Bosatlas)



Figuur 9: De jaargemiddelde windsnelheid (m/s) boven Den Haag op 30m hoogte



Figuur 10: Windroos De Bilt



Figuur 11: vlaagsnelheid aan de kust en op grotere afstand van de kust



Hoewel landinwaarts de gemiddelde windsnelheden lager zijn, neemt de vlagerigheid van de wind als gevolg van de toegenomen ruwheid landinwaarts juist toe, figuur 11.

Met de gegeven ruwheidslengten kan berekend worden dat de windsnelheid tussen 10 en 100 m boven open zee met een factor 1,25 toeneemt, boven een grote stad met een factor 2,5. Wanneer de windsnelheid op 100 m hoogte in beide situaties gelijk is, zal in de stad dus een veel lagere windsnelheid heersen dan op het strand (bij wind van zee).

Door de veel grotere turbulentie van de wind in/boven een grote stad zal de vlagfactor in een stad veel groter zijn: deze kan wel een waarde 2 of hoger bereiken. In een open landschap bedraagt de vlagfactor tot circa 1,5 a 1,6. Aan de kust zal – bij zeewind – de vlagfactor nog lager zijn: orde 1,4.

In de windrichting kunnen veranderingen optreden. Boven een open landschap kan de windrichting binnen enkele minuten over een hoek van zo'n 20 tot 40° variëren. In een stedelijk gebied, met grotere ruwheid kunnen variaties in windrichting voorkomen over hoeken van circa 60°.

2.3. Wind bij gebouwen

2.3.1. Stromingen rond gebouwen

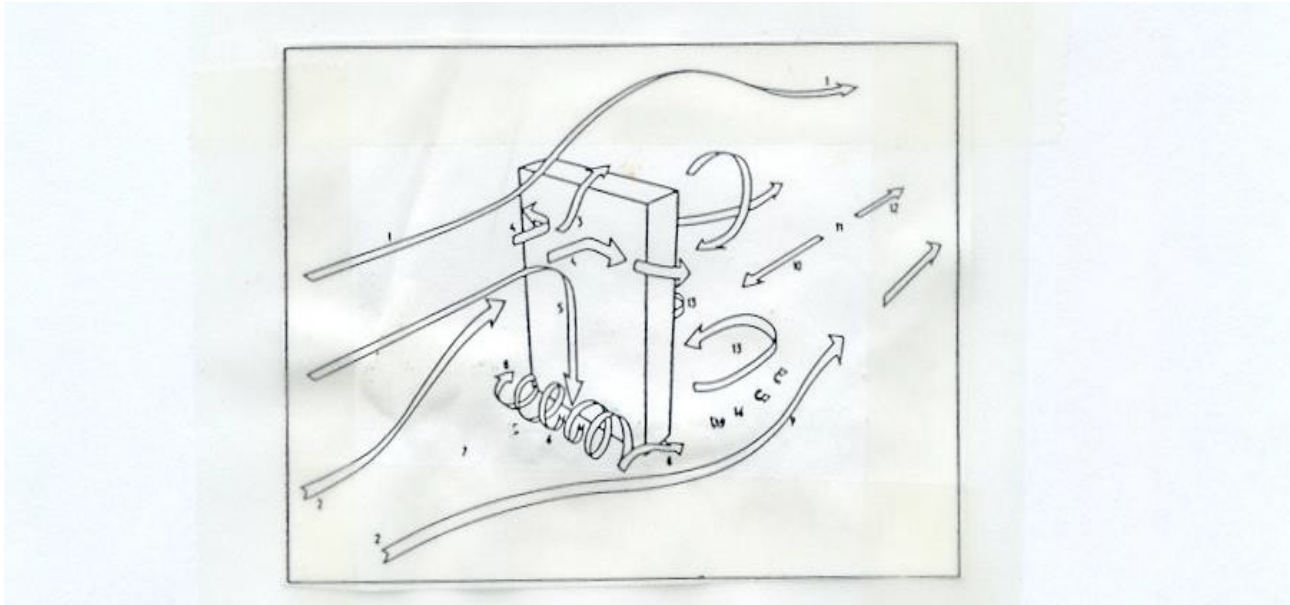
Een gebouw beïnvloedt de windstroming. De grootste invloed wordt bij een eenvoudig rechthoekig gebouw, gezien vanuit de richting van de windstroming, gevonden bij de gebouwhoeken aan de voorzijde en vandaar uit uitwaaierend tot naast het gebouw.

Een obstakel in een atmosferische grenslaagstroming wekt een zeer ingewikkeld stromingspatroon op. De (soms ongestoord) aanstromende lucht – die op grotere hoogte een hogere snelheid heeft dan op looppniveau – moet over en om het gebouw stromen (wet van behoud van massa). Dit leidt tot een zeer complex stromingspatroon, waarbij (ook op looppniveau) een zeer turbulente stroming ontstaat. De stroming rond een vliegtuig is met computermodellen redelijk te berekenen, de stroming in het turbulente gebied achter een vliegtuig niet. Het stromingspatroon op looppniveau is te vergelijken met de turbulente stroming achter het vliegtuig.

Eén rechthoekig gebouw

Windstroming

Wanneer een gebouw loodrecht wordt aangestroomd, ontstaat op ongeveer $\frac{2}{3}$ tot $\frac{3}{4}$ van de hoogte – aan de loefzijde – een drukpunt of stuwpunt. Boven dit punt stroomt de lucht naar boven (en naar opzij), onder dit punt stroomt de lucht naar beneden (en opzij). Op maaiveldniveau ontstaat aan de loefzijde van het gebouw een wervel, die naar de gebouwhoeken stroomt, zie figuur 12.



Figuur 12: Op maaiveldniveau ontstaat aan de loefzijde van het gebouw een wervel met een horizontale as. In dit gebied stroomt de lucht naar de gebouwhoek

Doordat er ook aan de zijkanten van de voorgevel lucht naar beneden stroomt, wordt de hoeveelheid lucht die vlak boven maaiveld in de wervel moet worden afgevoerd naar de hoeken toe gezien steeds groter. De luchtsnelheden nemen naar de hoek toe steeds meer toe. Bij de hoeken van het gebouw buigen de wervels af naar de lijzijde van het gebouw. De kurkentrekkerwervels die zo ontstaan staan onder een zekere hoek van het gebouw af, niet evenwijdig met de zijgevels. Deze zogenaamde cornerstreams vormen in een lobvormig gebied (smal bij de gebouwhoek aan de loefzijde van het gebouw, breder wordend naar het gebied naast en achter het gebouw) een hoge turbulentie. In dit turbulente gebied zijn de windsnelheden hoog, bovendien waaieren de cornerstreams wat heen en weer. De cornerstreams hebben een lengte van ongeveer 1 à 2 maal de hoogte van het gebouw. In de cornerstreams komen ook wervels voor met een nagenoeg verticale as: cycloonvormige wervels. Een voetganger die door een cornerstream loopt, ondervindt over een korte afstand een zeer sterke toename van de windsnelheid. Bovendien verandert de richting waaruit de wind op hem of haar aangrijpt (de windrichting) eveneens over een relatief korte afstand die wordt afgelegd. In dergelijke gebieden wordt vaak veel 'windhinder' ondervonden. Ook tussen de zijkanten van het gebouw en de cornerstreams ontstaan cycloonvormige wervels. Deze verticale wervels zijn het gevolg van de lucht die (in de cornerstreams) van voor het gebouw naar de lijzijde stroomt. De verticale wervels groeien aan, en laten na enige tijd weer los. Vaak gebeurt dit afwisselend voor de verschillende zijden van het gebouw. De cornerstreams zwaaien hierdoor wat heen en weer.

Voor het gebouw (gezien vanuit de windrichting) ontstaat dus een naar beneden gerichte luchtstroming. In de gebieden naast het gebouw zijn de luchtstromingen vooral horizontaal gericht. Voor het gebouw heerst een overdruk. Achter het gebouw ontstaat een gebied waar onderdruk heerst. In dit gebied komen wervels voor, waardoor de windsterkte en windrichting in korte tijd kan veranderen. Direct achter het gebouw kan een gebied met een naar het gebouw gerichte stroming ontstaan. De windsnelheid achter het gebouw is over het algemeen laag; het is een relatief luw gebied.

Doordat de windsnelheid op grotere hoogte hoger is dan op loophoogte, kan gesteld worden dat de windsnelheid die op dakhoogte heerst naar beganegrondniveau wordt gebracht. Dit gaat echter niet meer op voor hoge slanke gebouwen. Bij gebouwen die hoger zijn dan ruwweg twee à drie maal de breedte (gezien vanuit de stromingsrichting) neemt de windhinder nog weinig toe met de hoogte. SBR 65 geeft dat het invloedsgebied weinig toeneemt bij een hoogte van de voorgevel die meer is dan 1,25 maal de breedte. Een verhoging van bijvoorbeeld het VNO-kantoor met enkele bouwlagen zal slechts een beperkt effect op het windklimaat rondom dat gebouw hebben.

Drukveld en invloedszone

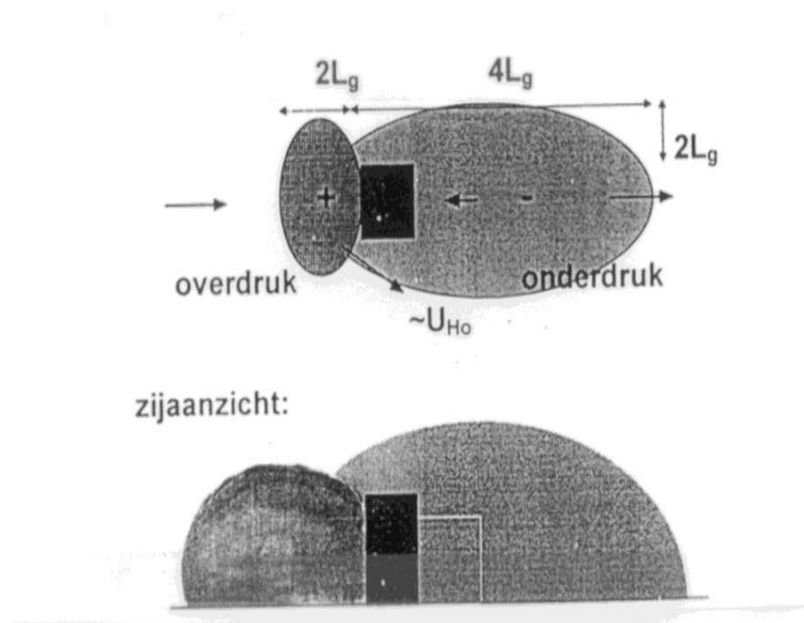
Voor het gebouw (loefzijde) ontstaat een overdrukgebied.

We definiëren L_g als de minimumwaarde van:

- de breedte van de voorgevel, en
- twee maal de hoogte van de voorgevel.

Dit overdrukgebied heeft een diepte (gerekend vanaf de voorgevel) van circa 2 maal L_g .

Achter het gebouw ontstaat een gebied waarin onderdruk heerst. De diepte van dit gebied is, gerekend vanaf de voorgevel, circa 4 maal L_g , zie ook figuur 13.



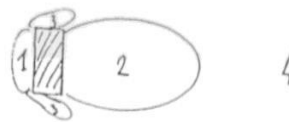
Figuur 13: Achter het gebouw is een gebied waar onderdruk heerst. De diepte van dit gebied gerekend vanaf de voorgevel, is ongeveer acht maal de hoogte van de voorgevel, of, als dit kleiner is, vier maal de breedte van de voorgevel

In SBR 65 wordt (pag. 86 e.v.) nog wat uitgebreider ingegaan op een (iets anders gedefinieerd) invloedsgebied. NB het gebruik van een invloedsgebied kan nuttig zijn om in een rapportage aan te geven tot waar de invloed van

het bouwplan zich uitstrekt.

Deze drukvelden kunnen tot luchtstromingen leiden: lucht stroomt van een plaats met een hoge luchtdruk naar een plaats met een lagere luchtdruk. Vooral wanneer luchtstroming mogelijk is van een overdrukgebied naar een onderdrukgebied via een onderdoorgang, of een (smalle) tussendoorgang kunnen grote windsnelheden voorkomen.

Het gebied voor het gebouw wordt aangeduid met stuwzone, direct achter het gebouw is de recirculatiezone. Achter de recirculatiezone ligt het zoggebied. Bij de (voorste) hoeken en naast (tot schuin achter) het gebouw vindt men de cornerstreams. In deze cornerstreams worden de hoogste windsnelheden gevonden, zie ook figuur 14.



- 1 stuwzone
- 2 recirculatiezone
- 3 cornerstream
- 4 zoggebied

Figuur 14: Naast het gebouw zijn gebieden, waarin de hoogste snelheden worden gevonden: de cornerstreams.

2.3.2. Windklimaat bij (meerdere) gebouwen

Windefecten die tot een verkeerde beoordeling kunnen leiden

Bij de windhindernormen (zie hoofdstuk 3) wordt uitgegaan van een bepaalde -toelaatbare- drempelsnelheid van de wind. Vaak is dat 5 m/s. Bij een (uur-) gemiddelde windsnelheid hoger dan deze drempelsnelheid wordt het windklimaat juist als oncomfortabel ervaren. Dit is wel gebaseerd op de windvlagen, die bij deze gemiddelde windsnelheden kunnen voorkomen. In het vrije veld (open landschap) kan de windsnelheid in een 3-secondenvlaag circa 60% hoger liggen dan de uurgemiddelde snelheid. Door de lagere turbulentie bij aanlandige wind over zee zal dat in de kuststrook de windsnelheid in een laag minder toenemen, in een grote stad, met een ruwheid van 1 à 2 m zal de vlaagsnelheid juist groter kunnen zijn door de grotere turbulentie.

Dit zou er toe kunnen leiden dat de gedachte zou opkomen dat in een grote stad het windklimaat nog slechter is dan (uit wind tunnelmetingen) voorspeld, er wordt immers niet met een norm gewerkt waarbij de drempelsnelheid afhankelijk is van de terreinruwheid. Toch is dit een misvatting. Als de wind boven een stedelijk gebied wordt afgeremd, neemt de turbulentie toe. Wordt de lucht naar beneden gestuurd door obstakels, waardoor de windsnelheid op looppniveau toeneemt, dan neemt de turbulentie (op looppniveau) niet evenredig met de windsnelheid toe.

Duidelijker gemaakt met de vergrotingsfactor:

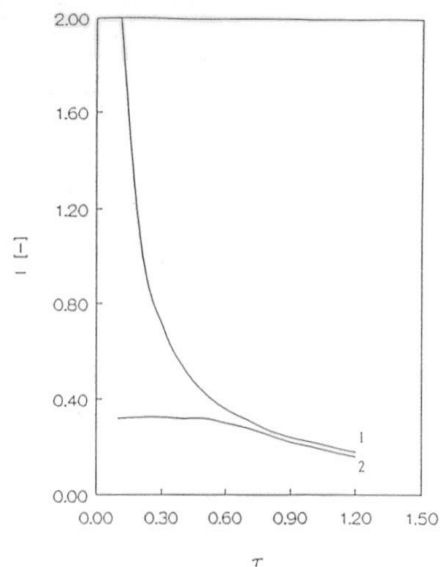
$$c = U_{1,75} / U_{10} \quad (9)$$

met:

c vergrotingsfactor

$U_{1,75}$ windsnelheid op loophoogte

U_{10} windsnelheid op 10 m hoogte (bij meteo-station)



Figuur 15: De turbulentie-intensiteit als functie van de versterkingsfactor.

Lijn 1: stroming loodrecht over een oneindig lang blok.

Lijn 2: stroming onder een hoek van 45

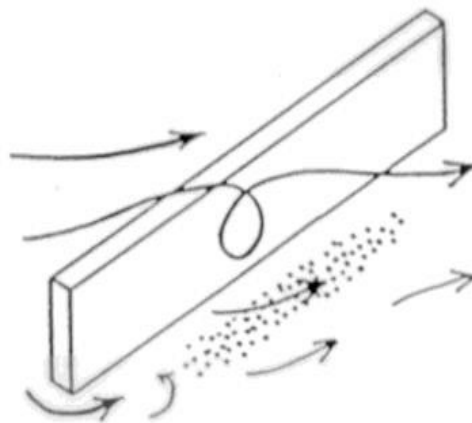
In figuur 15 wordt een verband gegeven tussen de vergrotingsfactor en de turbulentie-intensiteit. Bij toenemende vergrotingsfactor neemt de turbulentie-intensiteit voor de onderzochte bouwkundige situaties (lang gebouw en aanstroming loodrecht resp. onder hoek van 45°) af [9].

In het algemeen geldt dat als de wind versneld wordt door een obstakel, in een onderdoorgang etc, waardoor de windsnelheid op loophoogte toeneemt, dat daarbij de turbulentie niet evenredig toeneemt.

Normen (zie hoofdstuk 3) zijn opgesteld voor een gemiddelde waarde van de turbulentie-intensiteit in steden. In gebieden met een hoge turbulentie-intensiteit wordt -bij aanpassingen ter verbetering van het windklimaat- een minder goed windklimaat bereikt dan op grond van de normen verwacht zou worden; de normen zijn daar dan in feite te licht. Dit geldt voor het zog achter en naast gebouwen, maar ook voor pleinen in een stedelijke omgeving. In gebieden met een lage turbulentie-intensiteit zijn de normen dan te zwaar: het werkelijke windklimaat is daar immers wat beter dan bij gemiddelde turbulentie.

Schuine aanstroming

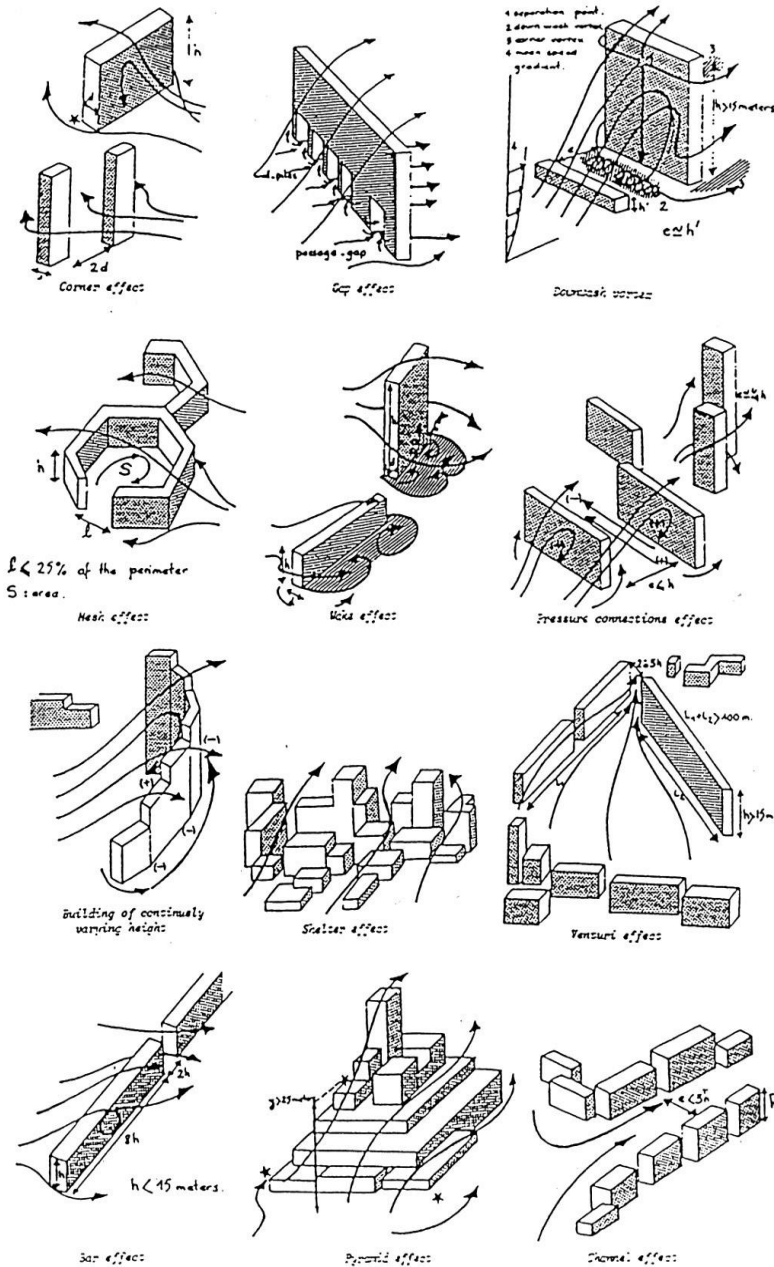
De windrichting heeft een grote invloed op de windsnelheid rondom gebouwen. Wanneer een lang gebouw onder een hoek (tussen ca 30 en 60°) met de lange (voor-) gevel wordt 'aangestroomd' ontstaat een complex stromingspatroon. Aan de loefzijde kunnen, door windgeleiding, hoge windsnelheden ontstaan. Door het zogenaamde schermeffect kunnen ook op enige afstand van de gevel aan de lijzijde hoge windsnelheden ontstaan. Dit is het gevolg van over het gebouw heenslaande wervels met een horizontale as, zie figuur 16. Deze effecten treden op wanneer een gebouw minstens drie maal zo breed is als hoog.



Figuur 16: Wervels kunnen over een gebouw slaan, indien het gebouw langer is ten opzichte van de hoogte: (lengte > 3 maal gebouwhoogte).

Effecten die tot een verslechtering van het windklimaat kunnen leiden

Een overzicht van enkele te behandelen gevallen is gegeven in figuur 17, afkomstig uit de dissertatie van Wu: lit. [13]. Zie ook SBR 65 en 90 [2, 3].



Figuur 17: De afmetingen en de vorm van een gebouw; of de plaats van gebouwen ten opzichte van elkaar kunnen plaatselijk hoge windsnelheden veroorzaken. Figuur is afkomstig uit een publicatie van Gandemer (1975), overgenomen door Wu.



Onderdoorgang

Eerder is beschreven dat voor een gebouw (loefzijde) een overdrukgebied ontstaat, achter een gebouw een onderdrukgebied. Wanneer het overdrukgebied en het onderdrukgebied met elkaar in verbinding staan via een onderdoorgang kunnen in de onderdoorgang (zeer) hoge windsnelheden voorkomen. Hoge windsnelheden in onderdoorgangen komen logischerwijze vooral voor bij grote drukverschillen: dus bij wind loodrecht op de gevel, dan wel onder een hoek tussen loodrecht en ca 45°. Bij wind die een hoek van zo'n 90° met de voorgevel maakt (windrichting evenwijdig aan de voorgevel) is de windsnelheid in een onderdoorgang minimaal. Bij niet zo hoge gebouwen (enkele bouwlagen) met een ongunstige oriëntatie kan in een onderdoorgang al ernstige windhinder optreden. Hoe hoger het gebouw, en hoe groter het oppervlak van de voorgevel, hoe groter de windhinder in de onderdoorgang.

Beïnvloeding van het windklimaat door twee gebouwen

Twee gebouwen die zo ten opzichte van elkaar zijn geplaatst dat de invloedsgebieden elkaar (gedeeltelijk) overlappen, kunnen het windklimaat beïnvloeden. Er kan een onderscheid gemaakt worden naar:

- gebouwen evenwijdig achter elkaar
- gebouwen evenwijdig naast elkaar
- gebouwen versprongen ten opzichte van elkaar
- willekeurige situering

Voor de laatste twee mogelijkheden wordt verwezen naar bijvoorbeeld [13]. De kans dat hierin overigens een configuratie wordt gevonden die voldoende overeenkomt met een gebouwconfiguratie in de adviespraktijk is klein, en wordt daarom hier niet behandeld. Alleen aan twee gebouwen versprongen ten opzichte van elkaar wordt aandacht gegeven.

Bij twee gebouwen evenwijdig aan elkaar wordt vooral de horizontale wervel voor het hoge gebouw beïnvloed. Bij twee evenwijdig naast elkaar gesitueerde gebouwen is het vooral de cornerstream die sterk kan afwijken van de stroming bij een enkelvoudig gebouw.

Doorgang tussen gebouwen

Afhankelijk van de afmetingen van de gebouwen en de afstand tussen de gebouwen kan er een interactie optreden tussen de stromingspatronen bij beide gebouwen. Hierdoor kunnen bij evenwijdige gebouwen (voorgevels in één lijn) de windsnelheden tussen de gebouwen ca 20% hoger liggen dan in de cornerstreams van een enkel gebouw.

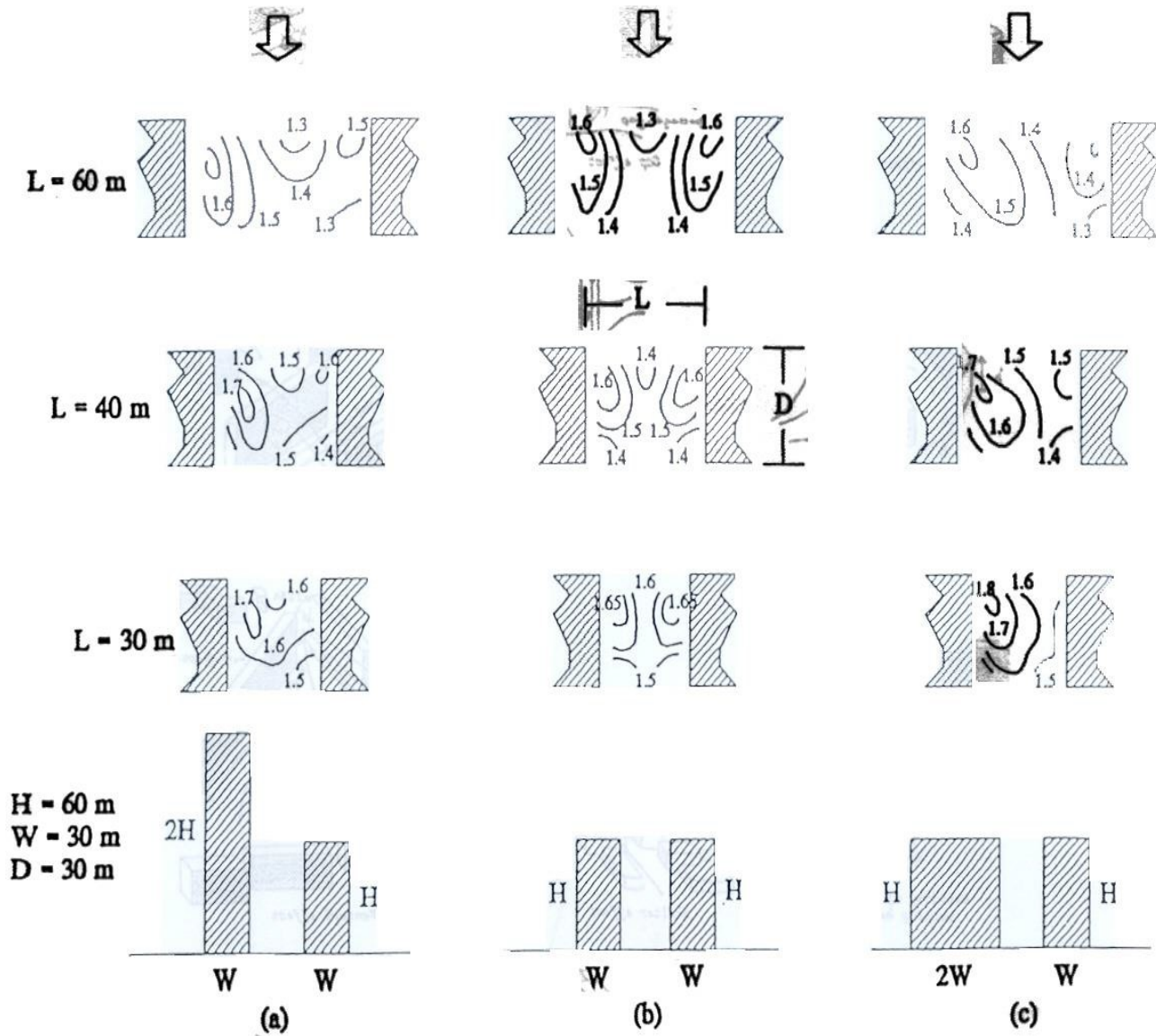
Figuur 18 (uit [13]) geeft voor een aantal afmetingen voorbeelden. Zie ook [3].

In figuur 19 wordt een 'modificatiefunctie' gegeven, waarmee aan de hand van de dimensies van de gebouwen en de onderlinge afstand de vergrotingsfactor kan worden geschat.

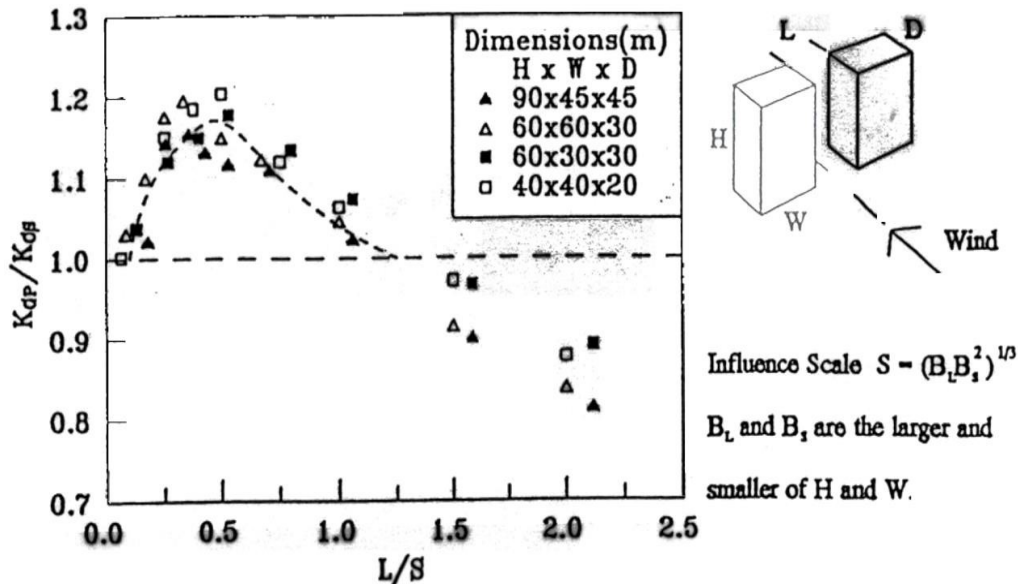
Vuistregel: geen noemenswaardige versterking ten opzichte van windsnelheden bij een enkel gebouw indien de onderlinge afstand meer is dan:

- 2,5 maal de hoogte (bij gebouwen die breder zijn dan 3 maal de hoogte)
- 2,5 maal de breedte (bij gebouwen die hoger zijn dan 3 maal de breedte).

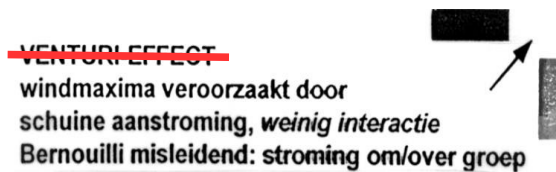
Staan de gebouwen onder een hoek, dan ontstaat het trechter-effect. Bij windrichtingen waar de wind in de door de gebouwen gevormde 'trechter' wordt geblazen, worden de windsnelheden belangrijk vergroot, figuur 20. Dit wordt ten onrechte vaak venturi effect genoemd.



Figuur 18: De onderlinge afstand en de afmetingen van twee gebouwen zijn van invloed op de toename van de windsnelheid tussen de gebouwen, uitgedrukt in een versterkings-factor.



Figuur 19: Modificatiefunctie gegeven, waarmee aan de hand van de dimensies van de gebouwen en de onderlinge afstand de versterkingsfactor kan worden geschat

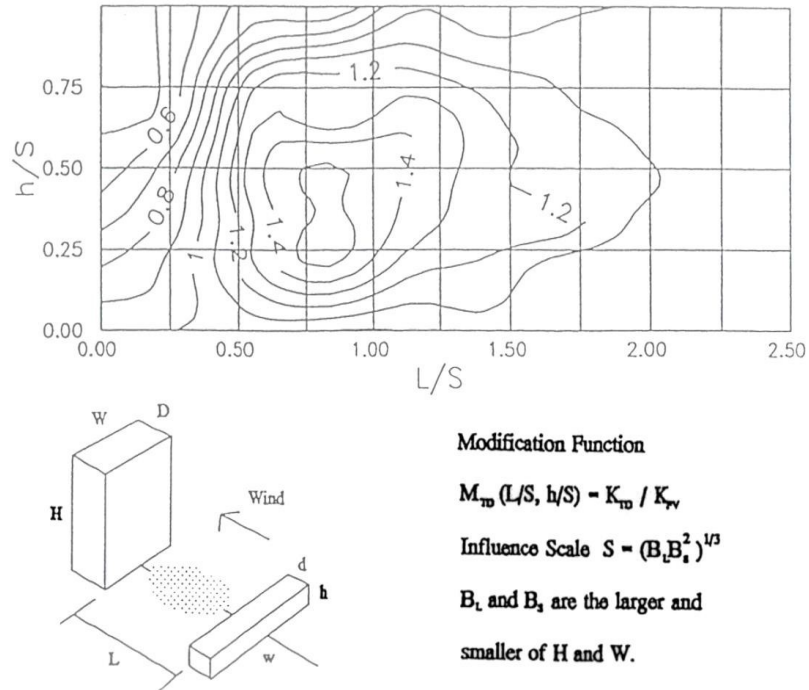


Figuur 20: De windsnelheid tussen gebouwen neemt toe bij een gebouwconfiguratie die een trechter vormen.

Laag gebouw voor hoog gebouw

Voor een alleenstaand gebouw ontstaat een wervel, de lucht stroomt boven maaiveld naar de gebouwhoeken. Wanneer een laag gebouw voor een hoog gebouw staat wordt de wervel versterkt. In figuur 21 is een 'modificatie-functie' MTD gegeven (uit [13]) waaruit de invloed kan worden afgeleid: deze invloed blijkt afhankelijk te zijn van de hoogte en breedte van de hoogbouw, en de hoogte van de laagbouw en de afstand tussen hoog- en laagbouw.

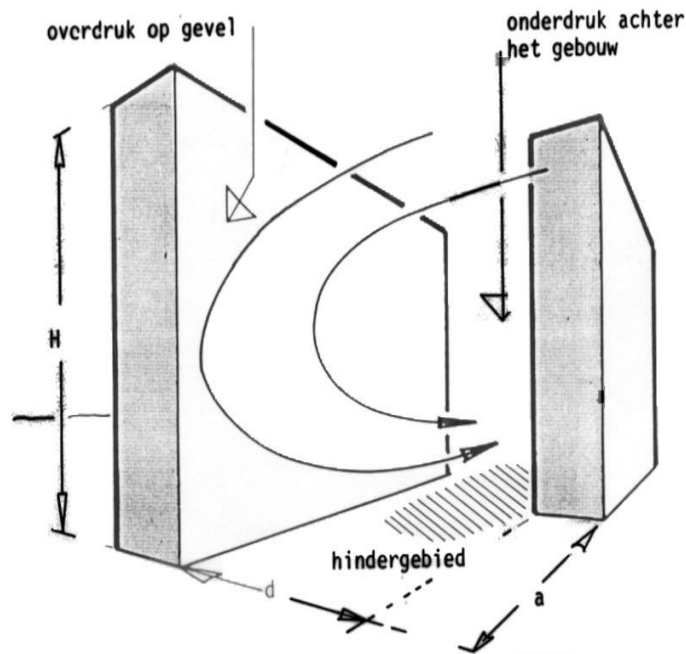
Bij $MTD < 1$ is er een beschuttende invloed door de laagbouw, bij $MTD > 1$ treedt er door de laagbouw versterking van de windhinder op.



Figuur 21: De afstand en de afmetingen van een laag gebouw voor een hoog gebouw zijn bepalend of de windsnelheid voor het gebouw hoger of lager is dan voor een hoog gebouw zonder laagbouw

Gebouwen versprongen ten opzichte van elkaar

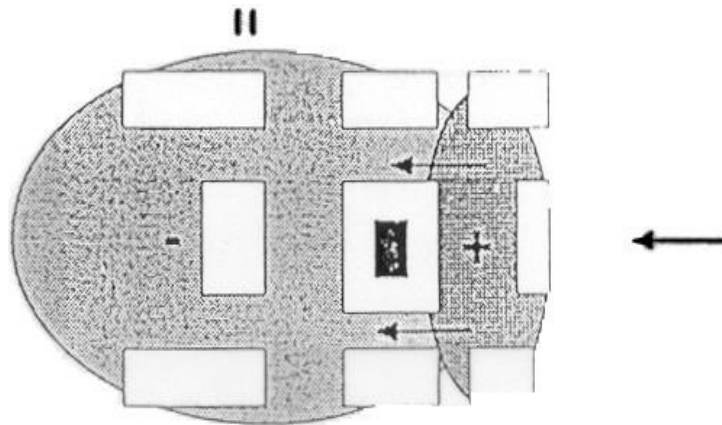
Wanneer twee evenwijdige gebouwen ten opzichte van elkaar zijn versprongen, en de wind nagenoeg loodrecht op de lange gevel staat, kan een versterkend effect op het windklimaat optreden. Er ontstaat immers een overdruk aan de voorzijde van een gebouw, dus ook voor het achterste gebouw. Achter de gebouwen ontstaat een onderdruk. Er kan een sterke stroming optreden tussen het overdruk gebied van het achterste gebouw, naar het onderdrukgebied achter het voorste gebouw, figuur 22.



Figuur 22: Een sterke stroming kan optreden tussen het overdruk gebied voor het achterste gebouw, naar het onderdruk gebied achter het voorste gebouw.

Lage gebouwen rondom hoog gebouw

Wanneer in een wijk laagbouw aanwezig is, waartussen een hoog gebouw gesitueerd wordt, kan het windklimaat op loopniveau verhoudingsgewijs sterk worden beïnvloed. Dit kan vooral plaatsvinden doordat lucht stroomt van het overdrukgebied voor het hoge gebouw, naar het onderdruk gebied achter het gebouw, en waarbij de lucht stroomt door (nauwe) straten -in ieder geval door straten tussen de laagbouw: een kleiner doorstroomoppervlak dan in een 'vrije veld situatie' rondom de hoogbouw, figuur 23.



Figuur 23: Indien laagbouw om hoogbouw is gegroepeerd kan de windsnelheid op loopniveau hoger worden dan bij de hoogbouw alleen.

Kanaliseringsseffect

Wanneer de bebouwing aan weerszijden van een straat een vrijwel aaneengesloten wand vormt wordt de luchtstroming door de straat geleid. Door schuin invallende wind (zie 'schuine aanstroming') kan de wind over de gebouwen heen de straat indraaien. Door de gesloten bebouwing kan de lucht moeilijk de straat uit over de bebouwing aan de lijzijde van de straat. De lucht zal dan vooral in de richting van de lengteas van de straat stromen, maar ook voortdurend worden aangevuld met over de bebouwing aan de lijzijde heen 'vallende' wind worden aangevuld. Hierdoor nemen de windsnelheden in de straat steeds verder toe. Door de bebouwing langs een lange straat op regelmatige afstanden te onderbreken wordt het kanaliseringseffect voor een belangrijk deel voorkomen.

Effecten die door afscherming tot verbetering van het windklimaat kunnen leiden.

Afscherming door de stedelijke omgeving

Door de gebouwen van een stad zal een afscherming ontstaan. Deze afscherming is 'optimaal' wanneer vanaf de rand van de stad de hoogte geleidelijk oploopt. Het effect wordt overigens pas bereikt na een behoorlijke afstand: om een goede beschutting te bereiken is een afscherming door de stedelijke omgeving van zo'n 200 m of meer nodig.

Het effect van de afscherming kan teniet gedaan worden door hoogbouw die ruim (orde 20 m of meer) uitsteekt boven de omringende bebouwing, en door grote open ruimten: pleinen, brede lanen.

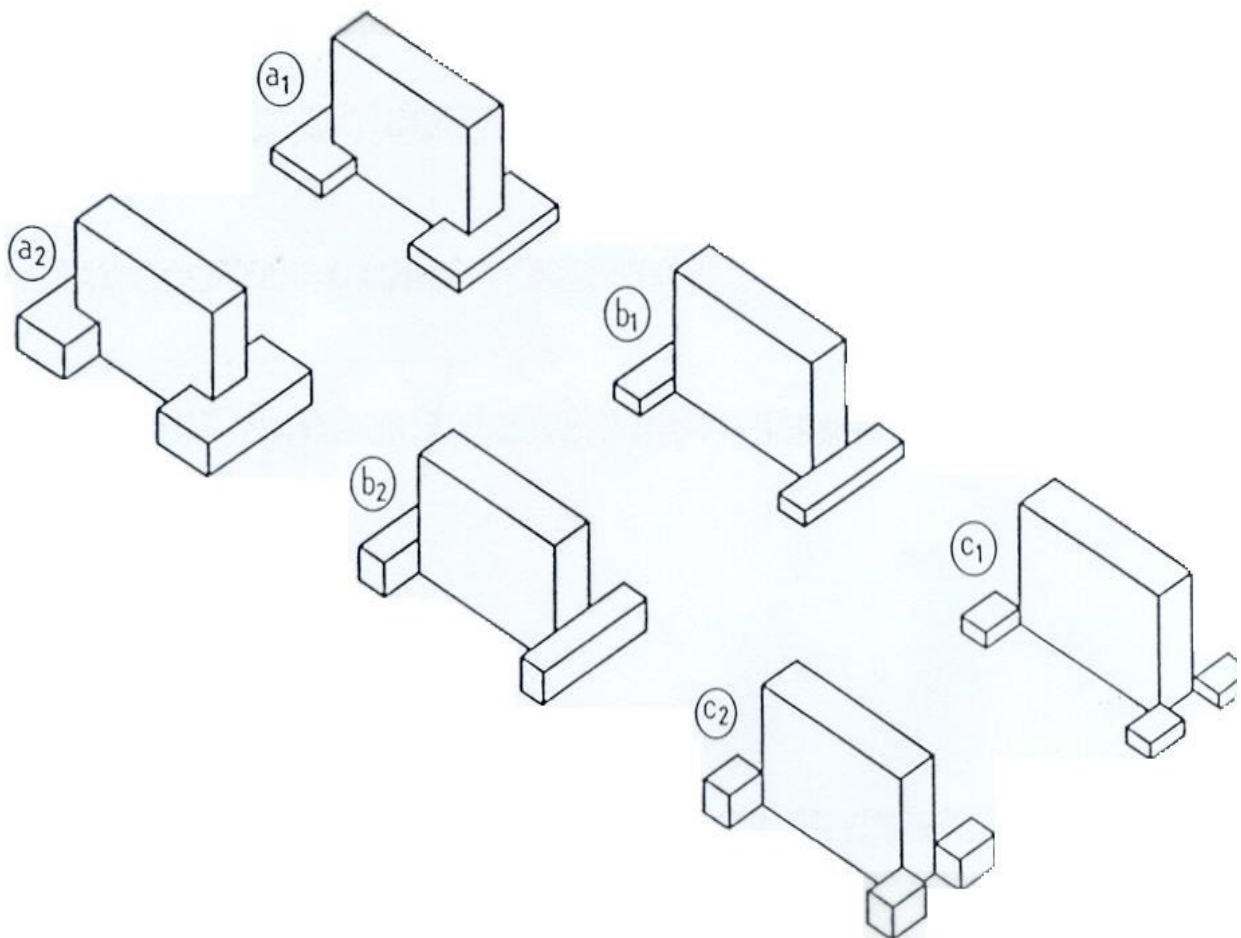
Piramide of hoogbouw op laagbouw

Door een hoogbouw te situeren op een laag bouwdeel, wordt bereikt dat de hoge windsnelheden vooral voorkomen op dakniveau van de laagbouw. Op loopniveau kan dan een behoorlijk lagere windsnelheid worden ondervonden dan bij een gelijke hoogbouw 'zondermeer'. Door een gebouw piramidevormig op te bouwen wordt tevens bereikt dat de blokkering op grotere hoogte veel minder is: dit leidt tot een lagere versterking van de

windsnelheid dan bij een even hoog gebouw met een gelijk bruto vloeroppervlak.

Gebouw met lagere vleugels aan de gebouwhoeken

Bij een gebouw met aan de gebouwhoeken lagere vleugels ontstaat een minder grote wervel aan de voorzijde. Een deel van de door het gebouw geblokkeerde lucht zal al op grotere hoogte om het gebouw 'afstromen', en bereikt het maaiveld niet. Ook de cornerstreams worden hierdoor lager, figuur 24.



Figuur 24: Door aan de gebouwhoeken lagere vleugels te projecteren wordt een verbetering van het windklimaat verkregen.

Maaseffect

In een binnenruimte van een geheel of gedeeltelijk omsloten gebouw kan een luw gebied ontstaan. Wanneer een toegang ruim gedimensioneerd is, kan het effect weer (gedeeltelijk) teniet gedaan worden, en kan zelfs een effect als bij een doorgang tussen twee gebouwen ontstaan (verslechtering van het windklimaat). Is de binnenruimte



groot ten opzichte van de gebouwhoogte, dan kan het positieve effect van de luwe binnenruimte ook achterwege blijven. Zo- mogelijk heeft de binnentuin of patio een diameter of grootste lengte die minder is dan 3 maal de hoogte van het gebouw.

2.3.3. Winddrukken op gebouwen

Door de windstroming zal - gezien vanuit de stromingsrichting - voor een gebouw een overdruk ontstaan, achter het gebouw een onderdruk. De grootte van de druk kan (in de praktijk en op modelschaal in de windtunnel) worden gemeten. In de windtunnel zal dit per windrichting gebeuren.

Uit de gemeten winddruk en de 'uurgemiddelde snelheidsdruk op 10 m hoogte in het vrije veld' kunnen de winddrukcoëfficiënten c_p worden bepaald:

$$c_p = P / (\frac{1}{2}\rho v_{10}^2) \quad (10)$$

met:

c_p winddrukcoëfficiënt

P plaatselijk gemeten winddruk (uurgemiddelde waarde)

$\frac{1}{2}\rho v_{10}^2$ snelheidsdruk op 10 m hoogte in het vrije veld (uurgemiddelde waarde)

ρ volumieke massa van lucht (ca. 1,2 kg/m³)

v windsnelheid gemeten op 10 m hoogte in vrije veld (bij Meteo-station)

Dit is de bekende winddrukcoëfficiënt die ook in de TGB voorkomt. De winddrukcoëfficiënt kan een waarde hebben die groter is dan 1, en een waarde kleiner dan 0 (windzuiging).

Vooraf bij (zeer) hoge gebouwen (meer dan 70 m) is het zinvol de winddrukcoëfficiënt uit metingen te bepalen (windtunnelonderzoek), maar ook bij hoge gebouwen met complexe vorm en bij hoge gebouwen die dicht bij elkaar staan.

In de laatste twee situaties kan -bij bepaalde winddruk- plaatselijk op de gevel of op het dak een winddruk voorkomen die (sterk) afwijkt van de drukken waarop volgens de TGB moet worden gerekend.



Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

3. Normen

3.1. Achtergronden en historie

Over de achtergronden van de normen wordt verwezen naar de literatuur. De dissertatie van Bottema [10] geeft in hoofdstuk 3 een zeer volledig overzicht tot circa 1992. Zie ook van Bottema [9] en [11]

Van belang is ook de publicatie van ing. G. Visser van TNO: Windhindercriteria [14] en de publicatie van Wisse en Bottema [12].

De gemeente Den Haag had alternatieve criteria [16], die mede gebaseerd zijn op een studie van Van Dorsser Raadgevende Ingenieurs [17].

Voor het windeffect op mensen kan uitgegaan worden van de eerder gedefinieerde effectieve windsnelheid U_{eff} :

$$U_{eff} = U + k \sigma = U(1 + k.I) \quad (11)$$

met:

U_{eff} effectieve windsnelheid

U uurgemiddelde windsnelheid

k gewichtsfactor, die aangeeft in hoeverre de vlagerigheid van de wind mee wordt gerekend

σ standaarddeviatie voor de windsnelheidsvariaties in de richting van de uurgemiddelde windsnelheid

I turbulentie-intensiteit

Windhinder wordt niet zozeer bepaald door de gemiddelde windsnelheid, maar door de windvlagen (vlagerigheid of buigigheid van de wind).

De in de literatuur voor windhinder aangehouden criteria voor het ‘windcomfort’ (naast criteria ten aanzien van gevaar) in kunnen algemeen geschreven worden (eis geen windhinder) als:

$$U_{eff} < x \text{ m/s}$$

met x de toelaatbaar geachte drempelsnelheid, waarvoor verschillende waarden worden aangehouden. Voor de gewichtsfactor k -waarmee de windvlagen worden verdisconteerd- worden door diverse auteurs in het algemeen waarden aangehouden tussen 0 en 3,5.

Er kan natuurlijk altijd wel een storm voorkomen. Daarom kan men nooit de eis stellen dat U_{eff} altijd kleiner is dan x m/s.

Vrij algemeen wordt dan gesteld dat de kans dat U_{eff} kleiner is dan x m/s kleiner dient te zijn dan zeg $Y\%$:

$$P(U_{eff} > x) < Y\% \quad (12)$$

Bij de beoordeling wordt veelal onderscheid gemaakt tussen verschillende “activiteitenklassen”. In gebieden waar mensen alleen maar doorheen lopen worden minder strenge eisen gesteld dan aan bijvoorbeeld winkelgebieden of

terrassen. Ook bij entrees worden strengere eisen gesteld aan het windklimaat. De wijze waarop dit in rekening gebracht wordt is verschillend. Bij Melbourne [19] is de drempelsnelheid afhankelijk van de activiteitenklasse, waarbij voor elke activiteitenklasse de zelfde overschrijdingskans toelaatbaar is, terwijl in de Nederlandse normen gekozen is voor één drempelsnelheid voor windhinder, waarbij per activiteitenklasse een andere overschrijdingskans gehanteerd wordt.

Een overzicht van de wijze waarop de eisen door enkele auteurs worden gehanteerd is gegeven in tabel 4 (naar Bottema en Wisse).

Tabel 4: Overzicht van gewichtsfactor, drempelsnelheid en toelaatbare kans bij enkele auteurs.

	Visser (15)	Melbourne (19)	Gandemer (20)
drempelsnelheid x	5	terras: 10 markt: 13 winkelen: 16	6
gewichtsfactor k	0	3,5	1
toelaatbare kans in	%	per jaar	%
terras	0,03	1 /jr	2
markt	1,4	1 /jr	10
winkels	10	1 /jr	15
park	20	-	-

Tot eind 2005 was het in Nederland vrij gangbaar om als eis de TNO-normen aan te houden. Hierin is aangehouden $k=0$, en is de vlagerigheid van de wind in principe verdisconteerd in de (daarom lager gekozen) waarde van de drempelsnelheid x. De eis wordt geformuleerd in een windhinderpercentage of in windhinderdagen. Omdat de meteogegevens -als eerder aangegeven- door het KNMI zijn gegeven als uurgemiddelde waarden, wordt uit (windtunnel-) metingen bepaald hoeveel uur per jaar de uurgemiddelde windsnelheid hoger is dan de drempelsnelheid. Hierbij telde 24 uur overschrijding als één windhinderdag. NB de afwijkingen van de statistische informatie over een jaar bedraagt ca 10% van de langjarige statistische gegevens.

Visser [14] maakt een onderscheid tussen eisen voor het westen en voor het oosten van het land, met als argument dat de gemiddelde windsnelheid in het westen hoger is dan in het oosten, waardoor de mensen in het westen hebben zich aangepast (zijn gewend) aan een hogere gemiddelde windsnelheid. Voor dit onderscheid wordt in de (buitenlandse) wetenschappelijke literatuur geen grond gevonden. In de huidige norm is dit onderscheid dan ook vervallen. Een overzicht van de criteria voor het windklimaat volgens de oude TNO-norm is weergegeven in tabel 6.

Voor windgevaar werd vrij algemeen ook uitgegaan van een toelaatbare kans, maar nu met een hogere drempelsnelheid (vaak 15 m/s). Bij een vlagfactor van 1,5 à 1,6 leidt een gemiddelde windsnelheid van 15 m/s tot een maximale vlaagsnelheid van 23 m/s. Dit is een vlaagsnelheid waarbij jonge mensen het evenwicht kunnen verliezen en kunnen vallen.

In de SBR publicaties was de kans op gevaar gekoppeld aan een toelaatbare vergrotingsfactor γ . De (voor zover bekend alleen in de SBR-publicaties gebruikte) geeft de windsnelheid op loophoogte 'zonder gebouw', gedeeld

door de windsnelheid op loophoogte ‘met gebouw’. Voor een stedelijke situatie is de vergrotingsfactor γ 1,6 maal de vergrotingsfactor c : de verhouding van de windsnelheid op een bepaald punt met bebouwing en de windsnelheid op 10 m hoogte.

Tabel 6: Windhindercriteria volgens de oude TNO-norm: Het aantal dagen per jaar, dat de uurgemiddelde windsnelheid van 5 m/s op hoofdhoogte gemiddeld per jaar in het oosten en in het westen van Nederland mag worden overschreden.

Activiteitengebied	Toepasbaar voor	Locatie	Goed	Matig	Slecht
doorloop gebied	parkeerplaatsen, trottoirs. openbare wegen. Fietspaden	Oosten	< 15	15 - 40	> 40
		Westen	< 35	35 - 75	> 75
slenter gebied; overdekt door loop- Gebied	winkelcentra. parken, gebouwingangen, voetpaden; overdekte openbare wegen en fietspaden. bus- en trein- perrons	Oosten	< 2	2 - 15	> 15
		Westen	< 5	5 - 35	> 35
verblijfsgebied korte duur; overdekt slenter gebied	sportvelden. winkelcentra. pleinen. overdekte winkel centra en voetpaden	Oosten	-	0 - 2	> 2
		Westen	< 0,1	0,1 - 5	> 5
verblijfsgebied lange duur: overdekt verblijfsgebied	terrassen. openluchttheaters, zwembaden, overdekte pleinen en winkelcentra	Oosten	-	-	-
		Westen	-	0 - 0,1	> 0,1

3.2. Normen volgens NEN 8100

Eind 2005 is de norm NEN 8100 ‘Windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving’ uitgekomen. Gezien het feit dat het een officiële Nederlandse norm is, wordt binnen Nederland vrijwel al het windklimaatonderzoek uitgevoerd volgens deze norm. De norm heeft echter geen wettelijke status: je bent niet wettelijk verplicht een windklimaatonderzoek uit te voeren. Wel eisen veel gemeentes een onderzoek volgens de norm in het vergunningstraject voor hoogbouw projecten. De definitie van “hoogbouw” verschilt daarbij van gemeente tot gemeente, en is niet altijd in overeenstemming met dat wat de NEN 8100 aanhoudt.

3.2.1. Beslismodel

Om snel en eenvoudig een indicatie te krijgen of windhinder is te verwachten, is een beslismodel opgesteld. Specifieke deskundigheid op het gebied van windhinder is bij toepassing van dit beslismodel niet nodig, hoewel het lastig kan zijn te beoordelen of een bouwwerk een beschutte of onbeschutte ligging heeft; Het beslismodel kan zowel worden gebruikt om na te gaan of onderzoek naar windhinder en windgevaar nodig is. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat gebouwen die tussen andere gebouwen staan van ongeveer dezelfde hoogte niet snel overmatige windhinder veroorzaken. In het beslismodel wordt dan ook onderscheid gemaakt tussen beschut en onbeschut liggende gebouwen. Een gebouw ligt beschut als de verhouding tussen de hoogte van het gebouw en de hoogte van ieder ander gebouw in de omgeving kleiner is dan 1,5. Hoge bouwwerken vereisen altijd een windhinderonderzoek. De NEN 8100 stelt daarom:



- Voor beschut liggende gebouwen tot een hoogte van 15 m is geen nader onderzoek noodzakelijk.
- Voor beschut liggende gebouwen met een hoogte tussen de 15 m en 30 m en voor onbeschut liggende gebouwen tot een hoogte van 30 m is de hulp van een windhinderdeskundige noodzakelijk om te beoordelen of er wel of niet windtunnel- CFD-onderzoek noodzakelijk is.
- Voor gebouwen met een hoogte vanaf 30 m is nader onderzoek met CFD- of windtunnelsimulatie noodzakelijk.

Bovenstaande beslismodel is voor ontwikkelaars, gemeenten en adviseurs een waardevol hulpmiddel om te kijken of er een windklimaat onderzoek noodzakelijk is.

3.2.2. Windhinder

Zoals gebruikelijk wordt ook in deze norm onderscheid gemaakt tussen hinder en gevaar ten gevolge van wind. Er is daarbij (analoog aan de TNO-norm) gekozen voor een drempelsnelheid ter beoordeling van windhinder van 5 m/s. De achtergrond hiervoor is dat bij windsnelheden boven circa 5 m/s mechanische effecten een rol gaan spelen: het haar verwaait, kleding en parapluus worden door de wind bewogen. De gevoeligheid van personen voor windhinder is natuurlijk wel afhankelijk van de activiteit die men op een zeker moment onderneemt. Bij de beoordeling van windhinder wordt daarom onderscheid gemaakt tussen de activiteiten ‘doorlopen’, ‘slenteren’ en ‘langdurig zitten’. De activiteitenklasse I. Doorlopen is daarbij bijvoorbeeld van toepassing op een parkeerterrein of trottoir, de activiteitenklasse II. Slenteren in een onoverdekt winkelcentrum, park of bij een gebouwingang, de activiteitenklasse III. Langdurig zitten bij een bankje in een park.

In de norm zijn 5 kwaliteitsklassen aangegeven. Deze kwaliteitsklassen worden voorgesteld met de letters A (de hoogste windcomfortklasse) tot E (het laagste kwaliteitsniveau). Afhankelijk van de kwaliteitsklasse wordt aangegeven of het lokale windklimaat als goed, matig of slecht voor bepaalde activiteiten beoordeeld moet worden, zoals aangegeven in tabel 8.

Criteria windhinder volgens NEN 8100

Overschrijdingskans $p(v_{LOK} > v_{DR,H})$ in procenten van het aantal uren per jaar	Kwaliteitsklasse	Activiteit		
		I. Doorlopen	II. Slenteren	III. Langdurig zitten
< 2,5	A	Goed	Goed	Goed
2,5 – 5	B	Goed	Goed	Matig
5 – 10	C	Goed	Matig	Slecht
10 – 20	D	Matig	Slecht	Slecht
≥ 20	E	Slecht	Slecht	Slecht

In de toelichting bij de norm wordt specifiek aandacht gegeven aan commerciële terrassen. Daarbij stelt de norm dat de eisen voor zitten niet bedoeld zijn voor horeca-terrassen: voor dergelijke terrassen gelden hogere eisen en is een betere afscherming gewenst. Een goed windklimaat op een terras zonder een afscherming in de vorm van windschermen (en nabij hoge gebouwen: met luifels) is niet mogelijk.



3.2.3. Het gevaarcriterium

Naar analogie voor de beoordeling van windhinder wordt het criterium ter beoordeling van windgevaar opgebouwd. Hierbij wordt een drempelsnelheid van 15 m/s (uurgemiddelde windsnelheid) aangehouden. Als windgevaar wordt in het algemeen de situatie bedoeld waarbij mensen tijdens een windvlaag kunnen vallen. Bij windvlagen neemt de snelheid in korte tijd toe.

Tijdens een windvlaag kunnen windsnelheden voorkomen ter grootte van 1,5 tot 2 maal de uurgemiddelde windsnelheid.

Ten aanzien van het beoordelen van windgevaar wordt de indeling zoals aangegeven in tabel 9 aangehouden.

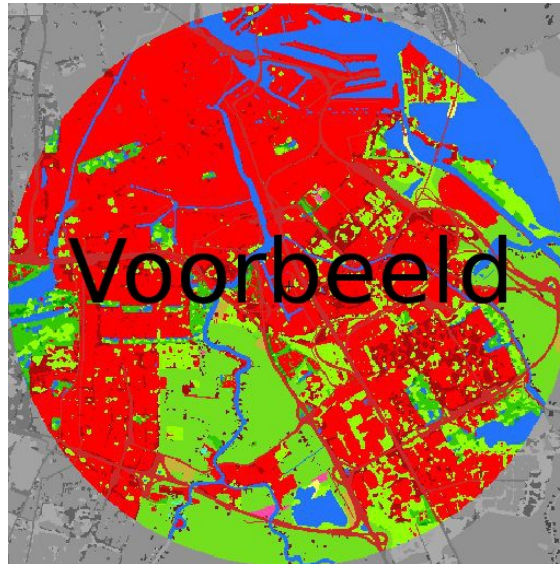
Criteria windgevaar volgens NEN 8100

Overschrijdingskans $p(V_{\text{LOK}} > V_{\text{DR,G}})$ in procenten van het aantal uren per jaar	Kwalificatie
$0,05 < p < 0,30$	Beperkt risico
$p \geq 0,30$	Gevaarlijk

De norm stelt: “Situaties waarvoor een overschrijdingskans geldt van $0,05 < p < 0,30$ mogen alleen worden geaccepteerd als deze vallen binnen activiteiten klasse I (doorlopen). Voor activiteiten klasse II en III 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.”

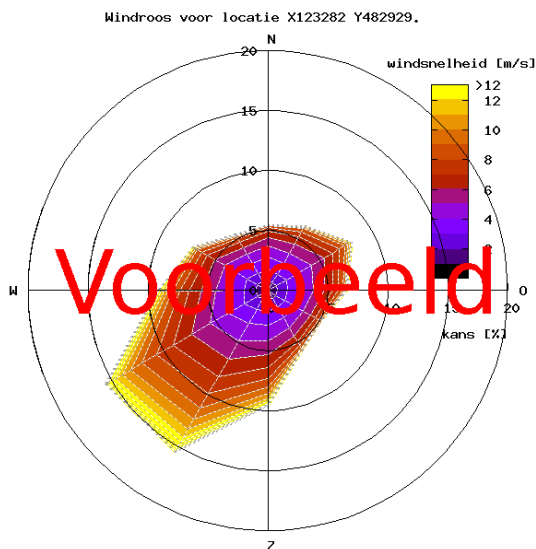
3.2.4. Meteorologische gegevens

Voor het bepalen van de lokale windstatistiek dient gebruik gemaakt te worden van de NPR 6097:2006 *Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland*. Met behulp van de bijbehorende software kan voor elke locatie in Nederland een windstatistiek berekend worden op basis van meteogegevens van een groot aantal meteostations en gegevens omtrent terreinruwheden tot 6 km afstand van de locatie. De terreinruwheden van het omliggend gebied worden zijn daarbij afhankelijk van het grondgebruik, en worden in de uitvoer grafisch weergegeven. De kleur geeft het terreingebruik aan, rood staat bijvoorbeeld voor stedelijk bebouwd gebied. De resulterende windstatistiek wordt zowel cumulatief als distributief, absoluut (in uren per jaar) en relatief (in procenten) als tabel als uitvoer gegeven.



f1 Terreinruwheid tot 6 km afstand volgens NPR 6097

In figuur 2 is de op basis van de NPR 6097 berekende windroos op 60 meter hoogte boven een voorbeeldlocatie weergegeven. De onderstaande windstatistiek is weergegeven in tabel 3.1. De windstatistiek is kenmerkend voor Nederland: met name bij wind uit het zuiden tot westen treden de hoogste windsnelheden op en de wind komt relatief vaak uit het zuidwesten (210° en 240°). De zuidwesten wind is dan ook vaak het meest bepalend voor het windklimaat op een bouwlocatie.



f2 Windroos betreffende locatie volgens NPR 6097

Distributief overzicht windsnelheden 60 meter op basis van NPR 6097 in uren per jaar													totaal aantal uren: 8766.4	
Positie X123282 Y482929 Jaar 1963-2002													gemiddelde windsnelheid (m/s): 5.5	
wind snelheid	30°	60°	Oost 90°	120°	150°	Zuid 180°	210°	240°	West 270°	300°	330°	Noord 360°		
0.0 - 0.9	14.4	17.4	16.8	17.4	15.5	12.9	15.8	21.1	18.9	20.3	18.7	16.5		
1.0 - 1.9	51.5	57.6	50.2	50.5	51.0	50.4	53.4	71.3	63.1	67.2	55.5	58.5		
2.0 - 2.9	71.2	84.0	77.3	77.3	78.5	85.1	89.8	103.5	89.3	86.3	72.3	80.6		
3.0 - 3.9	94.4	101.1	94.5	78.1	87.0	103.6	118.8	132.5	101.4	96.5	82.1	87.9		
4.0 - 4.9	84.8	111.9	94.1	77.2	84.3	112.3	142.9	155.4	111.3	95.3	74.5	81.6		
5.0 - 5.9	79.1	102.9	83.7	58.2	69.3	105.7	154.9	158.8	101.9	78.9	61.0	64.6		
6.0 - 6.9	60.2	76.6	58.8	41.7	46.8	92.7	153.2	157.2	90.0	67.3	44.9	43.5		
7.0 - 7.9	40.9	54.8	43.1	27.6	32.1	77.5	135.8	138.4	70.8	48.4	28.1	25.5		
8.0 - 8.9	24.5	41.4	29.2	12.1	20.3	63.1	126.6	122.0	51.8	32.5	18.2	12.7		
9.0 - 9.9	13.9	27.3	15.7	4.7	12.1	47.0	95.3	96.8	35.5	19.5	9.1	6.3		
10.0 - 10.9	7.3	16.9	8.8	1.8	6.3	31.8	84.8	69.1	27.2	11.2	4.8	2.9		
11.0 - 11.9	3.3	9.9	5.4	0.6	2.9	23.7	63.7	55.0	17.5	6.9	2.6	1.4		
12.0 - 12.9	1.8	5.4	1.8	0.3	1.3	15.2	45.3	34.5	12.6	2.6	1.3	1.2		
13.0 - 13.9	0.7	1.3	0.7	0.1	0.5	8.9	32.1	23.9	6.9	1.4	0.5	0.3		
14.0 - 14.9	0.2	0.7	0.4	0.0	0.3	5.3	20.0	14.7	4.0	0.8	0.3	0.0		
15.0 - 15.9	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	3.0	12.0	7.4	2.6	0.2	0.0	0.0		
16.0 - 16.9	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.0	7.0	4.3	1.0	0.1	0.0	0.0		
17.0 - 17.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	3.8	2.6	0.6	0.2	0.0	0.0		
18.0 - 18.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.4	1.2	0.3	0.1	0.0	0.0		
19.0 - 19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.1	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0		
20.0 - 20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0		
21.0 - 21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0		
22.0 - 22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0		
23.0 - 23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
24.0 - 24.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
25.0 - 25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
26.0 - 26.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	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	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
28.0 - 28.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
29.0 - 29.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
30.0 - 30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
31.0 - 31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
32.0 - 32.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
33.0 - 33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
34.0 - 34.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
35.0 - 35.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
36.0 - 36.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
37.0 - 37.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
38.0 - 38.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
39.0 - 39.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
aantal uren	548.3	709.6	580.6	447.6	508.2	840.8	1360.1	1371.0	807.0	635.8	473.9	483.5		
gemiddelde snelheid	4.7	5.1	4.8	4.2	4.5	5.9	7.1	6.6	5.6	4.8	4.4	4.2		

t3.1 Windstatistiek van de betreffende locatie volgens NPR 6097

4. Onderzoeksmethoden

Onderscheid kan gemaakt worden naar de volgende ‘onderzoeksmethoden’:

- analytisch (onderzoek op basis van literatuur, kentallen en ervaring)
- computerberekeningen met stromingsmodellen (CFD)
- windtunnelonderzoek

4.1. Analytisch onderzoek

In het algemeen wordt - naast een algemeen verhaal over windhinder - aandacht gegeven aan de volgende aspecten:

- Invloedsgebied van het gebouw

Dit is het gebied waar de windsnelheid rechtstreeks (en significant) door het nieuwe gebouw wordt beïnvloed. Bepaling van het invloedsgebied door de overlappende contour te tekenen voor de invloedsgebieden voor alle windrichtingen. De invloedsgebieden per windrichting te bepalen volgens SBR 65, pag. 85 e.v., zie voor een voorbeeld figuur 25.

Voordeel van het aangeven van een invloedsgebied is dat vaak eventuele belanghebbende omwoners aangeven kan worden dat hun huis buiten het gebied ligt waar het windklimaat belangrijk wordt beïnvloed. Daarbij moet natuurlijk wel worden duidelijk gemaakt dat het invloedsgebied niet het gebied is waar windhinder verwacht mag worden: er zijn gebieden waar nieuwbouw een duidelijke afschermende werking heeft. Voor een goede inschatting van het invloedsgebied zal dit bepaald moeten worden voor alle windrichtingen waarbij mogelijk windhinder te verwachten is.

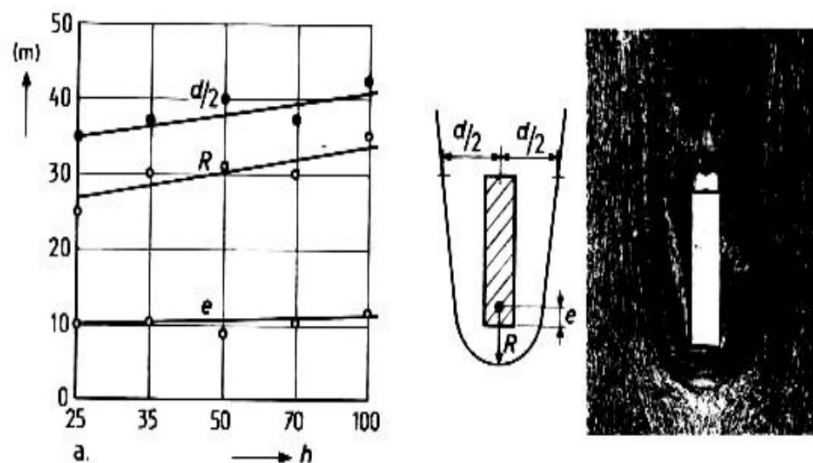
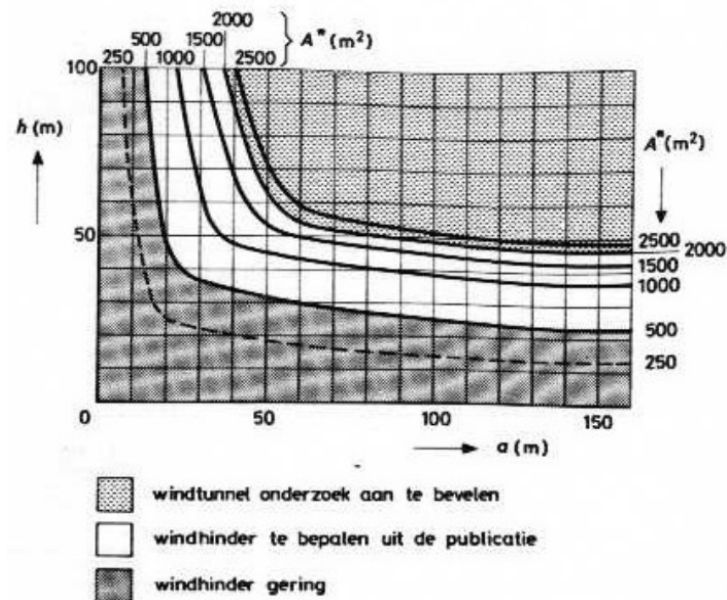


Fig. 48. Grootte van het invloedsgebied bij een smalle voorgevel ($b = 20$ m) als functie van de hoogte.

a. Meetresultaten

b. Stroomlijnenpatroon ($b \times l \times h = 20 \times 80 \times 100$ m)

Figuur 25: Invloedsgebied volgens SBR 65



Figuur 26: Windhinderoppervlak en de kans op windhinder volgens SBR 65

- Windhinderoppervlak

Het oppervlak van de gevel ingetekend in figuur 52 van SBR 65 kan soms duidelijk maken dat door het gebouw geen grote problemen verwacht behoeven te worden, figuur 26. Hoewel heel wat beperkingen zitten in de waarde van een windhinderoppervlak kan dit in een rapport toch nut hebben, wanneer het gebouw valt in het gebied 'Windhinder gering', en je hebt vastgesteld dat er inderdaad weinig problemen te verwachten zijn. In de NEN 8100 is overigens beter aangegeven wanneer een onderzoek naar windhinder zinvol is, zie paragraaf 3.2.1

- Interactie met overige gebouwen en bestaande beplantingen

Hierbij wordt ingegaan op de al aanwezige bebouwing. De korte beschouwing die onder deze titel in het rapport wordt opgenomen dient vooral gesteund te worden door de kennis, ervaring en literatuur over windhinder en de windstroming bij verschillende gebouwen. Zie hiervoor het voorgaande hoofdstuk.

- Entrees van het gebouw

Gezien het feit dat entrees gevoelig zijn voor windhinder zal in de beschouwing aandacht moten zijn voor de locatie van de entrees, en zo nodig advies gegeven worden voor het eventueel verplaatsen van de entrees.

- Windafschermende voorzieningen

Eventuele gewenste voorzieningen worden in het rapport beschreven. De kwaliteit van het advies is afhankelijk van de kennis en ervaring van de adviseur.



4.2. Windtunnelonderzoek

De windtunnel is tot op heden de meest betrouwbare methode voor het onderzoeken van het windklimaat rond bebouwing. Alhoewel de windtunnel ook zijn onbetrouwbaarheden kent, is het de enige methode waarbij de stroming op fysisch correcte wijze gemodelleerd wordt. Een uitgebreide toelichting op de werkwijze bij een windtunnelonderzoek wordt gegeven in hoofdstuk 5.

4.3. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Voor achtergronden: zie artikel van Willemsen c.s. in Bouwfysica (17). Stroming rond gebouwen is zeer complex en niet eenvoudig numeriek te berekenen. De afgelopen jaren is er dankzij een forse toename van de computerkracht een behoorlijke ontwikkeling in de toepassing van CFD voor windhinder geweest. Mede onder invloed van het wegvallen van de windtunnel van TNO zijn er adviesbureaus die alle windklimaatonderzoeken uitvoeren met behulp van CFD. Voor complexe situaties heeft een windtunnelonderzoek, mede door het missen van een aantal fysische aspecten in de huidige CFD praktijk, nog altijd de voorkeur. Dit in tegenstelling tot wat in het artikel in het blad Bouwfysica door Krüs [21] geschetst wordt. Een uitgebreide toelichting op de werkwijze bij een CFD onderzoek is gegeven in hoofdstuk 6.



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

5. Windtunnelonderzoek

5.1. Voorbereiding

Nagegaan dient te worden welk grenslaagprofiel gewenst is. Daarbij moet vooral gelet worden op de bebouwing ten zuidwesten tot westen van het gebouw. Let vooral op de lengte waarover de bedoelde bebouwing gerekend vanaf het gebouw aanwezig is.

Vaak is het verstandig de situatie ter plaatse op te nemen en om de omgeving van het bouwplan te fotograferen: vanuit het standpunt van het bouwplan een fotosessie over 360° rondom maken.

Overleg moet plaats vinden met opdrachtgever en gemeente over de te hanteren normen. Daarvoor moet vastgelegd worden wat de functie is van de verschillende gebieden rondom het gebouw. Er gelden immers voor verschillende functies van gebieden ook verschillende criteria.

Hoewel gemeente ook wel eisen stellen aan het windklimaat ter plaatse van de entree van een gebouw, zou een gemeente zich in principe dienen te beperken tot eisen aan het windklimaat in de openbare ruimte en ter plaatse van het terrein van derden (de omwonenden).

Overleggen met de gemeente en de opdrachtgever op welke plaatsen het windklimaat (in ieder geval) gemeten moet worden is gewenst.

Soms is overleg met opdrachtgever en gemeente nodig over de mogelijkheden die er zijn om iets te doen aan de beplantingen in de omgeving. Vaak is dit buiten de kavel van de opdrachtgever en kom je op het grondgebied van derden (openbare ruimte).

Bepaal op welke schaal de maquette gerealiseerd dient te worden. In principe denken aan 1:250 tot 1:300 (à 1:350). Bij de tunnels met een hoogte van ca 2 m is de blokkeringsgraad (vrijwel) nooit bepalend voor de keuze van de modelschaal. Bij lagere tunnels kan de blokkeringsgraad daarvoor wel bepalend zijn.

Uitgaande van diameter van de draaischijf (veelal ca 2,3 m) kan met de schaalfactor worden bepaald welk deel van de omgeving op de maquette “geplaatst” wordt.

Een nauwkeurige kaart van de stedelijke omgeving moet beschikbaar zijn. Op deze kaart wordt de positie van het bouwplan vastgesteld. Het nieuwe gebouw ongeveer in het midden van de draaischijf situeren: op de kaart kan nu de cirkel (draaischijf) worden getekend.

Hoogte van de gebouwen die binnen de getekende cirkel liggen moeten opgevraagd worden.

In een iets kleiner gebied rondom het bouwplan wordt bepaald of er relevante begroeiingen (struiken, bomen) zijn. De hoogte en positie beplantingen wordt op de situatietekening aangegeven, en later op de maquette weergegeven.

Facultatief: op de kaart de positie van de meetpunten aangeven (onderlinge afstand in principe ten minste 12,5 m bij schaal 1:250 i.v.m. onderlinge beïnvloeding sensoren).

Bij het onderzoek dient iemand namens de opdrachtgevers en namens de architect aanwezig te zijn om mee te beslissen over aanpassingen (luifels, etc.).

Wanneer drukmetingen uitgevoerd moeten worden, dient de maquette hol te zijn.

Maquette dient gecontroleerd te worden voor inbouw en windtunnel. Eventueel kan in dat stadium nog worden aangegeven waar de meetpunten gesitueerd dienen te worden (daar worden gaten voorgeboord in de draaischijf). De maquettebouwers die normaliter de maquettes voor het windtunnelonderzoek maken weten hoe gedetailleerd de maquette gerealiseerd moet worden.

In principe: bouwplan: verspringingen in gevel/dak van minder dan een meter mogen verwaarloosd worden.

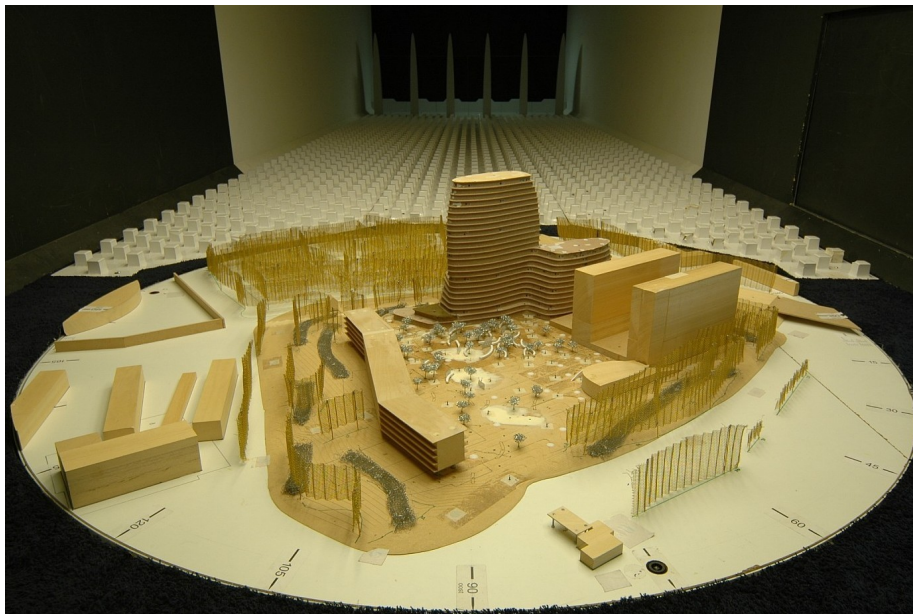
Gebouwen in omgeving: eerste ring rondom bouwplan: gebouwvorm zo goed mogelijk benaderen. Gebouwen op grotere afstand mogen vereenvoudigd worden tot basisvormen, met één dakhoogte op de gemiddelde hoogte van meerdere dakvlakken.

5.2. Windtunnelmetingen: windklimaat op loopniveau

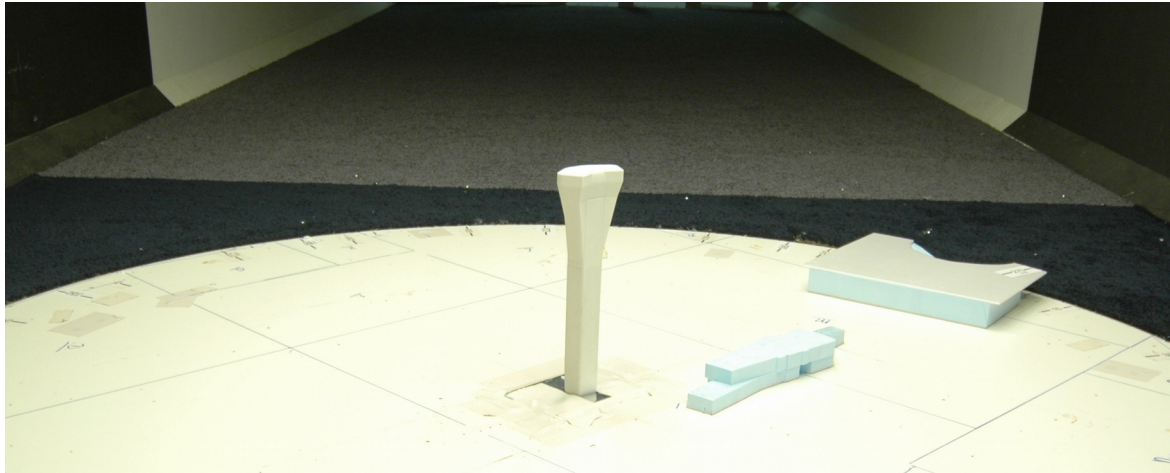
5.2.1. Tunnel

Metingen kunnen in tunnels worden uitgevoerd waarin soms windsnelheden kunnen worden gegenereerd van ruim 80 m/s (300 km/uur). Windtunnelonderzoek voor bouwplannen gebeurt gewoonlijk bij een snelheid van 12 tot 30 m/s.

In de windtunnel wordt een aardse grenslaag op schaal opgewekt voor de gewenste ruwheid. De grenslaag zou in een ideale situatie worden bereikt door deze te laten aangroeien over een voorland met de juiste ruwheid. Daarbij moet dan zowel het juiste snelheidsprofiel als een juiste turbulentie worden gegenereerd.



Figuur 27: Achter in de windtunnel zijn de 'haaieivinnen' met daarachter de horizontale barrière zichtbaar. Voor in de tunnel de ruwheidselementen voor een stedelijke omgeving.



Figuur 28: Windtunnel met een lage ruwheid van het voorland

Het voorland voor de meetplaats zou voor het bereiken van een juiste grenslaag wel erg lang moeten zijn. Voor de bekorting van dit voorland wordt gebruik gemaakt van diverse hulpmiddelen (op de vloer geplaatste barrière, haaienvinnen). In figuur 27 zijn de haaienvinnen met daarachter de horizontale barrière zichtbaar.

De ruwheidselementen die in het voorland worden toegepast voor een stedelijke omgeving ($z = 0,7$ m) zijn ook zichtbaar in figuur 27, voor een voorland met een lage ruwheid in figuur 28.

Daar tunnels over het algemeen verschillen qua afmetingen, voorland en hulpmiddelen voor het bereiken van de gewenste grenslaag, mag ook verwacht worden dat metingen aan overeenkomstige maquettes toch tot verschillende resultaten leiden.

5.2.2. Maquette

Om een gelijke stroming te hebben rondom en om een maquette dient het Reynoldsgetal in principe gelijk te zijn. Bij een maquette op schaal 1:250 zou de windsnelheid in de tunnel dus eigenlijk 250 maal zo groot moeten zijn als in werkelijkheid. Gezien het feit dat dan snelheden ver boven de geluidssnelheid opgewekt zouden moeten worden zou dit, afgezien van een praktische onuitvoerbaarheid, ook fysisch niet correct zijn. Door de hoge snelheid zou compressibiliteit een grote rol gaan spelen, waardoor de stroming alsnog niet vergelijkbaar zou zijn. Bij sterk turbulente stromingen wordt de "Reynolds gevoeligheid" echter gelukkig sterk gereduceerd, waardoor het wel verantwoord is om met kleinere Reynoldsgetallen in de tunnel te werken. Bij het verlagen van het Reynoldsgetal verandert de stroming natuurlijk wel. We raken daarbij de kleinste schalen in de stroming kwijt. Nu is het gelukkig zo dat we over het algemeen niet geïnteresseerde zijn deze schalen. De kleinste schalen liggen in de orde van grootte van een millimeter. De schaal waarin we geïnteresseerd zijn is de menselijk maar, orde grootte een meter. Bij voldoende hoge luchtsnelheden in de windtunnel is ook in de windtunnel de kleinste schaal orde grootte een millimeter, waarmee met een schaal van 1:250 de kleinste gemodelleerde schaal orde 25 cm is. De grootschalige stroming in de tunnel is daarbij gelijkvormig met de grootschalige stroming in werkelijkheid. Alleen bij ronde gebouwen en sterk afgeronde gebouwhoeken is de stromingsweerstand sterk afhankelijk van het Reynoldsgetal. In de praktijk is de stroming vaak superkritisch ($Re > 3 \times 10^6$), terwijl de stroming in de windtunnel

subkritisch is ($Re < 2 \times 10^5$). In zo'n situatie kan de stroming op modelschaal op een andere plaats van het gebouw loslaten dan in werkelijkheid, waardoor ook de stroming op looppniveau te veel kan verschillen. Oproeven van de ronde maquettedelen zo eventueel verhogen van de snelheid in de tunnel is dan noodzakelijk om een zo goed mogelijke overeenkomst tussen de stroming in werkelijkheid en die bij het model in de tunnel te bereiken.

Metingen vinden in Nederland meestal plaats met behulp van NTC-elementen. De NTC-elementen zijn in principe in het horizontale vlak nauwelijks richtingsgevoelig. Wel kunnen ze een afwijkende gevoeligheid hebben voor stroming in het verticale vlak. Als het goed is worden de elementen zo op hoogte gesteld dat de effectieve meethoogte gelijk is aan 1,75 m op volle schaal. Dit houdt dan ook in dat ze bij een maquette op een schaal van zeg 1:200 op een andere hoogte staan dan bij een maquette op schaal 1:300.



Figuur 29: NTC-element

De NTC-elementen meten door de warmtecapaciteit van de elementen niet helemaal de momentane snelheden, en zijn daarom ook niet geschikt voor het meten van de turbulentieintensiteit op de meetpunten. Binnen de Nederlandse meetpraktijk is dat ook niet nodig, omdat de NEN 8100 volledig gebaseerd is op de uurgemiddelde windsnelheden. Voor meer informatie over meetprincipe: zie [22].

Een alternatief voor deze NTC-elementen zijn zgn. Irwin probes. Deze probes werken op basis van een drukverschil ten gevolge van de omstroming van een buisje dat uit de maquette steekt en de ongestoorde druk bij de voet van het buisje. Omdat het mogelijk is deze drukken op een hoge frequentie te meten, is het met deze probes wel mogelijk de turbulentieintensiteit van de stroming te bepalen. Door het meetprincipe zijn de probes niet gevoelig voor de verticale component in de stroming. In bij voorbeeld Engeland wordt in bepaalde tunnels standaard met deze probes gemeten.

De sensoren worden genummerd. De plaats van de sensoren moet vanaf de maquette worden opgemeten, en op een situatietekening worden overgenomen.

Figuur 29 geeft een voorbeeld van een deel van een maquette met NTC-element.

Voor het bepalen van maatregelen kan het vaak zinvol zijn om te weten uit welke richting de stroming komt. Dit kan niet uit de meetgegevens afgeleid worden, zonder hulpmiddelen is het evenmin zichtbaar. Hulpmiddelen waarmee de stroming zichtbaar gemaakt kan worden:



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

- vaantjes
- rook.

De eerste methode (er worden strookjes wol op de maquette geplakt) werkt snel, de metingen worden niet gestoord, maar alleen de stromingen direct langs gebouwen of de grondplaat kunnen zichtbaar gemaakt worden.

Gebruik maken van rook (via een dunne buis “hengel”) geeft op één plaats informatie over de stroming - buis kan naar wens op willekeurige plek gehouden worden - maar vertraagt veelal de metingen.

De windsnelheid wordt dus bepaald ter plaatse van de meetsensoren. Uit de gemeten windsnelheid wordt, met de (met grenslaagprofiel omgerekende) snelheid op 60 m (op modelschaal), de vergrotingsfactor bepaald. Dit gebeurt per 30°; de draaischijf draait dus telkens 30° door. In totaal worden 12 metingen per run uitgevoerd.

Met de uit de metingen bepaalde vergrotingsfactoren wordt met de windstatistiek voor die locatie de overschrijdingskans van de drempelsnelheid bepaald (5 respectievelijk 15 m/s). In het verleden werd met die gegevens het aantal windhinderdagen of - bij toetsing aan de Haagse normen - de gemiddelde windsnelheid bepaald.

Is de overschrijdingskans (het aantal windhinderdagen of de gemiddelde windsnelheid) op een bepaald punt te groot dan dient ingeschat te worden van welke richting de sensor bij die windrichting wordt aangestroomd. Met deze informatie kan bepaald worden welke voorzieningen aangebracht gaan worden om in een volgende run opnieuw het windklimaat te bepalen.

Houd er ook rekening mee dat op bepaald plaatsen de (voor de windhinder) verantwoordelijke stroming verticaal gericht kan zijn; daar kunnen luifels zinvol zijn.

Op andere plaatsen kunnen horizontale stromingen verantwoordelijke zijn: daar zijn voorzieningen in de vorm van luifels weer niet zinvol.

Voorzieningen kunnen bestaan uit:

- aanpassingen van de afmetingen of de plaats van de bouwvolumes (meestal ingrijpend).
- aanbrengen van gesloten of gedeeltelijk doorlatende luifels
- aanbrengen van gesloten of gedeeltelijk doorlatende schermen
- aanbrengen van (regelbeplanting uit) bomen
- plaatsen van struiken.

Voor gedeeltelijk doorlatende schermen en luifels is geperforeerd metaalplaat en gaas aanwezig. De gewenste aanpassing wordt uitgezaagd of geknipt en op de maquette bevestigd. Er zijn platen die ca. 33, 50 of 65% aan perforaties hebben.

Bomen kunnen gerealiseerd worden als “gaas op pootjes”, de zgn. TNO-boompjes. Deze boompjes doen minder dan boompjes die gevormd zijn uit staalwol (Sorbo-boompjes), figuur 31. Staalwol boompjes hebben wel het voordeel dat ze, net als bomen in werkelijkheid, de valwinden van de gevel kunnen opvangen, dit in tegenstelling tot gevouwen gaas.

Struiken kunnen eveneens geformeerd worden uit gaas, of staalwol.



Figuur 31: Bomen weergegeven door gaaselementen en bolletjes staalwol

5.3. Welke onderzoeken nog meer in de windtunnel?

Naast het meten van de windsnelheid op looppniveau kan onderzocht worden:

- de winddruk op bepaalde plaatsen op gevels en daken (drukmetingen met slangetjes in holle maquette).
- krachten op gebouwen (balansmetingen, soms is elastisch model wenselijk).
- verspreiding verontreinigingen en kortsluiting (rook van afvoer naar luchttoevoer).
- ventilatie van b.v. parkeergarage (met tracergas; concentratiemetingen).

5.4. Rapportage

In een rapport dient in het algemeen ten minste beschreven te worden:

- nulvariant (huidige situatie zonder nieuwbouwplan).
- situatie met bouwplan in "basisuitvoering"
- één of meerdere configuraties met aanpassingen ter verbetering van het windklimaat.



5.5. Leren (van fouten)

De modelschaal dient niet te groot gekozen te worden. Ook al laat de blokkeringsgraad van de tunnel een grote modelschaal toe, dan nog is het zinvol om tenminste de eerste ring van bebouwing rondom het bouwplan mee te nemen. Soms wordt om die reden met aanvullende, buiten de draaischijf geplaatste bouwvolumes gewerkt.

Soms wordt onvoldoende rekening gehouden met de grote openingen in de eerste rij van de bebouwingen. Dit leidt er dan toe dat hulpmiddelen gebruikt moeten worden om het effect van de achterliggende bebouwing te simuleren. Bedacht moet worden dat de blokjes die gebruikt worden voor de oppervlakteruwheid een beperkte hoogte hebben. Wanneer een wat grotere modelschaal wordt gebruikt zullen gebouwen met een hoogte van meer dan 10 m toch een belangrijk effect blijven houden. In zo'n geval levert een verlaging van de modelschaal een dubbel voordeel op.



6. CFD onderzoek

Binnen CFD wordt de stroming rond de bebouwing middels numerieke berekeningen bepaald. Teneinde een goed beeld te krijgen van de sterke en zwakke punten van CFD berekeningen zal eerst kort de achtergrond van CFD besproken worden, waarna er een aantal praktische aspecten voor het op correcte wijze uitvoeren van een CFD onderzoek worden toegelicht.

6.1. Theorie

Binnen CFD wordt het te onderzoeken volume opgedeeld in een groot aantal rekencellen. De bewegingsvergelijkingen voor de stromende lucht zijn de Navier-Stokes vergelijkingen:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) u_i = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i$$

Deze worden gediscetiseerd, waarna deze op iteratieve wijze, samen met de continuïteitsvergelijking, opgelost worden. Het probleem daarbij is echter dat de vergelijkingen intrinsiek instabiel zijn. Dat klopt ook als je naar de stromende lucht kijkt: turbulentie is een instabiel, chaotisch proces, dat op geen enkele wijze volledig te voorspellen valt. Het exacte verloop van stromingen valt dan ook allen op heel kleine schaal volledig fysisch correct te beschrijven, met zogenaamde Directe Numerieke Simulaties (DNS). Als men bedenkt dat de kleinste schaal in werkelijkheid bij een beetje forse wind in de orde grootte van een millimeter ligt, terwijl de grootste schalen die van belang zijn afmetingen hebben van honderden meters, is het al snel duidelijk dat het niet mogelijk is de stroming volledig op te lossen. Evenals bij windtunnel onderzoek zijn we niet geïnteresseerd in deze kleinste schalen. Er bestaat dan ook de mogelijkheid deze kleinste schalen te modelleren middels een aantal vergelijkingen, en alleen de grote schalen expliciet te berekenen. Dit wordt binnen de stromingsleer aangeduid met Large Eddy Simulaties (LES). Ook voor LES berekeningen in een complexe stedelijke omgeving zijn de huidige generatie computers echter nog niet krachtig genoeg: er zou een zeer fijn rekengrid nodig zijn dat met een zeer kleine tijdstap gedurende een lange periode doorgerekend dient te worden. Dit is met krachtige supercomputers wellicht mogelijk, maar zou het qua kosten en doorlooptijd afleggen tegen een windtunnelonderzoek. CFD berekeningen ten behoeve van windklimaatberekeningen zijn dan ook altijd zogenaamde RANS berekening.

Teneinde met de beschikbare computerkracht het windklimaat te kunnen berekenen, worden de bewegingsvergelijkingen zo omgeschreven dat alleen de gemiddelde stroming berekend wordt. Dit wordt gedaan door de verschillende grootheden in de vergelijkingen (met name verschillende snelheidscomponenten en de druk) te splitsen in een gemiddeld en een fluctueren deel en vervolgens de vergelijkingen te middelen, waardoor het fluctuerende deel wegvalt. Deze procedure wordt Reynolds-middeling genoemd (naar degene die deze truc voor het eerst uitvoerde). Het resultaat zijn de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) vergelijkingen. Het resultaat is hieronder weergegeven:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f}_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (13)$$

Als we de vergelijking bekijken zien we dat er nog steeds één term is die niet de gemiddelde snelheid of de gemiddelde druk bevat, maar nog steeds afhankelijk is van de snelheidsfluctuaties:



$$-\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (14)$$

Deze term wordt veelal aangeduid als de “Reynolds-stress” en beschrijft de correlatie tussen de snelheidsfluctuaties in de verschillende richtingen. Dit kan worden geïnterpreteerd als de interactie tussen twee locaties in de stroming door de turbulente wervels. Om de RANS vergelijkingen op te kunnen lossen zal deze term gemodelleerd moeten worden. In de loop der tijd zijn er verschillende zogenaamde turbulentiemodellen opgesteld, waarvan het $k\varepsilon$ -model (en varianten daarop) het meest gebruikt wordt. en kan worden gezien als een “turbulente viscositeit”: hoe groter de turbulentieintensiteit, hoe groter de interactie tussen de verschillende plekken in de stroming, hoe groter de turbulente viscositeit. Bij het $k\varepsilon$ -model worden aan de bewegingsvergelijkingen twee extra vergelijkingen toegevoegd, die variantie van de snelheid k en de dissipatie (de snelheid waarmee de turbulentie uitdooft) ε beschrijven.

Samenvattend hebben we de instabiele, tijdsafhankelijke Navier-Stokes vergelijkingen vervangen door vergelijkingen die alleen afhankelijk zijn van de gemiddelde stroming plus twee extra vergelijkingen die de turbulentie beschrijven.

Bij deze procedure raken we een stuk informatie kwijt. Zo is in werkelijkheid de turbulentie niet in alle richtingen hetzelfde, terwijl in het turbulentie model geen richtingsafhankelijkheid zit. Ook raken we een stuk ruimtelijk informatie kwijt. Binnen het $k\varepsilon$ -model bestaat de turbulentie uit twee parameters, terwijl in werkelijkheid er een heel spectrum aan ruimteschalen is. Er zijn dan ook situaties waarin RANS-berekeningen falen. In veel gevallen echter kan een redelijk beeld van de stroming in een stedelijke omgeving verkregen worden.

Naast nadelen heeft een onderzoek met CFD ook voordelen: de belangrijkste is dat de resultaten niet op een beperkte set meetpunten maar in het volledige domein bekend zijn. Daarnaast is naast de grootte ook de richting van de snelheid bekend, wat het adviseren van maatregelen soms eenvoudiger maakt.

6.2. CFD-pakketten

Er zijn veel verschillende software pakketten op de markt waarmee CFD berekeningen kunnen worden uitgevoerd. De verschillen tussen deze pakketten zijn groot, maar met de meeste kunnen, mits kundig bedient, windklimaatberekeningen worden uitgevoerd. Hierbij is het zo, dat dure, commerciële pakketten niet tot betere resultaten behoeven te leiden dan minder dure of gratis pakketten. Er zijn echter een aantal randvoorwaarden waaraan een pakket moet voldoen om bruikbaar te zijn:

- De juiste turbulentiemodellen moeten aanwezig zijn.
- De juiste randvoorwaarden moeten opgelegd kunnen worden (snelheidsprofiel, turbulentieprofiel).
- Er moet voldoende vrijheid zijn om het rekengrid aan te passen op de door te rekenen situatie.

De belangrijkste factor voor het al dan niet betrouwbaar zijn van de resultaten van CFD berekeningen is niet het pakket waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd, maar de adviseur die het pakket bedient. Binnen vrijwel elk CFD-pakket is er een grote keus aan numerieke schema's en numerieke solvers. Elk van deze schema's en solvers zal leiden tot een resultaat, maar de kwaliteit van hiervan zal deels afhankelijk zijn van de juiste keuze hierin in combinatie met het rekengrid dat rond de bebouwing is gelegd.



Stichting
Kennisoeverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

6.3. CFD-berekeningen aan het windklimaat

Opzet

Net als een windtunnelonderzoek moet ook een onderzoek met behulp van CFD berekeningen op de juiste wijze worden opgezet en aan een aantal randvoorwaarden voldoen. Analoog aan een windtunnelonderzoek moet ook voor CFD berekeningen een model gemaakt worden, waarbij voldoende omgevingsbebouwing meegenomen wordt. Ook de blokkering van het rekendomein moet klein genoeg zijn. Voor een uitgebreide beschrijving van de randvoorwaarden waaraan een wetenschappelijk verantwoorde CFD berekening moet voldoen zie [23]. Er zullen, wil het onderzoek voldoen aan de randvoorwaarde van de NEN 8100, berekeningen moeten worden uitgevoerd voor 12 windrichtingen, en analoog aan het windtunnel onderzoek zal de windstatistiek in rekening moeten worden gebracht bij de beoordeling van het windklimaat.

Randvoorwaarden

Aan de rand van het rekendomein waar de lucht binnen stroomt of uitstroomt, moeten de juiste randvoorwaarden worden opgelegd. Het is ondoenlijk om het rekendomein zo groot te maken dat het snelheidsprofiel en turbulentieprofiel zich binnen het domein zich volledig ontwikkelen. Voor de snelheid zal er dus niet een uniforme snelheid opgelegd mogen worden, maar moet er een snelheidsprofiel (bijvoorbeeld het log-profiel zoals beschreven in hoofdstuk 2) voorgeschreven worden. Dat zelfde geldt voor de turbulente grootheden k en ε (zie bijvoorbeeld Blocken [24]). Een berekening zonder de juiste randvoorwaarden zal leiden tot een onbetrouwbare uitkomst.

Rekengrid

Eén van de bepalende factoren van de betrouwbaarheid van de resultaten van CFD berekeningen is de kwaliteit van het rekengrid. Met name in het interessegebied moet er voldoende resolutie aanwezig zijn om de stroming te kunnen berekenen. Op grotere afstand van het interessegebied mag het rekengrid wat minder fijn zijn. Gezien het feit dat de berekeningen gericht zijn op het windklimaat, waarbij er beoordeeld wordt op de snelheden op een hoogte van 1,75 m, zullen er in de onderste laag van het domein voldoende rekencellen moeten liggen. Deze hoogte zal minimaal in de vierde cel vanaf de bodem moeten liggen. Ook in de openingen tussen de gebouwen die het windklimaat in het interessegebied bepalen moeten voldoende cellen liggen, waarbij zo mogelijk een grotere cel-dichtheid bij de gevels aanwezig is teneinde de gradiënten in de snelheid op deze plekken goed te kunnen beschrijven. Natuurlijk zijn er voor complexe situaties meer rekencellen nodig dan voor eenvoudige situaties. De kwaliteit van een CFD berekening puur beoordelen op het aantal rekencellen is echter te kort door de bocht: een onderzoek met veel rekencellen op plekken waar ze er eigenlijk niet toe doen kan leiden tot minder betrouwbare resultaten dan een onderzoek met een goed ontworpen rekengrid met de helft van het aantal cellen.



7. Maatregelen ter verbetering van het windklimaat

7.1. Fundamentele aanpassingen

Vaak wordt een windtunnelonderzoek uitgevoerd nadat het VO of zelfs DO is vastgesteld. Het is dan veelal niet meer mogelijk om een belangrijke wijziging gehonoreerd te krijgen. Dit impliceert dat, voor het bereiken van een ontwerp waarin rekening is gehouden met het aspect windhinder, in de fase waarin de massastudies worden verricht aandacht moet worden gegeven aan windhinder. Zonder windtunnelonderzoek (met een klein budget) maar met kennis en ervaring van windhinder dienen dan adviezen verstrekt te worden die - indien opgevolgd - een veel grotere invloed op het windklimaat hebben dan een duur windtunnelonderzoek.

7.1.1. Stedebouwkundig plan

Zie de SBR-publicaties en o.a. Gandemer voor de beoordeling van stedenbouwkundige rangschikking van bouwblokken.

Alert zijn op:

- hoogbouw in een wijk van laagbouw
- hoogbouw bij winkelcentra etc.
- positionering van bouwvolumes ten opzichte van elkaar
- voorkomen van kanaliseringseffect
- hoofdassen van wegen en in Nederland overheersende windrichting
- plaats van parken, pleinen, terrassen en speelplaatsen (in het algemeen: plaatsen waar een hoge eis aan het windklimaat wordt gesteld) ten opzichte van hoogbouw etc.
- plaats van (hoofd-)entree van winkelcentrum ten opzichte van meest voorkomende windrichting.

7.1.2. Individuele gebouwen

Bij vormgeving van afzonderlijke gebouwen kan door gebouwvorm(-en) het windhinderaspect worden betrokken. Let op gebouwhoogte en plaats ten opzichte van bestaande bebouwing. Bij hoogbouw denken aan piramidevormig gebouw, hoogbouw op laagbouw, etc.

Probeer onderdoorgangen te voorkomen.

Belangrijke stromingen komen voor tussen het (over-)drukveld voor, en het onderdrukveld achter het gebouw. Tracht deze drukvelden te verkleinen (voorbeeld: VNO-kantoor met open parkeergarage over eerste vijf bouwlagen).

Indien verblijfsgebieden voor langdurig verblijf gewenst zijn bij het gebouw (parkjes, terrassen) aandacht besteden aan plaats van het gebied ten opzichte van gebouwen.

Voor winkelcentra gelden strenge eisen. Letten op plaats (hoofd-)entree t.o.v. overheersende windrichting. Combinatie van winkelcentrum met hoogbouw is vrijwel altijd problematisch.

Indien het project bestaat uit meerdere bouwvolumes bij elkaar, waartussen hinder kan ontstaan: voorstellen deze door een laagbouw te verbinden, of te overkappen met een geheel of gedeeltelijk (ca. 60% of meer) gesloten dak



(pergola o.i.d.).

7.2. Maatregelen bij gebouwen waarvan het ontwerp “vast” ligt

Vaak wordt pas onderzoek naar het windklimaat uitgevoerd wanneer het definitief ontwerp vastgesteld is en het ontwerp door de welstandscommissie is beoordeeld. Mogelijkheden om aan het gebouw iets fundamenteel te wijzigen zijn er dan niet meer.

Maatregelen die dan getroffen kunnen worden liggen in de sfeer van:

- verplaatsen kritische verblijfs- of verkeersgebieden naar minder gevaarlijke of hinderlijke gebieden
- plaatselijk verbeteren van het windklimaat
- ontoegankelijk maken van “gevaarlijke” gebieden

7.2.1. Verplaatsen kritische gebieden

Vaak bestaan er nog mogelijkheden om ongunstig gesitueerde entrees te verplaatsen naar een andere locatie. Vooral alert zijn op entrees gesitueerd in onderdoorgangen en tussendoorgangen.

Ook voor terrassen gelden strenge eisen: probeer deze op een qua windklimaat zo gunstig mogelijke positie te situeren.

7.2.2. Plaatselijk verbeteren windklimaat

Horizontale afscherming

Bij luchtstromingen die een sterke verticale component hebben kan een horizontale afscherming een positief effect hebben.

Te denken valt aan luifels boven een entree, figuur 32. Over het algemeen moeten luifels wel een grote afmeting hebben om te bereiken dat men in een luw gebied komt. Omdat ook horizontale luchtstromingen vaak een rol spelen, zullen de luifels vaak een zijdelingse afscherming moeten hebben om een duidelijke verbetering onder de luifel te veroorzaken. Deze zijdelingse afscherming is bij voorkeur niet geheel gesloten, maar 30 tot 50% open. N.B. in de SBR publicatie staat aangegeven dat van luifels in het algemeen weinig verbetering verwacht mag worden. Bedacht moet echter worden dat in het gebied voor een entree een hogere eis gesteld wordt dan in het doorloopgebied naar de entree.

Dit is ook niet vreemd als gedacht wordt aan de acties die gepleegd worden om binnen te komen (koffertje neerzetten, deur openen, aanbellen, via intercom communiceren, wachten tot de deur wordt geopend, etc.). Een beter windklimaat in juist dit gebied heeft dan toch een belangrijk voordeel, ook al is het zo dat men om daar te komen toch nog door een gebied met matig tot slecht windklimaat moet wandelen.



Figuur 32 Een luifel voor verbetering van het windklimaat is effectief bij verticale windstroming

Een horizontale afscherming kan ook boven een zitplaats in een terras of prakje, of boven parkeerplaatsen worden gerealiseerd door het aanbrengen van een pergola.

Ook kan bij een parkeerplaats een beplanting met veel middelgrote bomen, waardoor men zich bevindt onder aaneengesloten boomkruinen, een positief effect hebben.

Tussen gebouwen kan het aanbrengen van een horizontale afscherming in de vorm van een dak (gesloten of gedeeltelijk gesloten) zinvol zijn, maar let erop dat wanneer een overdrukgebied en een onderdrukgebied aan weerszijden van dat horizontaal beschermende gebied grenzen, er een grote horizontale luchtstroming optreedt die nog steeds kan leiden tot een slecht windklimaat.

Vaak moeten horizontale afschermingen gecombineerd worden met verticale schermen.



Verticale afschermingen

Door het plaatsen van schermen kan het gebied dat aan de loefzijde van het scherm ligt beschermd worden. Wanneer een gesloten scherm wordt toegepast zal achter het scherm een onderdruk optreden, waardoor nog steeds sterke stromingen achter het scherm optreden. Gedeeltelijk gesloten (geperforeerde) schermen hebben een beter effect, en over een redelijke afstand. Door meerdere schermen evenwijdig aan elkaar te plaatsen kan in een behoorlijk gebied een verbetering worden bereikt. Wel dient de afstand tussen de schermen dan niet te groot te zijn, om te voorkomen dat wervels het loopniveau bereiken. Door een juiste afstand tussen de schermen te kiezen wordt als het ware bereikt dat de luchtstroming wordt opgetild tot boven het niveau van de schermen. Bij geperforeerde schermen mogen de afzonderlijk openingen niet te groot zijn. Met regelbeplanting kan eenzelfde effect bereikt worden als met bouwkundige schermen.

Horizontale afscherming tussen gebouwen kan ook bereikt worden met verspringende schermen, waardoor als het ware een doolhof ontstaat. Bij het bouwplan Leonardo da Vinci zijn voor dit doel kiosken geprojecteerd. Een doolhof dient goed gedimensioneerd te worden: wanneer de afstand tussen de schermen te groot wordt kan een verslechtering van het windklimaat optreden.

Door rondom het gebouw regelbeplantingen of veel behoorlijke bomen te situeren kan in een groot gebied bereikt worden dat de stroming wordt “opgetild” en de grote snelheden boven het loopniveau optreden.

Wanneer bomen worden toegepast met een behoorlijk takkengestel in de kruin is de stromingsweerstand die bereikt wordt in de periode dat er geen bladeren aan de boom zitten vaak voldoende groot. Bij de keuze van beplantingen dienen (door een hovenier) bomen en struiken geselecteerd te worden die tegen grote windkrachten bestand zijn.

Ontoegankelijk maken van slecht gebied

Incidenteel kan overwogen worden een gebied waar een heel slecht windklimaat heerst een zodanige bestemming te geven dat verwacht mag worden dat er geen voetgangers of fietsers komen. Dit kan bereikt worden door dichte beplantingen of door vijvers.



SKB

Stichting
Kennisoverdracht
Bouwfysica

TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Symbolen

I_z turbulentie-intensiteit op hoogte z

U de uurgemiddelde windsnelheid langs de as in de gemiddelde windrichting

U_{eff} effectieve windsnelheid

U_z (uurgemiddelde) windsnelheid op hoogte z

U_1, U_2 (uurgemiddelde) windsnelheid op hoogte 1 resp. 2

$U_{1,75}$ windsnelheid op loophoogte

U_{10} windsnelheid op 10 m hoogte (bij meteo-station)

c vergrotingsfactor

c_p winddrukcoëfficiënt

k Von Karman constante

k gewichtsfactor, die aangeeft in hoeverre de vlagerigheid van de wind mee wordt gerekend

u wrijvingssnelheid

u de momentane windsnelheid langs de as in de gemiddelde windrichting

u' de momentane afwijking van de uurgemiddelde windsnelheid

z hoogte boven het aardoppervlak

z_0 ruwheidslengte

z_1, z_2 hoogte 1 resp. 2

σ_{Uz} standaardafwijking in de snelheid

σ standaarddeviatie voor de windsnelheidsvariaties in de richting van de uurgemiddelde windsnelheid

ρ volumieke massa van lucht ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

ν kinematische viscositeit



Literatuur

1. Aynsly, R.M.; W. Melbourne. B.J. Vickery; Architectural Aerodynamics, Applied Science Publishers Ltd, London 1977
2. SBR, Beperken van windhinder om gebouwen deel 1 + fotobijlage, Stichting bouwresearch, SBR 65, 1979
3. SBR, Beperken van windhinder om gebouwen deel 2 + fotobijlage, Stichting bouwresearch, SBR90, 1982
4. Wieringa, J; P.J. Rijkoort: Windklimaat van Nederland; Staatsuitgeverij, 1983
5. Visser, ing. G. Th; Post HBO-opleiding 'Bouwfysica' IBBB 's Hertogenbosch, 1997-1998, deel Windhinder & bezonning
6. Bottema, dr. Ir. M., Post HBO-opleiding 'Bouwfysica' IBBB 's Hertogenbosch, 1997-1998, deel Windhinder & bezonning
7. Pleysier, ir. J.A.; Post HBO-opleiding 'Bouwfysica' IBBB 's Hertogenbosch, 1997-1998, deel Windhinder & bezonning
8. KNMI, Klimaatatlas van Nederland; Staatsuitgeverij, Den Haag, 1972
9. Bottema, drs. M; Windhindercriteria en overschrijdingskansen, Fago-rapport 89.17.K, 1989
10. Bottema, drs. M; Windclimate and Urban geometry, dissertatie (rapport 92.63.K), TUE, 1992
11. Bottema, dr. M.; A method for optimization of wind discomfort criteria, 'Building and Environment'.
12. Wisse, prof. Dr. J.A.; dr. M. Bottema; Fragen des Windkomforts (Stuttgart ? onbekend)
13. Wu, Hanqing; Pedestrian Level Wind Environment around Buildings; dissertatie Concordia University Montreal, Quebec, 1994
14. Visser, ing. G. Th; Windhindercriteria; TNO-rapport 90-376; Apeldoorn, november 1990
15. Visser, ing. G. Th; Windhinder: criteria; in bundel KIVI - symposium windhinder, 1989
16. Wisse, prof. Dr. J.A.; Inleiding: wind in de gebouwde omgeving; in bundel KIVI - symposium windhinder, 1989
17. Dienst REO, Den Haag; Windhinder rond nieuwbouw; Den Haag, 1995
18. Van Dorsser Raadgevende Ingenieurs: Alternatieve criteria voor het beoordelen van het windklimaat op loopniveau in de bebouwde omgeving; Den Haag, 1995
19. Melbourne, W.H.; Criteria for environmental wind conditions; J. of Ind. Aerodynamics 3, pag. 241-249, 1978
20. Gandemer, J.; Aerodynamic studies of built-up areas made by CSTB at Nates, France; J. of Ind. Aerodynamics 3, pag. 227-240, 1978
21. Haartsen, ir. T.J.; ir. H.W. Krüs, ir. R. Ruijsink, Rekenen met wind, Bouwfysica vol. 8, 197 no. 1
22. Willemsen, ir. W.; Windhinder: meettechnieken in de windtunnel. NLR technische publikatie TP89400 L, 1989.
23. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, K.H. and Carissimo, B. (Eds.) Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, COST Office Brussels, Belgium, 2007
24. Blocken, B., T. Stathopoulos, T., Carmeliet, J.E., CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, Atmospheric Environment, Vol. 41(2007), No. 2, p. 238-252