

Bijlage II Windbelastingen

Deze bijlage is informatief

**(alleen de rood gemarkeerde delen dienen als
normatief onderdeel gelezen te worden)**

Algemeen

Wind is een horizontale luchtstroming, die ontstaat als gevolg van verschillen in verticale luchtdruk in de atmosfeer tussen twee gebieden.

De lucht stroomt van een gebied met hoge luchtdruk naar een gebied met lage luchtdruk.

De snelheid waarmee de luchtmasa stroomt tussen de twee gebieden, hangt onder andere af van het verschil in verticale luchtdruk tussen de gebieden.

De snelheid hangt ook af van de weerstand, die de bewegende luchtmasa ondervindt van het terrein eronder.

Vlak open terrein (of een glad wateroppervlak, zoals de zee) levert een hoge snelheid op en ruw terrein met veel verticale opstanden (bijv. gebouwen of bomen) levert een lagere snelheid op.

Daarnaast is de snelheid afhankelijk van de hoogte ten opzichte van het terrein. Dicht bij het weerstand biedende terrein zal de snelheid lager zijn en op grotere hoogte (verder van het weerstand biedende terrein af) is de snelheid hoger.

Vooralsnog gaan we ervan uit dat de luchtsnelheid, beïnvloed door deze 3 aspecten (luchtdrukverschillen, globale terreinruwheid en hoogte ten opzichte van het terrein), gelijkmatig is.

We kunnen de luchtsnelheden uitdrukken in m/sec of in km/uur. Voor meteorologische doeleinden wordt de windsnelheid ook wel uitgedrukt in een waarde op de schaal van Beaufort. Deze schaal loopt van 1 tot 12 en geeft per windsnelheidswaarde een beschrijving van het waarneembare effect van de windsnelheid op de omgeving.

Ter informatie is hieronder een tabel opgenomen met alle Beaufort-waarden met de daarbij behorende windsnelheden. Meer over de Beaufort-waarde, zie verderop.

(Bron: www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/windschaal-van-beaufort)

kracht*	benaming	wind gemiddelde snelheid over 10 minuten [km/h]	wind gemiddelde snelheid over 10 minuten [m/sec]	uitwerking boven land en bij mens
0	stil	0-1	0-0,2	rook stijgt recht of bijna recht omhoog
1	zwak	1-5	0,3-1,5	windrichting goed af te leiden uit rookpluimen
2	zwak	6-11	1,6-3,3	wind merkbaar in gezicht
3	matig	12-19	3,4-5,4	stof waait op
4	matig	20-28	5,5-7,9	haar in de war; kleding flappert
5	vrij krachtig	29-38	8,0-10,7	opwaaiend stof hinderlijk voor de ogen; gekuifde golven op meren en kanalen; vuilcontainers waaien om
6	krachtig	39-49	10,8-13,8	paraplu's met moeite vast te houden
7	hard	50-61	13,9-17,1	het is lastig tegen de wind in te lopen of te fietsen
8	stormachtig	62-74	17,2-20,7	voortbewegen zeer moeilijk
9	storm	75-88	20,8-24,4	schoorsteenkappen en dakpannen waaien weg; kinderen waaien om
10	zware	89-102	24,5-28,4	grote schade aan gebouwen; volwassenen waaien om
11	zeer zware	103-117	28,5-32,6	enorme schade aan bossen

12	orkaan	>117	>32,6	verwoestingen
----	--------	------	-------	---------------

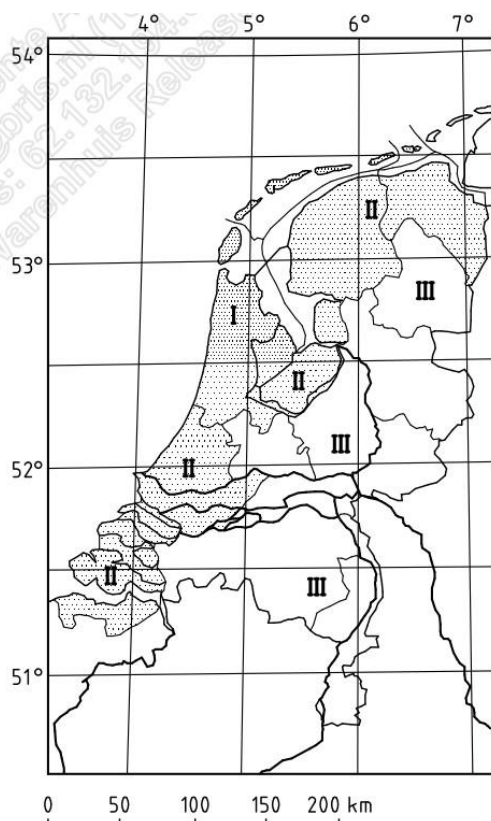
(Bron: Weergaloos Nederland. Uitgeverij Kosmos/Z&K, Utrecht, 1997/2004)

* de windkracht volgens Beaufort wordt bepaald uit het gemiddelde van de windsnelheid over 10 minuten

De fundamentele basiswindsnelheid $v_{b,0}$

De door het KNMI afgegeven windsnelheidsverwachting is de gemiddelde snelheid over een periode van 10 minuten en optredend in een vrij en open veld op een hoogte van 10 m.

Deze verwachtingen zijn dus gebaseerd op dezelfde uitgangspunten als voor de fundamentele basiswindsnelheid $v_{b,0}$ uit NEN-EN 1991-1-4 gelden.



Figuur NB.1 — Indeling van Nederland in windgebieden

(Bron: www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/windmetingen)

De door het KNMI afgegeven windverwachting in Beaufort kan daarmee direct vergeleken worden met de in NEN-EN-1991-1-4 opgenomen fundamentele basiswindsnelheid $v_{b,0}$.

Voor Nederland zijn 3 windgebieden vastgelegd en daarmee 3 fundamentele basiswindsnelheden. Deze waarden zijn vastgesteld aan de hand van statistische interpretatie van een groot aantal windmetingen door diverse weerstations. De terreingesteldheid (glad of ruw) speelt een rol bij de hoogte van deze waarden.

De windgebieden zijn in NEN-EN 1991-1-4 vastgelegd in Figuur NB.1 en de waarden van de fundamentele basiswindsnelheid in Tabel NB.1. Deze figuur en tabel zijn hieronder ter informatie opgenomen.

Tabel NB.1 — $v_{b,0}$ voor toepassing in Nederland

Windgebied	I	II	III
$v_{b,0}$ [m/s]	29,5	27,0	24,5

De basiswindsnelheid v_b

Naast de genoemde 3 factoren (luchtdrukverschillen, globale terreinruwheid en hoogte ten opzichte van het terrein) die van invloed zijn op de hoogte van de windsnelheid, kan de windsnelheid ook variëren per seizoen en per windrichting. De langjarige gemiddelde maandelijkse windsnelheid is in januari (maximale maand) veel hoger dan in augustus (minimale maand). Dit verschil kan in rekening gebracht worden door de factor c_{season} . Er kan ook een bepaalde heersende windrichting zijn waarin de windsnelheden gemiddeld hoger zijn. In het westen van Nederland is het westen gemiddeld genomen een heersende windrichting. Deze variatie per windrichting kan in rekening gebracht worden door de factor c_{dir} .

Deze twee factoren geven de basiswindsnelheid:

$$v_b = c_{\text{season}} * c_{\text{dir}} * v_{b,0} \text{ [m/sec]} \text{ (NEN-EN 1991-1-4, formule 4.1)}$$

Uit de statistische interpretatie van een groot aantal metingen door diverse meteorologische stations in Nederland over het gehele jaar zijn de hieronder gegeven reductiefactoren afgeleid. Daarbij is minimale factor van 0,85 als veilige ondergrens aangenomen.

periode	C _{season}
januari - februari	1,00
maart - april	0,90
mei - juni	0,85
juli - augustus	0,85
september - oktober	0,90
november - december	1,00

Dit levert een maximale reductie van de stuwdruk op van $0,85^2 = 0,72$ (28% reductie).

Voor de Nationale Bijlage van NEN 1991-1-4 is besloten om, als meest veilige benadering, de beide factoren C_{season} en C_{dir} op 1,0 aan te nemen.

In de voornorm voor de NEN-EN 1991-1-4 werd de factor C_{season} aangeduid als C_{TEM} . Deze factor C_{TEM} is ook gebruikt in de rekennorm voor tenten NEN-EN 13782. Evenementen vinden doorgaans plaats in de zomer. Voor deze reductiefactor wordt daarom in deze norm de waarde 0,8 (versie 2005) resp. 0,7 (versie 2015) opgegeven. We moeten ons er echter rekenschap van geven, dat deze factor een reductie tot $0,8^2 = 0,64$ (36% reductie) resp. $0,7^2 = 0,49$ (51% reductie) van de uiteindelijke stuwdruk q_p oplevert.

Er moet op worden toegezien dat het betreffende bouwsel alleen gebruikt wordt in het jaargetijde waarin het gebruik van $C_{season} = 0,8$ verantwoord is. Daarnaast kunnen juist in zomerstormen hoge pieksnelheden optreden. Ook daarom is terughoudendheid in het toepassen van C_{season} op zijn plaats en het verdient dan ook aanbeveling niet verder dan een factor 0,85 te reduceren.

Wanneer een tent langdurig gebruikt wordt voor bijvoorbeeld de huisvesting van vluchtelingen mag deze factor niet in rekening gebracht worden en moet de berekening volledig gebaseerd zijn op NEN-EN 1991-1-4.

De referentieperiode

Een ander aspect dat van invloed is op de hoogte van de meerjarige gemiddelde windsnelheid, is de gebruikperiode van het betreffende bouwwerk of bouwsel. Voor bouwwerken en gebouwen wordt uitgegaan van een gebruikperiode (ontwerplevensduur) van 50 jaar. Wanneer deze periode veel korter is (bijvoorbeeld bij evenementen) mag de windsnelheid op statistische gronden verlaagd worden. In NEN-EN 1991-1-4 kan dit met gebruikmaking van de factor C_{prob} (formule 4.2).

$$C_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n$$

Hierin is p de jaarlijkse overschrijdingskans $p = 1 - e^{-1/T}$ waarin T de gekozen ontwerplevensduur in jaren is.

Bij verwerking van de uitdrukking voor p in de formule voor C_{prob} kan deze worden omgezet in de eenvoudiger formule:

$$C_{prob} = \left[\frac{1 + K \cdot \ln(T)}{1 + K \cdot \ln(50)} \right]^n$$

Hierin zijn K en n opgegeven in NEN-EN 1991-1-4, Tabel NB.2.

In de rekennorm voor tenten NEN-EN 13782 is de ontwerplevensduur aangenomen op 10 jaar.

Dit geeft een $C_{prob} = 0,9$.

Gebruik van deze factor bij een zeer lage ontwerplevensduur (bij evenementen in het kader van deze richtlijn bijvoorbeeld minder dan 3 maanden) leidt het gebruik van deze factor tot niet realistische windsnelheden.

Hierbij zouden formeel al bij erg lage windsnelheden de beheersmaatregelen in gang gezet moeten worden.

Er mag dus een verlaagde windsnelheid, en dus een verlaagde extreme stuwdruk aangenomen worden voor het ontwerp van het bouwsel. In de beheersmaatregelen dienen deze lagere

ontwerputgangspunten, samen met de te nemen maatregelen bij overschrijding van de gekozen waarden, te zijn opgenomen.

Dit kan bijvoorbeeld van belang zijn bij het gebruik van bestaande bouwsels, die ooit op een lagere windbelasting zijn ontworpen. De toen gebruikte ontwerpbelastingen kunnen teruggerekend worden naar een toelaatbare "fundamentele basiswindsnelheid" conform NEN-EN 1991-1-4, waar in het kader van de beheersmaatregelen op gemonitord moet worden (hierover verderop in deze bijlage meer).

Het KNMI heeft meetresultaten beschikbaar van de frequentie van opgetreden windsnelheden over de jaren 1970 – 2000, gemeten op 28 meetpunten, verspreid door Nederland.

Deze resultaten geven een beeld van de variatie in optredende windsnelheden door het land, afhankelijk van locatie en tijd van het jaar. Deze tabellen zijn slechts indicatief. Voor de voor het ontwerp aan te houden windsnelheden moet de in de normen opgegeven snelheden worden aangehouden.

De gemiddelde windsnelheid $v_m(z)$

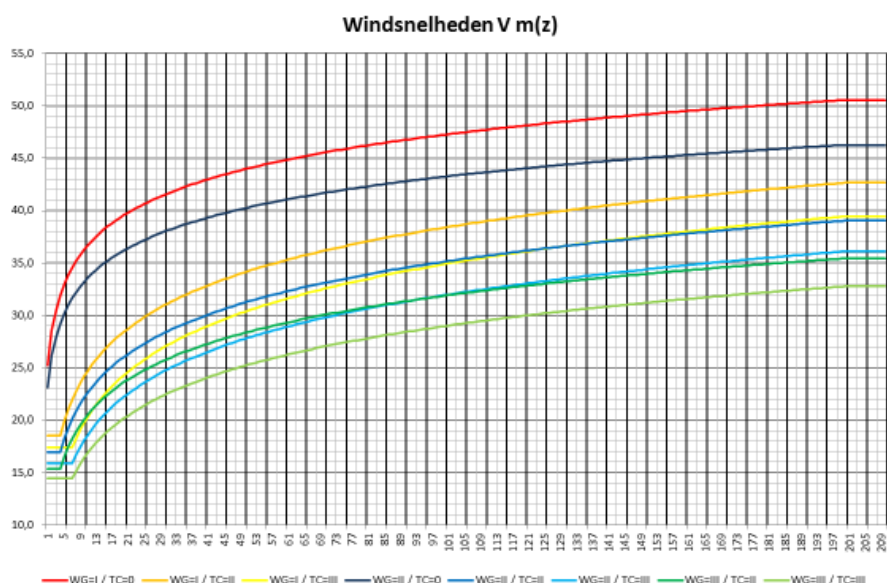
Naast de eerder genoemde globale terreinvloeden, die voor Nederland tot de 3 fundamentele basiswindsnelheden leiden, zijn op meer detailniveau 2 terreinfactoren van invloed, die bij verdere berekening tot een variatie van de windsnelheid in de hoogte leiden. Dit zijn de terreinruwheid, uitgedrukt in de ruwheidsfactor $c_r(z)$, en de invloed van hoogteverschillen in het terrein, uitgedrukt in de orografiefactor $c_o(z)$. Hoogteverschillen in terrein, die een substantiële invloed op de windsnelheid hebben, zijn in Nederland niet aanwezig. Daarom is in de NEN-EN 1991-1-4 deze factor op 1,0 gesteld. Voor een berekening van de ruwheidsfactor wordt hier korthedshalve verwezen naar NEN-EN 1991-1-4, art. 4.3.2. Verwerking van deze 2 factoren geeft de gemiddelde windsnelheid $v_m(z)$ op een hoogte z .

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b \text{ [m/sec]} \quad (\text{NEN-EN 1991-1-4, formule 4.3})$$

Dit is de gemiddelde windsnelheid, gerelateerd aan terreinruwheid en hoogte. Dit is ook de windsnelheid, zoals we die meten bij een terreinmeting die een tijdsduur van ten minste 10 minuten omvat.

Windmetingen in het terrein moeten dus altijd vergeleken worden met deze $v_m(z)$.

Wanneer we de gemiddelde windsnelheden voor de diverse windgebieden en terreincategorieën ten opzichte van de hoogte in grafiek uitzetten, zien we de invloed van de terreinruwheid duidelijk naar voren komen. Dicht bij de grond neemt de windsnelheid sterk af en op grotere hoogten nemen de snelheden nauwelijks meer toe.



Nabijgelegen bouwwerken

Als laatste aspect dat van invloed is op de gemiddelde windsnelheid, moet genoemd worden de invloed van naburige bouwwerken. Speciaal bij binnenstedelijke evenementen kunnen naburige bouwwerken grote invloed hebben op de gemiddelde windsnelheid. Deze invloed moet berekend worden volgens NEN-EN 1991-1-4, bijlage A.4. Naar deze bijlage wordt hier korthedshalve verwezen.

De piek- of vlaagwindsnelheid

Tot nu toe zijn alleen de gemiddelde windsnelheden beschouwd.

De snelheid waarmee de luchtmasa zich verplaatst is echter niet constant. Als gevolg van allerlei onderlinge krachten en drukverschillen tussen de luchtdeeltjes varieert de snelheid sterk in tijd en plaats.

De hoogste snelheden die daarbij op kunnen treden, noemen we windpieken of windvlagen.

Voor berekening van de kracht die door de wind op bouwwerken wordt uitgeoefend, moeten we daarom voor de meest veilige benadering geen gebruik maken van de gemiddelde windsnelheid, maar van de hoogst optredende snelheid, de piek- of vlaagwindsnelheid.

De relatie tussen de gemiddelde en de piekwindsnelheid is niet eenvoudig te leggen. In een rapport van het KNMI (WR-2006-05) lezen we bijvoorbeeld:

“Het stochastisch karakter van turbulentie maakt een deterministische beschrijving onmogelijk.”

Toch is men er in geslaagd door middel van uitgebreide metingen een wiskundige relatie te leggen tussen de gemiddelde snelheid en de pieksnelheid.

Bij het bepalen van de totale pieksnelheid (of vlaagsnelheid) zijn twee effecten van belang:

- turbulentie-effecten > wervelingen in de luchtmasa, veroorzaakt door wrijving met de ondergrond en botsingen met hoge opstanden (gebouwen of bomen);
- de variatie in lineaire luchtsnelheid > dit levert kortdurende pieksnelheden op.

De berekening van de turbulentie-invloeden is vastgelegd in NEN-EN 1991-1-4, art. 4.4. De invloed van turbulentie is vastgelegd in de turbulentie-intensiteit $I_v(z)$.

Voor de berekening van deze $I_v(z)$ wordt hier korthedshalve naar dit artikel verwezen.

Turbulentie-effecten zijn sterk afhankelijk van de hoogte en de terreinruwheid.

De waarden van $I_v(z)$ lopen uiteen van 0,1 (boven zee of kust op hoogten > 100 m) tot 0,37 (boven bebouwd gebied op hoogten < 10 m).

De berekening van de pieksnelheden zelf wordt in de eurocode niet verder uitgewerkt, maar deze ligt besloten in een enkele getalswaarde (7) in formule 4.8.

Vastgesteld is dat de verhouding tussen de gemiddelde windsnelheid en de kortdurende pieksnelheid, de piekfactor g , uit de drukken is in de volgende relatie:

$$g = 0,42 * \sqrt{\frac{T}{t}}$$

Hierin is: T = de middelingstijd [sec]

t = de vlaagduur [sec]

Voor de volgende middelingstijden en vlaagduren vinden we dan de volgende piekfactoren:

		T =					
	g	600	1200	2400	3000	3600	4200
t =	1	2,69	2,98	3,27	3,36	3,44	3,50
	2	2,40	2,69	2,98	3,07	3,15	3,21
	3	2,23	2,52	2,81	2,90	2,98	3,04
	4	2,10	2,40	2,69	2,78	2,86	2,92
	5	2,01	2,30	2,59	2,69	2,76	2,83

Hoe langer de middelingstijd en hoe korter de vlagduur, des te hoger de piekfactor.

Bij de verdere uitwerking van de berekening is ervoor gekozen de meest ongunstige van deze waarden als maatgevend aan te nemen, te weten $g = 3,5$.

Het gecombineerde effect van pieksnelheid en turbulentie kan worden uitgedrukt in de volgende vergelijking:

$$G = \frac{v_{\text{vlaag}}}{v_{\text{gem}}} = 1 + g * I_v \quad > \quad v_{\text{vlaag}} = v_{\text{gem}} * (1 + g * I_v)$$

Hier zien we de factor $(1+7 \cdot I_v(z))$ uit NEN-EN 1991-1-4, formule 4.8 al voorzichtig tevoorschijn komen. Bij een factor $g = 3,5$ vinden we, afhankelijk van I_v de volgende waarden voor G :

$I_v =$	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,400
$G =$	1,35	1,44	1,53	1,61	1,70	1,79	1,88	1,96	2,05	2,14	2,23	2,31	2,40

Hieruit zien we dat de vlaagsnelheid globaal een factor 1,5 tot 2,5 keer hoger kan zijn dan de gemiddelde snelheid.

Deze vlaagsnelheid is bepalend voor de optredende stuwdruk op het bouwwerk of bouwsel.

De stuwdruk q_p

De snelheid van de bewegende luchtmassa levert een hoeveelheid potentiële kinetische energie op. Wanneer de luchtmassa op een verticaal vlak botst, wordt de beweging omgezet in kinetische energie en daarmee in kracht op het vlak. In de berekening van windbelastingen is dit de stuwdruk.

De door de bewegende luchtmassa opgewekte energie (kracht) kan worden uitgedrukt in de volgende formule:

$$q_p = 1/2 * q * v_{vraag}^2 = 1/2 * p * (1 + g * I_v)^2 * v_{gem}^2$$

Hierin wordt: $(1 + g * I_v)^2 = 1^2 + 2 * g * I_v * (g * I_v)^2$

Met verwaarlozing van de laatste term wordt dit: $1 + 2 * g * I_v$

Met $g = 3,5$ wordt de formule: $1 + 2 * 3,5 * I_v = 1 + 7 * I_v$

Dit levert formule 4.8 op: $q_p = 1/2 * p * (1 + 7 * I_v) * v_{gem}^2$

Ondanks de verwaarlozing van de laatste term wordt met deze formule toch geacht een veilige benadering te zijn gekozen. De pieksnelheden zijn conservatief hoog gekozen, met name met de keuze van de piekfactor van $g = 3,5$. Daarnaast bezit een gemiddeld bouwwerk een massatraagheid die het effect van de windkracht met een duur van 1 sec op de inwendige krachten in de constructie aanzienlijk kan reduceren.

Bij lichte constructies, zoals bijvoorbeeld bij evenementen, moeten we het effect van pieksnelheden (met inachtneming van bovenstaande beschouwing) daarom niet onderschatten.

De Beaufortschaal

Door middel van trial-and-error is een formule ontwikkeld voor de relatie tussen de Beaufort-waarde en de daarbij behorende windsnelheid. De windsnelheden hebben een bandbreedte rond iedere Beaufort-waarde, die is opgenomen in de tabel in het algemene deel van deze bijlage. Wanneer deze formule wordt toegepast, ligt iedere hele Beaufort- waarde ongeveer in het midden van de in de tabel gegeven bandbreedte.

3

De formule luidt: $v = 0,836 * B^{\frac{1}{2}}$

waarbij:

v = de gemiddelde windsnelheid gedurende 10 minuten op 10 m boven de grond in m/sec
 B = de getallen op de Beaufortschaal

Verwarrend kan zijn dat in de meteorologie van "wind-kracht" gesproken wordt in relatie tot de Beaufort- getallen, terwijl hier geen sprake is van een kracht in de natuurkundige betekenis, maar alleen van een dimensieloos getal om de windsnelheden binnen een bepaalde bandbreedte een "naam" te geven.

Terugrekenen van q_p naar een toelaatbare " $v_{b,0}$ "

Veel evenementenconstructies zijn ontworpen op basis van uitgangspunten waarmee ze geacht worden in het hele land te kunnen functioneren. Bij oudere bouwsels kunnen deze uitgangspunten afkomstig zijn uit niet meer vigerende normen of wellicht zijn de uitgangspunten niet meer te achterhalen. Wanneer als enige gegeven bekend is de toelaatbare stuwdruk q_p zouden we dus willen weten welke windsnelheid in welk deel van het land hierbij toelaatbaar is.

Zoals we van $v_{b,0}$ naar q_p een bepaalde rekenweg volgen, kunnen we deze weg dus ook in omgekeerde volgorde afleggen (terugrekenen).

Het COBc heeft een spread-sheet ontwikkeld, waarbij vanuit een gegeven q_p , voor elke terreincategorie en elke bouwselhoogte, de toelaatbare $v_{b,0}$ op eenvoudige wijze kan worden berekend.

De sheet is te downloaden van de website van het COBc. Verderop is een voorbeeld van deze sheet opgenomen.

Samenvatting van de berekeningsgang van $v_{b,0}$ tot q_p

Hierna is een schematische samenvatting opgenomen van de berekening van $v_{b,0}$ tot q_p .

In dit voorbeeld is een bouwsel aangenomen met een hoogte van 7 m in windgebied III en terreincategorie II (onbebouwd gebied). Volgens tabel NB.5 moet hierbij $q_p = 0,62 \text{ kN/m}^2$ worden aangehouden. De terugrekening leidt tot een $v_{b,0} = 24,5 \text{ m/sec}$ (overeenkomstig windgebied III).

NEN-EN 1991-1-4 / Hfdst. 4 / Terugrekening van $q_p(z)$ naar $v_{b,0}$																							
Invoergegevens:	Extreme stuwdruk	$q_p(z) = 0,62$ [kN/m ²]																					
	Terreincategorie	Onbebouwd gebied (II)																					
	Ruwheidslengte	$z_0 = 0,200$ [m]																					
	Minimale hoogte	$z_{\min} = 4$ [m]																					
	Maximale hoogte	$z_{\max} = 200$ [m]																					
	Hoogte bouwsel boven maaiveld	$z = 7,0$ [m]																					
	Rekenhoogte voor $I_v(z)$ en $c_r(z)$	$z = 7,0$ [m]																					
	Dichtheid van lucht	$\rho = 1,25$ [kg/m ³]																					
	Windrichtingsfactor	$c_{dir} = 1,0$ [-]																					
	Seizoensfactor	$c_{season} = 1,0$ [-]																					
	Turbulentiefactor	$k_l = 1,0$ [-]																					
	Orografiefactor	$c_o(z) = 1,0$ [-]																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Terreincategorieën - Tabel NB.3-4.1</th></tr> <tr> <th>Terreincategorie</th><th></th><th>z_0 [m]</th><th>$z_{\min}$ [m]</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zee of kustgebied aan zee</td><td>0</td><td>0,005</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Onbebouwd gebied</td><td>II</td><td>0,200</td><td>4</td></tr> <tr> <td>Bebouwd gebied</td><td>III</td><td>0,500</td><td>7</td></tr> </tbody> </table>				Terreincategorieën - Tabel NB.3-4.1				Terreincategorie		z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]	Zee of kustgebied aan zee	0	0,005	1	Onbebouwd gebied	II	0,200	4	Bebouwd gebied	III	0,500	7
Terreincategorieën - Tabel NB.3-4.1																							
Terreincategorie		z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]																				
Zee of kustgebied aan zee	0	0,005	1																				
Onbebouwd gebied	II	0,200	4																				
Bebouwd gebied	III	0,500	7																				
$z_0 = \text{ruwheidslengte volgens art. 4.3.2(1)}$ $z_{\min} = \text{minimale hoogte volgens art. 4.3.2(1)}$																							
	Terreinfactor	$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} = 0,209$ [-]																					
	Ruwheidsfactor	$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,744$ [-]																					
	Turbulentie-intensiteit	$I_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) * \ln(z/z_0)} = 0,281$ [-]																					
$q_p(z) = (1 + 7 * I_v(z)) * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) > v_m(z) = \sqrt{\frac{2 * q_p(z)}{(1 + 7 * I_v(z)) * \rho}} = 18,2$ [m/sec]																							
N.B. $> V_m(z)$ is de in het veld gemeten windsnelheid op hoogte z																							
$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b > v_b = \frac{v_m(z)}{c_r(z) * c_o(z)} = 24,5$ [m/sec]																							
$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} > \text{toelaatbare windsnelheid is: } v_{b,0} = v_b = 24,5$ [m/sec]																							
N.B. $> V_{b,0}$ is de door een weerstation (bijv. KNMI) opgegeven of voorspelde windsnelheid en vergelijkbaar met de $V_{b,0}$ - waarden uit tabel NB.1 van NEN-EN-1991-1-4																							
 windkracht volgens Beaufort 10 [Bft]																							

(versie 30-05-2017)

Om ditzelfde bouwsel aan de kust (en terreincategorie 0) toe te kunnen passen, mag er bij de volgens de specificaties opgegeven $q_p = 0,62 \text{ kN/m}^2$ geen hogere gemiddelde windsnelheid toegelaten worden dan $v_{b,0} = 9,1 \text{ m/sec}$.

NEN-EN 1991-1-4 / Hfdst. 4 / Terugrekening van $q_p(z)$ naar $v_{b,0}$

Invoergegevens:

Extreme stuwdruk

$q_p(z) = 0,62$ [kN/m²]

Terreincategorie

Zee of kustgebied aan zee (0)

Ruwheidslengte

$z_0 = 0,005$ [m]

Minimale hoogte

$z_{min} = 1$ [m]

Maximale hoogte

$z_{max} = 200$ [m]

Hoogte bouwsel boven maaiveld

$z = 7,0$ [m]

Rekenhoogte voor $I_v(z)$ en $c_r(z)$

$z = 7,0$ [m]

Dichtheid van lucht

$\rho = 1,25$ [kg/m³]

Windrichtingsfactor

$c_{dir} = 1,0$ [-]

Seizoensfactor

$c_{season} = 1,0$ [-]

Turbulentiefactor

$k_l = 1,0$ [-]

Orografiefactor

$c_0(z) = 1,0$ [-]

Terreincategorieën - Tabel NB.3-4.1

Terreincategorie		z_0 [m]	z_{min} [m]
Zee of kustgebied aan zee	0	0,005	1
Onbebouwd gebied	II	0,200	4
Bebouwd gebied	III	0,500	7

z_0 = ruwheidslengte volgens art. 4.3.2(1)

z_{min} = minimale hoogte volgens art. 4.3.2(1)

Terreinfactor $k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} = 0,162$ [-]

Ruwheidsfactor $c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1,172$ [-]

Turbulentie-intensiteit $I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln(z/z_0)} = 0,138$ [-]

$$q_p(z) = (1 + 7 * I_v(z)) * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) > v_m(z) = \sqrt{\frac{2 * q_p(z)}{(1 + 7 * I_v(z)) * \rho}} = 22,4 \text{ [m/sec]}$$

N.B. $v_m(z)$ is de in het veld gemeten windsnelheid op hoogte z

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b > v_b = \frac{v_m(z)}{c_r(z) * c_0(z)} = 19,1 \text{ [m/sec]}$$

windkracht
volgens Beaufort

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} > \text{toelaatbare windsnelheid is: } v_{b,0} = v_b = 19,1 \text{ [m/sec]}$$

> 8 [Bft]

N.B. $v_{b,0}$ is de door een weerstation (bijv. KNMI) opgegeven of voorspelde windsnelheid
en vergelijkbaar met de $V_{b,0}$ - waarden uit tabel NB.1 van NEN-EN-1991-1-4

(versie 30-05-2017)

NEN-EN 1991-1-4 - artikel 4.5 - extreme stuwdruk

extreme stuwdruk $q_p(z)$ [kN/m²] (formule 4.8)
 $q_p(z) = (1 + 7 \cdot I_p(z)) \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$ [kN/m²]

piekfactor g is verwerkt in de factor 7
 $7 = 2 \cdot g = 2 \cdot 0,42 \cdot \ln \frac{T}{t}$
 waarin: T = middelingstijd voor $v_{gem} = 3600$ sec
 t = vaagduur = 1 sec
 $> g = 3,4 > 2 \cdot g = 6,8 > \text{afgerond} = 7$

$I_p(z)$ = turbulentie-intensiteit [-] (formule 4.7)
 $I_p(z) = \frac{K_t}{C_o(z) \cdot \ln(z/z_0)}$ voor $z_{min} \leq z \leq z_{max}$
 $I_p(z) = I_p(z_{min})$ voor $z < z_{min}$
 waarin: $K_t = 1,0$ en $C_o = 1,0$
 z = hoogte boven het maaiveld [m] (invoer)
 $z_{max} = 200$ m (maximale hoogte)

ρ = dichtheid van lucht
 $= 1,25$ kg/m³

$v_m(z)$ = gemiddelde windsnelheid op hoogte z [m/sec]
 $v_m(z) = C_o(z) \cdot v_b$ (formule 4.3)
 waarin: $C_o(z) = 1,0$ (vlak terrein)

$C_r(z)$ = ruwheidsfactor [-] (formule 4.4)
 $C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ voor $z_{min} \leq z \leq z_{max}$
 $C_r(z) = C_r(z_{min})$ voor $z < z_{min}$
 waarin: **z = hoogte boven het maaiveld [m] (invoer)**
 z_0 = ruwheidslengte [m] > zie tabel NB.3 / 4.1

v_b = basiswindsnelheid [m/sec]
 $v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0}$ (formule 4.1)
 waarin: C_{dir} = windrichtingsfactor = 1,0
 C_{season} = seizoensfactor = 1,0

Tabel NB.3 / 4.1

Terreincategorie (invoer)

	z_0 [m]	z_{min} [m]
0 Zee of kustgebied aan zee	0,005	1
II Onbebouwd gebied	0,2	4
III Bebouwd gebied	0,5	7

waarin: z_0 = ruwheidslengte [m]
 z_{min} = minimale hoogte [m]

k_r = terreinfactor [-] (formule 4.5)
 $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$
 waarin: z_0 = ruwheidslengte [m] > zie tabel NB.3 / 4.1

Tabel NB.1

Windgebied (invoer)

	I	II	III
$v_{b,0}$ [m/sec]	29,5	27,0	24,5

Beschrijving windgebieden:
 art. 4.2(1)p en figuur NB.1

De tenten-norm NEN-EN 13782

In de norm voor tenten NEN-EN 13782 is onder artikel 6.4.2.2 (versie 2005) een tabel met voorgeschreven stuwdrukken opgenomen. De waarden van deze tabel zijn vergelijkbaar met de waarden in NEN-EN 1991-1-4, tabel NB.5, zoals in onderstaande tabel te zien is. Deze waarden zijn ook volgens dezelfde berekeningsmethodiek tot stand gekomen.

Enkele uitgangspunten zijn echter anders gekozen, te weten:

$$v_{b,0} = 28,0 \text{ m/sec}$$

$$c_{\text{season}} = 0,8 \quad T = 10 \text{ jaar} \quad z_0 = 0,05$$

Windbelasting - NEN-EN 13782, artikel 6.4.2.2 (versie 2005)							
$v_{b,0} =$	28,0 [m/sec]	$K_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} =$	0,19	terreinfactor (formule 4.5)			
$c_{season} =$	0,8 [-]	$c_r(z) = K_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$		ruwheidsfactor (afh. van hoogte z)			
$v_b =$	22,4 [m/sec]	$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_{b,red}$		gemiddelde windsnelheid op hoogte z			
$K =$	0,200 [-]	$I_z(z) = \frac{K}{c_o(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$		turbulentie-intensiteit (afh. van hoogte z)			
$n =$	0,5 [-]	$q_p(z) = (1 + 7 * I_z(z)) * \frac{1}{2} * \rho * v_m(z)^2$		extreme stuwdruk (afh. van hoogte z)			
$T =$	10 jaar	$v_{\text{piek- / vlaag } p} = \sqrt{\frac{2 * q_p(z)}{\rho}}$		piek- of vlaag windsnelheid			
$c_{prob} =$	0,905 [-]						
$v_{b,red} =$	20,3 [m/sec]						
$\rho =$	1,25 kg/m ³						
$z_0 =$	0,050 [m]						
$c_{dir} =$	1,0 [-]						
$K_1 =$	1,0 [-]						
$c_a =$	1,0 [-]						
Terug naar "13782"-waarden							
						Piek/vlaagwaarden	
Hoogte z [m]	$c_r(z)$ [-]	$I_z(z)$ [-]	$v_m(z)$		$q_p(z)$ kN/m ²	$v_{\text{piek/vlaag } p}(z)$	
			[m/sec]	[km/uur]		[m/sec]	[km/uur]
1	0,569	0,334	11,5	41,5	0,28	21,1	75,9
2	0,701	0,271	14,2	51,2	0,37	24,2	87,1
3	0,778	0,244	15,8	56,8	0,42	26,0	93,5
4	0,833	0,228	16,9	60,8	0,46	27,2	97,9
5	0,875	0,217	17,7	63,9	0,50	28,2	101,4
6	0,910	0,209	18,4	66,4	0,52	28,9	104,2
7	0,939	0,202	19,0	68,5	0,55	29,6	106,5
8	0,964	0,197	19,6	70,4	0,57	30,2	108,6
9	0,987	0,193	20,0	72,0	0,59	30,7	110,4
10	1,007	0,189	20,4	73,5	0,60	31,1	112,0
11	1,025	0,185	20,8	74,8	0,62	31,5	113,4
12	1,041	0,182	21,1	76,0	0,63	31,9	114,7
13	1,057	0,180	21,4	77,1	0,65	32,2	115,9
14	1,071	0,177	21,7	78,2	0,66	32,5	117,0
15	1,084	0,175	22,0	79,1	0,67	32,8	118,1
16	1,096	0,173	22,2	80,0	0,68	33,1	119,0
17	1,107	0,172	22,5	80,8	0,69	33,3	119,9
18	1,118	0,170	22,7	81,6	0,70	33,6	120,8
19	1,129	0,168	22,9	82,4	0,71	33,8	121,6
20	1,138	0,167	23,1	83,1	0,72	34,0	122,4
21	1,148	0,166	23,3	83,8	0,73	34,2	123,1
22	1,156	0,164	23,4	84,4	0,74	34,4	123,8
23	1,165	0,163	23,6	85,0	0,75	34,6	124,4
24	1,173	0,162	23,8	85,6	0,75	34,7	125,1
25	1,181	0,161	23,9	86,2	0,76	34,9	125,7

In de laatste versie van deze norm (2015) is de reductiefactor c_{TEM} (c_{season}) verlaagd van 0,8 naar 0,7.

De tabelwaarden zijn echter ongewijzigd gebleven. De waarden voor de stuwdruk worden in deze versie niet meer "pressure" maar "peak velocity pressure" genoemd. Een correcte aanduiding, omdat de stuwdruk gebaseerd is op de gemiddelde snelheid met medeneming van piekfactor en turbulentie.

Bij toepassing van deze norm op bouwsels die aan de kust gebruikt worden, moet er rekening mee worden gehouden dat daar de voorgeschreven $v_{b,0} = 29,5 \text{ m/sec}$.

Dit is dus hoger dan de in NEN-EN 13782 aangenomen 28,0 m/sec.

N.B. voor een "gewoon bouwwerk" moet er bij een hoogte van 5 m een $q_p(z) = 1,37 \text{ kN/m}^2$ worden aangehouden.

Windmetingen op locatie

Met een windmeting ter plaatse kan gecontroleerd worden of de optredende windsnelheid onder de waarde blijft van de gemiddelde windsnelheid $v_m(z)$ waar het bouwsel (via q_p) op berekend is.

Bij een dergelijke windmeting moeten de meetomstandigheden (meethoogte en terreinruwheid) overeen komen met de ontwerputgangspunten van het te controleren bouwsel. Zijn deze omstandigheden anders, dan moet een omrekening gemaakt worden.

Zoals in de richtlijn is aangegeven, mag een bouwsel bij een evenement ontworpen zijn op een lagere stuwdruk dan in NEN-EN 1991-1-4 of NEN-EN 13782 is opgegeven. Voorwaarde hierbij is, dat beheersmaatregelen in gang gezet worden als de optredende windsnelheden hoger dreigen te gaan worden dan de ontwerpsnelheid.

Het hoger worden van windsnelheden kan op twee manieren worden geconstateerd:

- uit voorspellingen;
- uit metingen ter plaatse.

Bij het uitvoeren van beheersmaatregelen kunnen we globaal de volgende stappen benoemen:

1. het aanhoren van voorspellingen of het uitvoeren van windmetingen;
2. het interpreteren en beoordelen van voorspellingen of metingen;
3. de beslissing of maatregelen in gang gezet moeten worden;
4. het informeren van publiek en artiesten;
5. het begeleiden van de uitvoering van de maatregelen;
6. het ontruimen en/of afbreken van kritische bouwsels;
7. de controle of alle maatregelenstappen zijn uitgevoerd;
8. de constatering dat publiek en artiesten zijn veilig gesteld.

Na afronding van stap 8 "mogen" de hogere windsnelheden gaan optreden.

Bij de uitvoering van stappen 2. t/m 8. behoort een bepaald tijdpad. Dit tijdpad moet in de omschrijving van de beheersmaatregelen zijn vastgelegd. Dit betekent, dat een windmeting ter plaatse geen goede methode is om te beoordelen of beheersmaatregelen uitgevoerd moeten worden. Er is na constatering van te hoge windsnelheden onvoldoende tijd om de hele procedure van beheersmaatregelen uit te voeren.

Althans, wanneer de gemeten windsnelheid als directe indicator gehanteerd wordt om de beheersmaatregelen in gang te zetten.

Er is dus alleen voldoende tijd voor het uitvoeren van de maatregelen, als bij stap 2. bekend is dat de te hoge windsnelheden bij stap 8. een feit zullen zijn.

Dit is alleen te realiseren met behulp van voorspellingen. Dit kan met behulp van:

- a. korte termijnvoorspellingen;
- b. lange termijnvoorspellingen.

Korte termijnvoorspellingen kunnen bestaan uit informatie van een betrouwbaar lokaal weerstation, dat bij voorkeur enige tijd vóór “stap 2.” informatie kan geven over de te verwachten windsnelheden.

Lange termijnvoorspellingen zijn bijvoorbeeld de weersvoorspellingen van het KNMI. Hierbij kan ca. 24 uur vóór aanvang van het evenement bekend zijn of er kritische windsnelheden te verwachten zijn.

De lange termijnvoorspellingen kunnen een zo duidelijk negatief weerbeeld geven, dat besloten moet worden het gehele evenement af te gelasten.

Bij minder zekere voorspellingen kan besloten worden het evenement wel door te laten gaan, maar op basis van lokale korte termijnvoorspellingen en/of windmetingen ter plaatse te besluiten of beheersmaatregelen in gang gezet moeten worden. Hierbij kan in dat geval het gehele evenement beëindigd worden of kunnen bepaalde kritische bouwsels ontruimd en eventueel afgebroken worden.

Windmetingen hebben in dat geval niet als doel de kritische windsnelheid daadwerkelijk te meten (dan zijn we te laat voor het nemen van maatregelen) maar om op basis van het oplopen van de windsnelheden een bevestiging te krijgen van de voorspellingen.

Bij windmetingen ter plaatse moet er ook rekening mee gehouden worden, dat de gemeten waarden sterk afhankelijk zijn van de terreinruwheid en de meethoogte.

Het optreden van hoge windsnelheden ter plaatse kent vele onzekerheden:

- gaan de snelheden wel optreden op de evenementenlocatie;
- binnen welk tijdbestek na voorspelling treden de windsnelheden ter plaatse op.

Het in gang zetten van beheersmaatregelen op basis van deze voorspelling-bevestigende windmetingen levert daarom het minst veilige scenario op. Daarom moet gehandeld worden op basis van betrouwbare voorspellingen, die ruim voor het “beheersmaatregelen-traject” gegeven zijn.