
Analyse van torenwindgegevens over het tijdvak 1977 tot en met 1991

Gertie Geertsema

Technische rapporten; TR-148

I Inleiding

Het KNMI heeft de taak bij calamiteiten meteorologische ondersteuning te geven aan lokale instanties om te helpen de gevolgen ervan zoveel mogelijk te beperken. Bij een calamiteit kan gedacht worden aan het vrijkomen van een radioactieve stof, maar ook aan gevaarlijke chemische stoffen. Lokale autoriteiten moeten de risico's voor de bevolking inschatten, waarna waarschuwingen uit kunnen gaan, evacuatie kan plaatsvinden, enzovoorts. Vragen die op dat moment aan het KNMI gesteld zullen worden betreffen de *wind*, de *stabiliteit* en de *menghoogte*, grootheden die bepalend zijn voor de verspreiding. Om de richting van de verspreiding te bepalen zal de meteoroloog met name gevraagd worden naar de *gemiddelde transportwind*, dat is de wind op de hoogte van de massamiddellijn van de pluim.

Bij ongevallen met gevaarlijke chemische stoffen komt vaak veel warmte vrij, waardoor er eerst pluimstijging zal optreden. Uit formules voor het bepalen van het zwaartepunt van een pluim blijkt dat ook in het geval van een thermisch-neutrale lozing op 10 meter hoogte de pluimas zich al vrij spoedig verder boven de grond bevindt. Op dit moment staan de meteoroloog waarnemingen ter beschikking van de windvector op 10 meter hoogte en praktische formules die het verloop van de wind met de hoogte beschrijven. Helaas is de verandering van de windsnelheid en de windrichting het grootst en het minst goed te bepalen in een stabiele grenslaag. Dit is zeer essentiële informatie omdat in die omstandigheden de zijwaartse spreiding van de pluim klein is en de menglaag dun. In deze omstandigheden zijn de concentraties hoog. Een stabiele grenslaag komt tussen de 40 en 50% van de tijd voor.

Vindt een calamiteit plaats in de buurt van Cabauw, dan staat de wind op grotere hoogte ter beschikking, zodat de meteoroloog de verandering van de wind met de hoogte kan meenemen bij de schatting van de transportwind. Bovendien worden vier maal per dag ballonmetingen verricht te De Bilt. Deze metingen leveren windgegevens tot ver boven de menghoogte. Dichterbij de grond leveren de ballonmetingen geen betrouwbare informatie.

Ten gevolge van bijvoorbeeld de zee-land overgang is de grenslaag niet horizontaal homogeen. Daarnaast staan er veel potentiële bronnen bij de kust. Deze situatie wordt als onbevredigend ervaren. In het verleden stonden metingen op hoogte ter beschikking dankzij 5 TV-masten. Als gevolg van een veranderd onderhoudsschema zijn deze gegevens niet meer beschikbaar.

Een andere mogelijkheid om aan windgegevens op grotere hoogte te komen, is een windprofiler netwerk. Er zal waarschijnlijk in de nabije toekomst een windprofiler geïnstalleerd worden bij Schiphol. Ook wordt overwogen een windprofiler in Cabauw te plaatsen. Deze apparatuur kan het windprofiel tussen ~ 100 en 2000m en een temperatuurprofiel tot $\sim 1000\text{m}$ waarnemen met een verticale resolutie van ~ 50 meter. Deze performance is wel afhankelijk van de frequentie

waarop gemeten mag worden. Behalve de wind op verschillende hoogten kan ook de stabiliteit en de menghoogte afgeleid worden. Vanzelfsprekend kan deze informatie alleen gebruikt worden bij calamiteiten als de data ook *operationeel* beschikbaar is voor de meteoroloog. Bij de aanschaf van deze apparatuur moet gedacht worden aan een bedrag van ruim een half miljoen. Een samenwerkingsverband met belanghebbenden (denk aan kerncentrales, chemische industrieën enzovoorts) is vermoedelijk mogelijk.

Torens kunnen informatie verschaffen tot ongeveer 200 meter en in het algemeen zal slechts op één hoogte gemeten kunnen worden. Profilers kunnen zoals genoemd tot grotere hoogten meten en op meer hoogten. Echter de aanschaf van profilers brengt veel meer kosten met zich mee. Het is duidelijk dat in de nabije toekomst geen uitgebreid netwerk van profilers beschikbaar zal zijn.

Om uit te zoeken welke horizontale resolutie wenselijk is heeft het RIVM windwaarnemingen op 5 torens beschikbaar gesteld over het tijdvak 1977 tot en met 1991. Getracht zal worden na te gaan in hoeverre 3 meetgegevens voldoende zijn.

II De windgegevens en de locaties van de torens

Er is een analyse gemaakt van windgegevens van 1977 tot en met 1991 van de RIVM LML-meetstations 127, 317, 502, 817 en 920 (LML: landelijk meetnet luchtverontreiniging). De gegevens bevatten de uurlijkse windsnelheid en windrichting, een totaal dus van ongeveer 131400 uurwaarden.

De locaties van deze televisietorens worden in figuur II.1 getoond. Nadere gegevens zijn te vinden in tabel II.1.

De uurwaarden van resp. windrichting en windsnelheid worden gegeven. Alleen die uren waar alle meetpunten geldige waarden (d.w.z. niet negatief) geven voor de wind worden geanalyseerd. Het aantal uurwaarden dat overblijft per jaar is gegeven in tabel II.2 en is ongeveer 17% van het totaal aantal uren. In Buijsman e.a. (1992) is de beschikbaarheid van de meetgegevens beschreven. Het bestand bevat de windsnelheid in 0.1m/s, en de windrichting in graden waarbij geldt dat 0 een variabele richting aangeeft.



Fig. II.1: De locaties van de 5 meetpunten

Met een simpel plotpakket zijn subsets van de data bekeken. Analyseren van de hele dataset met dat plotpakket op een pc was niet mogelijk omdat het aantal data te groot is. Een eerste indruk was dat de correlatie tussen de metingen op de verschillende torens groot was. Daarna zijn voor

Station	Code	Naam	Meethoogte	Oosterlengte	Noorderbreedte
1	T 127	Roermond	192.4m	05 ^o 58'35"	51 ^o 11'05"
2	T 317	Goes	146.7m	03 ^o 53'05"	51 ^o 30'42"
3	T 502	Wieringen	200.5m	05 ^o 03'31"	52 ^o 54'34"
4	T 817	Markelo	179.1m	06 ^o 26'32"	52 ^o 14'16"
5	T 920	Hoogersmilde	312.0m	06 ^o 24'14"	52 ^o 54'14"

Tabel II.1: Gegevens van de 5 torens.

Jaar	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1988	tot. 1977-1991
uurwaarden	3295	1963	3768	5765	3323	2136	2900	23150

Tabel II.2: Aantal uurwaarden per jaar waarop alle locaties geldige windgegevens leveren. Jaren met 0 uurwaarden zijn weggelaten.

de hele dataset gemiddelden bepaald. De resultaten daarvan bevestigen de eerste indruk, zoals blijkt uit tabel II.3. Merk op: een richting van 0 graden betekent dat de windrichting variabel was, daarom zijn deze datapunten bij de bepaling van de gemiddelde windrichting weggelaten. De gemiddelde windrichting die zo gevonden wordt is 200^o.

Omdat de wind met de hoogte ruimt is het te verwachten dat de gemiddelde windrichting op ~200 meter hoogte meer westelijk is dan de in Nederland op 10 meter overheersende windrichting. In het KNMI 'Normalenboek' (1992, pag.15) echter wordt voor 5 hoofdstations als gemiddelde windrichting 235^o gevonden. De verklaring ligt in de wijze van bepaling van de gemiddelde windrichting: in dit onderzoek zijn bij de bepaling van de gemiddelde windrichting de windsnelheden *niet* als gewichtsfactoren meegenomen. In het KNMI 'Normalenboek' (1992) is de gemiddelde windrichting bepaald met behulp van vectoroptelling. Het gevolg is dat de dominerende richting bij hoge windsnelheden (in het Normalenboek de binnenste kromme in de windrozen op pagina's 84 e.v.) zwaar meeweegt in de bepaling van de gemiddelde windrichting.

In de tabel II.3 zijn ook de maximale snelheden (v_{max}) voor de verschillende locaties gegeven. Daarbij blijkt de invloed van de zee-land overgang duidelijker dan in de gemiddelde windsnelheden: de maximale windsnelheden zijn het grootst voor Goes en Wieringen, groter zelfs dan het maximum voor het hoogste meetpunt, Hoogersmilde. Deze maxima zijn in tabel II.4 nog eens uitgeschreven voor verschillende seizoenen en voor verschillende tijdstippen op de dag. Dit is gedaan omdat alleen de windgegevens ter beschikking staan. De stabiliteit zowel als de menghoogte zijn op het moment van dit onderzoek niet beschikbaar. De menghoogte is 's zomers overdag groter dan het hoogste meetpunt, maar kan 's nachts tot ~100 á 200 meter zakken, hetgeen lager is dan het hoogste meetpunt. Ook 's winters is een menghoogte van 100 á 200 meter niet ongewoon. Dit kan de windsnelheid behoorlijk beïnvloeden. De dagelijkse gang van de menghoogte en het effect hiervan op luchtverontreiniging is geschetst in figuur II.2.

In figuur II.3 zijn de verdelingen van de windsnelheden en -richtingen gegeven. Ook hier zijn geen opvallende verschillen tussen de 5 meetpunten te zien.

station	$\langle v \rangle$	N_θ	$\langle \theta \rangle$	v_{max}	σ_v	σ_θ	1200 UT		1200 UT elke 5e dag	
							$\langle \theta \rangle$	$\langle v \rangle$	$\langle \theta \rangle$	$\langle v \rangle$
1 (R)	7.5	22802	196	26.5	3.8	90	199	6.6	200	6.4
2 (G)	8.7	22964	194	32.3	4.4	97	193	8.2	189	7.7
3 (W)	10.1	23036	201	32.6	5.2	97	201	9.6	201	9.1
4 (M)	8.2	22863	197	29.4	3.8	90	199	7.3	202	7.0
5 (H)	10.1	22928	204	30.1	5.3	93	204	9.2	202	8.9

Tabel II.3: Gemiddelden over alle uurwaarden waarvan de data voor alle torens bekend zijn. De gemiddelde windsnelheid ($\langle v \rangle$) is hier gegeven in m/s. Bij het bepalen van de gemiddelde windrichting ($\langle \theta \rangle$) zijn datapunten met richting 0. genegeerd, N_θ geeft het aantal richtingen waarover gemiddeld is. Verder zijn gegeven: de maximale windsnelheid (v_{max}), en de standaarddeviaties voor respectievelijk de windsnelheid (σ_v) en de windrichting (σ_θ). De laatste kolommen laten de gemiddelden voor subsets van de data zien.

dagdeel	station: seizoen	Maxima					Gemiddelden				
		1 R	2 G	3 W	4 M	5 H	1	2	3	4	5
12-18	12-2	24.8	27.6	31.7	25.4	28.6	8.7	10.4	12.6	9.2	12.4
	3-5	18.4	24.3	27.5	22.5	27.8	6.4	7.6	8.5	6.9	8.0
	6-8	15.5	16.1	22.1	15.5	19.9	5.1	6.7	7.9	6.0	7.1
	9-11	22.4	23.9	29.4	29.3	27.4	7.3	9.1	10.7	8.1	10.4
0-6	12-2	21.7	25.6	30.9	23.7	28.4	9.7	10.9	12.9	10.2	12.9
	3-5	24.7	25.9	26.4	19.1	24.8	7.4	8.2	9.2	8.3	9.4
	6-8	14.6	15.4	20.6	17.1	22.6	6.4	7.3	8.1	7.5	8.4
	9-11	26.5	31.4	27.3	26.3	29.9	8.7	9.8	11.1	9.6	11.6

Tabel II.4: Maxima en gemiddelde windsnelheden als functie van dagdeel en seizoen. De seizoenen zijn gedefinieerd in overeenstemming met het Normalenboek. De winter wordt gedefinieerd van maand 12 tot en met maand 2, de lente van 3-5, de zomer van 6-8 en de herfst loopt van de 9e tot en met de 11e maand.

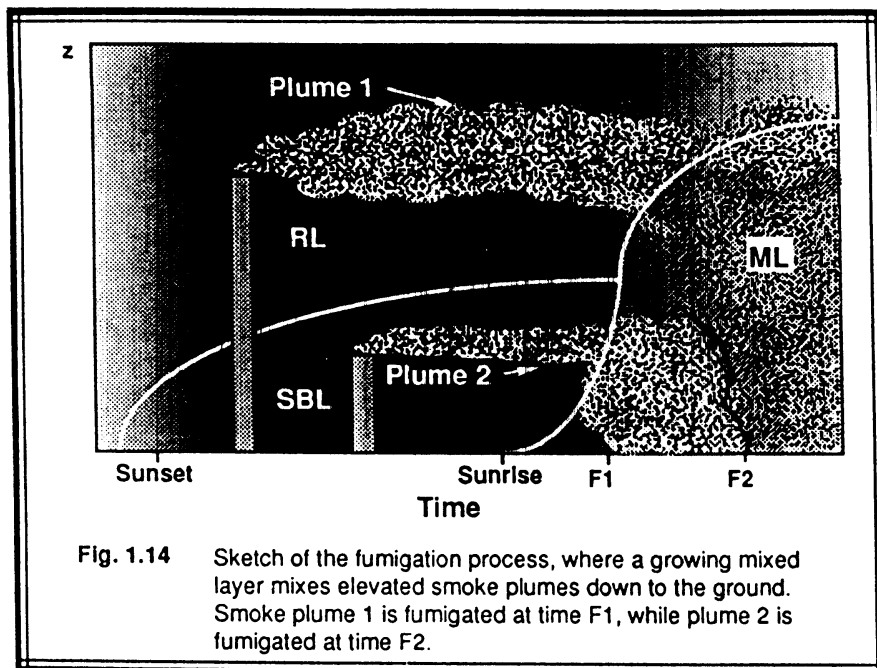


Fig. II.2: Dagelijkse gang van de menghoogte (Stull 1988)

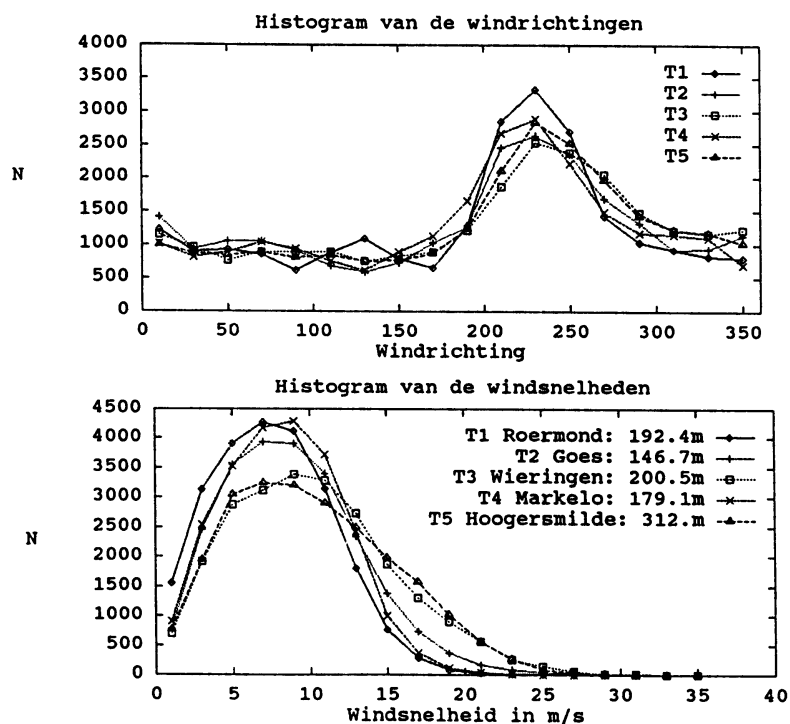


Fig. II.3: Frequentie verdeling van de windsnelheid en de windrichting voor de 5 meetpunten, het datapunt bij 10 graden geeft het aantal uurwaarden dat tussen 0 en 20 graden valt.

III Lineaire correlaties

Een eerste indruk van de correlatie tussen de verschillende meetpunten is verkregen door de gehele dataset te analyseren. Lineaire correlaties zijn uitgerekend met behulp van de formule

$$r(x, y) = \frac{\sum_n (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_n (x_n - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_n (y_n - \bar{y})^2}}. \quad (\text{III.1})$$

De correlatie coëfficiënt voor de windsnelheid is gelijk aan $r(v_i, v_j)$ en voor de windrichting $r(\theta_i, \theta_j)$. Deze correlaties zijn berekend voor alle mogelijke combinaties. Een correlatie van -1 betekent een perfecte anticorrelatie, 0 geen correlatie en 1 een perfecte correlatie. Uit tabel III.1 blijkt de correlatie coëfficiënt duidelijk af te nemen met toenemende afstand. Een dergelijk verband is er niet met het hoogteverschil. Waarschijnlijk is het effect van het hoogteverschil er uitgefilterd doordat bij de bepaling van de correlatie de gemiddelde windsnelheid \bar{v} (c.q. windrichting $\bar{\theta}$) van de windsnelheid v_n (c.q. windrichting θ_n) afgetrokken wordt. Om het verband van de correlatie coëfficiënt met hoogte c.q. afstand duidelijker te illustreren is de correlatie coëfficiënt in tabel III.2 nog een keer gegeven als functie de afstand en als functie van het hoogteverschil tussen de meetpunten. De conclusie is dat bij meetpunten op ~ 200 meter hoogte, de variaties sterker bepaald worden door de afstand tussen de locaties, dan door het hoogteverschil tussen de meetpunten. Natuurlijk is het hoogteverschil hier niet een onafhankelijke parameter. Bij een correlatie als functie van hoogteverschil alleen, zoals bijvoorbeeld bij Cabauw mogelijk is, is een ander verloop te verwachten.

In figuur III.1 wordt de correlatiecoëfficiënt als functie van de afstand vergeleken met de resultaten van Cats (1978) voor 10 meter winden. Cats beschouwde alleen 1200 GMT datapunten. De door Cats gevonden curve is in de figuur gegeven door een getrokken lijn. De correlatie coëfficiënten voor de gehele dataset liggen beneden deze lijn, de correlaties van de 1200 GMT data liggen zeer goed op de lijn (voor 12.00 uur is de verticale menging optimaal).

De lineaire correlatie coëfficiënten kunnen beïnvloed zijn door de autocorrelatie van de meetgegevens, immers de wind op 12 uur morgen is niet onafhankelijk van de wind van vandaag. Daarom is in figuur III.1 ook de correlatie gegeven van de data voor de windsnelheid met een interval van 5 dagen. Zo is een subset verkregen waarvan aangenomen mag worden dat de autocorrelatie verwaarloosbaar is. Uit de figuur blijkt dat de correlatie coëfficiënten zelfs toe nemen.

Een conclusie aan de hand van lineaire correlatie coëfficiënten moet met enige voorzichtigheid getrokken worden. De datasets die gebruikt worden moeten bijvoorbeeld eigenlijk bestaan uit onafhankelijke gegevens. Hier is niet geheel aan voldaan, maar dit blijkt geen ernstige tekortkoming te zijn. Een ander probleem is toevallige correlaties, in figuur III.2 zien we een voorbeeld

van een low level jet. In dit geval kan de windsnelheid van het hoogste meetpunt ($\sim 310\text{m}$) gelijk kan zijn aan de windsnelheid van het laagste meetpunt ($\sim 150\text{m}$) zonder dat er gesproken mag worden van een intrinsieke grote correlatie. Immers de low level jet kan zich een uur later op een grotere hoogte bevinden waardoor de correlatie tussen deze twee meetpunten verloren gaat.

Uit tabel III.2 blijkt dat de correlatie voor de windrichting beduidend slechter is dan voor de windsnelheid. In het geval van de windsnelheid is de correlatie op een afstand van 200 km van 0.9 naar 0.75 afgevallen, voor de windrichting is de situatie veel slechter, daar is de correlatie bij de kortste afstand al slechts 0.75.

$i - j$	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5
$r(\theta_i, \theta_j)$.63	.56	.66	.55	.61	.58	.55	.71	.75	.74
$r(v_i, v_j)$.80	.74	.81	.75	.79	.77	.75	.82	.89	.86
d	150	202	121	193	175	193	231	120	91	74
ΔH	45.7	8.1	13.3	111.6	53.8	32.4	165.3	21.4	111.5	132.9

Tabel III.1: Correlatie coëfficiënten voor de gehele dataset. De eerste rij bevat de combinatie van meetstations, de tweede rij geeft de correlatie voor de richting en de derde voor de snelheid. De afstand d tussen de twee meetstations in km is gegeven in de 4e rij en de laatste rij bevat het hoogteverschil ΔH in m.

d	$r(\theta)$	$r(v)$	ΔH	$r(\theta)$	$r(v)$
74	.74	.86	8.1	.56	.74
91	.75	.89	13.3	.66	.81
120	.71	.82	21.4	.71	.82
121	.66	.81	32.4	.58	.77
150	.63	.80	45.7	.63	.80
175	.61	.79	53.8	.61	.79
193	.55	.75	111.5	.75	.89
193	.58	.77	111.6	.55	.75
202	.56	.74	132.9	.74	.86
231	.55	.75	165.3	.55	.75

Tabel III.2: De correlatie coëfficiënten zijn hier gerangschikt naar horizontale afstand tussen de meetpunten en naar hoogteverschillen.

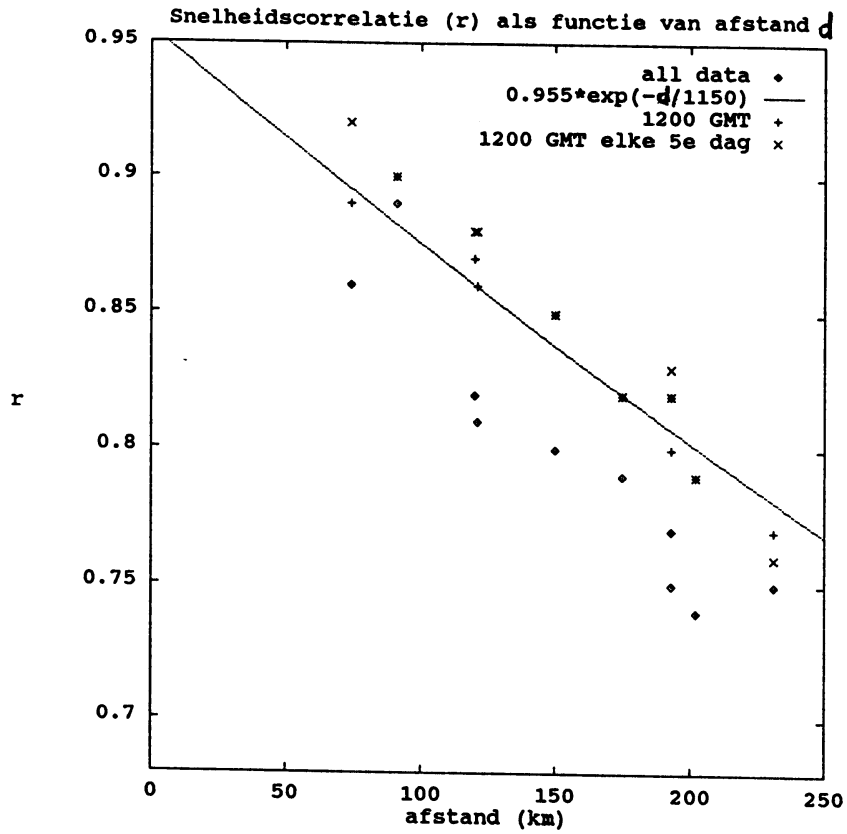


Fig. III.1: Lineaire correlatie coëfficiënten van de windsnelheden als functie van de afstand in km. De getrokken lijn is de door Cats (1978) gevonden relatie voor 1200 GMT 10 meter waarnemingen.

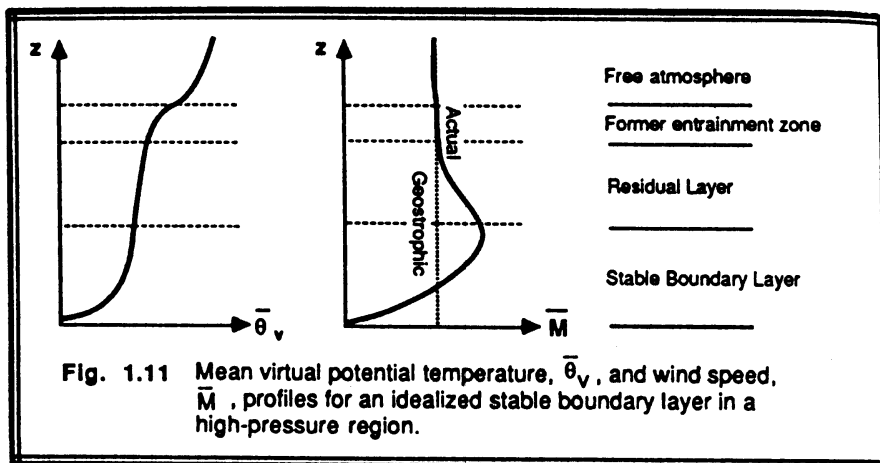


Fig. III.2: Voorbeeld van een snelheidsprofiel (Stull 1988)

IV Schattingen van de windsnelheid

Uitgaande van 4 torenwinden wordt de vijfde torenwind geschat. In eerste instantie beschouwen we alleen de windsnelheid. Om het verschil in hoogte te verdisconteren is de stabiliteit nodig, deze is op dit moment niet gegeven. Daarom wordt het effect van het hoogteverschil genegeerd. Voor de meetfout in de windsnelheid wordt hier 1.5m/s aangenomen. In figuur IV.1 is te zien dat de afwijking door het negeren van het hoogteverschil kleiner is dan de meetfout in het geval van een onstabiele of neutrale atmosfeer. Dit geldt niet in de zeer stabiele grenslagen, zoals blijkt uit Holtslag (1987 pag.112).

Uitgaande van 4 meetpunten wordt de windsnelheid op het 5e meetpunt geschat door middel van lineaire interpolatie met de afstand als gewichtsfactor. Met v_i het i e meetpunt geldt

$$v_5 = \frac{d_1 d_2 d_3 d_4}{d_1 d_2 d_3 + d_1 d_2 d_4 + d_1 d_3 d_4 + d_2 d_3 d_4} \left(\frac{v_1}{d_1} + \frac{v_2}{d_2} + \frac{v_3}{d_3} + \frac{v_4}{d_4} \right), \quad (\text{IV.1})$$

met d_i de afstand van het i e meetpunt tot en met het meetpunt waarvoor de snelheid geschat wordt. De gemiddelde windsnelheid van de 4 meetpunten wordt bepaald, voor verschillende snelheidsintervallen wordt nu het verschil tussen de gemeten windsnelheid en de geschatte windsnelheid bepaald:

$$v_{real} - v_{guess}.$$

Het aantal keer dat het verschil binnen de meetfout valt wordt geregistreerd en er wordt bijgehouden hoe vaak het verschil groter is dan 1 maal de meetfout, maar kleiner dan 2 maal de meetfout etcetera. Het resultaat is gegeven in tabel IV.1.

Voor Hoogersmilde blijkt de windsnelheid meestal onderschat te worden. De verklaring hiervoor kan gezocht worden in de hoogte van Hoogersmilde ($H=312\text{m}$). In het snelheidsinterval $0.-2.\text{m/s}$ ligt de fout in 70% van de gevallen binnen de meetfout. De situatie verslechtert bij toename van de gemiddelde windsnelheid. In de laatste rij staat het aantal gevallen waarin de windsnelheid is geschat. Daaruit blijkt dat de 50% die gevonden wordt bij een gemiddelde windsnelheid van $26.-28.\text{m/s}$ niet significant is. De laatste kolom geeft de percentages voor alle windsnelheden.

De verschillen tussen de geschatte windsnelheid en de gemeten windsnelheid kunnen goed verklaard worden uit de hoogte van de meetpunten en de ligging van de meetpunten ten opzichte van de kust. Voor een meetpunt landinwaarts, met een gemiddelde hoogte (rond de 200m) is de verwachting dat de geschatte windsnelheid groter is dan de gemeten windsnelheid. Dit komt door de hogere windsnelheid van Wieringen ten gevolge van de zee invloed en de hogere windsnelheid van Hoogersmilde ten gevolge van de grotere meethoogte. Een overschatting is terug te zien in de tabel IV.1 doordat dan de negatieve windsnelheidsklassen gevuld zijn. Daardoor

verbetert de schatting van de windsnelheid van bijvoorbeeld Markelo zelfs als slechts 3 torenwinden worden gebruikt voor de schatting, d.w.z. als nummer 5, het hoogste meetpunt, wordt weggelaten.

Concentreren we ons op Markelo: bij het schatten van Markelo uit 4 meetpunten ligt de schatting 51% van de tijd binnen de meetfout. Dit verbetert naar 55% als we Hoogersmilde weglaten. Echter in 10% van de tijd wijkt de geschatte windsnelheid 3m/s à 4.5m/s af van de gemeten windsnelheid. Dit houdt in dat de voorspelling waar de luchtverontreiniging terecht komt, na 1 uur al 16 kilometer fout is. Dit nog afgezien van de fout in de windrichting. En in 3% van de tijd is de fout 4.5 à 6m/s, equivalent met 16.2 à 21.6km/u.

In de appendix zijn deze gegevens ook voor de andere combinaties gegeven.

Blijven we bij Markelo, dan blijkt de situatie zelfs niet veel te verslechteren als op een verstandige manier nog een meetpunt weggelaten wordt, namelijk Wieringen. Bij het weglaten van Goes blijkt dat alleen Roermond een uitstekende keus is om daarmee de windsnelheid in Markelo te schatten. Tenminste meestal. In het geval Cindu (8 juli 1992 vond er een explosie plaats op het Cindu complex in Uithoorn) zoals beschreven door F.Kroonenberg (1992) lag een rug van hogedruk over Nederland waarvan de rugas aanvankelijk net ten noorden van de ramplocatie lag en langzaam zuidwaarts bewoog. Het gevolg is dat dan de meteorologie in Roermond niet representatief is voor bv Hoogersmilde.

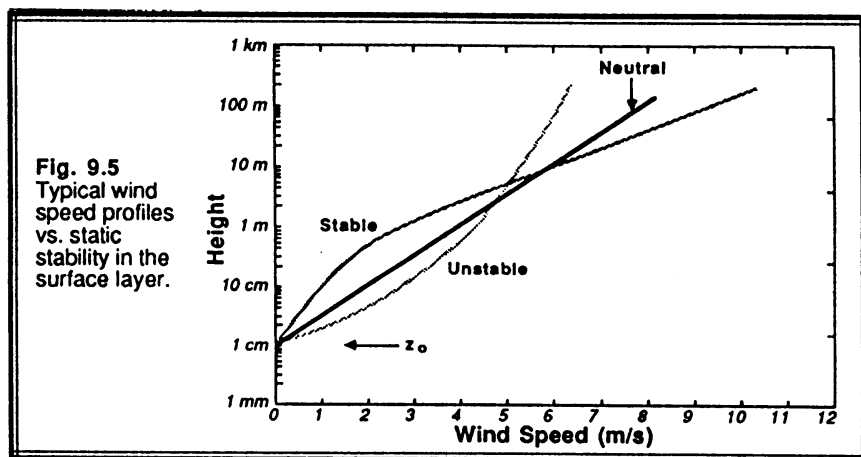


Fig. IV.1: Windsnelheid voor verschillende stabiliteitsklassen (Stull 1988)

meetpunten: 1 2 3 4 afstanden: 193 231 91 74 geschatte punt: 5																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Hoogersmilde																		
Einde snelheidsinterval:																		
klasse	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3	5	0	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
-4.5 -3.0	0	1	3	3	3	3	2	1	1	1	0	0	3	5	0	0	0	2
-3.0 -1.5	0	8	10	10	10	8	4	3	3	2	3	1	3	0	0	0	0	7
-1.5 .0	24	27	23	22	22	18	13	9	7	5	8	5	9	5	0	0	0	18
.0 1.5	46	37	30	27	26	26	23	17	16	15	17	26	12	0	0	0	0	26
1.5 3.0	20	19	21	22	23	23	25	26	26	31	27	16	26	47	50	0	0	23
3.0 4.5	6	6	8	9	14	20	26	26	26	26	29	25	24	26	50	0	0	14
4.5 6.0	3	2	3	3	5	9	13	13	16	14	15	21	5	0	0	0	0	6
6.0 7.5	0	1	1	2	1	3	5	5	4	2	7	0	0	0	0	0	0	2
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	274	2529	3842	4467	4278	3444	2202	1312	712	264	73	34	19	2	0	0	0	0

rms: 2.7

Tabel IV.1: Met behulp van (hier) 4 meetpunten is de windsnelheid voor een 5e meetpunt (hier Hoogersmilde) geschat. Voor verschillende gemiddelde windsnelheids intervallen (weergegeven in 4e regel in m/s) is het verschil met de gemeten windsnelheid bepaald. Kolom 1 geeft de klassen van snelheidsverschillen in m/s. In de tabel staat in hoeveel procent van de gevallen deze afwijking in een bepaalde klasse vallen. Een klasse met positieve getallen geeft aan dat de geschatte windsnelheid kleiner is dan de gemeten windsnelheid. N geeft het aantal keer dat de gemiddelde windsnelheid in een interval ligt, en de rms in m/s is gegeven.

meetpunten: 1 2 3 5 afstanden: 121 193 120 74 geschatte punt: 4																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Markelo																		
Einde snelheidsinterval:																		
klasse	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	7	10	*	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	6	8	17	23	10	0	0	1
-6.0 -4.5	0	0	0	1	1	1	2	4	9	18	29	28	28	27	30	0	0	3
-4.5 -3.0	0	1	5	5	8	10	22	32	36	36	35	33	21	17	30	0	0	12
-3.0 -1.5	3	14	18	21	25	33	39	37	30	19	17	13	13	20	0	0	0	25
-1.5 .0	40	43	34	35	36	34	27	16	10	9	7	17	7	0	0	0	0	32
.0 1.5	41	29	26	24	20	16	7	4	2	1	2	2	7	0	0	0	0	19
1.5 3.0	10	9	11	10	7	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6
3.0 4.5	4	3	4	3	2	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2
4.5 6.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6.0 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
N	210	2291	3768	4159	4025	3220	2373	1626	1010	470	182	47	30	10	1	0	0	0

rms: 2.3

Tabel IV.1: Vervolg

afstanden: 193 231 91 meetpunten: 1 2 3 geschatte punt: 5																	
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Hoogersmilde																	
Einde snelheidsinterval:																	
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																
<-7.5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	7	0	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	5	0	0	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	1	1	2	1	1	1	0	1	2	2	4	0	0	0	1
-4.5 -3.0	0	1	3	4	4	3	2	3	2	2	3	5	8	0	0	0	3
-3.0 -1.5	0	8	11	13	11	7	5	5	4	6	13	11	4	0	0	0	9
-1.5 .0	25	27	24	23	20	17	14	15	14	18	21	16	27	29	0	0	20
.0 1.5	37	33	28	25	25	24	22	25	28	26	25	16	31	43	*	0	26
1.5 3.0	25	20	19	19	21	24	26	26	26	27	15	20	15	14	0	0	22
3.0 4.5	11	7	9	9	11	16	18	17	17	15	10	16	12	14	0	0	12
4.5 6.0	2	2	4	4	4	5	7	5	7	3	7	0	0	0	0	0	4
6.0 7.5	0	1	1	1	1	2	3	3	1	0	0	2	0	0	0	0	1
>7.5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
N	278	2493	3933	4278	4251	3310	2228	1372	862	357	107	44	26	7	1	0	

rms:2.6

Tabel IV.1: Vervolg

afstanden: 121 193 120 meetpunten: 1 2 3 geschatte punt: 4																	
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Markelo																	
Einde snelheidsinterval:																	
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	4	11	0	14	*	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	9	5	35	14	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	0	1	2	2	2	3	8	14	21	25	8	29	0	0	2
-4.5 -3.0	0	1	4	5	6	6	11	19	28	33	20	16	35	14	0	0	7
-3.0 -1.5	1	13	17	17	20	23	34	38	36	29	25	11	15	29	0	0	22
-1.5 .0	36	36	29	31	33	37	34	27	18	15	8	18	8	0	0	0	32
.0 1.5	38	30	26	27	25	23	15	9	6	5	7	2	0	0	0	0	23
1.5 3.0	16	14	16	13	11	7	3	2	2	1	3	2	0	0	0	0	10
3.0 4.5	8	4	6	4	3	1	1	0	0	0	3	5	0	0	0	0	3
4.5 6.0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1
6.0 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	278	2493	3933	4278	4251	3310	2228	1372	862	357	107	44	26	7	1	0	

rms:2.1

Tabel IV.1: Vervolg

afstanden: 121 193 meetpunten: 1 2 geschatte punt: 4																		
Afwijking van de windsnelheid in Markelo																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	9	11	14	0	100	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	3	10	3	0	0	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	0	2	2	2	1	2	2	5	5	10	11	14	50	0	0	1
-4.5 -3.0	0	1	4	5	5	5	5	4	7	11	15	13	14	29	0	0	0	4
-3.0 -1.5	0	8	12	12	12	12	14	17	23	28	32	24	14	0	50	0	0	13
-1.5 .0	19	25	24	24	24	26	31	32	31	26	19	15	28	29	0	0	0	26
.0 1.5	38	30	25	28	31	31	31	25	18	11	9	8	14	0	0	0	0	29
1.5 3.0	22	20	21	19	18	13	11	9	6	5	6	11	0	0	0	0	0	17
3.0 4.5	14	10	9	7	5	3	2	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	6
4.5 6.0	3	4	4	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
6.0 7.5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
>7.5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
N	664	3046	4033	4577	4260	3302	2040	1019	494	179	68	36	7	2	2	2	0	0

rms: 2.2

Tabel IV.1: Vervolg

meetpunt: 1 geschatte punt: 4																		
Afwijking van de windsnelheid in Markelo																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	14	8	11	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	3	3	0	0	100	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	0	1	2	2	2	1	2	2	7	3	0	11	0	0	0	1
-4.5 -3.0	0	0	3	4	4	4	4	6	10	12	9	17	11	0	0	0	0	3
-3.0 -1.5	0	5	9	10	11	12	13	18	19	20	26	8	11	0	0	0	0	10
-1.5 .0	9	20	19	20	21	25	27	30	28	19	11	25	11	0	0	0	0	21
.0 1.5	30	27	27	27	30	31	31	24	24	18	17	25	22	0	0	0	0	28
1.5 3.0	28	23	22	22	21	18	18	13	8	9	6	0	22	0	0	0	0	21
3.0 4.5	16	14	12	11	8	6	4	3	4	6	9	0	0	0	0	0	0	10
4.5 6.0	9	7	4	3	2	1	1	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	4
6.0 7.5	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	3	17	0	0	0	0	1
>7.5	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
N	1658	3367	4049	4452	4380	3313	1841	787	309	95	35	12	9	1	0	0	0	1

rms: 2.5

Tabel IV.1: Vervolg

V Schattingen van de windrichting

Analoog aan de windsnelheid wordt hier de windrichting geschat. De analyse van de schatting van de windrichting is ingewikkeld, omdat de windrichting sterk kan variëren op een korte tijdschaal. Rijkoort (1975) geeft de hoek waarbinnen in 80% van de gevallen de windrichtingsverandering na 1 uur respectievelijk 2 uren beperkt blijkt, voor de verschillende seizoenen, voor dag en nacht, voor de windrichtingen oost en west en als functie van de windsnelheid. In het meest gunstige geval ligt de hoek na 1 uur binnen 13° . Dit is voor de grootste windsnelheden. Voor lage windsnelheden is de hoek 40 à 50 graden.

De windrichting wordt geschat door lineaire interpolatie met de afstanden als gewichtsfactoren, waardoor in de vergelijking IV.1 de snelheid vervangen kan worden door de windrichting. Is het verschil groter dan 180° dan wordt er 360° afgetrokken en bij een verschil kleiner dan -180° bij opgeteld. In de database wordt een variabele windrichting aangegeven doordat de windrichting dan gelijk aan 0 graden is (windrichting 360° geeft het Noorden aan). Deze datapunten zijn niet gecorrigeerd. Het meetpunt van Hoogersmilde ligt beduidend hoger dan de andere meetpunten, dit is terug te zien in tabel V.1: de wind ruimt met de hoogte (met de klok mee), het gevolg is een geschatte windrichting die kleiner is dan de gemeten windrichting.

Aangezien de windrichtingsverandering afhankelijk is van de windsnelheid worden de verschillen tussen de gemeten windrichting θ_{real} en de geschatte windrichting θ_{guess} bekeken voor verschillende windsnelheidsintervallen. In tabel V.1 is duidelijk te zien dat bij lage windsnelheden de spreiding in de windrichting veel groter is. Bij hoge windsnelheden is $\sim 60\%$ van de tijd het verschil tussen de gemeten en de geschatte windrichting kleiner dan 10° . Daardoor is het totale percentage sterk beïnvloedt: bekeken voor alle uurwaarden is het verschil voor Hoogersmilde tussen de gemeten en geschatte wind kleiner dan 10° in 42% van de tijd. Maar in 9% van de tijd ligt dit verschil tussen 30 en 50 graden, en 14% van de tijd is de fout in de hoek zelfs groter dan 50 graden.

afstanden: 193 231 91 74 meetpunten: 1 2 3 4 geschatte punt: 5															
Afwijking van de windrichting $\theta_{real} - \theta_{guess}$ in Hoogersmilde															
Einde snelheidsinterval:															
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	32	0-32
klasse	Percentages														
-180 -145	7	6	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-145 -110	8	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-110 -90	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-90 -70	7	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-70 -50	4	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-50 -30	6	7	5	4	2	2	1	1	2	1	1	3	0	0	3
-30 -20	3	5	5	5	3	2	2	2	1	2	1	11	0	0	3
-20 -10	4	6	9	9	8	5	6	5	5	6	5	8	14	20	7
-10 10	7	13	25	38	47	49	52	63	72	78	79	63	79	80	42
10 20	3	7	12	16	20	26	26	20	15	9	10	16	7	0	18
20 30	5	6	9	9	8	10	9	6	2	2	3	0	0	0	8
30 50	5	10	10	8	6	3	3	2	1	1	1	0	0	0	6
50 70	7	8	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
70 90	6	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
90 110	3	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
110 145	11	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
145 180	10	5	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
N	214	2407	3677	4309	4114	3358	2377	1500	908	362	111	38	28	5	

rms: 44

Tabel V.1: Met behulp van 4 meetpunten is de windrichting van een 5e meetpunt geschat. De windrichtingen zijn lineair geïnterpoleerd met de afstanden als gewichtsfactoren. Voor verschillende windsnelheidsintervallen (gegeven in de 4e rij in m/s) is het verschil met de gemeten windrichting bepaald. Kolom 1 geeft de klassen van hoekverschillen in graden. N geeft het aantal keer dat de gemiddelde windsnelheid in een interval ligt, en de rms in graden is gegeven.

afstanden: 121 193 120 74 meetpunten: 1 2 3 5 geschatte punt: 4																
Afwijking van de windrichting $\theta_{real} - \theta_{guess}$ in Markelo																
Einde snelheidsinterval:																
klasse	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	32	0-32
	Percentages															
-180 -145	10	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-145 -110	12	5	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-110 -90	6	3	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
-90 -70	3	4	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-70 -50	5	5	3	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-50 -30	6	7	7	6	5	4	3	3	2	2	3	3	0	0	0	5
-30 -20	3	6	7	9	11	12	9	8	4	4	1	8	7	0	0	9
-20 -10	4	6	12	16	24	30	34	30	27	17	21	29	25	40	0	21
-10 10	8	14	28	39	43	45	50	56	63	75	74	61	68	60	0	40
10 20	2	7	9	9	6	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
20 30	3	5	5	4	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
30 50	7	7	7	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
50 70	6	6	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
70 90	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
90 110	2	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
110 145	9	6	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
145 180	11	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
N	214	2407	3677	4309	4114	3358	2377	1500	908	362	111	38	28	5	0	

rms:49

afstanden: 202 175 120 91 meetpunten: 1 2 4 5 geschatte punt: 3																
Afwijking van de windrichting $\theta_{real} - \theta_{guess}$ in Wieringen																
Einde snelheidsinterval:																
klasse	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	32	0-32
	Percentages															
-180 -145	9	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-145 -110	7	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-110 -90	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-90 -70	5	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-70 -50	5	4	3	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
-50 -30	5	7	6	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
-30 -20	2	5	5	5	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	3
-20 -10	2	5	9	10	8	6	5	3	3	2	1	3	0	0	0	7
-10 10	7	13	23	34	43	49	55	58	62	64	64	37	68	60	0	39
10 20	4	8	12	15	19	23	21	22	19	20	23	34	14	40	0	17
20 30	3	6	8	9	10	9	8	8	8	7	5	13	11	0	0	9
30 50	13	10	8	6	5	5	6	4	4	5	5	5	7	0	0	6
50 70	8	7	4	3	2	1	1	1	1	1	1	3	0	0	0	3
70 90	7	6	4	2	2	2	1	0	1	0	0	5	0	0	0	2
90 110	5	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
110 145	8	7	4	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
145 180	7	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
N	214	2407	3677	4309	4114	3358	2377	1500	908	362	111	38	28	5	0	

rms: 46

Tabel V.2: Vervolg

afstanden: 150 175 193 231 meetpunten: 1 3 4 5 geschatte punt: 2																
Afwijking van de windrichting $\theta_{real} - \theta_{guess}$ in Goes																
Einde snelheidsinterval:																
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	32	0-32
klasse	Percentages															
-180 -145	8	5	4	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	
-145 -110	8	6	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
-110 -90	5	5	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
-90 -70	8	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
-70 -50	7	6	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
-50 -30	6	8	7	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
-30 -20	7	5	6	5	4	4	3	1	1	1	0	0	0	0	4	
-20 -10	3	5	9	10	12	13	12	10	7	7	5	3	4	0	10	
-10 10	9	12	20	29	38	45	52	59	62	64	66	63	54	60	36	
10 20	4	6	10	13	16	16	16	16	17	18	21	18	29	20	13	
20 30	5	5	7	10	10	8	7	6	7	5	5	13	7	20	8	
30 50	7	9	9	8	7	6	5	3	3	4	2	3	7	0	7	
50 70	5	5	4	3	3	2	1	1	1	1	1	0	0	0	3	
70 90	5	5	3	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	
90 110	5	4	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
110 145	4	6	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
145 180	3	5	4	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	2	
N	214	2407	3677	4309	4114	3358	2377	1500	908	362	111	38	28	5		

rms: 51

afstanden: 150 202 121 193 meetpunten: 2 3 4 5 geschatte punt: 1																
Afwijking van de windrichting $\theta_{real} - \theta_{guess}$ in Roermond																
Einde snelheidsinterval:																
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	32	0-32
klasse	Percentages															
-180 -145	7	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-145 -110	13	6	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-110 -90	8	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-90 -70	7	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-70 -50	6	6	5	3	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	3
-50 -30	11	8	10	11	9	8	5	4	4	2	6	13	0	0	0	8
-30 -20	2	6	8	10	11	14	11	9	10	8	7	11	7	0	0	10
-20 -10	3	6	10	13	18	24	22	22	22	23	23	24	32	0	0	16
-10 10	9	12	19	28	37	39	51	56	59	62	59	50	61	100	34	
10 20	0	4	8	9	9	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	7
20 30	1	4	5	5	4	3	1	1	0	0	1	3	0	0	0	3
30 50	6	6	6	5	3	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	4
50 70	3	5	4	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
70 90	7	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
90 110	3	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
110 145	7	7	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
145 180	7	7	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
N	214	2407	3677	4309	4114	3358	2377	1500	908	362	111	38	28	5		

rms: 50

Tabel V.2: Vervolg

VI Conclusie

De torenwinden zijn hier met elkaar vergeleken. Er is niet gecorrigeerd voor stabiliteit en er is niet gecorrigeerd voor de positie van de windmeters ten opzichte van de torenconstructie en de wind. Wordt dit onderzoek voortgezet, dan is dat één van de eerste te ondernemen acties. Daarnaast is het gewenst om de torenwinden met modeluitvoer te vergelijken. Dit is voor de hier besproken periode wat lastig, er vindt bijvoorbeeld geen archivering van LAM uitvoer plaats. Om een tijdlang voor Cabauw bij te houden wat de afwijking van de modelverwachting van de gemeten wind is kan nuttige informatie bijdragen over de wenselijkheid van torenwinden.

In dit onderzoek heeft de nadruk gelegen op de windsnelheid. De analyse van de windrichting is veel ingewikkelder omdat de draaiing van de wind met de hoogte voor het hoogste meetpunt (Hoogersmilde 312m) veel sterker is dan voor het laagste meetpunt (Goes 147m) en deze draaiing is sterk afhankelijk van de stabiliteit. Het hoogste meetpunt kan bovendien boven de menghoogte liggen wat de windrichting sterk kan beïnvloeden. De fout in de schatting van de windrichting is sterk afhankelijk van de windsnelheid (Rijkoort 1975). Voor lage windsnelheden is het absolute verschil tussen geschatte en gemeten windrichting vrij gelijkmatig verdeeld over 0 tot en met 180 graden. Voor hogere windsnelheden is het verschil $\sim 50\%$ van de tijd gelijk of kleiner dan 10 graden. Bekeken over alle windsnelheden is het verschil tussen de gemeten windrichting en de uit 4 meetpunten geschatte windrichting 60% van de tijd groter dan 10° . Het verschil ligt voor bijvoorbeeld Hoogersmilde 9% van de tijd tussen 30 en 50 graden, wat inhoudt dat bij een lozing van gifgas in Utrecht het gas naar Wieringen of naar Hoogersmilde waait!

Uit de analyse van de windsnelheden kan geconcludeerd worden dat bij het schatten van een 5e torenwind uit 4 meetpunten de fout 40 à 50% van de tijd binnen de meetfout van $\pm 1.5\text{m/s}$ ligt. Nemen we 3 meetpunten om de 4e te schatten, dan neemt dit percentage voor Wieringen af tot $\sim 30\%$ (zie Tabel VI.1). Hierbij moet niet vergeten worden dat een verschil dat groter is dan 1.5m/s op een windsnelheid van $\sim 3\text{m/s}$ in 30% van de gevallen natuurlijk toch aanzienlijk is. Bovendien verslechtert de situatie drastisch als de windrichting erbij betrokken wordt. Bij zwakke winden, hetgeen volgens de tabellen $\sim 10\%$ van de tijd is, is er zeer weinig verband tussen de geschatte windrichting en de gemeten windrichting.

station	1	2	3	4	5
4 meetpunten	38%	51%	43%	51%	44%
3 meetpunten	43%	51%	33%	55%	46%

Tabel VI.1: Deel van de tijd dat de geschatte windsnelheid binnen de meetfout van de gemeten windsnelheid ligt (uit tabel IV.1).

Uit het Atmes experiment (Verver 1992) blijkt dat de menghoogte een belangrijke parameter is bij verspreiding van luchtverontreiniging. Een parameter die meestal wel door windprofilers en niet door meettorens geleverd wordt. In Nederland is de windrichting 30% van de tijd Zuid West. Dit houdt in dat een meetpunt in het Zuid Westen van Nederland (Vlissingen, Borssele) een goede positie is voor een meetpunt op hoogte. Waar nog bij komt dat de omgeving open is, waardoor het gevaar op een verstoorde meting gering is.

In dit onderzoek komt duidelijk naar voren dat de keuze van de plaats van de windrichting meting erg belangrijk is. Een toegevoegd meetpunt kan de situatie verbeteren, maar bij een onverstandige keuze ook verslechteren.

Een keiharde conclusie betreffende het aantal gewenste torenwinden en/of windprofilers is moeilijk te maken zoals ook al in soortgelijk kader opgemerkt door Daan en Kroonenberg (1980). Gefaseerde invoer van meer meetpunten op grotere hoogte kan in deze helpen; door regelmatig de modeluitvoer met de meetgegevens te vergelijken wordt verder inzicht verkregen in de situaties waaronder de modeluitvoer niet toereikend is. Waarbij dan ook nader gespecificeerd moet worden wat onder niet toereikend verstaan wordt. Is een correlatie van 0.7 goed genoeg, of zijn we pas tevreden bij 0.9. Of zoals in tabel IV.1, is een afwijking van de geschatte windsnelheid van meer dan 3.m/s in 30% van de gevallen aanvaardbaar?

De windgegevens bleken slechts 17% van de tijd voor alle 5 torens ter beschikking te zijn. Een verklaring kan zijn dat het hier televisie masten betreft, waar onderhoud alleen mogelijk is als de eigenaar van deze masten dit toestaat. In de afweging tussen torenwinden en andere mogelijkheden om windgegevens op grotere hoogte te verkrijgen moet ook meespelen hoe gemakkelijk het onderhoud kan plaatsvinden. En dan niet alleen met inachtneming van de mogelijkheid, maar ook van de veiligheid.

Dankbetuiging

De windgegevens zijn door A. van Pul van het RIVM in ascii files aangeleverd, daarnaast heeft hij waardevolle opmerkingen bij de tekst gemaakt. Verder was het zeer plezierig om te kunnen overleggen met G. Verver en H. Wessels.

Referenties

- E. Buijsman, E.C.M. Rentinck, P. Swaan, J.W. Diesel, 1992: 'Beschikbaarheid van meetwaarden uit het landelijk meetnet luchtkwaliteit voor de periode 1976-1990' RIVM rapport 222104008 Bilthoven, RIVM
- G.J. Cats, 1978: 'Surface wind analysis over land in the Netherlands, based on an optimum interpolation method' KNMI Wetenschappelijke rapporten WR-78-17 De Bilt, KNMI
- H. Daan en F.C. Kroonenberg, 1980: 'Een norm voor de dichtheid van een waarnemingsnetwerk' KNMI memorandum afdeling Centrale Weerdienst 80-2 (manuscript)
- A.A.M. Holtslag, 1987: 'Surface fluxes and boundary layer scaling: models and applications' KNMI Wetenschappelijke rapporten WR-87-2 De Bilt, KNMI
- KNMI, 1992: 'Klimatologische Normalenboek over het tijdvak 1961-1990', KNMI publicatie 150-27
- F. Kroonenberg, 1992: 'private communication'
- W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, 1989: 'Numerical Recipes' Cambridge University Press, Cambridge
- P.J. Rijkoort, 1975: 'Windrichtingsvariabelen na verloop van één of twee uren.' KNMI Wetenschappelijke rapporten WR-75-8 De Bilt, KNMI
- R.B. Stull, 1988: 'An introduction to boundary layer meteorology' Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- G. Verver, 1992: 'Sensitivity of an operational puff dispersion model to alternative estimates of boundary layer depth' Proc 19th NATO CCMS ITM on air pollution modelling and its applications, Ierapetra, Crete (in press).

Appendix A Windsnelheid schattingen

meetpunten: 2 3 4 5 afstanden: 150 202 121 193 geschatte punt: 1																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Roermond																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	2	3	2	0	15	0	0	1
-7.5 -6.0	0	0	0	0	1	3	3	3	2	4	6	9	10	4	15	0	0	2
-6.0 -4.5	0	0	2	6	7	8	10	11	16	26	36	27	31	15	0	0	7	
-4.5 -3.0	0	1	11	13	15	18	26	32	36	34	28	30	42	23	0	0	17	
-3.0 -1.5	1	19	24	23	26	30	33	34	28	25	19	17	15	15	0	0	26	
-1.5 .0	34	37	27	27	27	25	19	15	10	6	5	10	8	15	0	0	24	
.0 1.5	41	24	22	18	15	11	6	4	4	1	0	2	0	0	0	0	14	
1.5 3.0	16	13	10	9	6	3	2	1	1	1	1	2	0	0	0	0	6	
3.0 4.5	6	5	4	3	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	2	
4.5 6.0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.0 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	218	2235	3491	4007	4059	3326	2519	1731	1033	530	194	60	26	13	0	0	0	

rms: 2.8

Tabel A.1: Vervolg op tabel IV.1

afstanden: 150 202 121 meetpunten: 2 3 4 geschatte punt: 1																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Roermond																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	0	13	0	0	1	
-7.5 -6.0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4	11	0	0	1	
-6.0 -4.5	0	0	2	5	6	6	7	6	12	20	29	22	7	25	0	0	5	
-4.5 -3.0	0	1	10	12	14	16	22	24	32	31	32	37	46	0	0	0	15	
-3.0 -1.5	1	17	23	22	25	29	34	37	31	29	25	18	25	50	0	0	26	
-1.5 .0	37	37	28	27	28	28	24	20	16	12	7	8	11	13	0	0	27	
.0 1.5	40	26	22	20	17	13	8	7	5	2	2	4	0	0	0	0	16	
1.5 3.0	16	13	10	10	6	3	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0	7	
3.0 4.5	5	4	4	2	1	1	0	0	0	1	1	4	0	0	0	0	2	
4.5 6.0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.0 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	281	2267	3605	4203	4245	3502	2454	1463	915	368	136	49	28	8	0	0	0	

rms: 2.6

Tabel A.1: Vervolg

meetpunten: 1 3 4 5 afstanden: 150 175 193 231 geschatte punt: 2																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Goes																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	1	4	0	0	0	0	1
-6.0 -4.5	0	0	1	3	4	3	3	2	2	5	3	4	9	0	0	0	2	
-4.5 -3.0	0	1	5	7	9	8	7	10	9	11	18	11	4	0	0	0	7	
-3.0 -1.5	1	8	14	16	16	18	21	21	25	26	20	20	13	14	0	0	16	
-1.5 .0	20	25	24	23	26	28	29	30	25	22	23	20	30	57	0	0	26	
.0 1.5	41	32	26	25	24	25	22	21	21	19	23	24	22	14	0	0	25	
1.5 3.0	24	20	19	17	13	10	10	9	10	7	5	13	4	14	0	0	14	
3.0 4.5	9	9	8	6	5	4	4	3	4	4	4	0	9	0	0	0	6	
4.5 6.0	5	3	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	4	0	0	0	2	
6.0 7.5	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	4	0	0	0	0	
>7.5	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	
N	302	2453	3586	4093	4007	3457	2414	1599	906	387	122	46	23	7	0	0		

rms: 2.4

Tabel A.1: Vervolg.

afstanden: 150 175 193 meetpunten: 1 3 4 geschatte punt: 2																		
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Goes																		
Einde snelheidsinterval:																		
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																	
<-7.5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	6	50	0	0	1
-6.0 -4.5	0	0	1	3	3	3	2	2	1	1	2	5	3	6	0	0	0	2
-4.5 -3.0	0	1	5	7	7	7	6	5	6	5	6	8	3	6	0	0	0	5
-3.0 -1.5	1	8	14	13	14	14	14	16	15	19	21	11	6	12	0	0	0	13
-1.5 .0	21	25	24	23	25	26	28	28	27	24	16	23	35	0	0	0	25	
.0 1.5	37	33	27	27	27	28	26	25	21	21	23	29	18	50	0	0	27	
1.5 3.0	26	21	19	18	15	14	14	14	17	15	18	26	0	0	0	0	17	
3.0 4.5	10	9	8	7	6	5	5	6	6	4	9	0	12	0	0	0	7	
4.5 6.0	4	3	2	2	1	1	1	2	3	3	5	6	0	0	0	0	2	
6.0 7.5	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	6	0	0	0	0	
>7.5	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3	3	0	0	0	0	0	
N	396	2590	3716	4399	4215	3536	2219	1353	693	251	74	31	17	2	0	0		

rms: 2.3

Tabel A.1: Vervolg

meetpunten: 1 2 4 5 afstanden: 202 175 120 91 geschatte punt: 3																	
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Wieringen																	
Einde snelheidsinterval:																	
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	12	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	6	0	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	0	2	1	1	1	1	1	1	0	0	6	0	0	0	1
-4.5 -3.0	0	1	4	4	3	2	1	1	1	2	3	4	6	0	0	0	3
-3.0 -1.5	3	9	11	9	8	6	5	3	2	3	1	4	0	0	0	0	8
-1.5 .0	19	23	21	18	17	16	13	9	7	8	6	4	6	33	0	0	17
.0 1.5	39	34	28	26	28	27	21	17	14	13	13	8	12	0	0	0	26
1.5 3.0	30	21	21	23	26	28	27	24	21	18	20	8	6	67	0	0	24
3.0 4.5	6	8	10	13	12	14	21	24	26	23	22	12	12	0	0	0	14
4.5 6.0	2	3	4	4	4	5	8	16	17	22	16	19	0	0	0	0	6
6.0 7.5	0	1	1	1	1	1	2	4	6	8	12	23	29	0	0	0	1
>7.5	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	7	19	6	0	0	0	1
N	288	2575	3839	4451	4134	3372	2310	1374	717	248	69	26	17	3	0	0	

rms: 2.7

Tabel A.1: Vervolg.

afstanden: 202 175 120 meetpunten: 1 2 4 geschatte punt: 3																	
Afwijking van de windsnelheid $v_{real} - v_{guess}$ in Wieringen																	
Einde snelheidsinterval:																	
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	0-32
klasse	Percentages																
<-7.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	20	0	0	0	0
-7.5 -6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	10	50	0	0	0
-6.0 -4.5	0	0	0	2	2	1	1	1	1	0	0	0	10	0	0	0	1
-4.5 -3.0	0	1	4	4	4	2	1	1	2	1	0	5	10	0	0	0	3
-3.0 -1.5	2	7	10	8	7	5	3	2	1	6	0	0	0	0	0	0	7
-1.5 .0	13	19	17	14	12	10	6	4	5	5	8	0	10	0	0	0	13
.0 1.5	29	26	22	20	20	18	13	8	11	10	18	0	10	0	0	0	20
1.5 3.0	37	24	20	21	23	22	18	13	12	9	14	20	10	0	0	0	21
3.0 4.5	11	13	14	17	19	21	22	20	15	20	14	10	20	50	0	0	17
4.5 6.0	5	7	8	9	9	13	20	24	20	21	8	15	0	0	0	0	11
6.0 7.5	2	2	3	3	3	6	10	17	15	12	4	5	0	0	0	0	5
>7.5	1	1	2	1	1	2	6	9	17	13	33	45	0	0	0	0	3
N	494	2820	4099	4595	4433	3427	1992	1031	406	129	49	20	10	2	0	0	

rms: 3.4

Tabel A.1: Vervolg