



Koninklijk Nederlands  
Meteorologisch Instituut  
*Ministerie van Infrastructuur en Milieu*

# Klimatologie van extreme windvlagen

H.W. van den Brink, I.L. Wijnant, F.C. Bosveld en A. Stepek

De Bilt, 2017 | Wetenschappelijk rapport; WR 2017-01

# Klimatologie van extreme windvlagen

Henk van den Brink, Ine Wijnant, Fred Bosveld, Andrew Stepek (KNMI)

1 juni 2017

# 1 Samenvatting

Voor de veiligheid van hoogbouw en windenergie is kennis van de windvlagen op grotere hoogte cruciaal.

In dit rapport wordt een parameterisatie gepresenteerd voor het afleiden van extreme windvlagen vanuit de gemiddelde wind op twee hoogtes. De voorgestelde parameterisatie van de extreme windvlagen op basis van de verticale windschering in de gemiddelde wind blijkt nauwkeurig de klimatologische waarden van de gemeten windvlagen te reproduceren. Dit geldt zowel voor de windvlagen op 10 m als op grotere hoogtes en zowel boven zee als boven land. De wintermaanden worden beter gerepresenteerd dan de zomermaanden. Omdat de jaarmaxima gedomineerd worden door de wintermaxima, is het effect van de onderschatting van de zomerextremen door HARMONIE gering.

Door gebruik te maken van de gemiddelde wind op 20 en 200 m hoogte uit de KNW-atlas (dit is een heranalyse over 1979-2013 met het operationele weermodel HARMONIE van het KNMI) kan op een rooster van 2,5x2,5 km informatie worden verkregen van de klimatologie van windvlagen op 10 verschillende hoogtes, variërend van 10 tot 200 m. Ook zijn op deze manier betrouwbare schattingen te maken van extreme windstoten die eens per jaar, 10 jaar en 50 jaar kunnen optreden.

Deze methode voor het afleiden van extreme windvlagen is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de Durst-curve, die in de meteorologie en bouwvoorschriften veelvuldig wordt gebruikt. Met de methode is het ook mogelijk om de turbulentie intensiteit af te leiden op basis van de verticale windschering in de gemiddelde wind.

Opvallend is dat de methode laat zien dat extreme windvlagen in de kustzone landinwaarts hoger zijn dan boven zee. Een kwalitatieve analyse aan de hand van de theorie van de interne grenslaag bevestigt deze resultaten.

De resultaten van dit onderzoek zijn vrij beschikbaar via <http://projects.knmi.nl/knw/>.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introductie</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Modelbeschrijving</b>	<b>5</b>
3.1	ERA-Interim . . . . .	5
3.2	HARMONIE . . . . .	5
3.2.1	Model set-up . . . . .	6
3.3	Windmetingen . . . . .	8
3.3.1	10m metingen . . . . .	8
3.3.2	Cabauw . . . . .	8
3.3.3	Meetmast IJmuiden . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Methode</b>	<b>10</b>
4.1	Vlagen onder neutrale stabiliteit . . . . .	10
4.2	Turbulentie Intensiteit . . . . .	14
4.3	Turbulente Kinetische Energie . . . . .	14
4.4	Effect van ruwheidsovergang op vlagen . . . . .	14
4.5	Effect van transformatie naar potentiële wind op vlagen . . . . .	16
4.6	Extreme-waarden theorie . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Validatie en verificatie</b>	<b>20</b>
5.1	Tijdreeks . . . . .	20
5.2	Verticaal profiel . . . . .	21
5.3	Ruwheidsovergang . . . . .	22
5.4	Gumbelplots . . . . .	23
5.4.1	Gumbelplots voor de waarnemingen . . . . .	23
5.4.1.1	Cabauw . . . . .	23
5.4.1.2	Meetmast IJmuiden . . . . .	25
5.4.2	Gumbelplots voor HARMONIE . . . . .	26
5.4.2.1	optimale parameterisatie . . . . .	26
5.4.2.2	seizoenseffecten . . . . .	28
5.4.2.3	wind op hoogte - Cabauw . . . . .	28
5.4.2.4	wind op hoogte - MMIJ . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Resultaten</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies en discussie</b>	<b>35</b>
<b>A</b>	<b>Appendix A</b>	<b>37</b>

## 2 Introductie

Voor de veiligheid van hoogbouw en windenergie is kennis van de wind - en dan met name van de windvlagen op grotere hoogte - cruciaal. In Nederland zijn een aantal normen die deze veiligheid moeten garanderen. Zo zijn er de EUROCODE-norm 'wind(piek)belasting op constructies'<sup>1</sup> en de IEC-standaard voor piekbelasting op windturbines<sup>2</sup>. Beide normen zijn gebaseerd op metingen. De EUROCODE-norm bijvoorbeeld op 15 jaar metingen (1962-1976) op 10 m hoogte op 12 KNMI-stations. Dat betekent dat er allerlei aannames gedaan moeten worden hoe deze metingen zich vertalen naar grotere hoogtes: de hoogste gebouwen in Nederland hebben een hoogte van rond 150 m en moderne windturbines zijn zelfs nog hoger terwijl de metingen gedaan zijn op 10 m hoogte. Bovendien is het maar de vraag of de 12 stations representatief zijn voor de rest van Nederland. De IEC-standaard is weliswaar gebaseerd op een jaargemiddelde metingen op ashoogte van de turbine, maar het vertalen van deze metingen naar eens in de 50 jaar extremen berust op allerlei aannamen.

In dit rapport beschrijven we een alternatieve en nauwkeurigere methode om windvlagen-klimatologie af te leiden. Daarbij maken we gebruik van een windatlas gebaseerd op alle beschikbare metingen in de periode 1979-2013 en een geavanceerd weermodel van het KNMI. Het weermodel is in dit geval niet gebruikt om een weersverwachting te maken, maar om het weer in de periode 1979-2013 opnieuw door te rekenen. Dat heet een heranalyse: een fysisch consistente samenvatting van alle beschikbare metingen in de betreffende periode. Het weermodel zorgt er dus voor dat er ook betrouwbare informatie gegenereerd wordt op plekken waar niet gemeten is. De windatlas is uitgebreid gevalideerd en geeft nauwkeurige windinformatie (gemiddelden en extremen) op hoogtes tussen 10 en 200 m. Alle informatie over de windatlas is te vinden op de website: <http://projects.knmi.nl/knw/>.

Tot nu toe bevatte de windatlas alleen klimatologische informatie over uurgemiddelde windsnelheden, niet over windvlagen. In dit rapport wordt een methode geïntroduceerd om de klimatologie van windvlagen af te leiden uit uurgemiddelde windsnelheden.

De in dit rapport gepresenteerde methode is bovendien een verbetering ten opzichte van de Durst-curve, die in de meteorologie en bouwvoorschriften veelvuldig wordt gebruikt (Durst, 1960). De Durstcurve is een relatie tussen uurgemiddelde winden en extremen op kortere tijdschaal (o.a. windvlagen met een typische tijdschaal van 3 seconde) die slechts geldig is op land, op 10 m hoogte en op open en vlak terrein. In dit rapport presenteren wij een uitbreiding naar andere hoogtes en omgevingen (met name zee).

---

<sup>1</sup>De EUROCODE (voorheen NEN6702) is gebaseerd op eens in de 50 jaar potentiële 10min-gemiddelde wind op 10 m hoogte (ruwheid 5 cm) die is afgeleid van de windstatistiek in de Nationale bijlage EN 1991-1-4 gebaseerd op eens in de 50 jaar uurgemiddelde potentiële wind op 10 m hoogte (ruwheid 3 cm).

<sup>2</sup>de IEC (1999) standaard gaat uit van een referentiewindsnelheid die gelijk is aan 5 maal de jaargemiddelde windsnelheid. De eens in de 50 jaar extreme windsnelheid op ashoogte van de turbine wordt verondersteld gelijk te zijn aan 1,4 keer de referentiewindsnelheid. Er wordt aangenomen dat het jaarmaximum van de windsnelheid 75% van de het eens in de 50 jaar extreem is.

### 3 Modelbeschrijving

Om op basis van een beperkt aantal metingen, met een onderlinge afstand van tientallen kilometers, tot een hoge-resolutie windklimatologie te komen, worden de berekeningen in twee stappen gedaan: eerst gebruiken we een weermodel om een fysisch consistente beschrijving te maken van alle wereldwijd beschikbare meteorologische meetgegevens (dus niet alleen de wind, maar ook de temperatuur, druk, neerslag, etc.). Het ontbreken van veel windmetingen op grotere hoogtes dan 10 m wordt zodoende (gedeeltelijk) gecompenseerd door andere metingen, bijvoorbeeld van temperatuur en druk. Deze analyse in de vorm van een 3-dimensionaal veld wordt elke 6 uur gemaakt. Voor deze analyses is het ERA-Interim model van het Europese centrum ECMWF<sup>3</sup> gebruikt.

Vervolgens zijn de ERA-Interim analyses gebruikt om de (3-dimensionale) randen van het KNMI weermodel HARMONIE van meteorologische informatie te voorzien. HARMONIE berekent vervolgens zelf, in het opgegeven domein, de weersvariabelen op een horizontale roosterafstand van 2.5x2.5 km. Daarbij maakt HARMONIE geen gebruik van extra metingen: het model wordt alleen gebruikt om op een fysisch verantwoorde manier het 3-dimensionale veld van ERA-Interim te downscalen. De hoge resolutie is nodig om weerfenomenen op een schaal kleiner dan 80 km en 6 uur (zoals fronten, buienlijnen, etc.) en land-waterovergangen realistischer te kunnen beschrijven.

#### 3.1 ERA-Interim

De kracht van de ERA-Interim dataset is dat het één van de toonaangevende weersverwachtingsmodellen (het ECMWF model) combineert met een geavanceerd systeem om de observaties te assimileren (Dee et al., 2011). De resulterende analyses kunnen beschouwd worden als de best mogelijke weergave van de toestand van de atmosfeer, gegeven de model informatie en de observaties. ERA-Interim bevat 3-dimensionale analyses van de atmosfeer op een resolutie van ongeveer 80 km. Voor het downscalen met HARMONIE is ERA-Interim gesampled op een resolutie van 0.5°. De tijdsresolutie van de analyses is 6 uur. Alle variaties in het weer die plaatsvinden binnen 80 km en/of 6 uur kunnen dus niet door ERA-Interim worden weergegeven. Alleen de grootschalige weerfenomenen worden door ERA-Interim gerepresenteerd, zoals depressies en hogedruk patronen. De bijbehorende kleinschalige fenomenen, zoals fronten en buien, zijn echter niet of nauwelijks in ERA-Interim waarneembaar. Voor meer informatie over het ECMWF en de ERA-Interim dataset verwijzen we naar [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int).

#### 3.2 HARMONIE

Sinds zomer 2012, is HARMONIE (*HIRLAM ALADIN Research On Mesoscale Operational NWP in Europe*) één van de operationele weermodellen van het KNMI. Het is een regionaal model dat ontwikkeld is, en voortdurend verder ontwikkeld, gemonitord en verbeterd wordt door het HIRLAM consortium, waarin vele Europese landen participeren. Nauwe samenwerking met onder andere het ECMWF zorgt voor een continue borging en verdere verbetering van de kwaliteit.

HARMONIE is de opvolger van de HIRLAM en ALADIN modellen. De belangrijkste verschillen zijn dat HARMONIE rekt op een rooster met een zeer hoge resolutie (standaard met een roosterpuntsafstand van 2.5 km) en dat het een zogenaamd non-hydrostatisch model is, wat betekent dat het een realistischer beschrijving geeft van de atmosferische processen. Het

---

<sup>3</sup>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

HIRLAM-ALADIN consortium heeft het model uitvoerig getest. HARMONIE is ook bekend onder de naam 'AROME'. Meer details over het HARMONIE/AROME model zijn te vinden in Seity et al. (2011) en op [www.hirlam.org](http://www.hirlam.org).

### 3.2.1 Model set-up

HARMONIE wordt continu doorontwikkeld. Voor de windkaart is de versie gebruikt die sinds Juni 2012 operationeel bij het KNMI ingezet wordt bij de dagelijkse weersverwachting. De model set-up is beschreven in Van den Brink et al. (2013). De belangrijkste elementen worden hier herhaald:

- We gebruiken HARMONIE versie CY37h1.1 (vrijgegeven in Juni 2012)
- We gebruiken (in overeenstemming met de standaard HARMONIE set-up) de ECUME ruwheids formulering (Weill et al., 2003) boven zee, en een Charnock formulering ( $\alpha=0.015$ ) voor meren en rivieren.
- Boven land is het landgebruik (en de daarbij behorende ruwheid) uit de ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) dataset gebruikt voor de gehele rekenperiode.
- Het model is gerund op een domein van 500x500 roosterpunten op een Lambert-rooster. Dit houdt in dat de onderlinge afstanden naar de dichtstbijzijnde roosterpunten overal gelijk zijn. Voor HARMONIE is deze roosterpuntsafstand 2.5x2.5 km. Het domein is gecentreerd op 54°N, 2°O. De positie is zodanig gekozen dat voor Nederland relevante depressies zo goed mogelijk binnen het domein passen. Het aantal van 500x500 roosterpunten geeft een goede balans tussen de rekenintensiteit en de grootte waar HARMONIE zich vrij ontwikkelt, zonder verstoring van de randen.
- Het aantal gebruikte verticale niveaus van HARMONIE is 60. Deze niveaus hebben dicht bij het oppervlak een kleine onderlinge afstand die toeneemt met de hoogte. Het onderste modelniveau volgt het aardoppervlak; hogere rekenniveaus volgen drukvlakken.
- Elke 6 uur is een verwachting van 6 uur geïnitieerd vanuit de ERA-Interim heranalyse van het ECMWF.
- Uurlijkse velden van de windvectoren zijn gearchiveerd voor hoogtes van 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 en 200 m boven het oppervlak.
- Maximale 3-sec windvlagen per uur, berekend volgens de parameterisatie van HARMONIE, zijn gearchiveerd voor een hoogte van 10 m.
- Vanaf elke analyse zijn de +1u tm +6u verwachtingen gebruikt. Het model heeft dus 1 uur de tijd vanuit de analyse om zich 'aan te passen' van de ERA-Interim toestand naar de HARMONIE toestand.
- De tijdsresolutie van de modelberekeningen is 1 minuut, de uitvoer is uurlijks. De uitvoer representeert de modeltoestand op het aangegeven moment. Omdat het model middelt over een roosterpunt, en kleinschalige fluctuaties niet gerepresenteerd worden in het model, is de uitvoer het beste te vergelijken met 1-uurlijkse punt-observaties.
- De terreinhoogte en ruwheid binnen de roosterpuntsafstand van 2.5 km zijn het gemiddelde van de roosterbox. Variaties binnen een roosterbox zijn uiteraard niet gemodelleerd. De grootste afwijkingen tussen het lokale windklimaat en het roosterbox-gemiddelde van HARMONIE zijn te verwachten in sterk verstedelijkte gebieden en land-water overgangen (met veel ruwheidsverschillen) en in heuvelachtig terrein, bijvoorbeeld in Zuid-Limburg.

De winden in HARMONIE zijn aangepast door de verticale schering te verhogen volgens onderstaande formule:

$$U_{h,nieuw} = U_{20} + \frac{U_{h,oud} - U_{20}}{0.85} \quad (1)$$

Waarin  $h$  de hoogte aangeeft. Verdere informatie is te vinden in Geertsema en Van den Brink (2014) en Stepek et al. (2015).

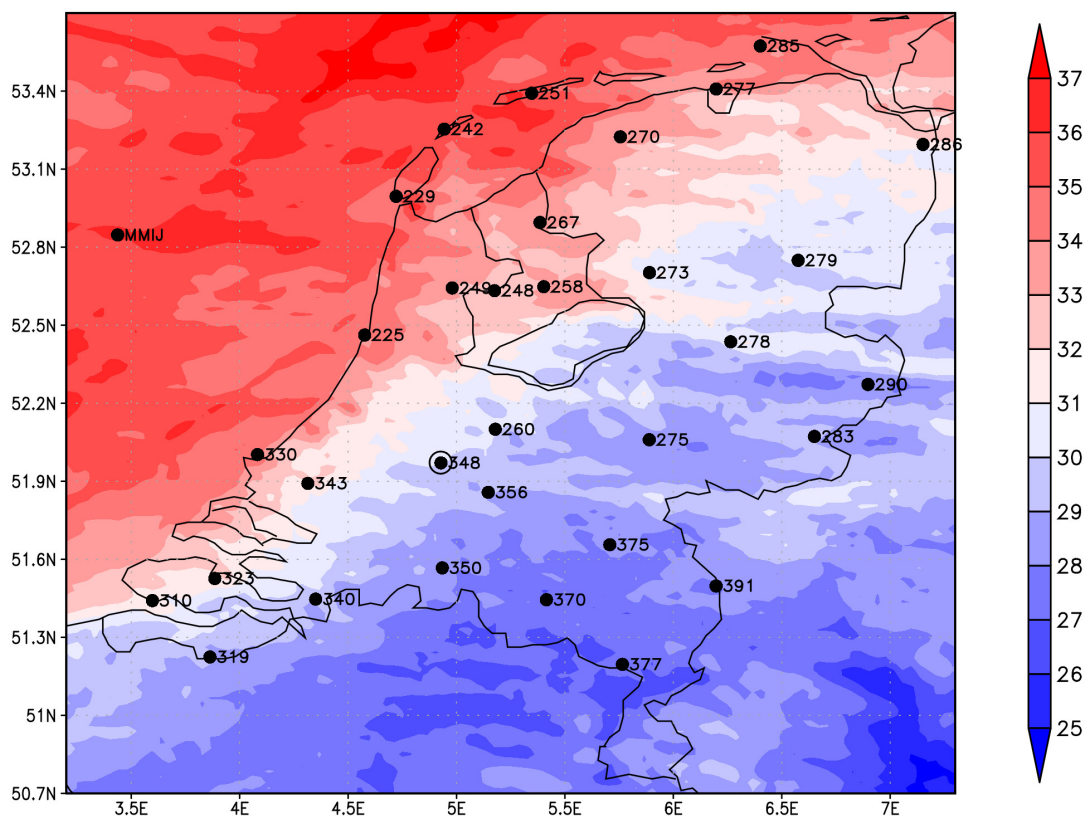


### 3.3 Windmetingen

#### 3.3.1 10m metingen

We gebruikten de wind- en vlag-metingen van 32 KNMI meetlocaties over land. De tijdseries bestaan uit uurgemiddelde waarden van de windsnelheid en windrichtingen en standaard deviaties van de wind op 10 m hoogte. Ook de maximale 3-sec windvraag over het afgelopen uur is gearhiveerd.

De locaties die zijn gebruikt in de analyse zijn weergegeven in Figuur 1. De nummers geven de stationscodes aan van de locaties waarvoor 10 m windmetingen zijn gebruikt.



Figuur 1: Eens per jaar windvraag op 10 m volgens de parameterisatie van HARMONIE. De 32 punten geven de locaties aan die zijn gebruikt in de analyse. De nummers geven de stationscode aan. Het omcirkelde punt is de locatie van Cabauw (code 348). Meetmast IJmuiden is aangegeven met MMIJ.

#### 3.3.2 Cabauw

Voor de meetmast in Cabauw zijn de cup anemometers aanwezig op hoogtes van 10, 20, 40, 80, 140 en 200 meter. Sonische anemometers zijn aanwezig op 3, 60, 100 en 180 m.

Cabauw (code 348) is omcirkeld in Figuur 1. Voor meer informatie over meetmast Cabauw verwijzen we naar <http://www.cesar-observatory.nl/>.

### 3.3.3 Meetmast IJmuiden

Meetmast IJmuiden is een offshore meetmast 85 km uit de kust van IJmuiden (N52°50.89', E3°26.14'). De waterdiepte is ongeveer 28 m. Er is gemeten van 2012 t/m 2015. De mast heeft 3 uithouders op 25,5 m, 57 m en 86,5 m hoogte waarop de meetinstrumenten zijn bevestigd. Ze worden de 0, 120 en 240 uithouders genoemd, maar in werkelijkheid wijst de 0- uithouder richting 46,5°, de 120- uithouder richting 166,5° en de 240- uithouder richting 286,5°. Er zijn cup anemometers op 3 uithouders op 2 niveaus (27 m en 58,5 m) en op de top (92 m). Sonische anemometers zijn aanwezig op 1 niveau (85 m). Meetmast IJmuiden is aangeduid in Figuur 1 met MMIJ. Voor meer informatie over meetmast IJmuiden verwijzen we naar <http://www.meteomastijmuiden.nl/>.

## 4 Methode

Voor het afleiden van een klimatologie van windvlagen maken we gebruik van de hoge-resolutie windklimatologie beschreven in hoofdstuk 2 met voor elk roosterpunt in Nederland (2,5 bij 2,5 km roosterafstand), op 10 niveaus, en voor elk uur uit de periode 1979-2013 een waarde voor de windsnelheid en -richting<sup>4</sup>. Om hier een klimatologie van de windvlagen uit af te leiden, gebruiken we de theoretische kennis die in dit hoofdstuk wordt toegelicht.

### 4.1 Vlagen onder neutrale stabiliteit

Als eerste stap gebruiken we de kennis uit de turbulentie-leer dat windvlagen gedefinieerd zijn als willekeurige fluctuaties rondom de gemiddelde wind. Onder aanname dat deze fluctuaties Gaussisch verdeeld zijn, geldt het volgende verband:

$$\langle u_x \rangle = \frac{\langle U_{max} \rangle - \bar{U}}{\sigma_U} \quad (2)$$

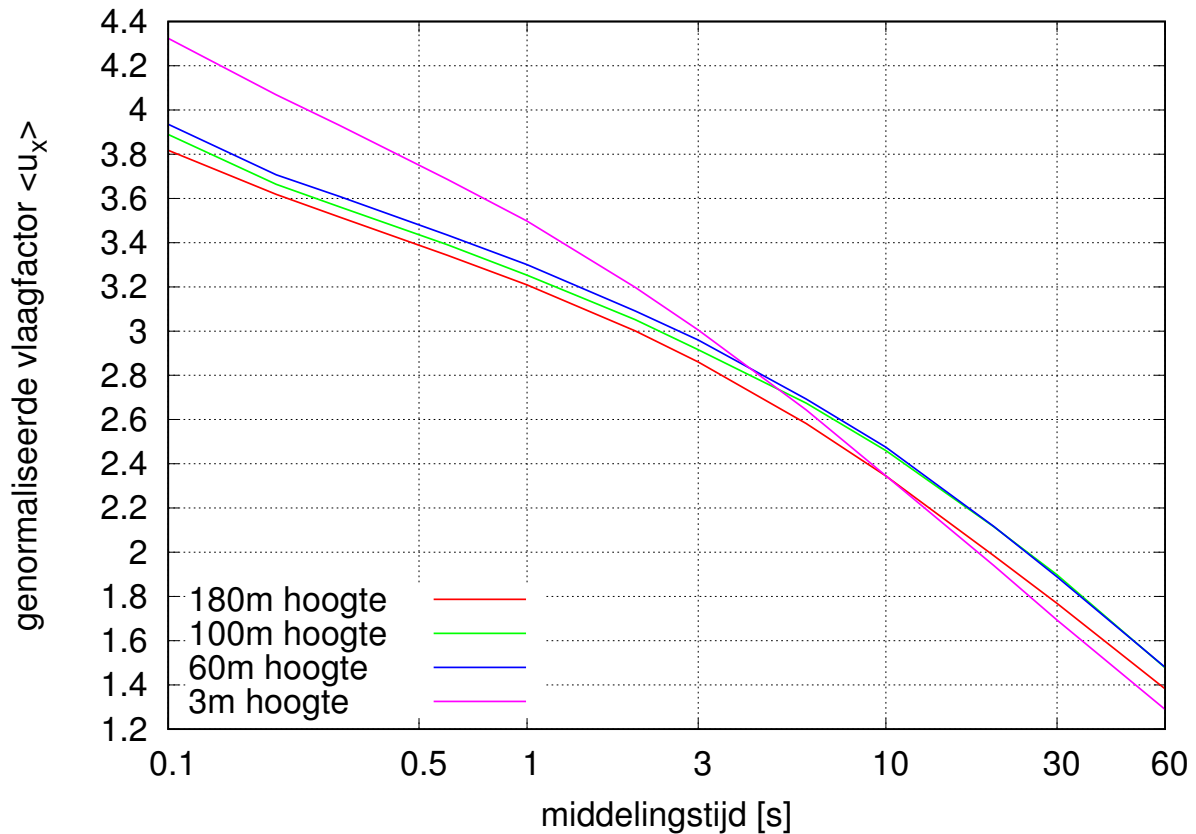
hierin is  $\langle u_x \rangle$  de genormaliseerde vlag,  $\langle U_{max} \rangle$  de grootte van de vlag,  $\bar{U}$  de gemiddelde wind over een gegeven tijdvak, en  $\sigma_U$  de standaard deviatie van de wind in dat tijdvak. Omdat de vlagerigheid van de wind een grillig karakter heeft, wordt er gewerkt met de mediaan-waarde: in een bepaald tijdvak is de helft van de windvlagen hoger en de helft lager dan deze waarde. Dit wordt aangeduid met de haken rond de  $U_{max}$  en rond  $u_x$ .

Formule 2 zegt dus dat we mogen verwachten dat de windvraag een aantal standaard-deviaties hoger is dan de gemiddelde wind. De waarde  $\langle u_x \rangle$  hangt af de middelingstijd van de vlag, van de middelingstijd waarover  $\bar{U}$  en  $\sigma_U$  zijn bepaald, en van het instrument waarmee wordt gemeten. De uitschieters in de minuutgemiddelde wind zullen immers lager zijn dan die van de wind die over 1 seconde gemiddeld is, en de maximale 3-sec uitschieter in een tijdvak van 10 min zal lager zijn dan de uitschieter in een uur.

Figuur 2 laat het verband zien tussen de genormaliseerde vlagfactor  $\langle u_x \rangle$  en de middelingstijd van de windvraag voor de hoogtes van 3, 60, 100 en 180 m in Cabauw.  $U_{max}$ ,  $U$  en  $\sigma_U$  zijn gemeten met een sonische windmeter in de periode van juli 2007 t/m juni 2008. De middelingstijd van de windvraag varieert in de figuur van 0.1 sec tot 1 minuut. De waardes van  $\bar{U}$  en  $\sigma_U$  zijn bepaald over hele uren. Uit het feit dat de lijnen voor 60, 100 en 180 m nagenoeg identiek zijn, kan geconcludeerd worden dat  $\langle u_x \rangle$  inderdaad onafhankelijk is van de hoogte voor grotere hoogtes. De afwijking voor 3 m hoogte is niet verder onderzocht, maar heeft mogelijk te maken met afwijkingen door de nabijheid van het aardoppervlak. Voor een middelingstijd van 3 seconden heeft  $\langle u_x \rangle$  een waarde van ongeveer  $2.9 \pm 0.1$ .

---

<sup>4</sup>Deze waarden zijn openbaar, en gratis te downloaden via <http://projects.knmi.nl/knw>.



Figuur 2: Waarde van  $\langle u_x \rangle$  bepaald voor hoogtes van 3, 60, 100 en 180 m op de meetmast Cabauw. De horizontale as is logaritmisch en geeft de middelingstijd van de vlaag aan. De gemiddelde wind en de bijbehorende standaard deviatie zijn bepaald over hele uren. De curves zijn bepaald op basis van de 500 hoogste uurgemiddelde windsnelheden in een jaar (juli 2007 tm juni 2008) en zijn gemeten door middel van een sonische anemometer met een meetfrequentie van 10 Hz.

De tweede formule die van belang is, is de volgende:

$$\frac{\sigma_U}{u_*} \approx c \quad (3)$$

Deze formule geeft aan dat de standaard deviatie  $\sigma_U$  rechtstreeks gekoppeld is aan de schuifspanning  $u_*$ . De waarde die in de literatuur veelal geldt voor  $c$ , is 2,2. In de bouwwereld is 2,5 gangbaar. De fysische interpretatie van Formule 3 is dat, bij neutrale opbouw van de atmosfeer, de vlagerigheid van de wind alleen bepaald wordt door mechanische turbulentie, en niet door temperatureffecten.

Als derde formule geldt:

$$\bar{U} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

waarin  $z_0$  de ruwheidslengte is,  $z$  de hoogte boven het aardoppervlak, en  $k$  de Von Karman constante, die de waarde 0,41 heeft. Deze formule laat zien dat de gemiddelde wind bij een neutrale opbouw van de atmosfeer logaritmisch toeneemt met de hoogte.

We kunnen vervolgens Formule 3 gebruiken om Formules 2 en 4 te combineren tot:

$$\langle U(z)_{max} \rangle = \bar{U}(z) \left( 1 + \frac{ck \langle u_x \rangle}{\ln(z/z_0)} \right) \quad (5)$$

We hebben hier expliciet gemaakt welke variabelen afhangen van de hoogte  $z$ . Deze omschrijving van de windvraag wordt veel in de literatuur aangetroffen. Uit de gemiddelde verhouding van  $U(z)_{max}$  en  $\overline{U(z)}$  bij hoge windsnelheden kan een schatting gemaakt worden van de ruweheidslengte  $z_0$ . De uitdrukking tussen haken wordt de vlagfactor genoemd. Het berekenen van de waarde van  $\langle U(z)_{max} \rangle$  met Formule 5 is echter lastig omdat de ruweheidslengte  $z_0$  moeilijk te meten is, en bovendien meestal ruimtelijk inhomogeen.

Strikt genomen is Formule 4 de integraal van de onderliggende formule:

$$\frac{\partial \overline{U(z)}}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \quad (6)$$

Voordeel van de representatie van Formule 6 boven Formule 4 is dat hierin de ruweheidslengte  $z_0$  ontbreekt.

Combinatie van Formules 3 en 6 geeft:

$$\sigma_U = ckz \frac{\partial \overline{U(z)}}{\partial z} \quad (7)$$

Combinatie van Formules 2 en 7 leidt tot:

$$\langle U(z)_{max} \rangle = \overline{U(z)} + ck \langle u_x \rangle z \frac{\partial \overline{U(z)}}{\partial z} \quad (8)$$

Door Formules 4 en 6 in te vullen in Formule 8, en  $\alpha$  te definiëren als  $\alpha = ck \langle u_x \rangle = 2.62$  volgt:

$$\begin{aligned} \langle U(z)_{max} \rangle &= \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} + \alpha z \frac{u_*}{kz} \\ &= \frac{u_*}{k} \left[ \ln \frac{z}{z_0} + \ln(e^\alpha) \right] \\ &= \frac{u_*}{k} \left[ \ln \frac{e^\alpha z}{z_0} \right] \\ &= \overline{U(e^\alpha z)} \end{aligned} \quad (9)$$

In de laatste stap hebben we Formule 4 toegepast.

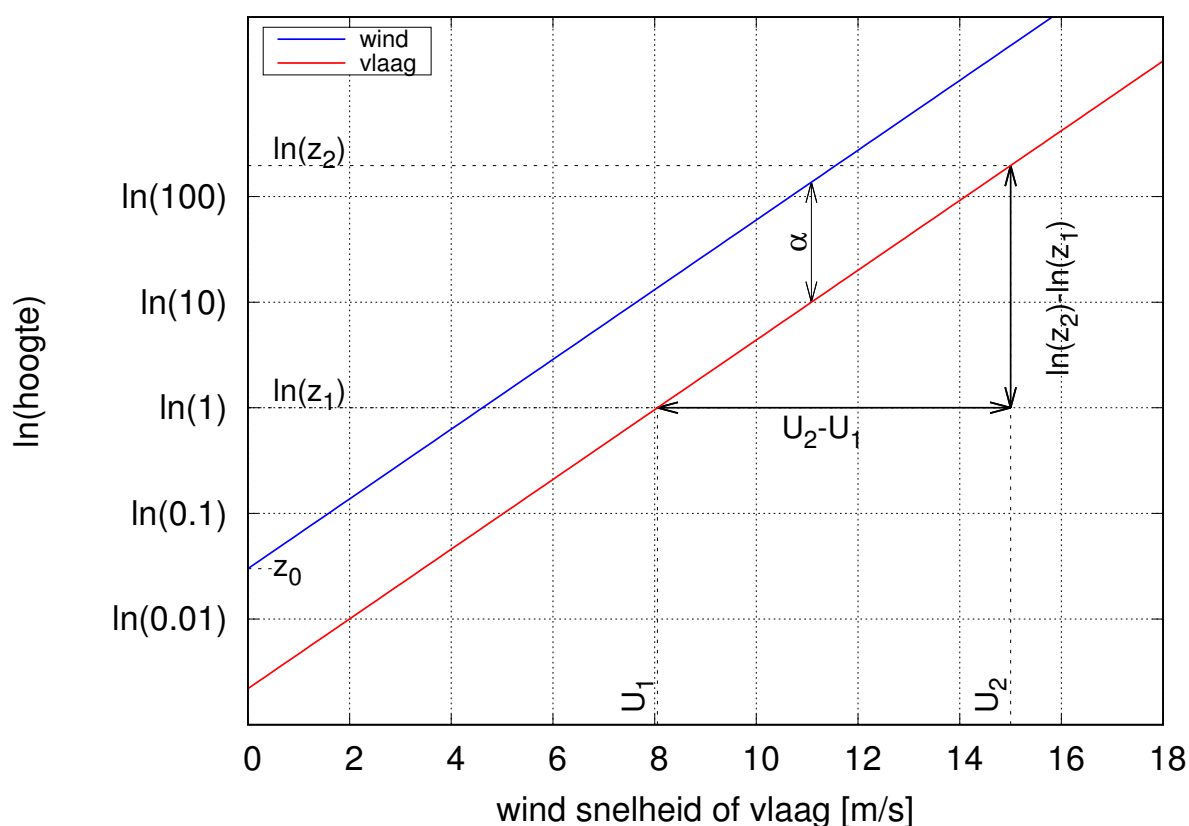
Een andere representatie volgt door Formule 4 in te vullen in Formule 8. Gebruikmakend van  $z \partial U / \partial z = \partial U / \partial \ln(z)$  volgt na enige algebra:

$$\langle U(z)_{max} \rangle = \overline{U(z)} + \alpha \frac{\overline{U(z_2)} - \overline{U(z_1)}}{\ln(z_2) - \ln(z_1)} \quad (10)$$

Hierin zijn  $\overline{U(z_1)}$  en  $\overline{U(z_2)}$  de gemiddelde windsnelheden op hoogtes  $z_1$  en  $z_2$  (zie ook Figuur 3). We maken de volgende opmerkingen bij Formules 9 en 10:

1. Het profiel van de windvraag verloopt parallel aan het profiel van de gemiddelde wind. De mate van verschuiving in verticale richting is gelijk aan  $\alpha$ , dus onafhankelijk van de hoogte, van de windsnelheid of van  $z_0$ . Dit is geïllustreerd in Figuur 3. De blauwe lijn in de figuur representeert de gemiddelde wind volgens Formule 4, waarbij de helling bepaald wordt door  $z_0$  en  $u_*$ . Uit Formule 9 volgt dat de rode lijn voor elke windsnelheid dezelfde factor  $\alpha$  verticaal verschoven moet zijn t.o.v. de blauwe lijn, en dus parallel is aan het profiel van de gemiddelde wind.
2. Als de verandering van de gemiddelde wind met de hoogte bekend is, zijn de windvragen te berekenen. Omdat het uitgangspunt een logaritmisch windprofiel is (Formule 4), is de blauwe lijn in Figuur 3 een rechte lijn en is de helling op alle hoogtes gelijk. De hoogtes  $z_1$  en  $z_2$  in Formule 10 zijn daarom vrij te kiezen, mits het windprofiel logaritmisch is.

- Als voor  $z_1$  de waarde  $z_0$  gekozen wordt (met  $\overline{U(z_1)} = 0$ ) en voor  $z_2 = z$ , gaat Formule 10 over in Formule 5. We geven de voorkeur aan de meer algemene representatie van Formule 10, onder meer omdat deze vorm geen expliciete aannames doet over de waarde van de ruwheidslengte  $z_0$ .
- Bij wind over inhomogeen terrein is geen eenduidige waarde van  $z_0$  te geven. Ook is het niet realistisch om te veronderstellen dat de windvlaag volledig gedomineerd wordt door de lokale ruwheid, zoals Formule 5 veronderstelt.
- Als  $z_1 = z$  en  $z_2 = z_1 \exp(\alpha)$ , gaat Formule 10 over in Formule 9.
- Formule 9 en Figuur 3 maken duidelijk dat de grootte van de windvlaag geschat kan worden aan de hand van de gemiddelde wind op een grotere hoogte. Zo is de maximale 3-seconden windvlaag in een uur op 10 m hoogte volgens Formule 9 gelijk aan de gemiddelde wind op  $10 \cdot \exp(\alpha) = 137$  m hoogte. We merken op dat dit volgt uit een algebraïsche analyse, en niet direct fysisch te interpreteren valt. Dat zou immers betekenen dat een 1-seconden windvlaag (die volgens Figuur 2 een vlagfactor heeft van 3,25, en dus  $\alpha = 2.93$ ) van een hoogte van 187 m komt, en een 0.1-seconden vlag van 337 m.
- De toepasbaarheid van Formule 9 is in praktisch opzicht beperkt tot het schatten van de vlag op kleine hoogtes, omdat de aanname dat  $u_*$  constant is met de hoogte beperkt is tot de oppervlaktelaag (die 10% van de grenslaag uitmaakt). Formule 10 heeft een grotere toepasbaarheid.



Figuur 3: Grafische weergave van de afleiding van Formules 9 en 10. Zie de tekst voor verdere toelichting.

## 4.2 Turbulentie Intensiteit

De turbulentie intensiteit  $I$ , een grootheid die vooral in de windenergie-sector veel gebruikt wordt, is gedefinieerd als:

$$I = \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \quad (11)$$

Dit kan, met bovenstaande formules, geschreven worden als:

$$I(z) = \frac{ck}{\bar{U}(z)} \frac{\overline{U(z_2)} - \overline{U(z_1)}}{\ln(z_2) - \ln(z_1)} \quad (12)$$

waarbij  $z_1$  en  $z_2$  (bij de aanname van een logaritmisch profiel) willekeurig te kiezen zijn.

Omdat  $\sigma_U$  bij een logaritmisch profiel onafhankelijk is van de hoogte, en  $\bar{U}$  toeneemt, zal  $I(z)$  afnemen met de hoogte.

Formule 12 laat zien dat ook de turbulentie intensiteit te herleiden is uit de verticale windschering in de gemiddelde wind.

## 4.3 Turbulente Kinetische Energie

HARMONIE berekent voor elke tijdstap en elk roosterpunt de turbulente kinetische energie (TKE), die gedefinieerd is als:

$$E_{TKE} = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (13)$$

waarin  $u'$ ,  $v'$  en  $w'$  de standaard deviaties van de snelheid in de drie richtingen zijn. Aannemend dat  $\sigma_U \approx \sqrt{u'^2 + v'^2}$ , en dat  $w'$  veel kleiner is dan  $u'$  en  $v'$ , volgt eenvoudig dat  $\sigma_U$  uit Formule 2 geschreven kan worden als:

$$\sigma_U \approx \sqrt{2E_{TKE}} \quad (14)$$

Uit Formule 2 volgt dan:

$$\langle U_{max} \rangle = \bar{U} + \langle u_x \rangle \sqrt{2E_{TKE}} \quad (15)$$

We merken op dat in deze benadering de aanname van neutrale stabiliteit niet gemaakt hoeft te worden, omdat stabiliteitseffecten meegenomen worden in de TKE.

Helaas is de TKE niet gearchiveerd in de 1979-2013 heranalyse. In operationele verwachtingen is de TKE echter wel beschikbaar.

## 4.4 Effect van ruwheidsovergang op vlagen

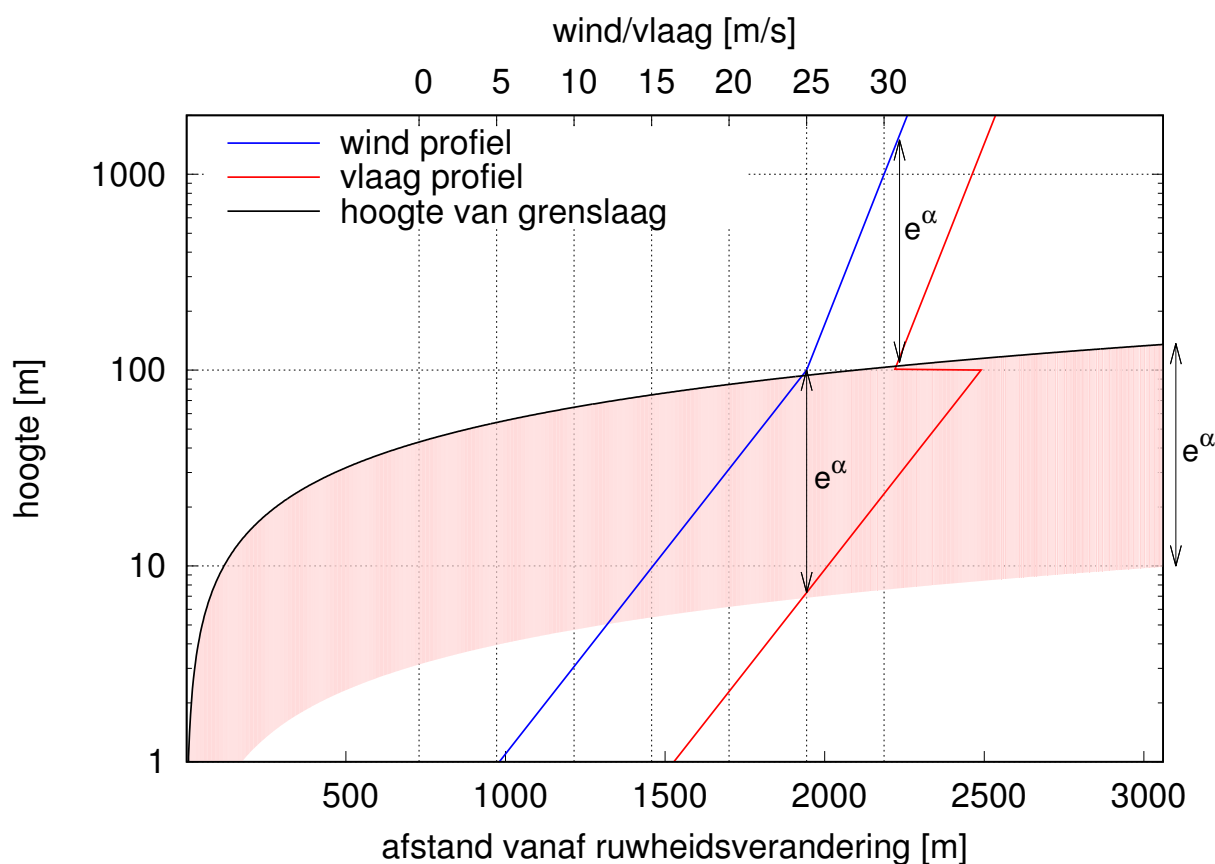
We gebruiken de beschrijving van Wood (1982) om de hoogte van de interne grenslaag (Engels: 'internal boundary layer' IBL) te bepalen bij een overgang van zee naar land:

$$H_{IBL} = 0.28z_{0,r} \left( \frac{x}{z_{0,r}} \right)^{0.8} \quad (16)$$

Hierin is  $H_{IBL}$  de hoogte van de interne grenslaag,  $z_{0,r}$  de ruwheidslengte van het ruwste oppervlak, en  $x$  de afstand stroomafwaarts van de overgang. In de parameterisatie van Wood (1982) hangt de IBL niet af van de stroomopwaartse (gladde) ruwheidslengte  $z_{0,s}$ .

Figuur 4 geeft de hoogte van de IBL van  $z_{0,2} = 0.001$  m (representatief voor een gladde zee) naar  $z_{0,r} = 0.3$  m (stedelijke omgeving) volgens Formule 16 in zwart. Als we aannemen dat het windprofiel logaritmisch is met de hoogte, met  $z_0 = 0.001$  m boven de IBL, en met

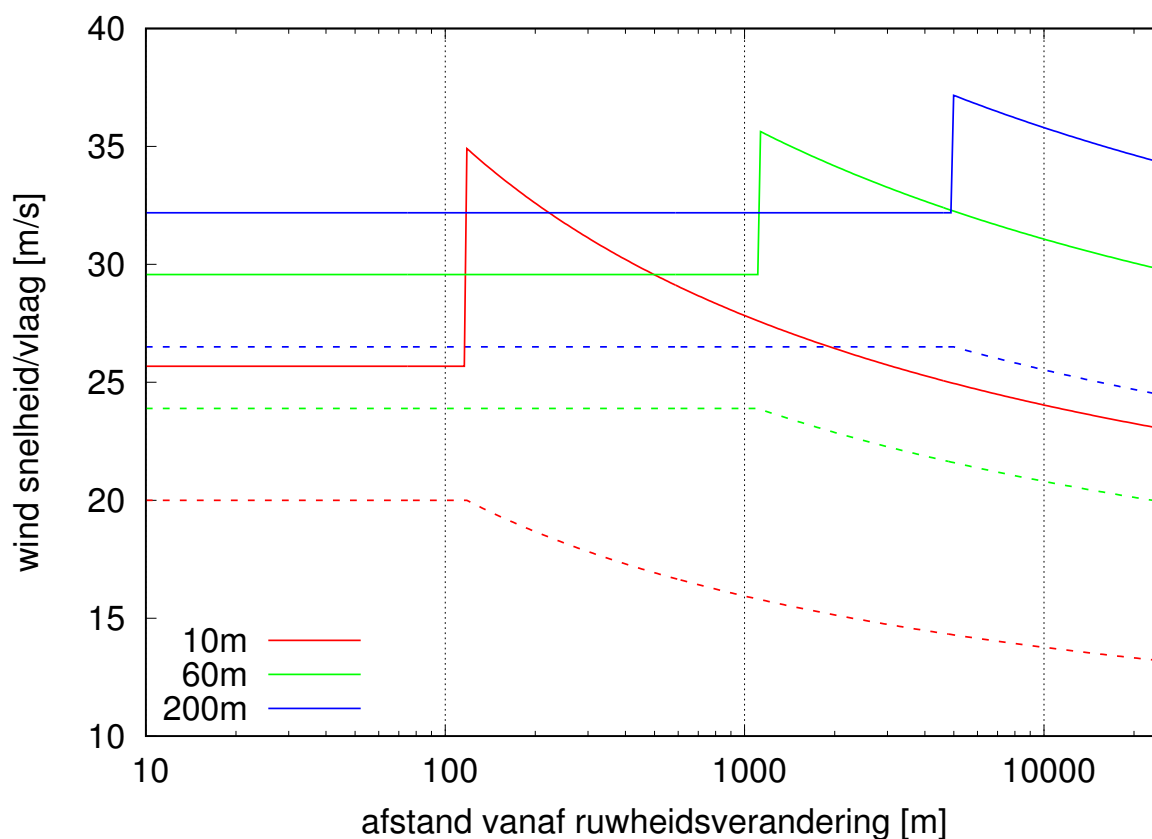
$z_{0,r} = 0.3$  m onder de IBL, dan kan het profiel beschreven worden met de blauwe lijn op de positie waar de grenslaag 100 m is. Toepassing van Formule 10 geeft de rode lijn voor het profiel van de windvlaag. Te zien is dat de windvlaag in het hoogste deel van de IBL een maximale waarde heeft die hoger is dan de windvlaag van de ongestoorde wind boven de IBL. In het rood gearceerde gebied is de windvlaag hoger dan deze ongestoord zou zijn. Voor een hoogte van 10 m betekent dit dat vanaf ongeveer 120 m stroomopwaarts van de ruwheidsovergang de landruwheid  $z_{0,r}$  gevoeld wordt. Vanaf dat punt tot 3160 m vanaf de ruwheidsovergang is de windvlaag hoger is dan boven zee. Voor de 100 m wind is dit tussen 2,1 en 56 km, en voor 200 m vanaf 5 km. Gezien de resolutie van HARMONIE van 2.5 km is de piek in windvlaag op 10 m niet goed detecteerbaar, maar zou wel detecteerbaar moeten zijn vanaf een hoogte van ongeveer 60 m. We merken op dat, hoewel de genoemde afstanden gelden voor een ruwheidslengte van  $z_{0,r}=0.3$  m, deze niet sterk afhangen van  $z_{0,r}$ .



*Figuur 4: Ontwikkeling van het grenslaag bij een ruwheidsovergang van  $z_0 = 0.001$  naar  $z_0 = 0.3$  m volgens Wood (1982) (zwart). Op de bovenste as is in blauw het verticale windprofiel weergegeven voor de locatie waar de grenslaag 100 m is. In rood is het profiel van de windvlaag weergegeven volgens Formule 10. In het rood gearceerde gebied is de windvlaag hoger dan deze zou zijn zonder ruwheidsovergang. Zie de tekst voor verdere toelichting.*

De wind- en vlag snelheden op verschillende hoogtes zijn getoond in Figuur 5. Hier is te zien dat de gemiddelde windsnelheid afneemt zodra de betreffende hoogte in de IBL valt, maar dat de windvlaag eerst een toename toont, en vervolgens afneemt. De sterkte van de toename hangt uiteraard af van  $z_{0,r}$  en  $z_{0,s}$ . We merken op dat de scherpe discontinuïteit van Figuur 5 in werkelijkheid gladder zal verlopen, mede door de advection van turbulentie.





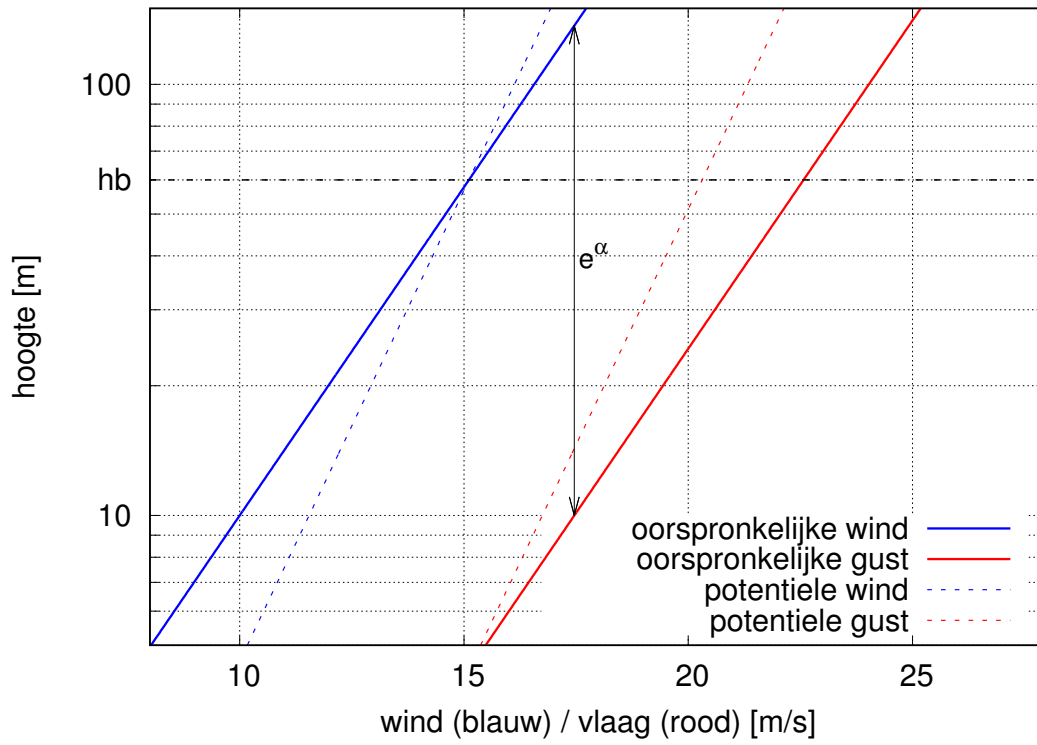
Figuur 5: Ontwikkeling van de windsnelheid (dashed) en windvlaag (solid) als functie van de afstand vanaf de ruwheidsovergang voor verschillende hoogtes. Uitgegaan is van een windsnelheid van 20 m/s op 10 m hoogte voor de ruwheidsovergang ( $z_0 = 0.001$ ). Na de ruwheidsovergang is  $z_0 = 0.3$  m. De horizontale as is logaritmisch.

#### 4.5 Effect van transformatie naar potentiële wind op vlagen

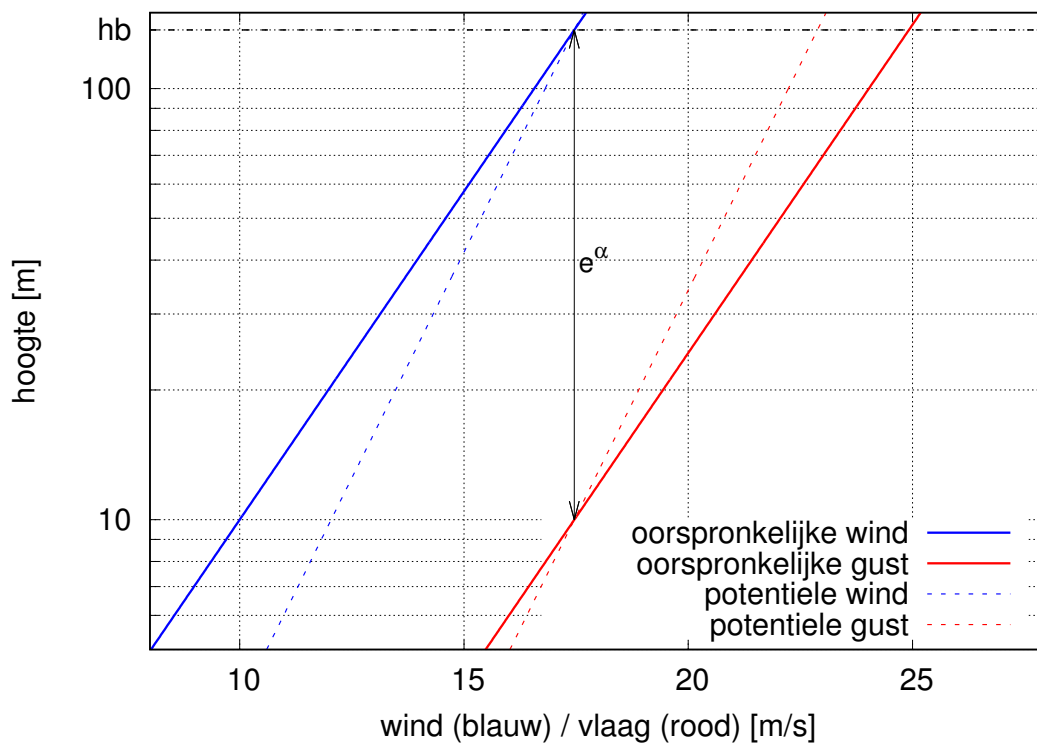
In het concept van potentiële wind wordt de wind met de lokale ruwheid volgens het logaritmisch profiel vertaald naar de menghoogte  $h_b$  ('blending height', meestal wordt hiervoor een hoogte van 60 m gekozen) en wordt er terug getransformeerd met de standaard WMO ruwheidslengte van 0,03 m. Hieruit wordt een beschuttingsfactor  $BF_U$  afgeleid (zie Wever, 2012):

$$BF_U = \frac{\ln(10/0.03) \ln(h_b/z_0)}{\ln(h_b/0.03) \ln(10/z_0)} \quad (17)$$

Er zijn parallellen tussen wat er gebeurt bij een ruwheidsovergang en het berekenen van de potentiële wind: de omrekening naar potentiële wind kan beschouwd worden alsof de hoogte van de IBL gelijk is aan de menghoogte, met een ruwheid van 0,03 m onder de IBL. Dit is geïllustreerd in Figuur 6 waar de verticale profielen van de wind (blauw) en windvlaag (rood) zijn weergegeven. De gestippelde lijnen geven de profielen voor resp. de potentiële wind en windvlaag bij een menghoogte  $h_b$  van 60 m (a) en 137 m (b). Te zien is dat de transformatie van een ruwheid van 0.3 m (stedelijke bebouwing) naar 0.03 m (grasland) de gemiddelde wind op 10 m doet toenemen, maar de windvlaag doet afnemen voor  $h_b=60$  m. Voor  $h_b=137$  m verandert de windvlaag op 10 m niet bij transformatie naar potentiële wind. Dit is het gevolg van het feit dat de hoogte van de menglaag dan (volgens Formule 9) gelijk is aan het niveau waar de gemiddelde windsnelheid gelijk is aan de 3-sec vlag op 10 m.



(a)  $h_b=60$  m



(b)  $h_b=137$  m

Figuur 6: Verticale profielen van de oorspronkelijke wind bij  $\bar{U}(10)=10$  m/s en  $z_0=0.3$  m (blauw) en het bijbehorende profiel van de windvlag (rood). De gestippelde lijnen geven de profielen aan van resp. de potentiële wind en windvlag. In (a) is de menkhoogte  $h_b=60$  m, in (b) is  $h_b=137$  m. De verticale assen zijn logaritmsch.

Toepassing van de informatie uit Figuur 6(b) laat zien dat het gebruik van een mennghoogte tussen de 10 m en 137 m bij een toename van de ruwheid resulteert in een afname van de 10 m-windsnelheid, maar in een toename van de 10 m-windvraag. De afname van de gemiddelde wind wordt dan dus ruimschoots gecompenseerd door de toename van de schering.

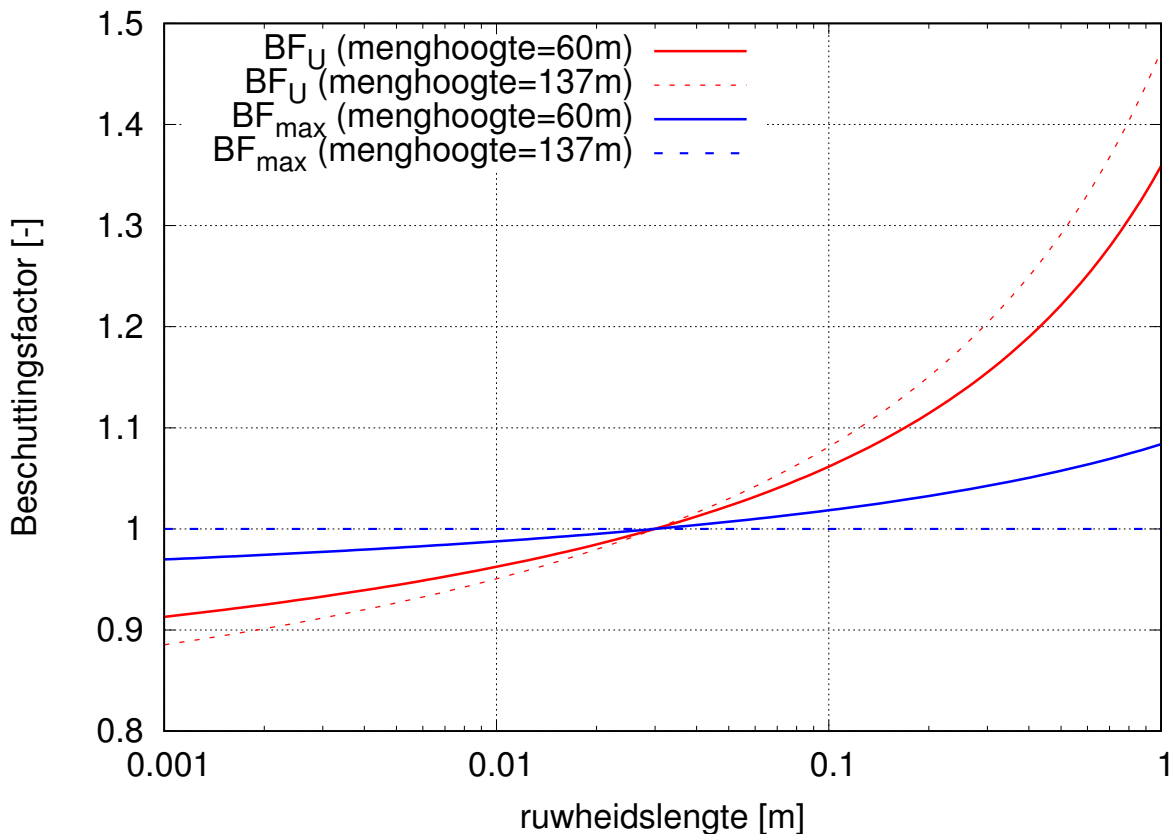
Om bovenstaande constatering te kwantificeren, herhalen we Formule 5:

$$\langle U(z, z_0)_{max} \rangle = \overline{U(z, z_0)} \left( 1 + \frac{\alpha}{\ln(z/z_0)} \right) \quad (18)$$

waaruit het verband tussen de windvraag en de ruwheidslengte  $z_0$  blijkt. We hebben hier expliciet gemaakt welke variabelen van  $z$  en  $z_0$  afhangen. Ook de gemiddelde wind  $\overline{U(z, z_0)}$  verandert als  $z_0$  verandert. De beschuttingsfactor  $BF_{max}$  voor de windvraag op 10 m volgt nu uit combinatie van Formules 5 en 17 :

$$BF_{max} = \frac{1 + \alpha/\ln(10/z_0)}{BF_U \cdot (1 + \alpha/\ln(10/0.03))} \quad (19)$$

In Figuur 7 zijn de beschuttingsfactoren voor de gemiddelde wind (rood) en de windvraag (blauw) voor mennghoogtes van 60m (doorgetrokken lijn) en 137m (gestippelde lijn) weergegeven als functie van de ruwheidslengte.



Figuur 7: Beschuttingsfactoren voor de gemiddelde wind (rood) en de windvraag (blauw) voor mennghoogtes van 60m (doorgetrokken lijn) en 137m (gestippelde lijn) als functie van de ruwheidslengte. De horizontale as is logaritmisch.

Uit Figuur 7 blijkt dat de beschuttingsfactor voor de gemiddelde wind veel sterker afhangt van de ruwheid dan voor de windvraag. Dit is het gevolg van compenserende effecten: een grotere ruwheid verhoogt de vlagerigheid, maar verlaagt de gemiddelde wind. Voor de standaard waarde van de mennghoogte van 60 m is de beschuttingsfactor voor de windvragen voor ruwheden

tussen 0.001 m en 1 m kleiner dan 10%. Voor een menhoogte van  $10 \exp(\alpha) = 137\text{m}$  is de compensatie volledig, en is de beschuttingsfactor voor de vlag onafhankelijk van de ruwheid (en gelijk aan 1).

Het feit dat bij een ruwheidsovergang de gemiddelde wind afneemt maar de windvlag toeneemt is van belang voor de windvlagen-klimatologie voor de bouwsector: het geeft aan dat de windvlagen-klimatologie in stedelijke gebieden extremer kan zijn dan in open terrein. We merken - wellicht ten overvloede - op dat dus niet alleen de vlagfactor toeneemt maar ook de vlag in absolute zin. De vlagrigheid neemt immers meer toe dan de gemiddelde wind afneemt.

Tenslotte merken we op dat het concept van potentiële wind alleen toepasbaar op hoogtes (ver) onder de menhoogte en dus niet toepasbaar is op hoogtes die van belang zijn voor bv. de windenergie.

## 4.6 Extreme-waarden theorie

Om de windvlag te bepalen die gemiddeld een keer in een gegeven tijd voorkomt (de herhaaltijd), fitten we de maxima in een gegeven tijd aan de Gegeneraliseerde Extreme Waarden (engels: Generalized Extreme Value: GEV) verdeling. Dit is de theoretische verdeling voor zgn. blokmaxima (zie bijvoorbeeld Coles, 2001):

$$G(y) = \exp\{-[1 + \xi(\frac{y - \mu}{\sigma})]^{-1/\xi}\} \quad (20)$$

Hierin zijn  $\mu$ ,  $\sigma$  en  $\xi$  respectievelijk de locatie-, schaal- en vormparameter, en  $y$  is de windvlag. Als  $|\xi| \rightarrow 0$  kan Formule 20 geschreven worden als:

$$G(y) = \exp\{-\exp(-\frac{y - \mu}{\sigma})\} \quad (21)$$

Deze verdeling wordt de Gumbel verdeling genoemd.

De herhaaltijd  $T$ , die de gemiddelde tijd tussen twee overschrijdingen van een bepaalde waarde aangeeft, is gedefinieerd door:

$$T = \frac{1}{1 - G(y)} \quad (22)$$

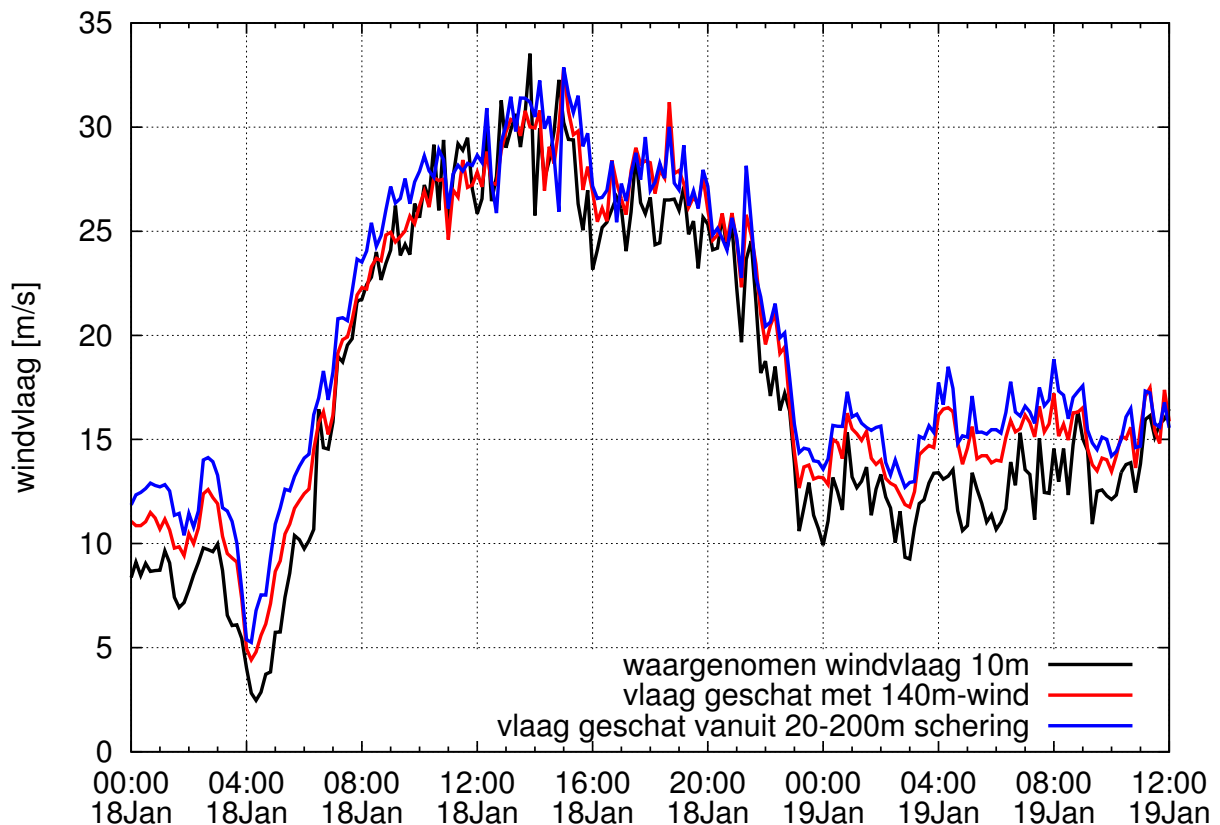
In dit rapport worden de blokmaxima gepresenteerd in de vorm van Gumbelplots, waarin de blokmaxima weergegeven worden als functie van de Gumbel variabele  $x = -\ln(-\ln(G(y)))$ . Bij een Gumbel distributie resulteert dit in een rechte lijn. Via Formule 22 is de Gumbel variabele rechtstreeks gerelateerd aan de herhaaltijd, die op de bovenste horizontale as wordt weergegeven.

Normaal worden jaarmaxima geselecteerd en geplot. Omdat de waargenomen reeksen van windvlagen vaak redelijk kort zijn, zou dit resulteren in te weinig maxima om een goede vergelijking te maken. Vandaar dat de maandmaxima geselecteerd zijn. Hierin worden de wintermaxima (Oktober-Maart) apart genomen van de zomermaxima (April-September) omdat de wintermaxima gegenereerd worden door depressies en de zomermaxima door convectieve situaties.

## 5 Validatie en verificatie

### 5.1 Tijdreeks

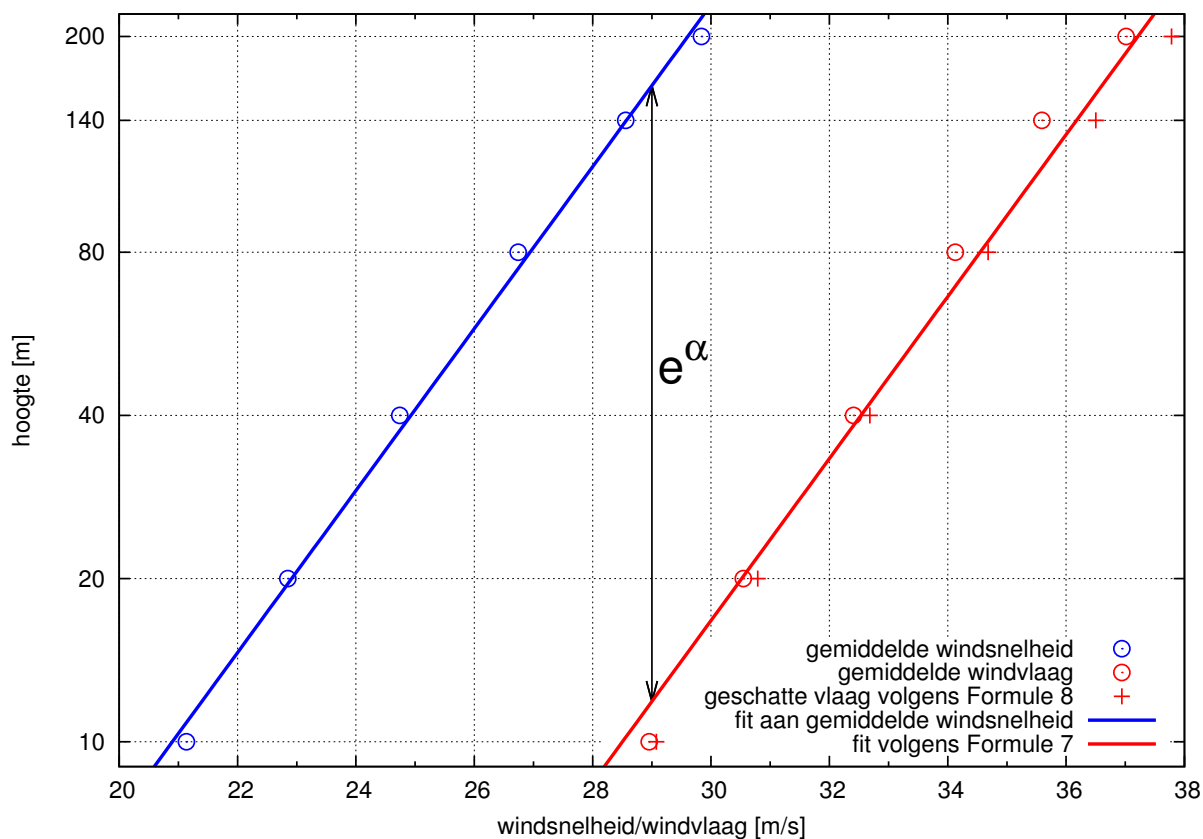
Figuur 8 toont in zwart een tijdreeks van de opgetreden 3-sec windvlagen op 10 m in Cabauw tijdens de storm van 18 januari 2007. De schatting van de windvlaag volgens Formule 9 en 10 (rood resp. blauw) laten zien dat beide formules een nauwkeurige schatting geven van de opgetreden (extreme) windvlagen.



Figuur 8: Waargenomen (zwart) en geschatte windvlagen volgens Formule 9 (rood) en Formule 10 (blauw). In Formule 10 is gekozen voor  $z_1 = 20$  en  $z_2 = 200$ . Getoond is de tijdreeks van de 10 m windvlagen in Cabauw tijdens de storm van 18 januari 2007.

## 5.2 Verticaal profiel

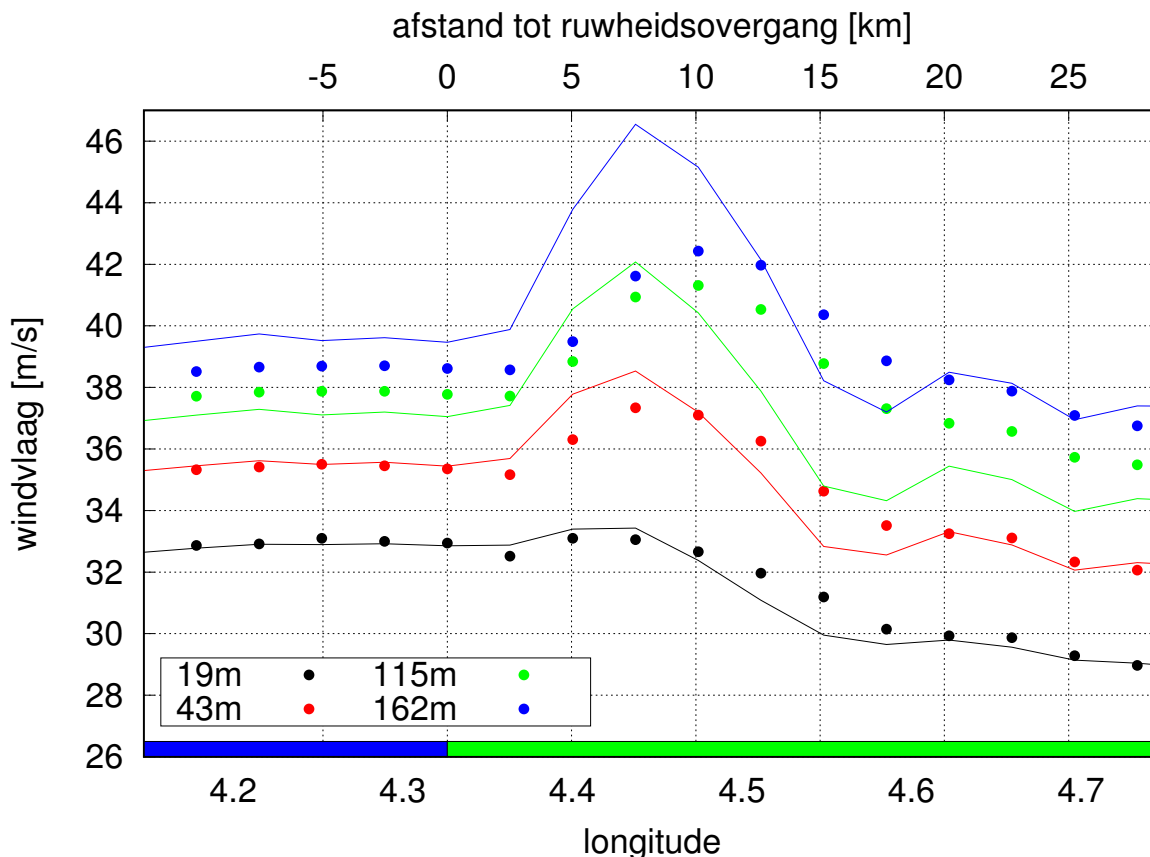
Figuur 9 toont het gemiddelde verticale profiel voor de 100 meest extreme uurgemiddelde 10 m windsnelheden in Cabauw uit de periode Mei 2000 - April 2016. De laagste uurgemiddelde windsnelheid van die 100 gevallen is 19.5 m/s. De blauwe punten geven de gemiddelde windsnelheid uit de waarnemingen, de blauwe lijn is de fit. De rode punten geven de gemiddelde windvraag, de rode lijn is de vertaling van de blauwe lijn volgens Formules 9 en/of 10. Uit Figuur 9 concluderen we dat Formule 10 een goede beschrijving geeft van de extreme windvlagen tot hoogtes van (minstens) 200 m.



Figuur 9: Gemiddeld verticale profiel van de 100 meest extreme 10 m windsnelheden in Cabauw uit de periode Mei 2000 - April 2016. De bijbehorende minimale 10 m windsnelheid is 19.5 m/s. De blauwe punten geven de gemiddelde windsnelheid uit de waarnemingen, de blauwe lijn is de fit. De rode punten geven de gemiddelde waargenomen windvlagen, de rode lijn is de vertaling van de blauwe lijn volgens Formule 9. De rode plus-symbolen geven de gemiddelde windvraag geschat volgens Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m.

### 5.3 Ruwheidsovergang

Figuur 10 geeft het verloop van de 3-seconde windvlaag aan op 23 Februari 2017 om 18:00 volgens de operationele verwachting van HARMONIE (versie 36H1.4) op verschillende hoogtes. De windvlaag is berekend met Formule 9 (lijnen) en met Formule 13 (stippen).



Figuur 10: 3-seconde windvlaag als functie van de longitude op 52.2N op 23 Februari 2017 om 18:00 volgens de operationele verwachting van HARMONIE (versie 36H1.4). De verschillende kleuren geven de verschillende hoogtes aan. De windvlaag is berekend met Formule 10 (lijnen) en met Formule 13 (stippen). De blauwe en groene balk geven aan waar zich respectievelijk zee en land bevindt. De bovenste horizontale as geeft het aantal kilometers vanaf de ruwheidsovergang aan.

De figuur laat zien dat de berekening van de vlag vanuit de TKE (Formule 13) kwalitatief dezelfde resultaten geeft als de berekening vanuit de schering (Formule 10), al zijn de resultaten vanuit de TKE meer 'uitgesmeerd', wat verklaard kan worden door de advection van TKE. De kwalitatieve overeenkomst onderbouwt de hypothese dat de windvlagen toenemen bij een overgang naar ruwer terrein. We merken op dat validatie vanuit waarnemingen moeilijk is, omdat het effect op 10 m zich alleen op een beperkte afstand van de kust voordoet, waar geen metingen plaatsvinden. Een optie is om het fenomeen verder te onderzoeken met Large Eddy Simulation (LES).

## 5.4 Gumbelplots

We richten ons eerst op de validatie van de methode door Formules 9 en 10 toe te passen op de waarnemingen in Cabauw en Meetmast IJmuiden. Vervolgens verifiëren we de resultaten van HARMONIE door dezelfde formules op de winden uit HARMONIE toe te passen en te bepalen welke keuzes (Formule 9 vs. Formule 10, keuze voor  $z_1$  en  $z_2$ ) de optimale resultaten geeft.

### 5.4.1 Gumbelplots voor de waarnemingen

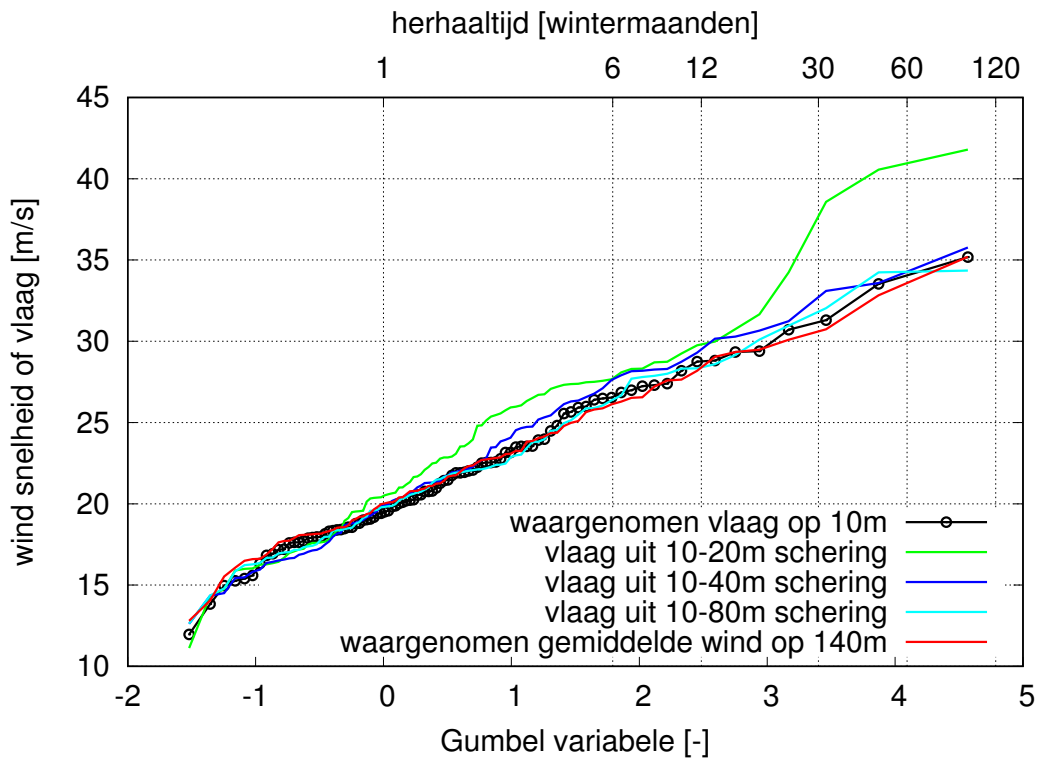
**5.4.1.1 Cabauw** Figuur 11 toont de Gumbelplot voor Cabauw van de maximale windvraag per maand volgens de waarnemingen (zwart), volgens Formule 9 (rood), en volgens Formule 10 met  $z_1=10$  en  $z_2=20$ , en 80 (respectievelijk groen, donkerblauw en lichtblauw). Figuur 11(a) toont de Gumbelplot voor de wintermaanden (Oktober-Maart), Figuur 11(b) voor de zomermaanden (April-September).

Voor de wintermaanden laat de wind op 140 m (rood) een verrassend goede overeenkomst zien met de waargenomen windvlagen op 10 m (zwart). De overeenkomst met Formule 10 is ook heel goed, mits  $z_2$  hoger dan 20 m wordt gekozen.

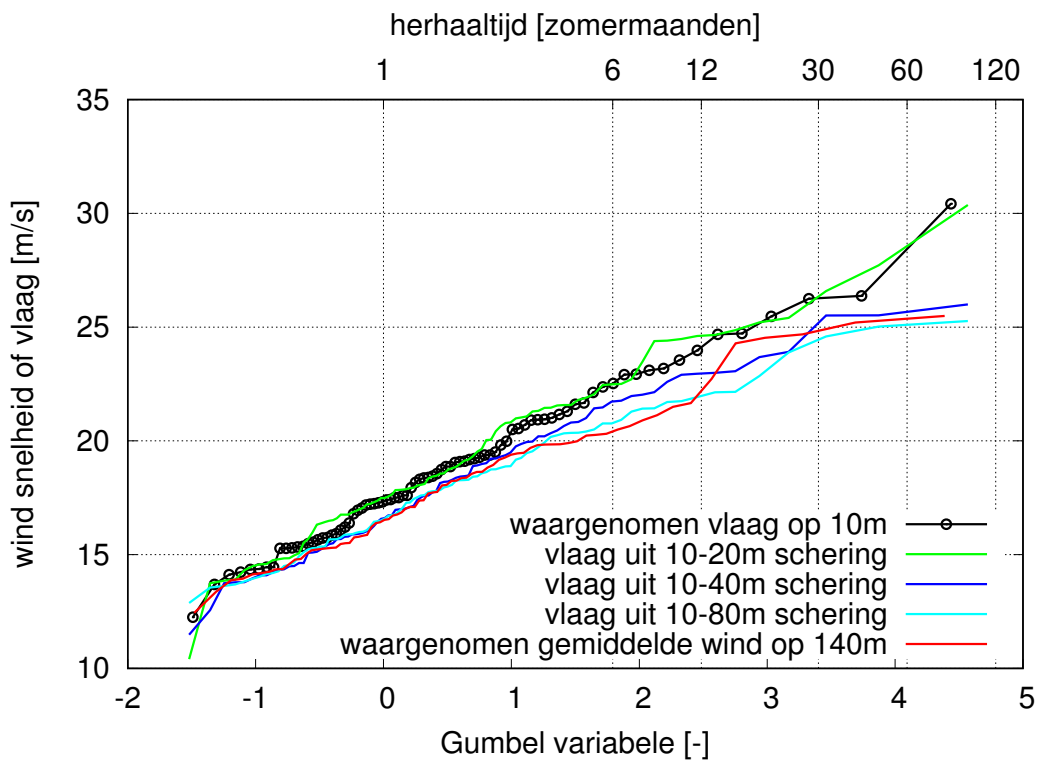
Voor de zomermaanden is de overeenkomst iets minder goed. Opvallend is dat juist hier de  $z_2=20$  m goede overeenkomst vertoont. Wat ook opvalt is dat ook in de zomermaanden, waar convectieve situaties voor extreme windvlagen kunnen zorgen, de benadering vanuit de schering toch een redelijk goede beschrijving geven van de extreme zomerse windvlagen, en dat de parameterisatie van HARMONIE waarin convectie expliciet is meegenomen, niet beter presteert.

We merken op dat de windvlagen in de winter gemiddeld hoger zijn dan in de zomer. Van de jaarmaxima is gemiddeld 10% afkomstig uit de zomermaanden. De afwijkingen in de zomermaanden hebben dus weinig effect op de jaarmaxima.





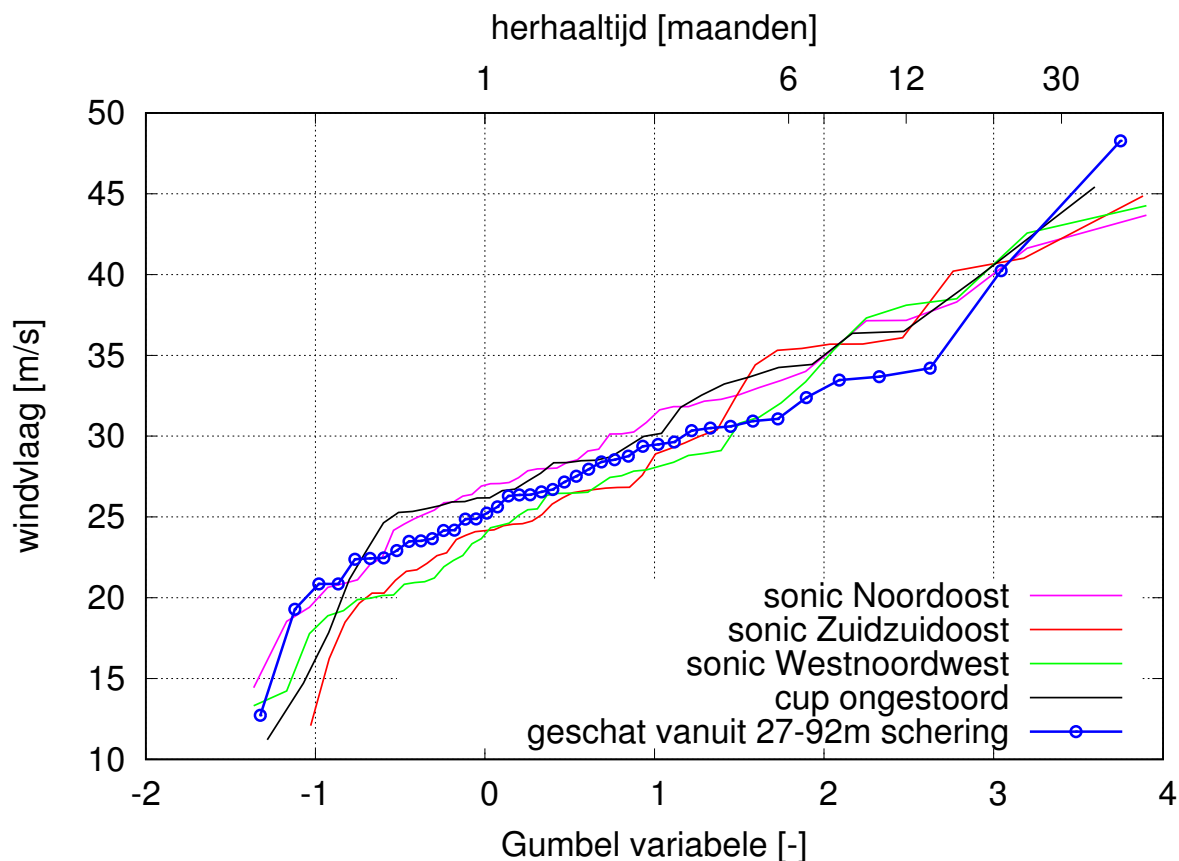
(a) wintermaanden



(b) zomermaanden

Figuur 11: Gumbelplots voor Cabauw van de maximale waargenomen waarden voor de windvlagen op 10 m hoogte (zwart), de gemiddelde wind op 140 m (rood), en volgens de parameterisatie van Formule 10 met  $z_1 = 10$  en  $z_2 = 20, 40$  en  $80$  (respectievelijk groen, donkerblauw en lichtblauw). Figuur (a) toont de Gumbelplot voor de wintermaanden (Oktober-Maart), figuur (b) voor de zomermaanden (April-September). De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.

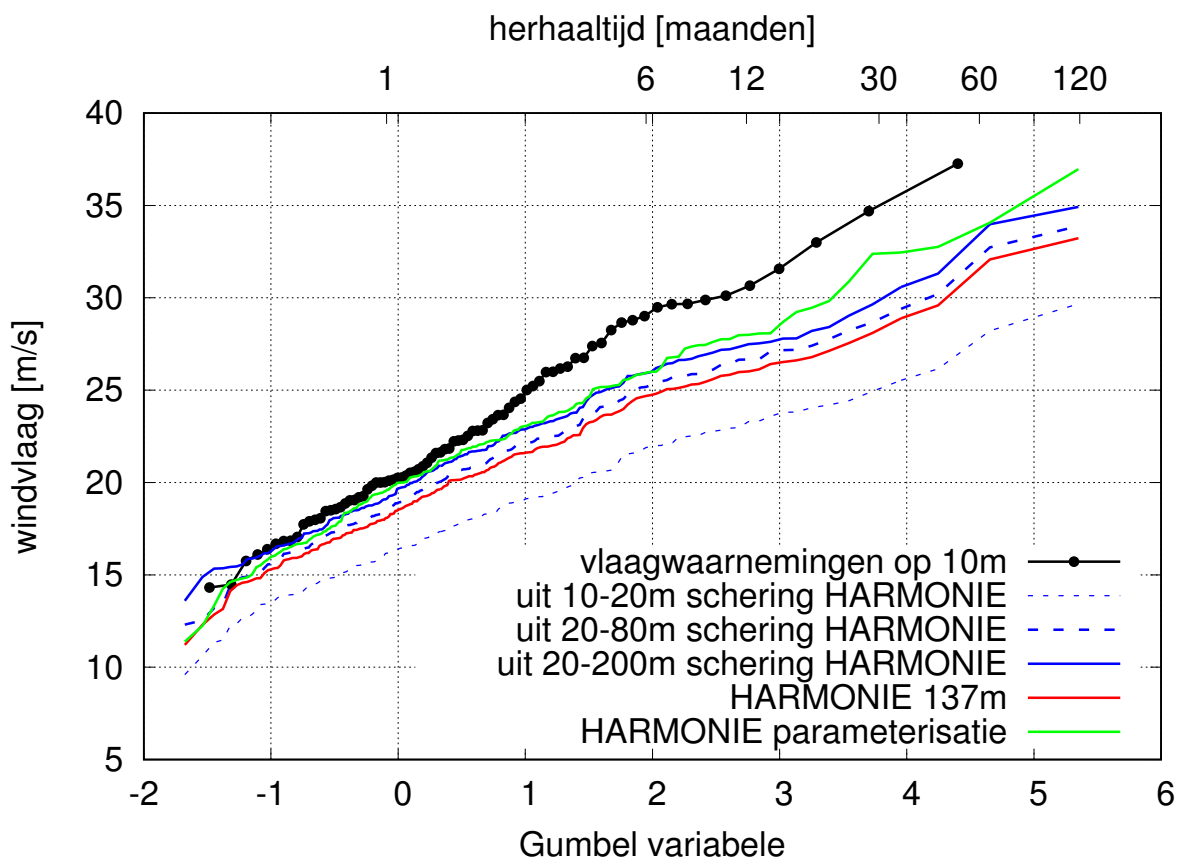
**5.4.1.2 Meetmast IJmuiden** De Gumbelplot voor de windvlagen op 85 m voor Meetmast IJmuiden is weergegeven in Figuur 12. Op de drie uithouders op 85 m hoogte wordt gemeten met sonische anemometers. Deze zijn alle drie weergegeven in de figuur. Ook de metingen met de cup-anemometer op 92 m zijn weergegeven (zwart). De verschillen tussen de onderlinge metingen zijn van dezelfde orde als het verschil met Formule 10 ( $z_1=27$  m en  $z_2=92$  m) (in blauw). We concluderen dat Formule 10 ook op grotere hoogtes boven zee goede klimatologische resultaten geeft.



Figuur 12: Gumbelplot voor Meetmast IJmuiden van de maximale waargenomen waarden per maand voor de windvlagen op 85 m hoogte gebaseerd op de uithouders in noordoostelijke, zuidzuidoostelijke en west-noordwestelijke richting (resp paars, rood en groen) met sonische instrumenten. De metingen met een cup-anemometer op 92 m zijn weergegeven in zwart. De windvlagen geschat met Formule 10 ( $z_1=27$  en  $z_2=92$  m) zijn weergegeven in blauw. De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.

## 5.4.2 Gumbelplots voor HARMONIE

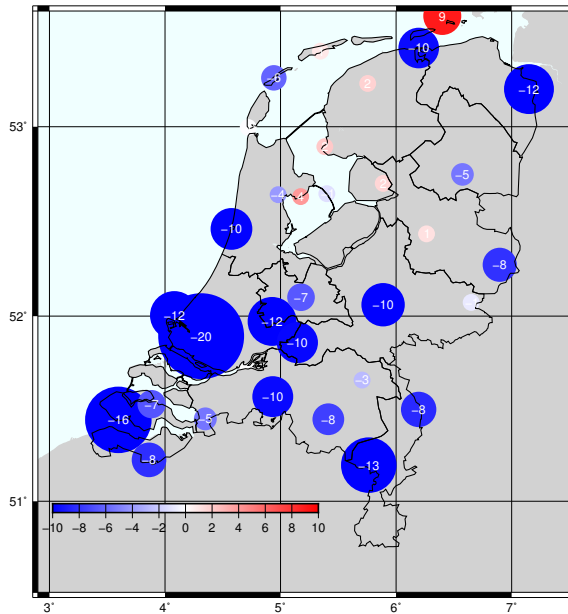
**5.4.2.1 optimale parameterisatie** Figuur 13 toont de Gumbelplot van de maximale 10 m windvlaag per wintermaand (Oktober-Maart) in Cabauw volgens de waarnemingen (zwart), afgeleid uit HARMONIE volgens Formule 9 (rood) en volgens Formule 10 (blauw). Er zijn drie combinaties van  $z_1$  en  $z_2$  getoond.



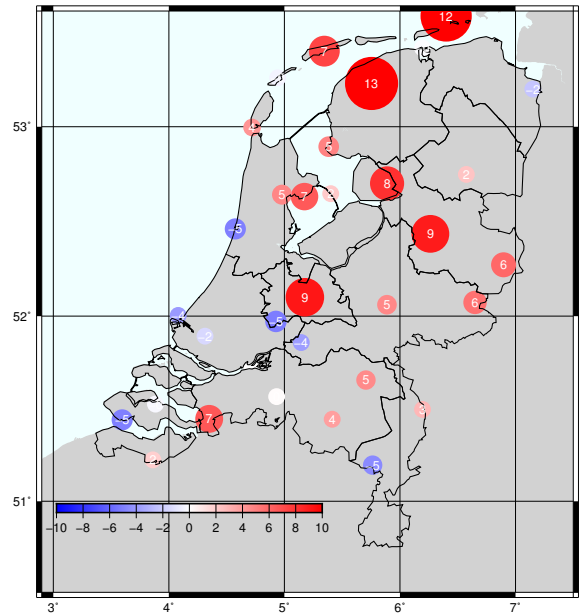
Figuur 13: Gumbelplot voor Cabauw van de maximale windvlaag in de wintermaanden (Oktober-Maart) voor de waarnemingen op 10 m (zwart), afgeleid uit HARMONIE volgens Formule 9 (blauw) en volgens Formule 10 (rood), en volgens de parameterisatie van HARMONIE (groen). Voor Formule 9 zijn 3 combinaties van  $z_1$  en  $z_2$  getoond. De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.

Het laat zien dat de klimatologie van HARMONIE de meest extreme windvlagen iets onderschat. De beste resultaten worden behaald met  $z_1=20$  m en  $z_2=200$  m. Deze waarden voor  $z_1$  en  $z_2$  worden toegepast op alle volgende berekeningen.

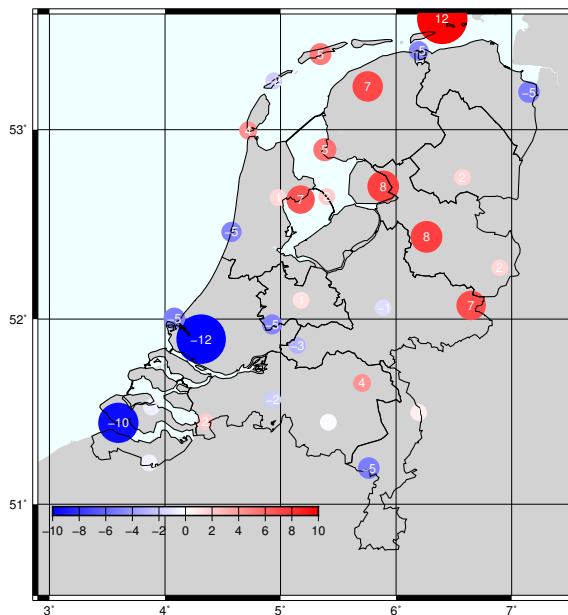
In Appendix A zijn de Gumbelplots voor de andere locaties weergegeven. Daarin is te zien dat de onderschatting van de extreme herhaaltijden niet voor alle locaties plaatsvindt, maar verschilt per station.



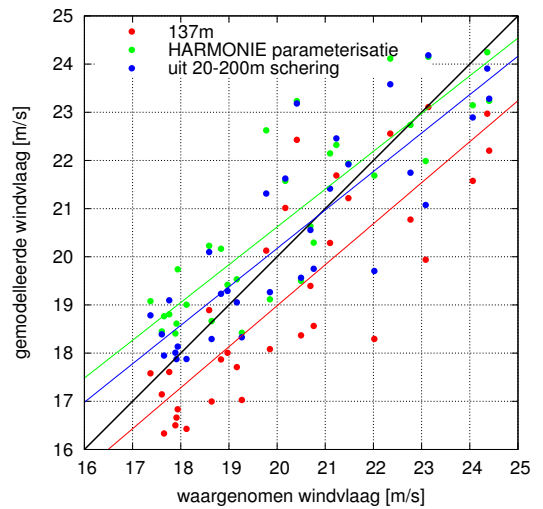
(a) wind op 137m (Formule 10)



(b) uit HARMONIE parameterisatie



(c) uit schering (Formule 10 met  $z_1 = 20$  en  $z_2 = 200$  m)

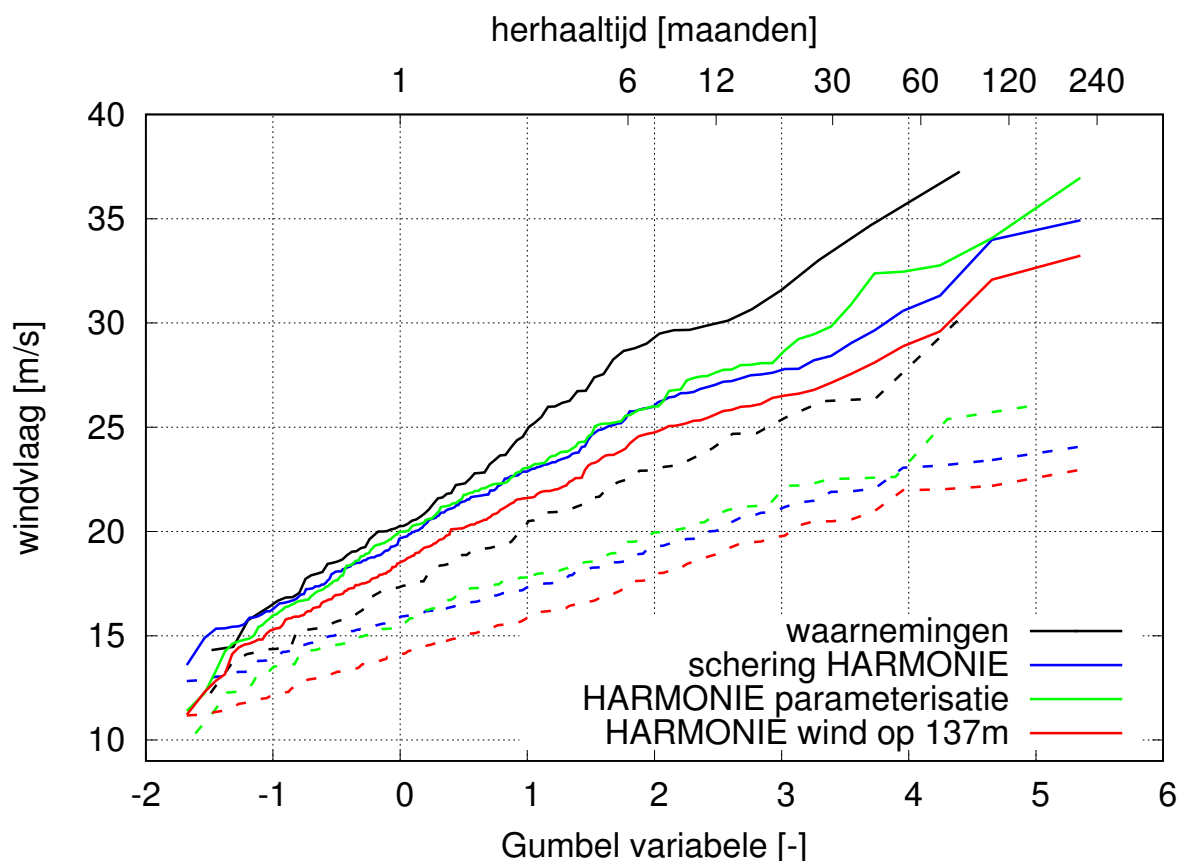


(d) scatterplot

*Figuur 14: Procentuele overschatting van de eens-per-maand windvraag in HARMONIE bepaald op basis van de wind op 137m (Formule 9) (a), volgens de HARMONIE parameterisatie (b) en volgens de schering tussen 20 en 200 m (c, Formule 10). Figuur (d) toont de scatterplot voor de drie getoonde parameterisaties. Elk punt representeert hier een locatie. De kleuren corresponderen met de parameterisaties, de lijnen tonen de lineaire fits. De zwarte lijn is de diagonaal.*

Figuur 14 toont de procentuele overschatting van de windvraag door HARMONIE voor een herhaaltijd van eens per maand voor drie verschillende parameterisaties. Figuur (a) laat de overschatting zien als de windvraag op 10 m geschat wordt uit de gemiddelde wind op 137 m

(Formule 10). Voor bijna alle locaties geeft dit een onderschatting van rond de 10%. De parameterisatie die HARMONIE zelf gebruikt geeft een lichte overschatting (Figuur (b)). De parameterisatie op basis van de schering tussen 20 m en 200 m (Formule 9) geeft de beste schatting (Figuur (c)). De informatie van Figuur 14(a-c) is samengevat in Figuur 14(d), waar de scatterplot getoond is van de drie parameterisaties. De parameterisatie op basis van Figuur (c) geeft zowel de kleinste gemiddelde afwijking (0,5%) als de kleinste standaard deviatie (5%).

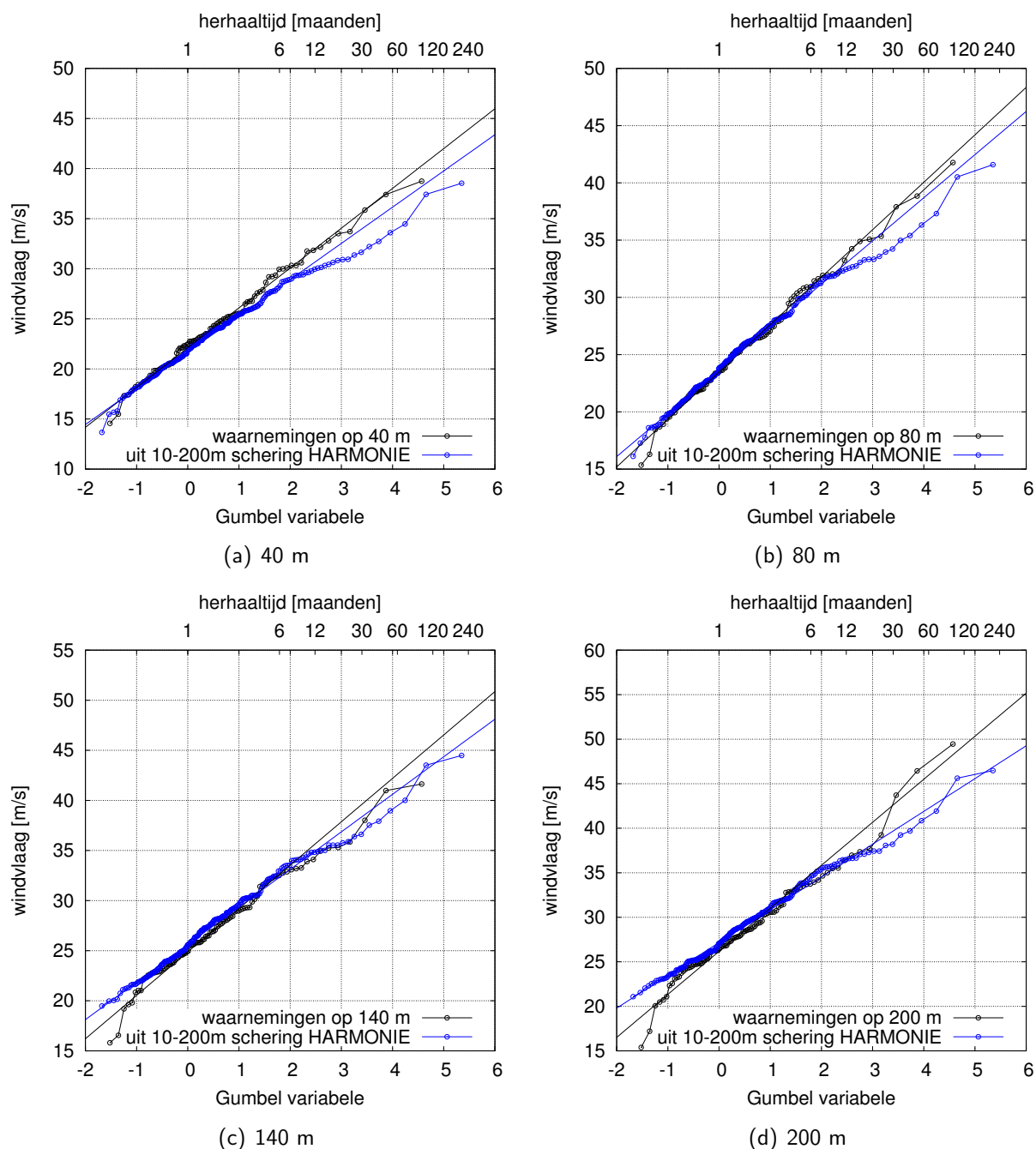


Figuur 15: Gumbelplot van de maximale windvlaag op 10 m in Cabauw voor de waarnemingen (zwart) en volgens de parameterisatie van HARMONIE (groen), volgens Figuur 10 (rood) en volgens Formule 9 (blauw). De doorgetrokken lijnen representeren de winter (Oktober-Maart) en de onderbroken lijnen de zomer (Maart-September). De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.

**5.4.2.2 seizoenseffecten** Figuur 15 laat de Gumbelplots voor Cabauw zien voor de zomermaanden (April-September, rood) en de wintermaanden (Oktober-Maart, blauw) voor zowel de waarnemingen als HARMONIE. Te zien is dat de extremen in de winter in toenemende mate onderschat worden voor hogere herhaaltijden. De wintermaxima worden beter gerepresenteerd dan de zomermaxima. Dit is te wijten aan de te hoge ruwheid die HARMONIE in de zomer veronderstelt als gevolg van de bladeren aan de bomen (Van den Brink en Bosveld, 2017). Een andere mogelijke oorzaak is de kwaliteit waarmee HARMONIE de convectieve situaties - die in de zomer voor zware windstoten kunnen zorgen - representeert.

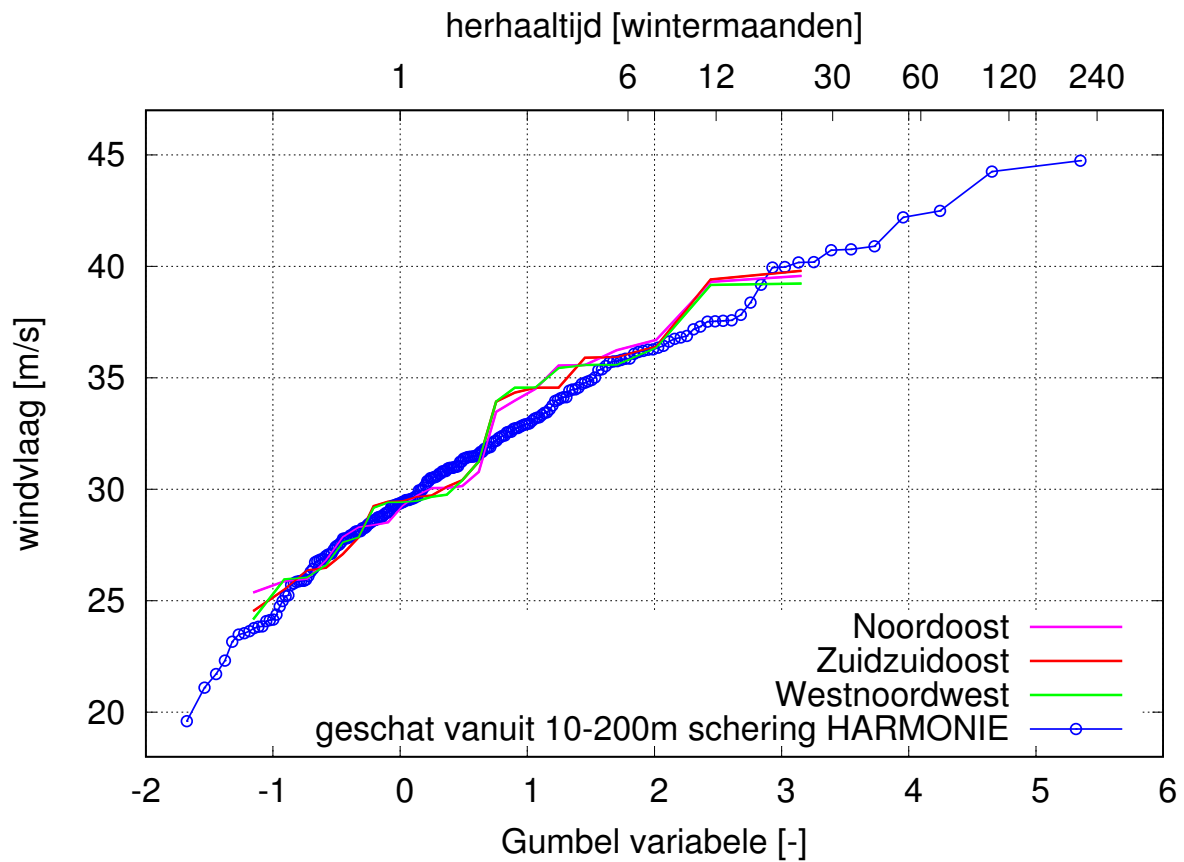
**5.4.2.3 wind op hoogte - Cabauw** Figuur 16 laat de Gumbelplots zien van de maximale windvlaag per wintermaand in Cabauw voor resp. 40, 80, 140 en 200m. De HARMONIE windvlaag is geparаметeriseerd met Formule 10 met  $z_1=10$  en  $z_2=200$  m. De figuur laat zien

dat de eens-per-maand windvlaag heel goed geproduceerd wordt; de meest extreme situaties worden licht onderschat. We concluderen dat ook op grotere hoogte er een goede reproductie van de extreme windvlagen mogelijk is.



*Figuur 16: Gumbelplots van de maximale windvlaag in Cabauw in de winter voor de waarnemingen (zwart) en volgens de parameterisatie van HARMONIE (blauw) voor resp. 40, 80, 140 en 200m. De HARMONIE windvlaag is geparameteriseerd met Formule 10 met  $z_1 = 10$  en  $z_2 = 200$  m. De doorgetrokken lijnen geven de fit volgens de Gumbel verdeling weer. De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.*

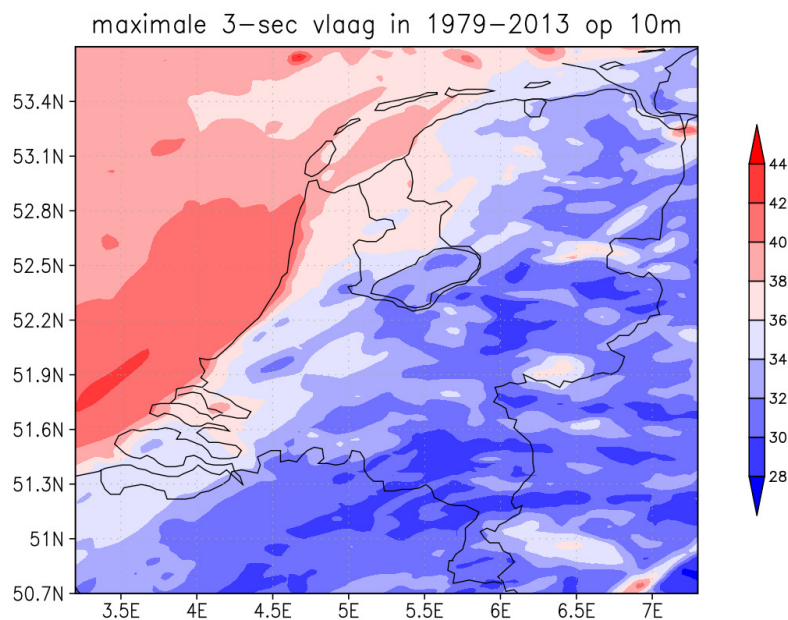
**5.4.2.4 wind op hoogte - MMIJ** De Gumbelplot voor de windvlagen op 85 m hoogte voor Meetmast IJmuiden is weergegeven in Figuur 17. De HARMONIE parameterisatie volgens Formule 10 (met  $z_1 = 20$  en  $z_2=200$  m) toont een uitstekende overeenkomst met de waarnemingen.



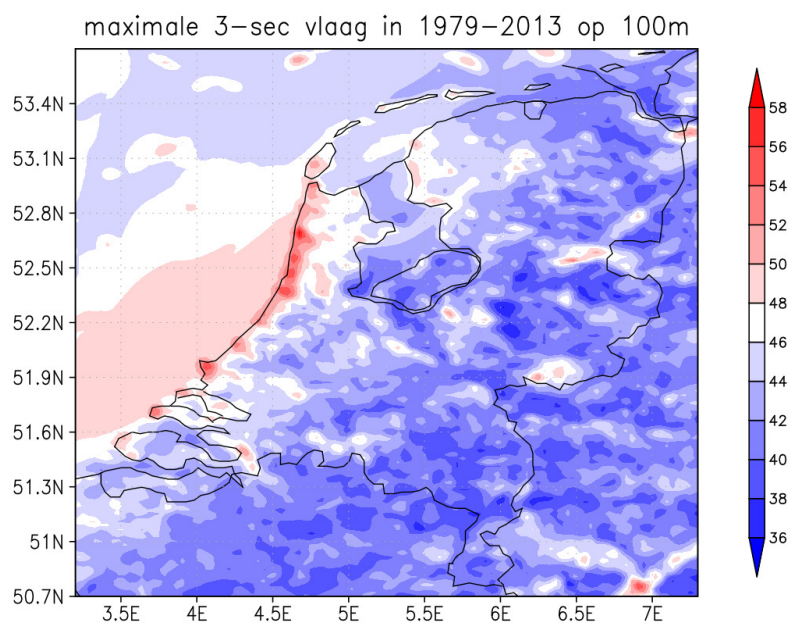
Figuur 17: Gumbelplot van de maximale windvlaag op Meetmast IJmuiden in de winter voor de cupanemometer waarnemingen op de drie uithouders en volgens de parameterisatie van HARMONIE (blauw) voor 85 m hoogte. De HARMONIE windvlaag is geparameteriseerd met Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m. De bovenste horizontale as geeft de herhaaltijd aan die hoort bij de Gumbel variabele op de onderste as.

## 6 Resultaten

Hieronder wordt de ruimtelijke verdeling van de extreme vlagen getoond, die zijn berekend volgens Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m. Deze waarden zijn ook beschikbaar via <http://projects.knmi.nl/knw/>.

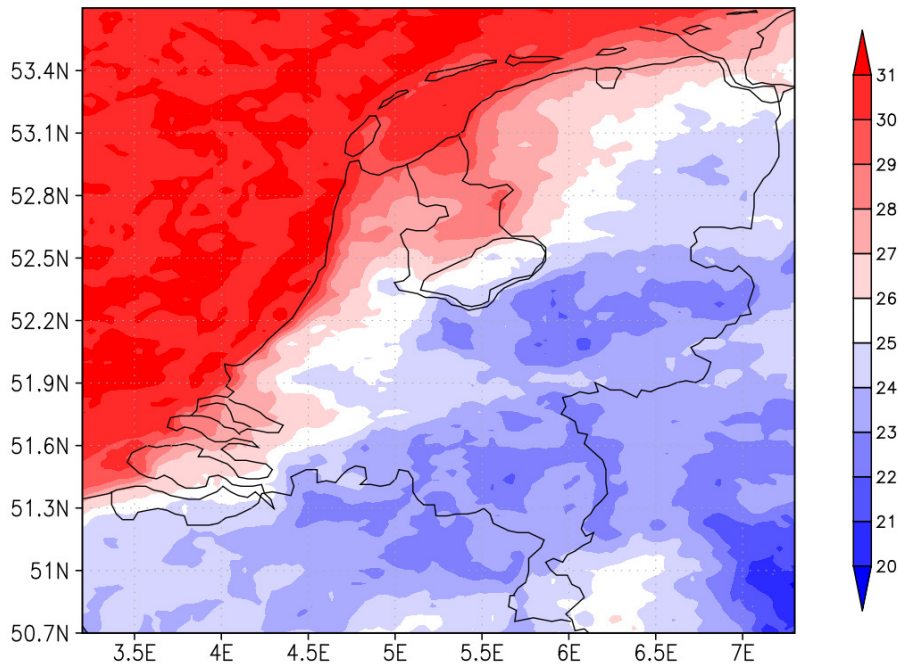


Figuur 18: Maximaal opgetreden windvlag in 1979-2013 op 10 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).

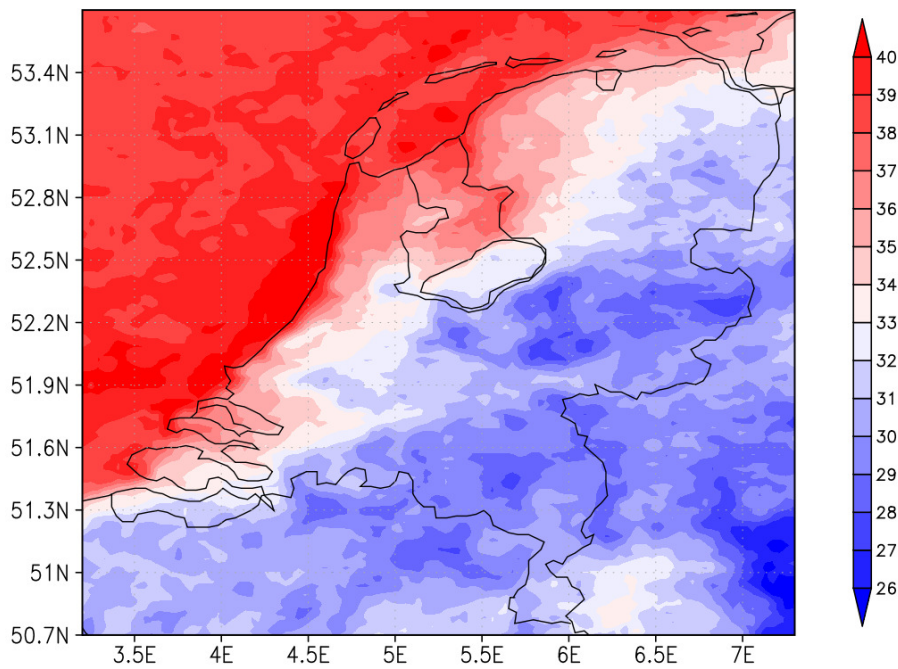


Figuur 19: Maximaal opgetreden windvlag in 1979-2013 op 100 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).

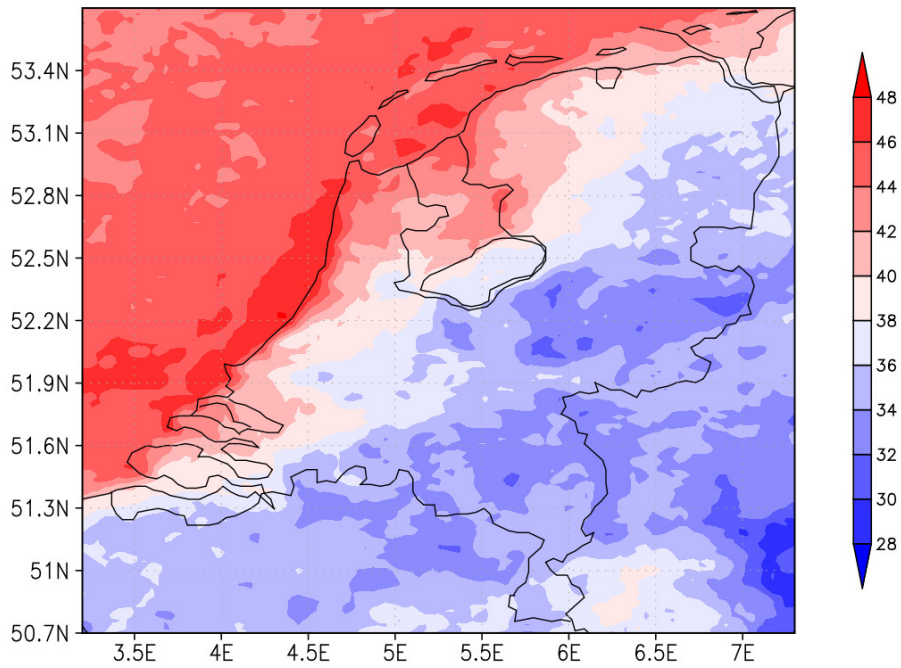




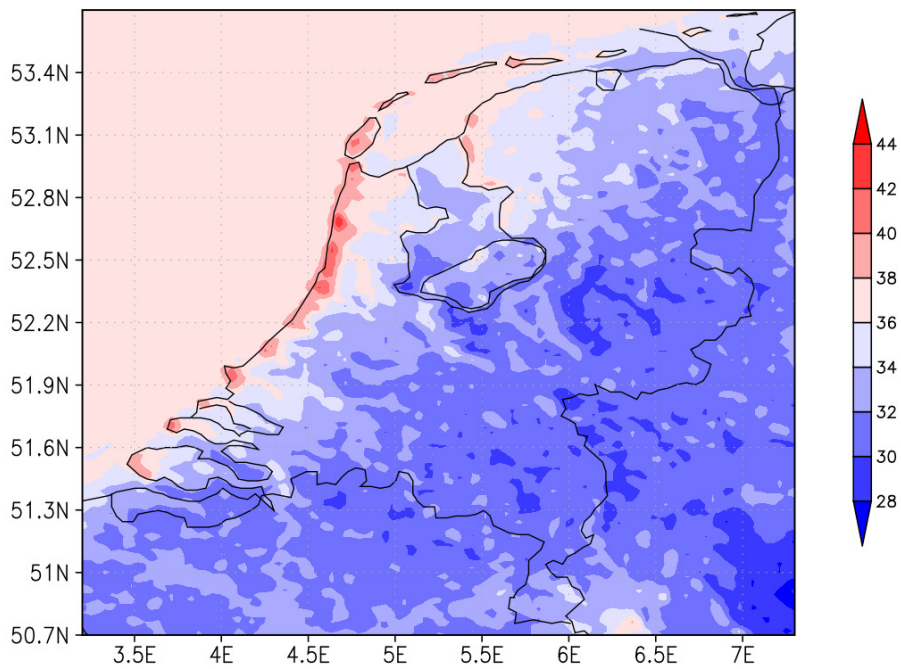
*Figuur 20: Eens-per-jaar windvlaag op een hoogte van 10 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).*



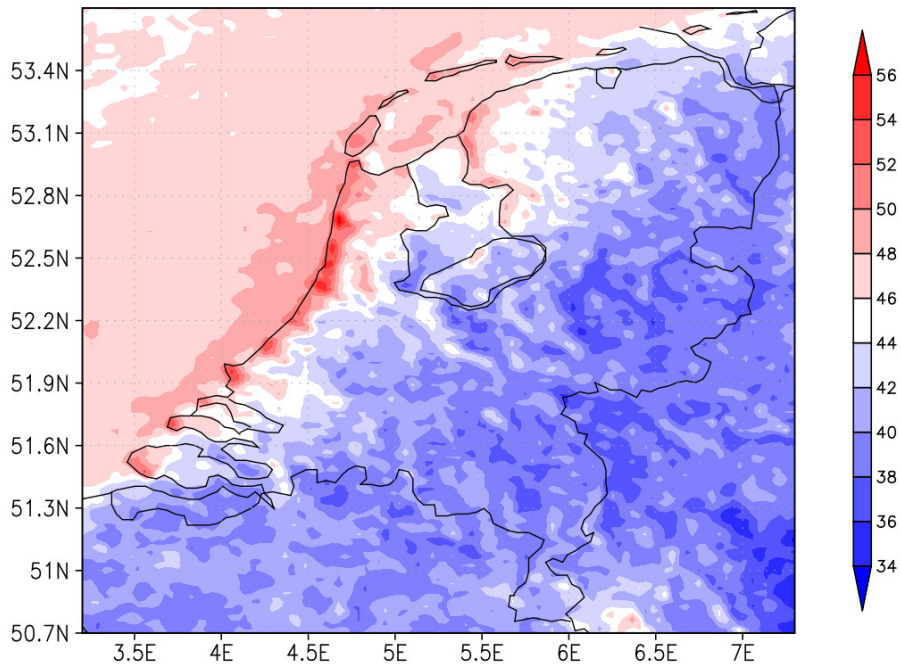
*Figuur 21: Eens-per-10-jaar windvlaag op een hoogte van 10 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).*



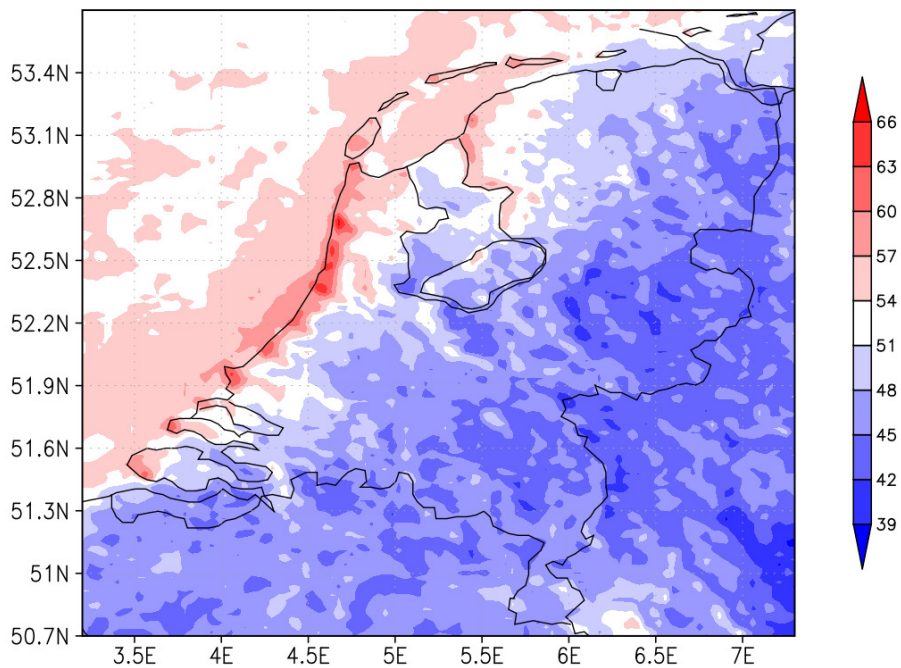
Figuur 22: Eens-per-50-jaar windvlaag op een hoogte van 10 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).



Figuur 23: Eens-per-jaar windvlaag op een hoogte van 100 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).



Figuur 24: Eens-per-10-jaar windvlaag op een hoogte van 100 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).



Figuur 25: Eens-per-50-jaar windvlaag op een hoogte van 100 m volgens HARMONIE (Formule 10 met  $z_1=20$  en  $z_2=200$  m).

## 7 Conclusies en discussie

Vergelijking van windvlagen die berekend zijn uit gemeten uurgemiddelde windsnelheden met rechtstreeks gemeten windvlagen laat zien dat de extreme windvlagen af te leiden zijn uit verticale windschering. Dit geldt zowel voor de windvlagen op 10m als op grotere hoogtes en zowel voor boven zee als voor boven land. De methode werkt niet alleen goed voor de wintermaanden, maar lijkt ook goed te werken voor de zomermaanden. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat zeldzame extreme convectieve windvlagen (buiencomplexen in de zomer) heel lokaal zijn en lang niet altijd gemeten worden op de waarneemstations.

De windvraag kan gezien worden als de gemiddelde wind plus een bijdrage die afhangt van de verticale schering in de gemiddelde wind. Bij een sterke ruwheidsovergang - zoals van zee naar land - zal de wind dicht bij het aardoppervlak eerder aangepast zijn aan de nieuwe ruwheid dan de wind op grotere hoogte. Door de grotere schering die hiervan het gevolg is zal de scheringsbijdrage aan de windvraag sterker toenemen dan de gemiddelde wind afneemt. De consequentie is dat de extreme windvlagen in een beperkt afstand na de ruwheidsovergang hoger zijn dan voor de ruwheidsovergang. De grootte van het gebied waar de windvlagen toenemen hangt af van de hoogte boven het aardoppervlak: de windvlagen op 10m zijn hoger op een afstand van ongeveer 100-3000 m na de ruwheidsovergang. Op grotere hoogtes is dit gebied breder en verder landinwaarts: voor de windvlagen op 100m hoogte zijn de windvlagen hoger vanaf een afstand van ongeveer 2 km. Helaas ontbreken metingen om het verloop van 3 sec windvlagen bij ruwheidsovergangen kwantitatief te valideren. Een optie is om dit fenomeen verder te onderzoeken met Large Eddie Similatie (LES).

De methode om windvlagen te berekenen uit de verticale windschering is gebruikt om windvlagen af te leiden met behulp van uurgemiddelde windsnelheden uit de KNW-atlas. De windvlagen die zo berekend worden geven een goede representatie van de extreme windvlagen, op verschillende hoogtes, zowel boven zee als boven land. De wintermaanden worden beter gerepresenteerd dan de zomermaanden. Dat de windvlagen in de zomer onderschat worden, komt waarschijnlijk doordat HARMONIE de ruwheid in de zomer overschat. Omdat de jaarmaxima gedomineerd worden door de wintermaxima, is het effect van de onderschatting van de zomerextremen gering.

De maandmaxima worden goed beschreven door de Gumbel verdeling. Hierdoor is het eenvoudig om extrapolaties te maken naar gewenste herhaaltijden.

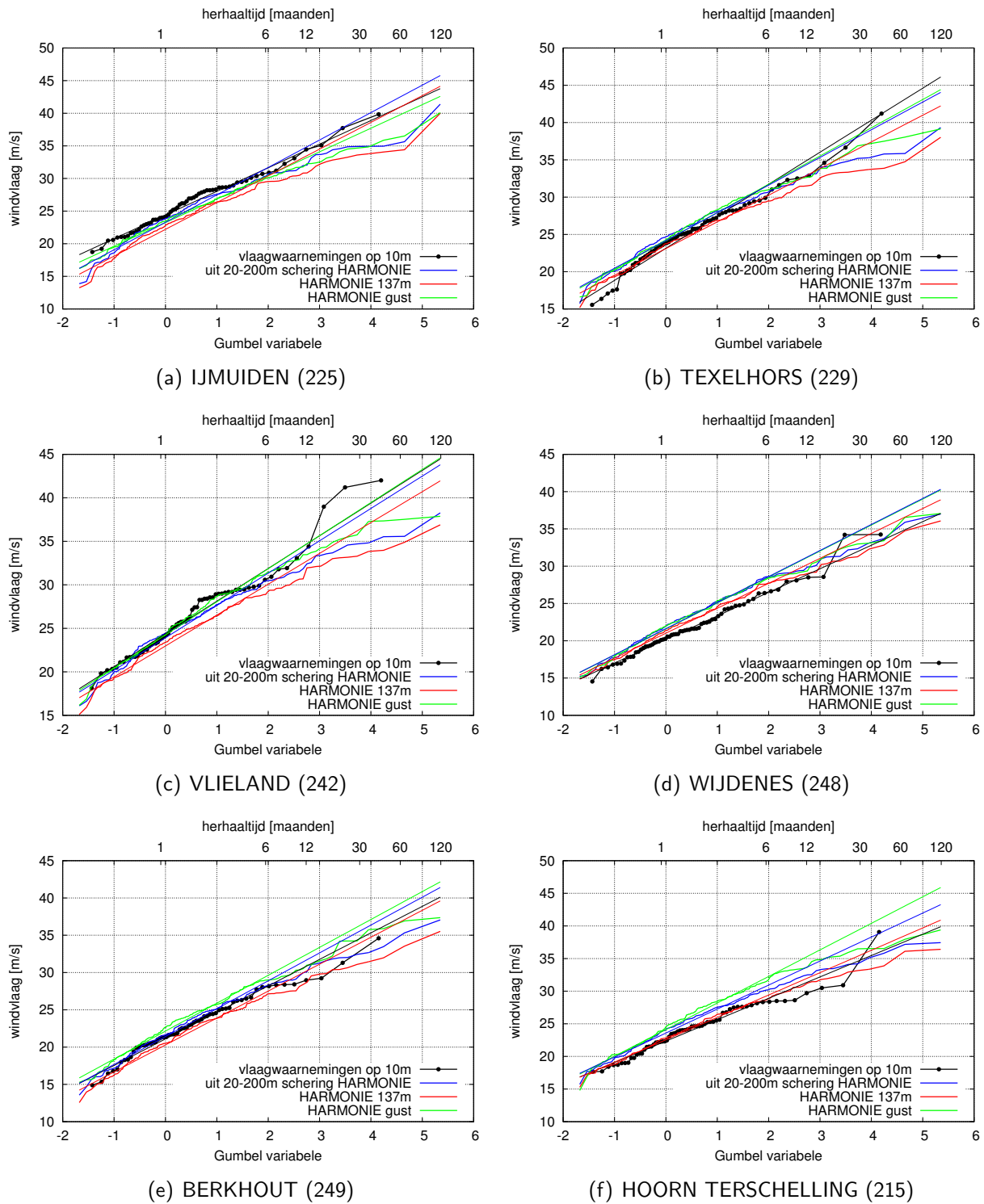
Door bovenstaande constatering is voldaan aan de vraag van het onderzoek om een update te geven van de zogenaamde Durst-curve, die alleen geldig is op 10 m hoogte over homogeen terrein met een lage ruwheid.

## Referenties

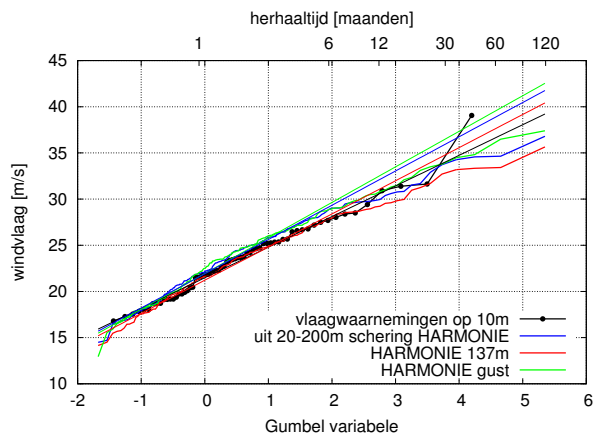
- S. Coles. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. Springer-Verlag. London, 2001.
- D.P. Dee, S.M Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, en L van de Berg. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137:553597, 2011. doi: 10.1002/qj.828.
- C.S. Durst. Wind speeds over short periods of time. *Meteor. Mag.*, 89:181186, 1960.
- G.T. Geertsema en H.W. Van den Brink. Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte. Gebaseerd op 2004-2013. Technical report, KNMI, 2014. URL <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR351.pdf>.
- V. Masson, J.L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet, en R. Lacaze. A global dataset of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate*, 16:1261–1282, 2003.
- Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, en V. Masson. The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139:976–991, 2011.
- A. Stepek, M. Savenije, H.W. Van den Brink, en I.L. Wijnant. Validation of KNW atlas with publicly available mast observations (Phase 3 of KNW project). Technical report, KNMI, 2015. URL <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR352.pdf>.
- Henk W. Van den Brink en F.C. Bosveld. Bringing modelled and observed surface winds together. *International Journal of Climatology*, 2017.
- H.W. Van den Brink, P. Baas, en G. Burgers. Towards an approved model set-up for HARMONIE Contribution to WP 1 of the SBW-HB Wind modeling. Technical report, KNMI, 2013. URL <http://www.knmi.nl/publications/showAbstract.php?id=10270>.
- A. Weill, L. Eymard, G. Caniaux, D. Hauser, S. Planton, H. Dupuis, A. Brut, C. Guerin, P. Nacass, A. Butet, S. Cloche, R. Pedreros, P. Durand, D. Bourras, H. Goirdani, G. Lachaud, en G. Bouhours. Toward a better determination of turbulent airsea fluxes from several experiments. *Journal of Climate*, 16:600–618, 2003.
- N. Wever. Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D11):n/a–n/a, 2012. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2011JD017118. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD017118>. D11104.
- D.H. Wood. Internal boundary layer growth following a step change in surface roughness. *Boundary-Layer Meteorol.*, 22:241–244, 1982.

# A Appendix A

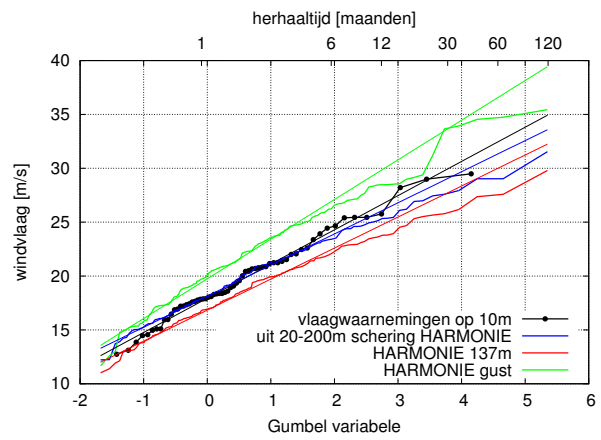
Hieronder worden de Gumbelplots getoond van de windvlagen op de stations waarvan de 10 m-windvlagen gebruikt zijn voor de valiatie. De stations zijn getoond in de volgorde van de stationscode. Zie Figuur 1 voor de locaties van de stations.



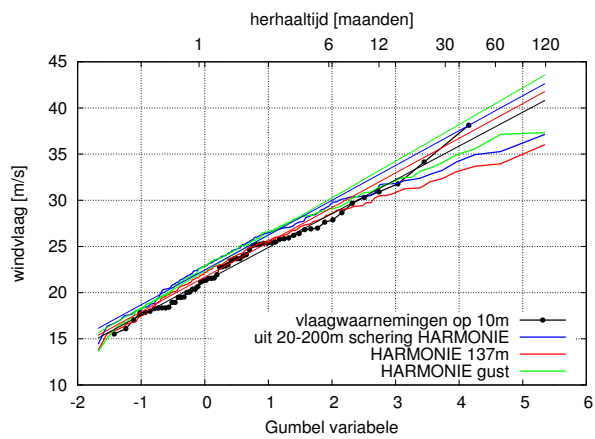
Figuur 26: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations.



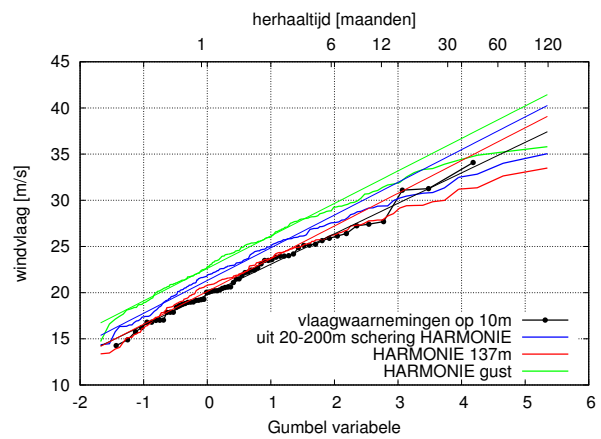
(a) HOUTRIBDIJK (258)



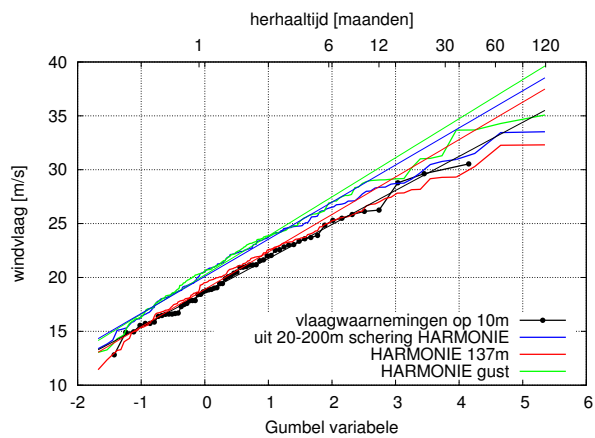
(b) DE BILT (260)



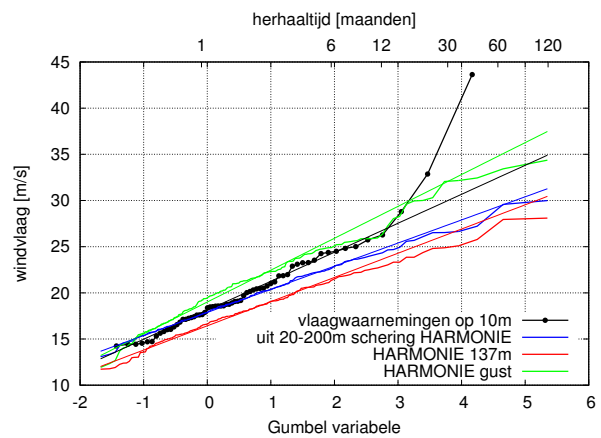
(c) STAVOREN (267)



(d) LEEUWARDEN (270)

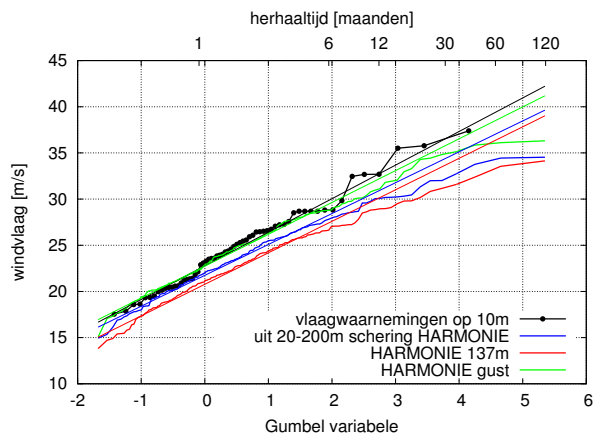


(e) MARKNESSE (273)

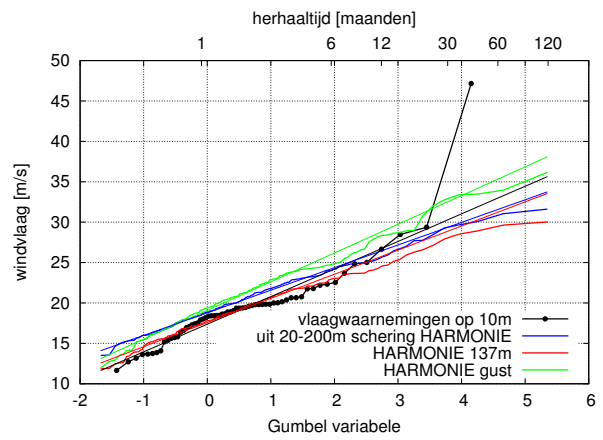


(f) DEELEN (275)

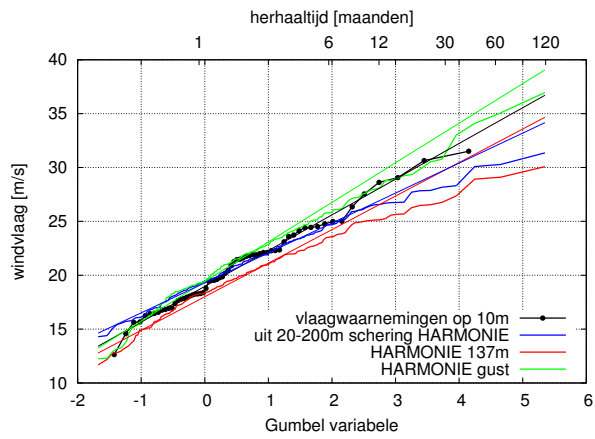
Figuur 27: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations (vervolg).



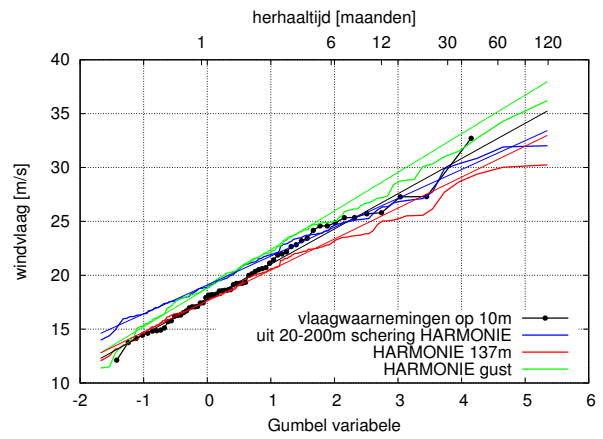
(a) LAUWERSOOG (277)



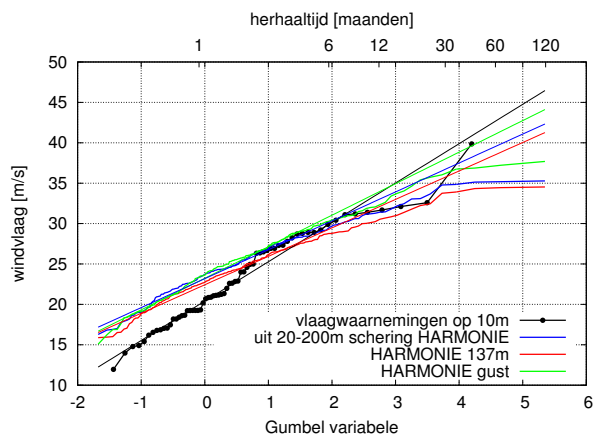
(b) HEINO (278)



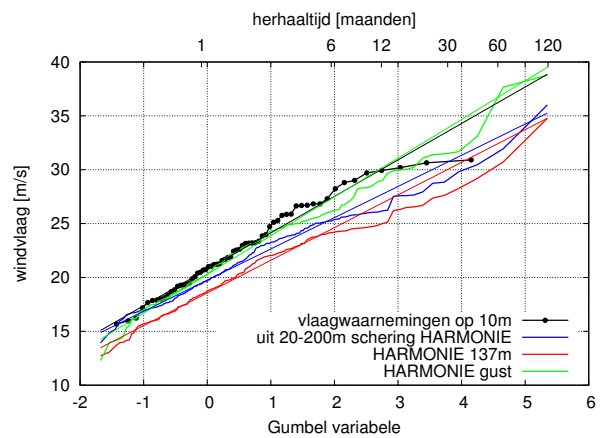
(c) HOOGEVEEN (279)



(d) HUPSEL (283)



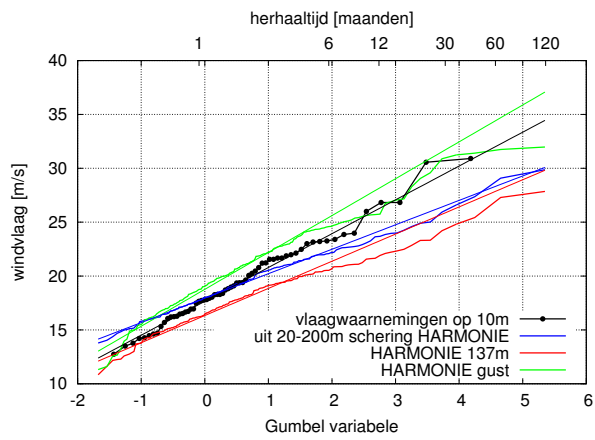
(e) HUIBERTGAT (285)



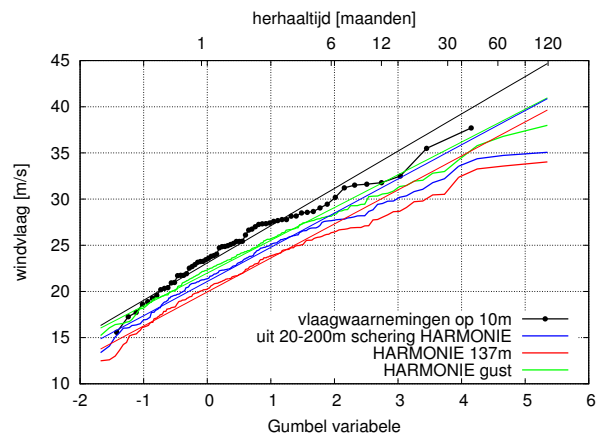
(f) NIEUW BEERTA (286)

Figuur 28: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations (vervolg).

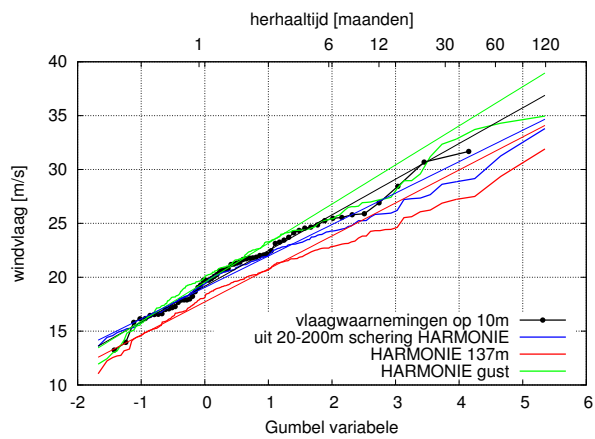




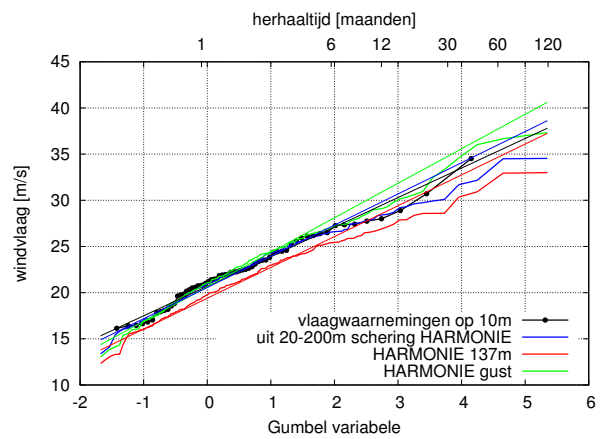
(a) TWENTHE (290)



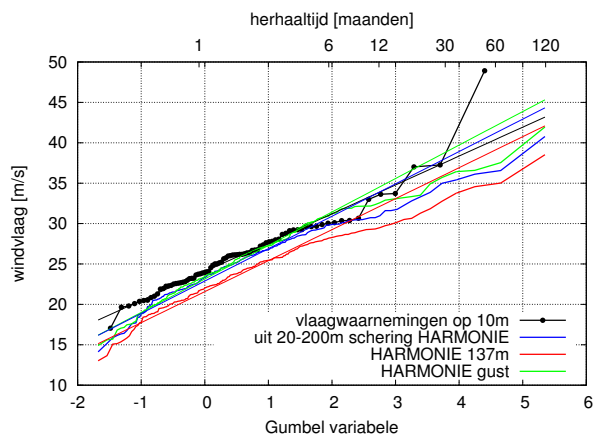
(b) VLISINGEN (310)



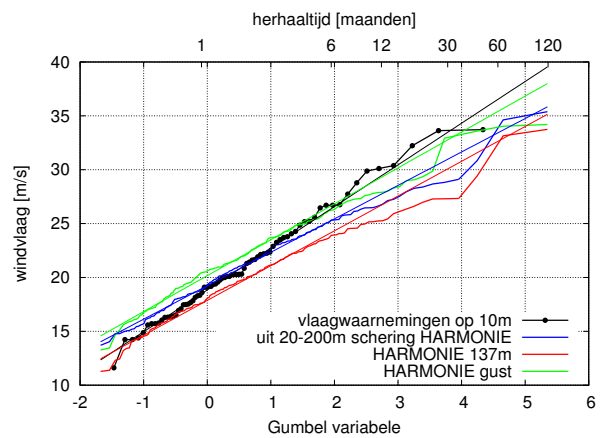
(c) WESTDORPE (319)



(d) WILHELMINADORP (323)

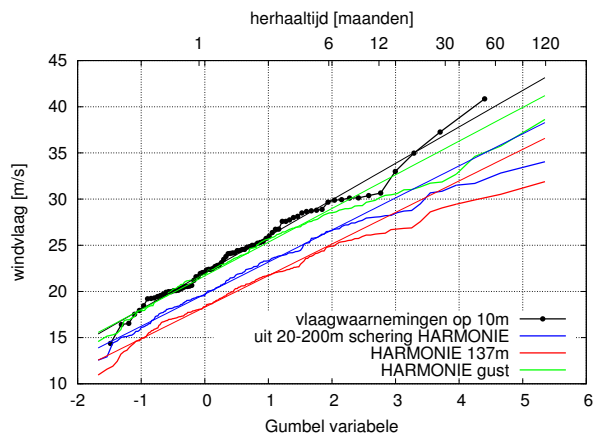


(e) HOEK VAN HOLLAND (330)

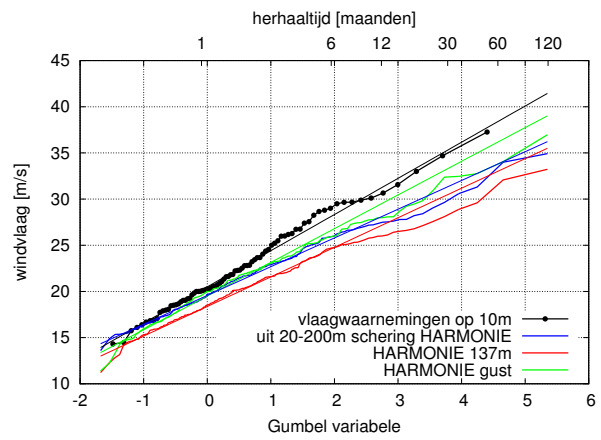


(f) WOENSDRECHT (340)

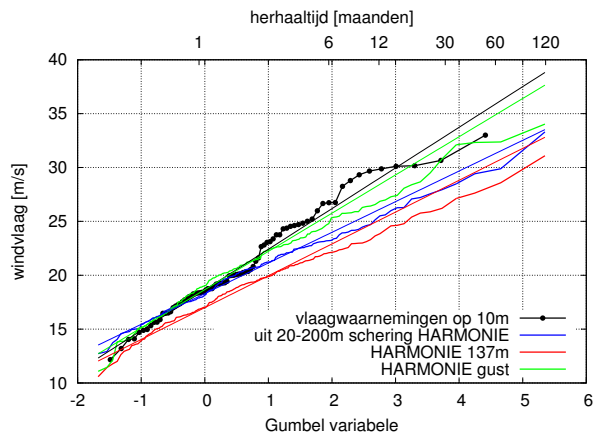
Figuur 29: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations (vervolg)



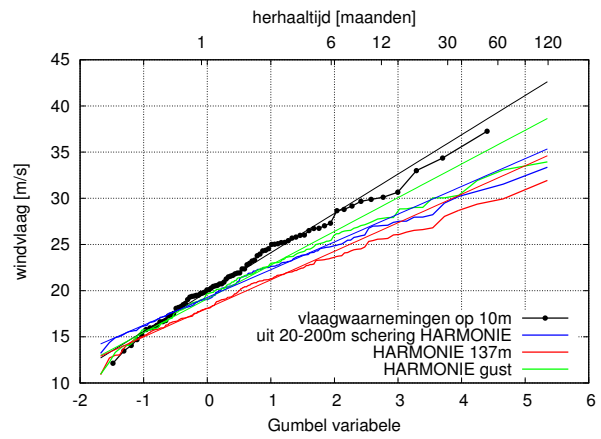
(a) RDAM-GEULHAVEN (343)



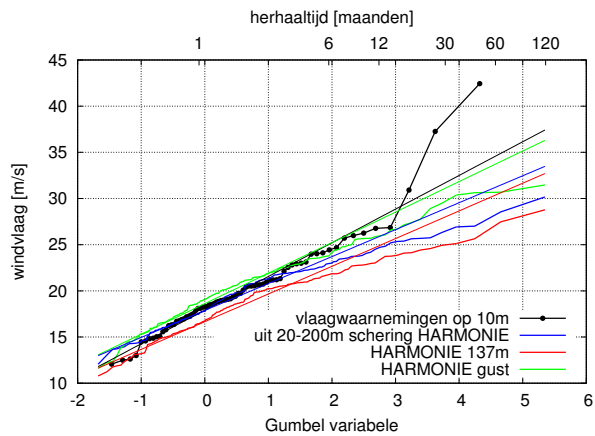
(b) CABAUW (348)



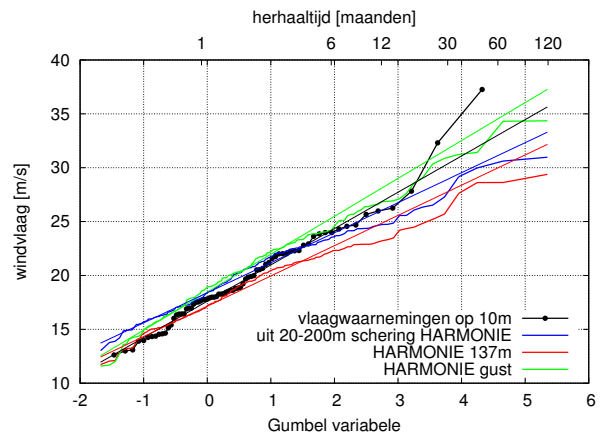
(c) GILZE-RIJEN (350)



(d) HERWIJNEN (356)

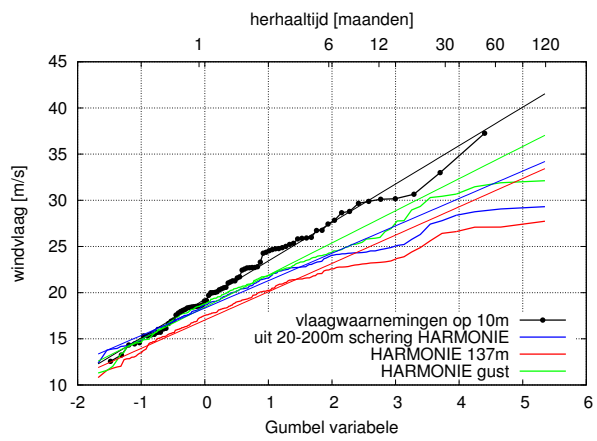


(e) EINDHOVEN (370)

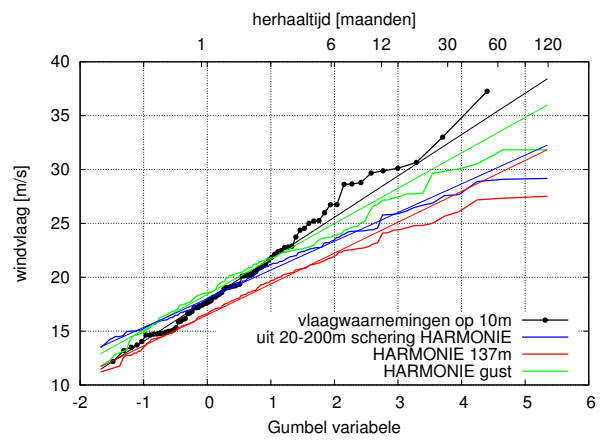


(f) VOLKEL (375)

Figuur 30: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations (vervolg)



(a) ELL (377)



(b) ARCEN (391)

Figuur 31: Gumbelplots voor de geanalyseerde 10 m stations (vervolg).