



Koninklijk Nederlands  
Meteorologisch Instituut  
*Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*

# Windgegevens voor het berekenen van de geluidsbelasting door windturbines

G.T. Geertsema, M.P. Scheele, H.W. van den Brink

De Bilt, 2018 | Technisch rapport; TR-370



# Windgegevens voor het berekenen van de geluidsbelasting door windturbines

**G.T. Geertsema, M.P. Scheele, H.W. van den Brink**

De Bilt, 2018 | Technisch rapport; TR-370



## Samenvatting

Sinds 2010 wordt de Europese dosismaat  $L_{den}$  gehanteerd voor de beoordeling van de geluidsbelasting door windturbines. Voor de berekening van de geluidsemisatie door windturbines is het noodzakelijk om windsnelheidsverdelingen op ashoogte apart af te leiden voor dag, avond en nacht;  $L_{den}$  staat namelijk voor day-evening-night. Deze berekening gebeurt sinds november 2018 op basis van dezelfde historische windgegevens die sinds 2015 gebruikt worden bij de SDE+ regeling. Hiervoor is met het weermodel HARMONIE het weer over de periode 2004 – 2013 geanalyseerd. Met dit model is de horizontale en de verticale resolutie van de windgegevens sterk verbeterd.

De beschikbaarheid van deze nieuwe set windgegevens leidt ertoe dat de geluidsbelasting door nieuwe windparken nauwkeuriger en consistentere kan worden vastgesteld, vooral voor windturbines met een ashoogte van meer dan 120 meter.

In dit rapport wordt toegelicht hoe de wind dataset is ontwikkeld, hoe deze kan worden gebruikt en welke interpolaties daarbij moeten worden toegepast.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1	Historie . . . . .	4
1.2	Verschillen met de 2009 dataset . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Van meetgegevens tot windverdeling</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Bepaling van de windverdeling (uit de datakubus)</b>	<b>8</b>
3.1	Windsnelheidsverdeling details . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Beschrijving dataset</b>	<b>12</b>
4.1	Tijdvakken: opdeling naar dag, avond en nacht-periode . . . . .	12
4.2	Indeling in windsnelheidsklassen . . . . .	13
4.3	Windsnelheidsverdeling voorbeelden . . . . .	13
4.4	Verticale resolutie . . . . .	15
4.5	Horizontale resolutie . . . . .	16
4.6	Geografische verschillen . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Gebruik dataset</b>	<b>18</b>
5.1	Bestandsformaat . . . . .	18
5.2	Interpolatie . . . . .	19
5.2.1	Details horizontale interpolatie . . . . .	20
5.2.2	Details verticale interpolatie . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Conclusie en discussie</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Infographic Weer- en klimaatmodellen</b>	<b>23</b>
<b>B</b>	<b>Tabellen</b>	<b>25</b>

# 1 Inleiding

Bij de aanvraag van een omgevingsvergunning voor de bouw van windturbines moet een geluidsrapport worden gevoegd. Sinds 2010 wordt voor de beoordeling van geluid door windturbines de Europese dosismaat  $L_{den}$  gebruikt. De geluidsemisatie van windturbines is afhankelijk van de windsnelheid ter hoogte van de as van de rotor. Omdat de geluidsemisatie van windturbines niet-lineair van de windsnelheid afhangt, kan voor de berekening van de geluidscontouren niet zonder meer de gemiddelde windsnelheid worden gebruikt. In plaats daarvan wordt voor elke windsnelheid de bijbehorende geluidsemisatie berekend, waarna het gewogen gemiddelde wordt bepaald met een weegfactor die voor elke snelheid evenredig is met het aantal keren dat die snelheid voorkwam over een bepaald tijdvak.

## 1.1 Historie

Voor de berekening van de geluidsbelasting van windturbines werden tot november 2018 de windgegevens van het KNMI gebruikt zoals die afgeleid waren in 2009 uit de windinformatie over een tijdvak van 5 jaar, namelijk van 2004-2008. Er zijn drie redenen om een nieuwe frequentieverdeling te maken. In de eerste plaats zijn de weermodellen die gebruikt worden sterk verbeterd sinds 2009. Het nieuwe weermodel HARMONIE heeft een veel betere ruimtelijke resolutie dan het voor de windgegevens van 2009 gebruikte HIRLAM. In de tweede plaats zijn windturbines hoger geworden. De oude windgegevens waren beschikbaar voor een bereik van 80 tot 120 meter. De nieuwe windgegevens gaan tot 260 meter. Daarnaast zijn de windgegevens nu afgeleid over een langere periode, namelijk de jaren 2004-2013.

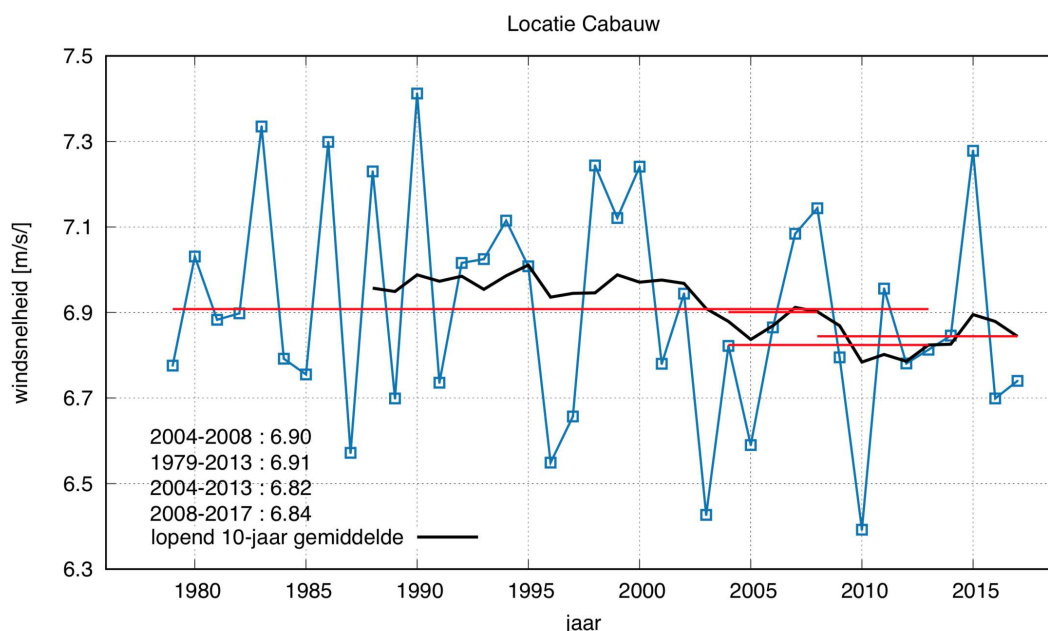
In dit document wordt uitgelegd hoe de nieuwe dataset met windgegevens is bepaald, en hoe ze gebruikt kan worden. Ook leggen we uit waarom voor het tijdvak 2004-2013 is gekozen.

Wellicht ten overvloede merken we hierbij op dat deze historische dataset alleen van toepassing is voor nog te ontwikkelen windparken. Voor een vergunning moet worden aangetoond dat het windpark naar verwachting voldoet aan de  $L_{den}$  norm. Daarnaast is voor de nachtperiode een aparte norm gesteld, de  $L_{night}$ , waar aan voldaan moet worden. Zo nodig kunnen daartoe geluidsreducerende maatregelen worden genomen, bijvoorbeeld door de windturbine langzamer te laten draaien. Wanneer het windpark in gebruik is genomen geschiedt toezicht en handhaving op basis van de actuele windtoestand en de werkelijk optredende jaarlijkse geluidsproductie.

## 1.2 Verschillen met de 2009 dataset

Het gebruik van een tienjarige periode in plaats van vijf en een gedetailleerder weermodel betekent dat de nieuwe windverdeling in het overlappende bereik tussen 80 en 120 meter niet precies overeenkomt met de oude. Dit kan toegelicht worden met de tijdserie van de jaargemiddelde windsnelheid. In Figuur 1 is deze tijdserie getoond voor de jaren 1979 tot en met 2017 voor de locatie Cabauw en 80 meter hoogte. De 2009 dataset was afgeleid op basis van de gegevens uit 2004 - 2008, de gemiddelde windsnelheid over die periode is 6.9 m/s. De nieuwe dataset is afgeleid op basis van de gegevens uit 2004 - 2013. Door de lagere gemiddelde windsnelheid in de meer recente jaren voor deze locatie en hoogte is de gemiddelde windsnelheid over deze periode iets lager, namelijk 6.8 m/s. Dit heeft tot gevolg dat de nieuwe invoergegevens in individuele situaties kunnen leiden tot berekende geluidniveaus die beperkt hoger of lager zijn dan bij gebruikmaking van de oude gegevens. De wijziging leidt daarmee niet tot nadelige effecten voor de omvang van geluidhinder in Nederland. Immers, ook nu vindt toetsing aan de geldende normering bij handhaving plaats op basis van de werkelijke windgegevens zoals deze in de praktijk optreden.

Met het gebruik van HARMONIE is niet alleen de horizontale, maar is ook de verticale resolutie sterk toegenomen. De windgegevens zijn nu beschikbaar voor hoogtes van 20 tot 260 meter boven het maaiveld. De beschikbaarheid van deze nieuwe set windgegevens leidt ertoe dat de geluidsbelasting door nieuwe windparken nauwkeuriger en consistentere kan worden vastgesteld, vooral voor windturbines met een ashoogte van meer dan 120 meter.



Figuur 1: Jaargemiddelde windsnelheid op 80 m hoogte voor Cabauw voor 1979-2017 op basis van HARMONIE uitvoer. De lange rode lijn geeft het gemiddelde over de hele periode tot en met 2013, de kortere rode lijnen tonen het gemiddelde over 10 jaar, en de zwarte lijn toont het lopend 10-jaar gemiddelde.

## 2 Van meetgegevens tot windverdeling

Een weermodel is nodig om weermetingen op de juiste wijze te interpreteren, met name om fysische consistentie te verkrijgen tussen verschillende posities en tijdstippen. Weermodellen gebruiken meetgegevens zoals windrichting en -snelheid, luchtdruk, temperatuur en bodemgesteldheid op een groot aantal locaties en op verschillende hoogtes om een zo goed mogelijk beeld van de atmosfeer te krijgen (zie Bijlage A). De metingen voor het tijdvak 2003-2014 zijn opnieuw geanalyseerd met het globale weermodel ERA-INTERIM (Dee et al., 2011). Dit levert informatie met een tijdsresolutie van 6 uur op een 3D grid voor de hele globe met een horizontale resolutie van 80 km.

We gebruiken HARMONIE<sup>1</sup> om deze informatie voor het Nederlandse domein verder te analyseren. De tijdsresolutie van de modelberekeningen is 10 minuten, maar de uitvoer is beschikbaar met een uurlijkse resolutie. Het model analyseert de atmosfeertoestand op 60 lagen boven de grond, met de hoogste resolutie vlak bij het oppervlak. De onderste modelniveaus volgen hierbij het aardoppervlak, terwijl de hoogste modelniveaus vlakken van constante druk volgen. De hoge verticale resolutie vlak bij het oppervlak is gebruikt om de uurlijkse windvelden te archiveren voor diverse hoogtes boven het oppervlak. Het model is gerund voor een domein dat Nederland ruim omvat op een Lambert-rooster. Dit houdt in dat de onderlinge afstand tussen de roosterpunten over het rekendomein overal gelijk is. In dit geval is het rooster 2.5 km bij 2.5 km.

Met deze model set-up is de wind voor het Nederlandse domein opnieuw geanalyseerd en gearchiveerd voor 8 hoogtes: 10, 20, 40, 60, 80, 150, 200 meter. De zo verkregen windgegevens worden opgeslagen in een 4D (tijd, lengte, breedte, hoogte) datakubus.

Deze datakubus is in 2014 gebruikt om een windkaart te maken voor heel Nederland (zie Figuur 2). Deze kaart geeft de windsnelheid per jaar, gemiddeld over de periode 2004-2013, en kan door exploitanten van windparken op land worden gebruikt om de gemiddelde opbrengst van een turbine op de gewenste locatie te berekenen, en daarmee de hoogte van de SDE+ subsidie. De jaargemiddelde windsnelheden bij de Cabauw-meetmast worden binnen 0.1 m/s door dit model beschreven (zie Geertsema and van den Brink, 2014, Figuur 4.10).

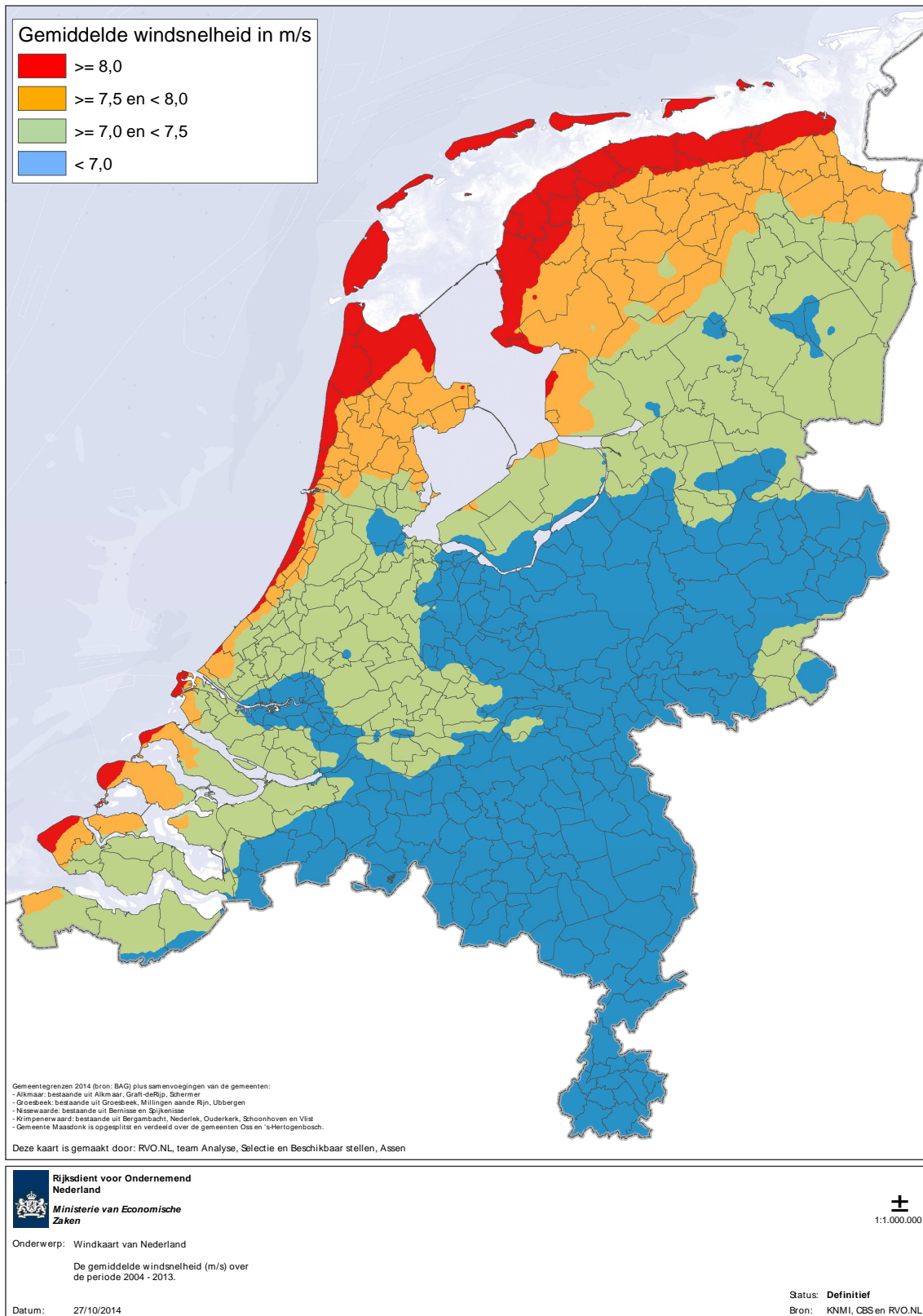
Voor de consistentie tussen deze windkaart (te gebruiken voor SDE+ subsidie) en de windsnelheidsverdeling (te gebruiken voor de schatting van de geluidsbelasting) is er voor gekozen dezelfde datakubus voor de periode 2004-2013 te gebruiken voor de bepaling van de windsnelheidsverdeling. Daartoe hebben we eerst geverifieerd dat de gemiddelde windsnelheid voor de locatie Cabauw sinds 2013 niet significant is veranderd. In Figuur 1 is de gemiddelde windsnelheid voor locatie Cabauw aangevuld tot en met 2017. Tussen 1979 en 2017 varieert de jaargemiddelde windsnelheid op 80 meter hoogte op die locatie tussen de 6.4 en 7.4 m/s. Het gemiddelde over de jaren 2004-2013 is vrijwel identiek aan het gemiddelde over de jaren 2008-2017.

---

<sup>1</sup>HARMONIE wordt door het KNMI dagelijks gebruikt in de operationele dienst voor de weersanalyse en weersverwachtingen tot en met 48 uur vooruit. De resultaten van HARMONIE zijn geïjkt met metingen van de CABAUW meetmast en geverifieerd met data van meetmasten op diverse andere locaties (Geertsema and van den Brink, 2014). Voor HARMONIE zie verder <http://www.hirlam.org>



# Windkaart van Nederland



Figuur 2: Windkaart van Nederland (datum: 27/10/2014), bron: KNMI, CBS en RVO.NL.

### 3 Bepaling van de windverdeling (uit de datakubus)

Bij het opnieuw analyseren van de toestand van de atmosfeer met HARMONIE was gekozen voor uitvoer op 8 niveaus dicht bij de grond, namelijk op 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 en 200 meter boven het aardoppervlak. Na postprocessing is nu ook de windsnelheid op tussenliggende hoogtes berekend zodat de windverdelingen beschikbaar zijn voor de hoogtes 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, tot en met 200 meter. De windsnelheid op de nieuwe hoogtes is berekend voor alle uren op basis van een neutraal logaritmisch windprofiel. Met deze zelfde aanname zijn de windsnelheden geëxtrapoleerd tot en met 260 meter boven de grond.

Het resultaat is vergeleken met de meetgegevens van de Cabauw meetmast. Hierbij is niet alleen naar het windprofiel gekeken, maar ook naar de resulterende windsnelheidsverdelingen. Cabauw metingen zijn beschikbaar op de hoogtes 10, 20, 40, 80, 140 en 200 meter.

Voor de windkaart is de nauwkeurigheid van de windkaart geschat op  $\pm 0.3\text{m/s}$  (Geertsema and van den Brink, 2014). Hierin is onder andere de natuurlijke variabiliteit in de jaargemiddelde windsnelheid meegenomen. Verder wordt de nauwkeurigheid in gelijke mate bepaald door onvolkomenheden in zowel het model als in de waarnemingen. De verschillen tussen de gemeten gemiddelde windsnelheden en de gemiddelde windsnelheden volgens het model op naburige gridpunten is weergegeven in Tabel 1 voor twee hoogtes. De verschillen tussen de waarnemingen en het model voor de gemiddelde windsnelheden op 10 meter hoogte liggen voor het gehele etmaal tussen 0.01 en 0.23 m/s. Voor de avondperiode zijn de verschillen het grootst, maar ook voor die periode liggen de verschillen nog ruim binnen de geschatte nauwkeurigheid. De verschillen zijn groter op 200 meter hoogte, maar vallen nog steeds binnen de geschatte nauwkeurigheid. Ook hier is het verschil het grootste voor de avond periode. Voor de avond periode is de modelwindsnelheid op 10 meter hoger dan de gemeten windsnelheid, op 200 meter hoogte is dit andersom.

periode	OBS	Model gridpunten				gemiddelde	verschil
Op 10 meter							
etmaal	4.19	4.20	4.42	4.18	4.27	4.27	-0.08
day	4.69	4.56	4.72	4.54	4.66	4.62	0.07
evening	3.80	3.96	4.04	3.92	3.99	3.98	-0.18
night	3.63	3.79	3.87	3.77	3.83	3.82	-0.19
Op 200 meter							
etmaal	8.47	8.28	8.28	8.28	8.29	8.28	0.19
day	8.06	7.82	7.84	7.82	7.84	7.83	0.23
evening	8.77	8.47	8.47	8.48	8.48	8.48	0.29
night	8.94	8.87	8.87	8.88	8.88	8.88	0.06

Tabel 1: Gemiddelde windsnelheid uit de observaties (2e kolom) en gemodelleerd op de 4 dichtstbij gelegen gridpunten rondom locatie Cabauw.

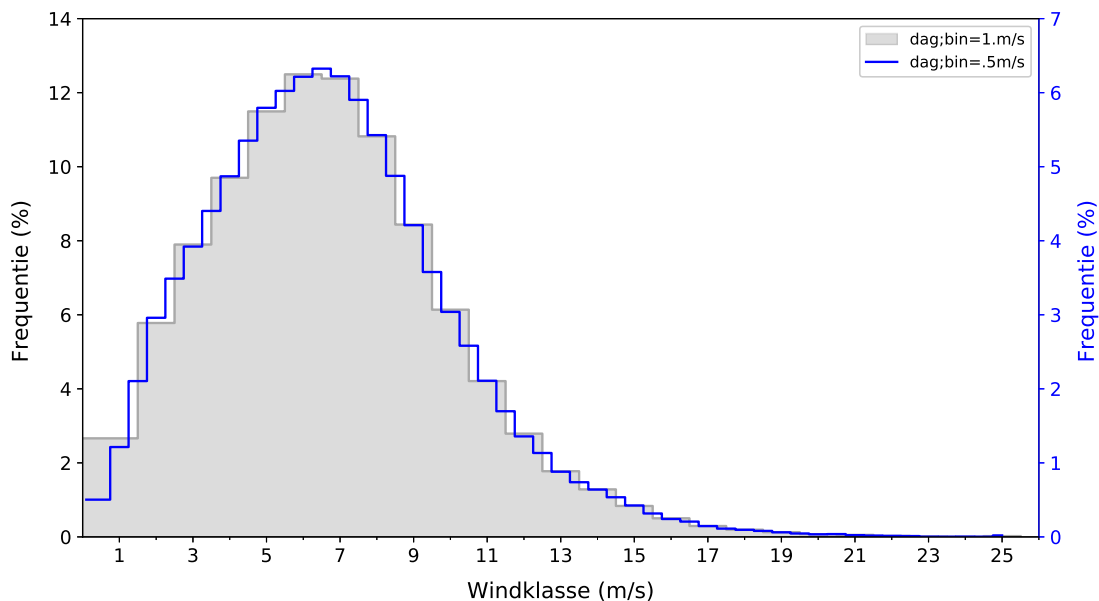
### 3.1 Windsnelheidsverdeling details

Bij het bepalen van de details van een verdeling zijn diverse keuzes mogelijk. In het ontwikkel stadium zijn deze keuzes besproken en uitgetest.

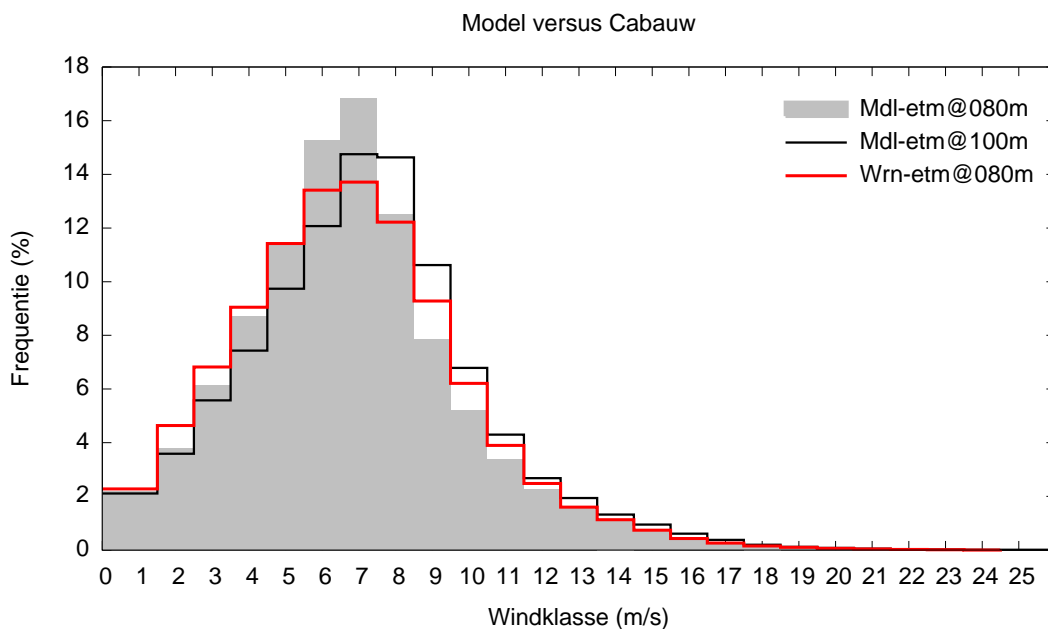
**Binbreedte** Doordat deze dataset 10 jaar beslaat is het mogelijk om een smalle binbreedte van slechts 0.5 m/s te gebruiken. In Figuur 3 is dit geïllustreerd aan de hand van de windsnelheidsverdeling op basis van waarnemingen voor de hoogte 80 m. Aan de hand van de resultaten is geconcludeerd dat een binbreedte van 1.0 m/s voldoende informatie biedt.

**Midden van de bin** De windverdelingen zijn opgedeeld in 25 klassen met een binbreedte van 1.0 m/s. Voor het midden van de bin is er voor gekozen om deze te laten overeenkomen met gehele waarden van de windsnelheid. Hierbij zijn windsnelheden kleiner dan 0.5 m/s opgeteld bij de eerste windklasse, hierdoor loopt de eerste bin van 0.0 m/s tot 1.5 m/s. De overige bins zijn wel 1.0 m/s breed, zoals te zien is in Figuur 4. In deze figuur is de verdeling voor het hele etmaal getoond.

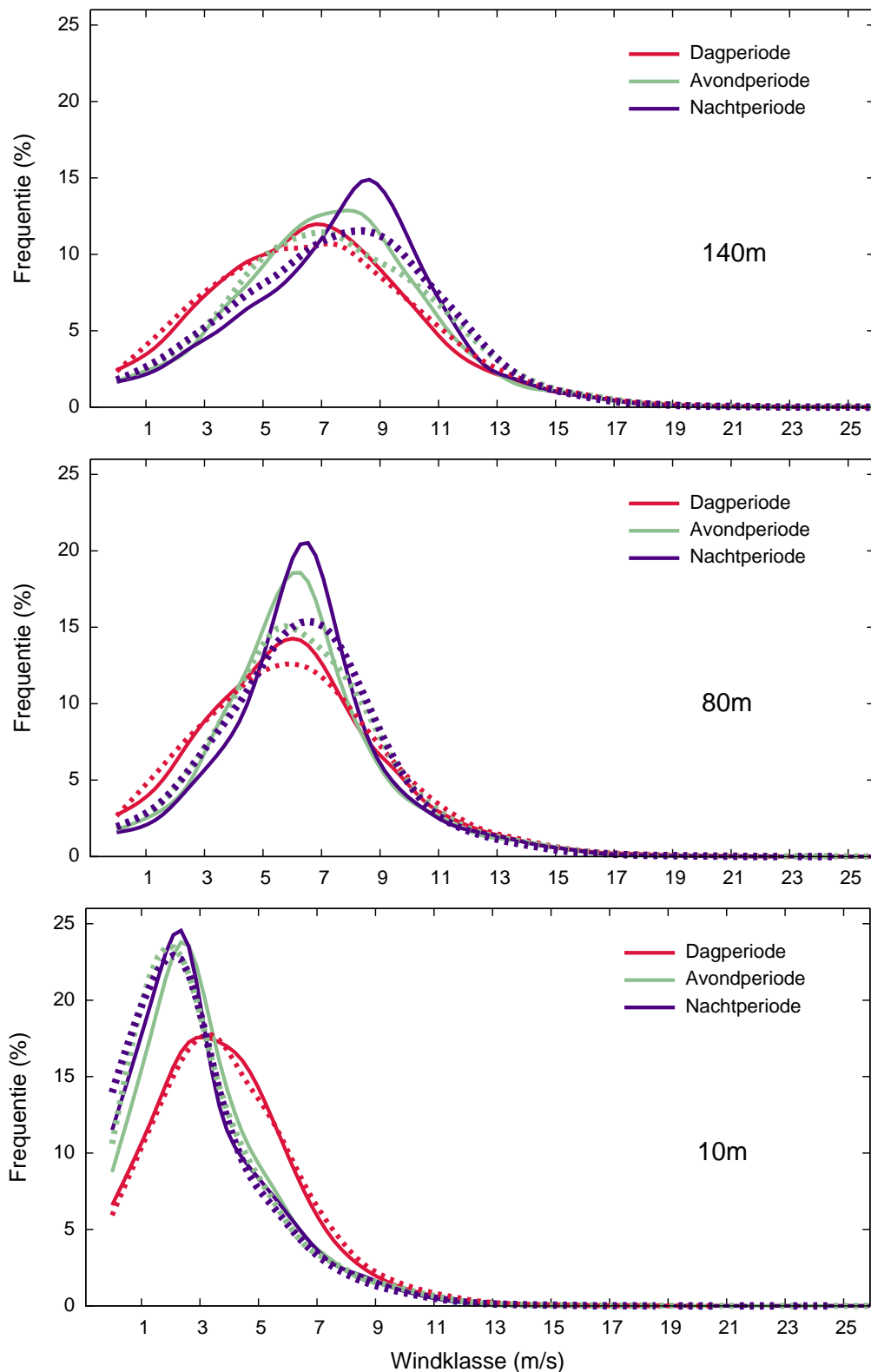
**Windsnelheidsverdelingen voor de dag-, avond- en nachtperiode** In Figuur 5 zijn de windsnelheidsverdelingen vergeleken voor verschillende hoogtes en voor verschillende periodes voor de dag. De donkere kleuren geven de verdeling op basis van de waarnemingen. De verdelingen op basis van het dichtstbijzijnde roosterpunt zijn gegeven in lichtere kleuren. De verdelingen in deze figuren hebben betrekking op dezelfde binbreedte als het histogram dat getoond is in Figuur 4. In dit geval is niet gekozen voor een representatie in de vorm van een histogram, maar is de frequentieverdeling getoond met een lijn door de punten van het midden van de bins getrokken. Daarnaast is ervoor gekozen om deze lijn licht glad te strijken zodat de 6 individuele lijnen goed te zien zijn.



Figuur 3: Windsnelheidsverdeling op basis van de waarnemingen op 80 meter hoogte op de meetmast te Cabauw. Bij het grijze histogram is de binbreedte op 1 m/s gezet, in blauw is het histogram weergegeven voor een binbreedte van 0.5 m/s. De linker-as hoort bij de grijs gevulde verdeling, de rechter-as hoort bij de blauwe verdeling. Deze verdelingen gelden voor de dag-periode.



Figuur 4: Windsnelheidsverdeling op basis van de waarnemingen op 80 meter hoogte op de meetmast te Cabauw (rode lijn), en de modelgegevens voor 80 meter hoogte (in grijs) en 100 meter hoogte (zwarte lijn). Hiervoor is het dichtstbij zijnde roosterpunt genomen. Deze verdelingen gelden voor het hele etmaal.



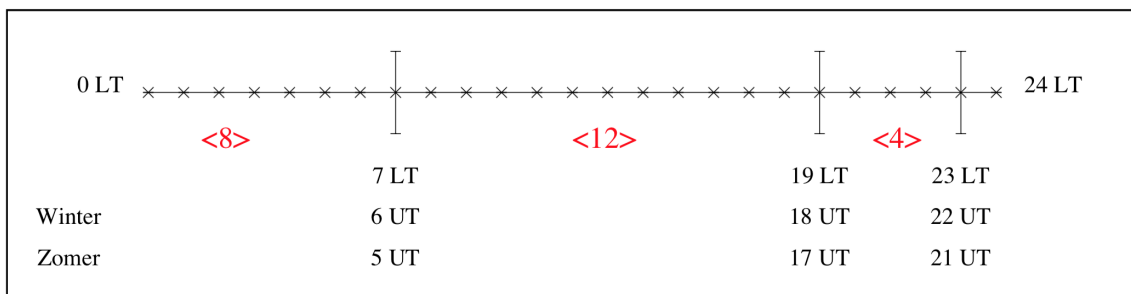
Figuur 5: Windsnelheidsverdeling voor de dag (rood), avond (groen) en nacht (blauw). De modelgegevens van een nabij gelegen roosterpunt zijn weergegeven met doorgetrokken lijnen. De gestippelde lijnen geven de verdeling op basis van de waarnemingen op de meetmast te Cabauw. De bovenste figuur geeft de verdeling voor 140 m hoogte, de middelste voor 80 m en de onderste figuur geeft de verdeling op 10 meter hoogte boven het maaiveld. Frequentie is per 1 m/s windklasse.

## 4 Beschrijving dataset

De resultaten zijn weergegeven in tabellen met jaargemiddelde windsnelheidsverdelingen, welke gebaseerd zijn op dezelfde 10 jaren die nu ten grondslag liggen aan de SDE+ regeling, namelijk 2004-2013.

### 4.1 Tijdvakken: opdeling naar dag, avond en nacht-periode

De windsnelheidsverdelingen zijn opgesplitst naar dag, avond en nacht periode. De dagperiode loopt van 07-19 uur, de avond-periode van 19-23 uur en de nacht-periode van 23-07 uur. Daarnaast rekent het weermodel in universele tijd (UT), dat wil zeggen dat het verschil met de lokale tijd in de winterperiode 1 uur is en in de zomerperiode 2 uur. Het weermodel levert informatie op elk heel uur. Via postprocessing zijn de tijdreeksen getransformeerd naar tijdreeksen in lokale tijd. Daarnaast is ervoor gekozen om de windinformatie op de overgangsuren voor de helft mee te laten tellen in het tijdvak voorafgaand aan het hele uur en voor de helft mee te laten tellen in het tijdvak volgend op het hele uur.



Figuur 6: Het weermodel rekent in UTC (Universal Time), maar de dag, avond en nachtperiode is in LT (Lokale Tijd) gedefinieerd. Het verschil met de lokale tijd is 1 uur gedurende de wintertijd-periode en 2 uren in de periode dat de zomertijd. De vertaling van LT naar UTC is hier grafisch weergegeven.

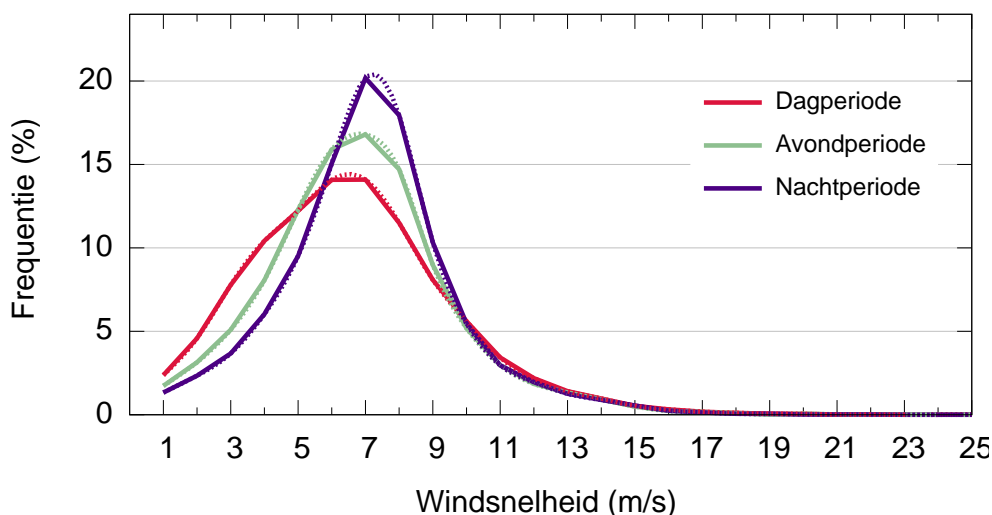
## 4.2 Indeling in windsnelheidsklassen

De windsnelheidsverdeling is opgedeeld in 25 klassen, waarbij de intervallen 1.0 m/s breed zijn en het midden van de klasse samenvalt met de windsnelheid zelf. De eerste klasse is breder zodat ook 0.0 tot 0.5 meter per seconde in de tabel is opgenomen. Voor de berekening van  $L_{den}$  is dit niet van belang omdat de windturbines bij deze lage windsnelheden stil staan. Ook windklasse 25 is breder; hierin worden windsnelheden groter dan 24.5 m/s meegenomen. De onderste grens van het interval wordt meegeteld, de bovengrens van het interval wordt bij de volgende windklasse meegeteld. In wiskundige notatie: windklasse 1 loopt van [0:1.5), windklasse 2 van [1.5:2.5) tot en met windklasse 23 van [22.5:23.5). Het hoogste interval is windklasse 25 en loopt van [24.5:∞).

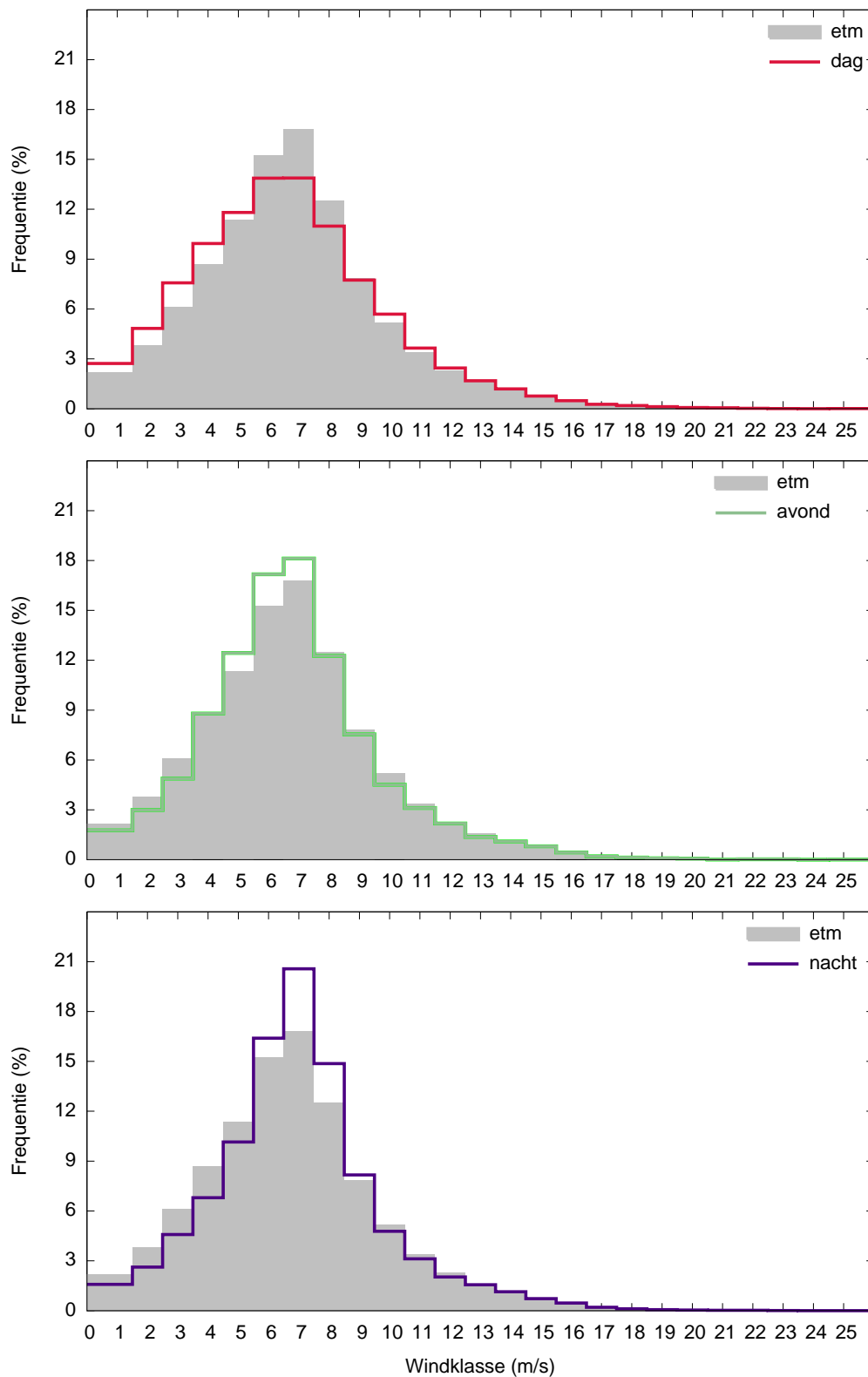
## 4.3 Windsnelheidsverdeling voorbeelden

Een voorbeeld van de windverdelingen voor de dag-, avond- en nachtperiode is gegeven in Figuur 7 die laat zien hoe vaak elke windsnelheid voorkomt. Deze grafiek is geplott voor een willekeurige positie in Nederland, voor deze locatie en hoogte is de windsnelheidsverdeling in de nacht veel smaller is dan voor de dag-periode.

In Figuur 7 zijn de punten van de windsnelheidsverdeling met een lijn verbonden. In Figuur 8 is een histogram gebruikt voor de grafische weergave van de frequentieverdeling. Hierbij is de verdeling voor de drie periodes (dag, avond en nacht) vergeleken met de verdeling voor het hele etmaal, zodat goed te zien is hoe de verdeling opgedeeld is. Deze verdeling is gebaseerd op een gridpunt in de buurt van Cabauw. Ook hier is te zien dat de verdeling voor de nachtperiode smaller is dan voor de dag-periode.



Figuur 7: Windsnelheidsverdeling op een willekeurige positie in het oosten van Nederland. De lijnen verbinden de middenpunten van de bins, waarbij de binbreedte hetzelfde is als bij de histogrammen, namelijk 1 m/s. De gestippelde lijn loopt vloeiender door deze punten. Deze methode is ook bij de figuren 5, 9 en 11 gebruikt.

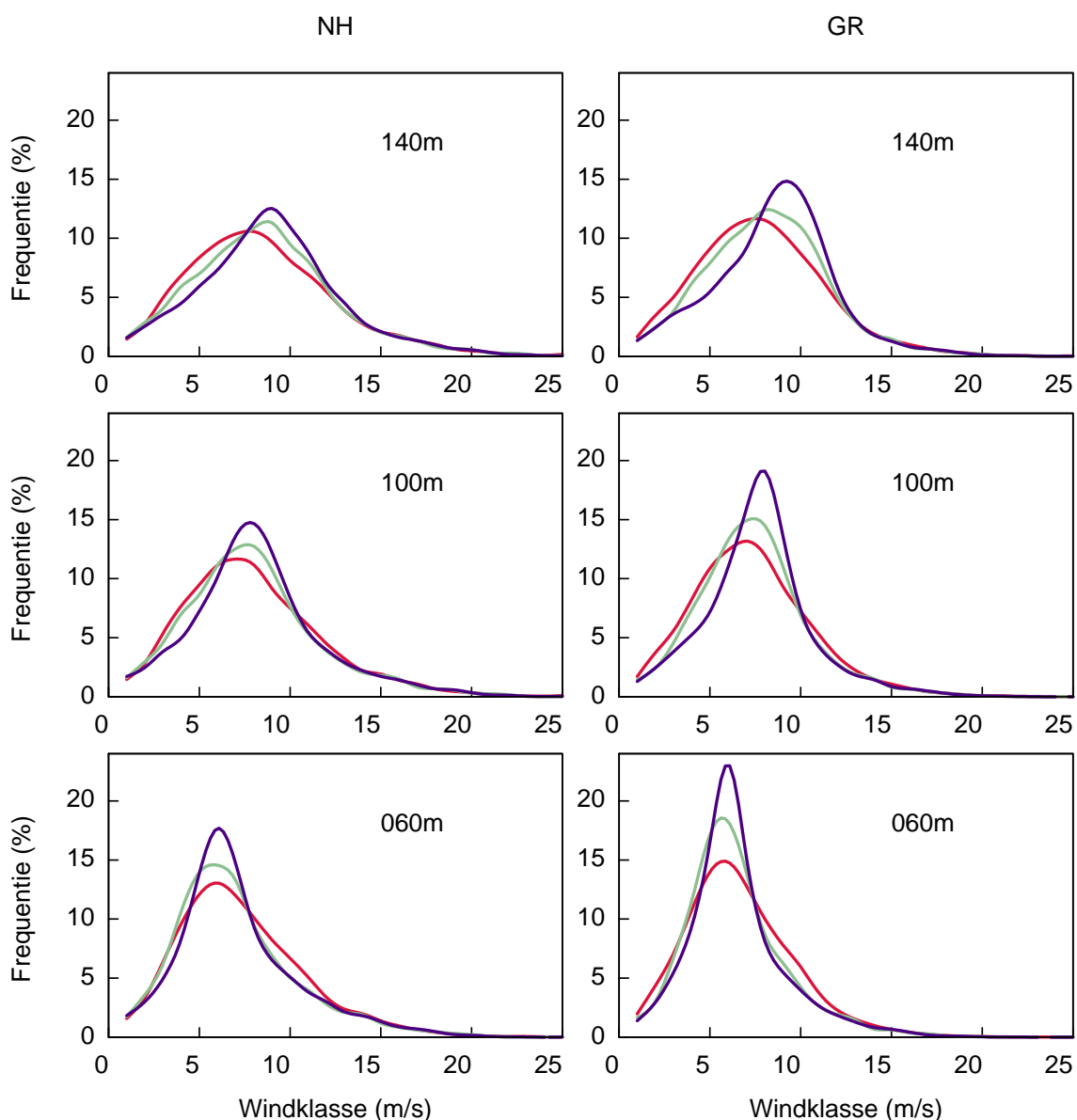


*Figuur 8: Windsnelheidsverdeling in de buurt van Cabauw voor 80 meter hoogte. Bovenste plot geeft de verdeling voor de hele dag, dus voor 24 uren, in grijs, met de verdeling voor alleen de dag-periode in rood. De middelste grafiek laat de verdeling voor de avond-periode zien in groen en de onderste grafiek voor de nacht-periode in blauw.*



## 4.4 Verticale resolutie

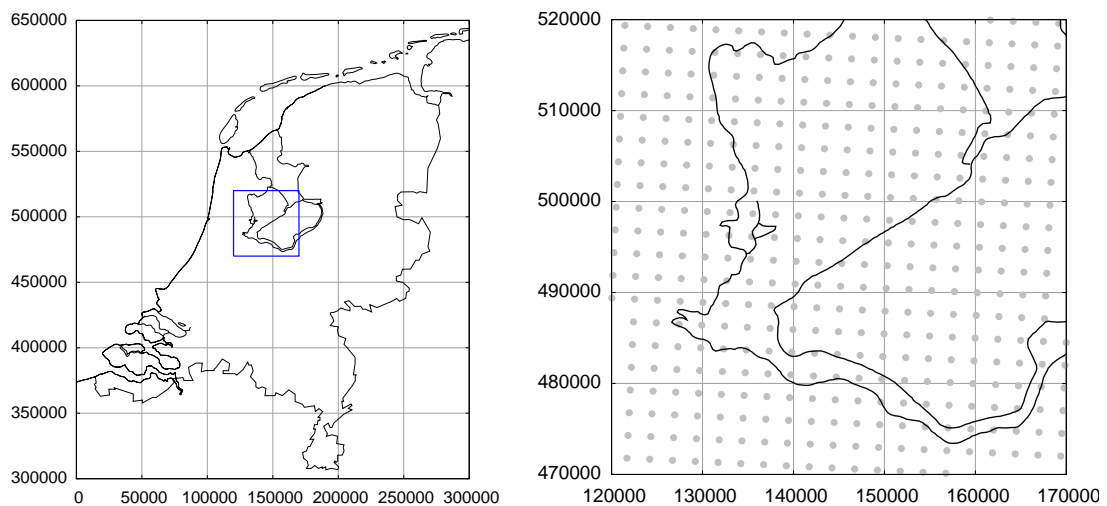
Voor de hoogtes 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 en 200 meter boven het oppervlak zijn de model gegevens beschikbaar. Voor de bepaling van de windsnelheid op de tussenliggende hoogtes zijn de tijdreeksen geanalyseerd en is op basis van het neutraal logaritmisch windprofiel de wind op de tussenliggende hoogtes voor elk uur bepaald voor de hoogtes 20 tot en met 260 meter met een verticale resolutie van 20 meter. Voor 60, 100 en 140 meter hoogte is in Figuur 9 de windsnelheidsverdeling geplot voor de dag, avond en nachtperiode voor een punt in Noord Holland en een locatie in de provincie Groningen.



Figuur 9: Windsnelheidsverdelingen op verschillende hoogtes, voor een locatie in Noord Holland (linker kolom) en een locatie in Groningen (rechter kolom). De verdelingen zijn geplot voor de dag (rood), avond (groen) en nacht (blauw) periode.

## 4.5 Horizontale resolutie

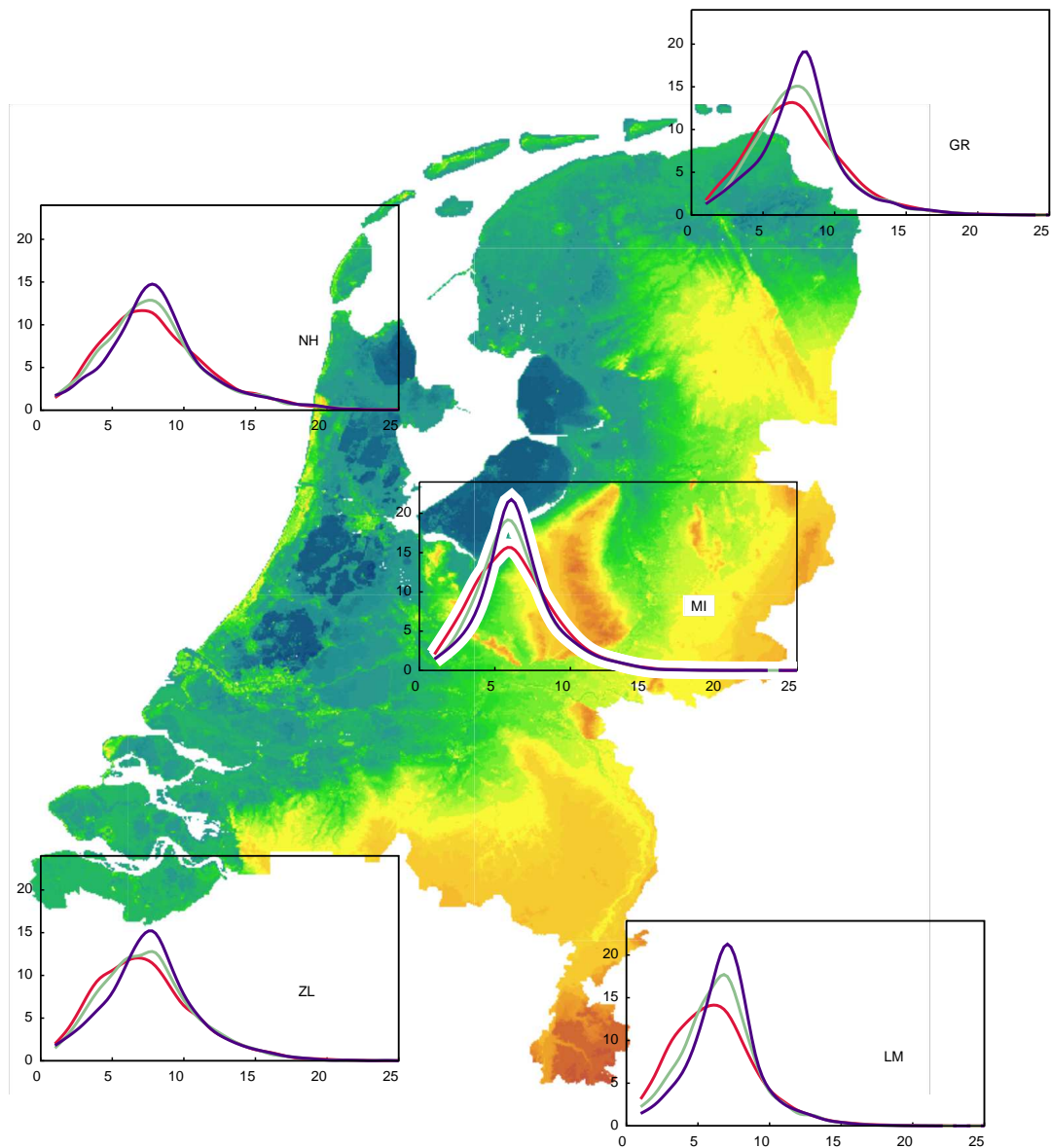
De tabellen zijn beschikbaar op een fijnmazig grid van  $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ , overeenkomstig met het rekenrooster van HARMONIE, het hoge resolutie weermodel van het KNMI. Het weermodel is gerund op een domein van  $500 \times 500$  roosterpunten op een Lambert-rooster. Dit houdt in dat de onderlinge afstanden naar de dichtstbijzijnde roosterpunten overal gelijk zijn. Het rekendomein is gecentreerd op 54 graden Noord, 2 graden Oost. Voor elk roosterpunt zijn de tabellen met windsnelheidsverdelingen aangemaakt. Hiermee is een semi-continue benadering van het windveld boven Nederland mogelijk. Voor elk rekenvakje is de positie van het midden van het vakje bij de tabel aangegeven zowel in noorderbreedte, oosterlengte als in het RD (Rijksdriehoeken) coördinatenstelsel  $x$  en  $y$ . Door de keuze van het gebied is het rooster wel regelmatig, maar iets gedraaid ten opzichte van het RD-coördinaten stelsel (zie Figuur 10).



*Figuur 10: Uitsnede van het rekenrooster in RD coördinaten stelsel*

## 4.6 Geografische verschillen

De windsnelheidsverdelingen verschillen niet alleen voor de periode van de dag, maar zijn ook verschillend voor verschillende locaties. In Figuur 11 wordt dit geïllustreerd aan de hand van de verdelingen op 100 meter hoogte voor roosterpunten in 5 verschillende regio's.



*Figuur 11: De windsnelheidsverdelingen zijn hier weergegeven voor 5 verschillende regio's. De locatie van de plot geeft een indicatie van het roosterpunt waarop de de snelheidsverdeling bepaald is. De drie kleuren geven de verdeling voor de dag (rood), avond (groen) en nacht-periode (blauw). De landkaart laat de orografie van Nederland zien.*

## 5 Gebruik dataset

In de Activiteitenregeling milieubeheer (2018) wordt aangegeven welke windgegevens bij de aanvraag van een omgevingsvergunning gebruikt moet worden. Hierbij staat een verwijzing naar de KNMI-dataset. Daarnaast heeft M+P een rekentool<sup>2</sup> ontwikkeld waarmee de windverdeling wordt bepaald voor de dag-, avond- en nachtperiode als functie van ashoogte en locatie door middel van interpolatie uit de KNMI-dataset. Deze tool is te vinden via de website van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO, 2018). Bij de rekentool wordt gebruik gemaakt van het Amersfoortse coördinaten stelsel (RDnew). Het gebruik van deze rekentool waarborgt dat de meest accurate windgegevens worden gebruikt.

De dataset is bij het KNMI ook op te vragen in de vorm van tabellen (G.T. Geertsema, 2018). Bij gebruik van deze dataset dienen de in de volgende secties besproken horizontale en verticale interpolaties toegepast te worden. Bij het gebruik van de rekentool worden deze interpolaties al voor de gebruiker uitgevoerd.

### 5.1 Bestandsformaat

De data is beschikbaar in ASCII-formaat. Voor elke roosterpunt is een bestand aangeemaakt dat in de bestandsnaam de indices van het HARMONIE-roosterpunt bevat. In het bestand staan de coördinaten van dit roosterpunt zowel in WGS84 (lat,lon) als in RD (x,y), voorafgegaan door de hoogte waarvoor de frequentietabellen bepaald is. Per bestand worden voor alle beschikbare hoogtes de dag, avond en nacht frequentietabel gegeven. Meer details en een voorbeeld zijn te vinden in Bijlage B.

De windinformatie is beschikbaar in roostervakjes van  $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ , iets gedraaid ten opzichte van het RDnew assenstelsel. Dit betekent dat er horizontaal geïnterpoleerd moet worden naar de gewenste locatie. De dichtstbijzijnde 4 gridpunten worden gebruikt om voor de nieuwe positie de windsnelheidsverdeling af te leiden, waarbij de afstand als weegfactor wordt meegenomen. De interpolatie techniek IDW (inverse distance weigthing) wordt gebruikt, met als weegfactor het kwadraat van de afstand. Voor de hoogte boven het maaiveld wordt de windinformatie aangeleverd op de hoogtes 20 tot en met 260 meter met een verticale resolutie van 20 meter. Voor de tussenliggende hoogtes moet met behulp van een neutraal logaritmische interpolatie formule de frequentieverdeling bepaald worden.

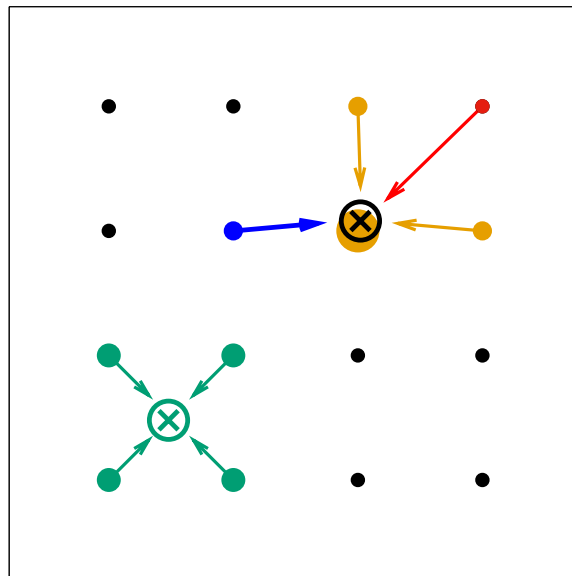
---

<sup>2</sup><http://www.mp.nl/rekentool>

## 5.2 Interpolatie

Ook bij het gebruik van een hoge resolutie weermodel is het gewenst de informatie op gridpunten te interpoleren naar de locatie van de windturbine cq het windpark.

Voor de horizontale interpolatie dient de interpolatie techniek IDW (inverse distance weighting) gebruikt te worden, met gebruik van de 4 naburige model-rekenpunten en een kwadratische afstandsweging (IDW,  $N=4$ ,  $p=2$ ). Dit wordt toegelicht in Figuur 12.



*Figuur 12: De stippen geven de roosterpunten aan. De kruisjes in cirkels geven de locaties waarvoor de windsnelheidsverdeling afgeleid moet worden. Bij de interpolatie worden de 4 dichtstbijzijnde roosterpunten gebruikt. Voor het groene kruisje zijn dit de groene (omliggende) roosterpunten. Voor het oranje kruisje zijn dit de 3 oranje roosterpunten en het blauwe roosterpunt. Het rode roosterpunt ligt verder weg dan het blauwe roosterpunt en wordt niet gebruikt bij de interpolatie. Met de gebruikte weegfactor weegt de informatie van het dichtstbijzijnde oranje roosterpunt veel zwaarder mee dan de andere roosterpunten. Dit is schetsmatig aangegeven door dit roosterpunt met een grotere stip te markeren.*

### 5.2.1 Details horizontale interpolatie

De algemene formule voor IDW is:

$$U(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x}) U_i}{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x})} & \text{als } d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \neq 0 \text{ voor alle } i's \\ U_i & \text{als } d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = 0 \text{ voor één van de } i's \end{cases} \quad (1)$$

met

$$w_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)^p} \quad (2)$$

Hierbij is de weegfactor de afstand  $d$  van het punt  $\mathbf{x}$  tot de punten  $\mathbf{x}_i$ ,  $N$  is 4, en  $p$  is 2. Merk op dat  $\mathbf{x}$  een 2D-vector is bestaande uit  $(x, y)$ . Dit geldt ook voor  $\mathbf{x}_i$ .  $U$  representeert in dit geval de windverdeling.

### 5.2.2 Details verticale interpolatie

De winddata worden aangeleverd op de hoogtes 10, 20, 40, 60 en zo verder tot en met 260 meter. Onder neutrale omstandigheden hangt de windsnelheid logaritmisch af van de hoogte. Om zo consistent mogelijk te zijn moet dit ook voor de windsnelheidsverdelingen gedaan worden. Dit betekent dat de fractie  $N$  op hoogte  $h$  per windsnelheidsbin  $bin$  logaritmisch gewogen gemiddeld berekend wordt uit de fractie voor een hoogteniveau lager ( $h_1$ ) en een hoogteniveau hoger ( $h_2$ ).

De formule voor de verticale interpolatie van de frequentie van de windsnelheid is:

$$N_{h, bin} = N_{h_1, bin} + \frac{\ln(h) - \ln(h_1)}{\ln(h_2) - \ln(h_1)} * (N_{h_2, bin} - N_{h_1, bin}) \quad (3)$$

Hierbij is  $N_{h, bin}$  de kans voor hoogte  $h$  op een windsnelheid in bin  $bin$ ,  $N_{h_1, bin}$  en  $N_{h_2, bin}$  zijn de kansen op een windsnelheid in bin  $bin$  op respectievelijk de hoogtes  $h_1$  en  $h_2$ , met  $h_1 < h < h_2$ .

De hoogte is relatief ten opzichte van de gemiddelde maaiveldhoogte. Indien de voet van de mast van de turbine uitsteekt boven het omringende terrein, dient dit te worden verdisconteerd in de ashoogte  $h$ .

## 6 Conclusie en discussie

Een heranalyse van het weer met behulp van de combinatie ERA-INTERIM/HARMONIE is uitgevoerd eind 2014 begin 2015 voor de SDE+ regeling. Voor deze regeling is de gemiddelde windsnelheid relevant. Deze gegevens zijn beschikbaar via de Windviewer<sup>3</sup>. Er is voor de SDE+ regeling gekozen om de Windviewer te baseren op het tijdvak 2004-2013. Hierbij zijn de windgegevens op 100 meter boven het maaiveld beschikbaar gesteld.

Begin 2018 bleek behoefte te zijn aan meer hoogte informatie, niet alleen hoger dan 100 meter, maar ook lager dan 100 meter. De wens om de windinformatie voor de windviewer uit te breiden met meer hoogtes viel samen met de vernieuwing van windgegevens voor het berekenen van de geluidsbelasting door windturbines. Voor beide toepassingen zijn nu dezelfde weergegevens gebruikt om de 10-jaar gemiddelde windsnelheid en de windsnelheidsverdelingen opgesplitst naar dag, avond en nacht af te leiden.

Dankzij HARMONIE is niet alleen de horizontale, maar is ook de verticale resolutie sterk toegenomen. De windgegevens zijn nu beschikbaar voor hoogtes van 20 tot 260 meter boven het maaiveld. De beschikbaarheid van deze nieuwe set windgegevens leidt ertoe dat de geluidsbelasting door nieuwe windparken nauwkeuriger en consistentere kan worden vastgesteld.

In de afgelopen jaren is ook informatie opgevraagd ten behoeve van de plaatsing van lage windmolens met bijvoorbeeld een mast hoogte van 15 meter. Om die reden bevat de dataset nu ook de windgegevens voor lage hoogtes, zoals 10 en 20 meter boven het maaiveld. Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor de onderste niveaus de lokale terrein-ruwheid een grotere rol speelt dan op grotere hoogte. Dit kan de nauwkeurigheid beïnvloeden voor een willekeurige locatie waar gebouwen en/of bomen de wind beïnvloeden.

---

<sup>3</sup>Voor de Windviewer zie <http://windviewer.rvo.nl>

## Referenties

- Activiteitenregeling milieubeheer, Reken- en meetvoorschrift windturbines, Bijlage 4. bij de Regeling algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, 2018. url: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0022830/2018-04-05#Bijlage4>.
- 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, and L. van de Berg. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137:553–597, 2011. doi: 10.1002/qj.828. url: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qj.828>.
- G.T. Geertsema and H.W. van den Brink. Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte. Technical report TR-351, KNMI, 2014. url: <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR351.pdf>.
- G.T. Geertsema. Windgegevens voor het berekenen van de geluidsemisatie van windturbines, 2018. url: <http://projects.knmi.nl/rvo>.
- RVO. Geluidsberekening windmolens, 2018. url: <https://rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/milieu-en-omgeving/geluid-en-windmolens/geluidsberekening>.



# A Infographic Weer- en klimaatmodellen

## KNMI weer- en klimaatmodellen

Goed informeren en waarschuwen over weer en klimaat kan niet zonder goede computermodellen. Zij vormen het onmisbare gereedschap waarmee weersverwachtingen en klimaatscenario's worden gemaakt. Het KNMI werkt voortdurend aan het verbeteren van deze modellen, aangepast aan de nieuwste inzichten en technologie. Maar hoe werkt zo'n model eigenlijk?

In een kolom gridcellen komen we modules tegen voor condensatie, neerslag, straling, turbulentie, verdamping en oppervlakteprocessen.

### 1 Wat is een model?

De zon verwarmt de aarde. Rond de evenaar wordt het warmer dan aan de polen. Dit veroorzaakt grootschalige luchtstromen en verplaatsing van vocht en warmte in de atmosfeer. Deze weer- en klimaatprocessen worden nagebootst in numerieke modellen.

ZON →

### 2 Berekenen

In het model is de atmosfeer opgedeeld in gridcellen

- In elke gridcel worden grootheden bijgehouden als:
  - temperatuur
  - druk
  - vocht
- wind
- straling
- etc.

Deze veranderingen worden in het model berekend met modules die de fysische processen beschrijven.

De waarden veranderen voortdurend: straling wordt gereflecteerd, water verdampt, turbulentie zorgt voor menging enz.

Het model doet zo'n berekening in stapjes van 60 sec:

over 60 sec

over 60 sec

over 60 sec

over 60 sec

over 60 sec

etc.

### 3 Weersverwachting

Om een weersverwachting te maken worden de beginwaarden van de grootheden in elke gridcel afgeleid uit waarnemingen van weersatellieten, grondstations, weerballonnen en andere metingen.

De metingen en het model zijn niet perfect. Een kleine afwijking van de begintoestand leidt tot een ander weerbeeld. Door de begintoestand en de fysische modules steeds iets te wijzigen ontstaat een weerpluim.

Smalle pluim: redelijk zekere weersverwachting

Gewaaierde pluim: verwachting onzeker

### 4 Klimaatscenario's

Voor klimaat simulaties rekent het model ver vooruit. Daarbij worden factoren meegenomen die het klimaat beïnvloeden, zoals broeikasgassen.

### Modellen die op het KNMI worden gebruikt:

**ECMWF**  
Wereldwijd model van het Europees Weercentrum in Reading (GB). Voor de verwachting tot 2 weken vooruit wordt een grid van 9 x 9 km gebruikt (ca. 600 vakjes voor Nederland).

**HARMONIE**  
Model voor Nederland en omgeving. Sinds 2012 ingezet voor de verwachting tot 2 dagen vooruit, met vakjes van 2,5 x 2,5 km (=10.000 voor Nederland).

### Supercomputer

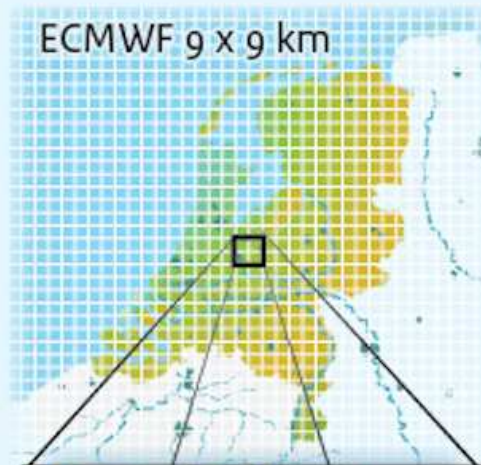
HARMONIE vergt ca. 3 miljard berekeningen. Om 8 x per dag een verwachting te maken beschikt het KNMI over een computer met een rekenkracht van 50 biljoen berekeningen/sec (50 teraflops).

Dit is een uitgave van ©KNMI 2017. Zie ook: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)

## Modellen die op het KNMI worden gebruikt:

### ECMWF

Wereldwijd model van het Europees Weercentrum in Reading (GB). Voor de verwachting tot 2 weken vooruit wordt een grid van **9 x 9 km** gebruikt (ca. 600 vakjes voor Nederland).



### HARMONIE

Model voor Nederland en omgeving. Sinds 2012 ingezet voor de verwachting tot 2 dagen vooruit, met vakjes van **2,5 x 2,5 km** (=10.000 voor Nederland).



## B Tabellen

De tabellen zijn opgeslagen in ascii bestanden, elk roosterpunt is opgeslagen in een apart bestand. Met 170x188 roosterpunten, komt dit neer op 31960 roosterpunten en meer dan 500 MB. De bestanden worden gecombineerd en gezippt, waarna de bestandsgrootte gereduceerd is tot 86 MB. De naamgeving van het bestand bevat de indices van het rekenvakje, in het bestand staan de coördinaten aangegeven.

De eerste 3 regels van bijvoorbeeld het ascii bestand `histogram_107-080.txt` bevat de volgende informatie:

```
# F010 52.15290 5.3709 153884 462743
  1    12.58  13.25  20.69
  2    26.93  30.52  30.24
```

De eerste regel is een commentaar regel en wordt daarom voorafgegaan door een #. Daarna volgt de volgende informatie:

```
F010:           de tabellen gelden voor de 10 meter boven het maaiveld
52.15290 5.3790: de locatie in Noorderbreedte en Oosterlengte
153884 462743:  de locatie in RD x,y in meters
```

En iets verder op in het bestand zijn dan de tabellen voor de hoogte 80 meter en 100 meter boven het maaiveld, zie Tabel 2. De frequentieverdelingen zijn gegeven in procenten met twee cijfers achter de komma. De eerste kolom bevat de 25 waarden van de windsnelheidsklassen. De volgende kolommen bevatten de verdeling van de windsnelheden in procenten voor respectievelijk de dag-, avond- en nachtperiode. Door afrondingsfouten tellen de verdelingen niet altijd tot exact 100% op.

#	F080	52.15290	5.3709	153884	462743
1	2.26	1.59	1.57		
2	5.65	3.86	3.62		
3	9.76	8.63	6.92		
4	13.95	15.03	14.54		
5	16.23	20.20	22.47		
6	15.85	18.51	19.68		
7	12.42	11.83	11.46		
8	9.15	7.65	7.31		
9	6.06	4.91	4.77		
10	3.62	3.17	3.06		
11	2.10	1.83	1.90		
12	1.32	1.38	1.31		
13	0.74	0.74	0.78		
14	0.45	0.32	0.34		
15	0.20	0.13	0.13		
16	0.13	0.13	0.07		
17	0.07	0.04	0.04		
18	0.03	0.02	0.01		
19	0.02	0.02	0.01		
20	0.00	0.01	0.01		
21	0.01	0.01	0.00		
22	0.00	0.00	0.00		
23	0.00	0.00	0.00		
24	0.00	0.00	0.00		
25	0.00	0.00	0.00		

#	F100	52.15290	5.3709	153884	462743
1	2.05	1.47	1.43		
2	5.02	3.26	2.92		
3	8.32	6.58	4.94		
4	11.94	11.04	8.69		
5	14.23	16.49	15.61		
6	15.69	19.16	21.74		
7	13.52	15.29	17.41		
8	10.27	10.09	10.49		
9	7.16	6.00	6.13		
10	4.64	4.01	4.01		
11	2.82	2.54	2.61		
12	1.75	1.65	1.64		
13	1.15	1.15	1.11		
14	0.62	0.64	0.70		
15	0.38	0.28	0.31		
16	0.17	0.13	0.12		
17	0.13	0.11	0.07		
18	0.07	0.05	0.04		
19	0.03	0.02	0.02		
20	0.01	0.02	0.01		
21	0.01	0.01	0.00		
22	0.01	0.00	0.01		
23	0.00	0.01	0.00		
24	0.00	0.00	0.00		
25	0.00	0.00	0.00		

Tabel 2: De tabellen voor 80 meter (links) en 100 meter (rechts) boven het maaiveld.





**Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut**

Postbus 201 | 3730 AE De Bilt  
T 030 220 69 11 | [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)