



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte

G.T. Geertsema en H.W. van den Brink

De Bilt, 2014 | Technisch rapport; TR-351

WINDKAART VAN NEDERLAND OP 100 METER HOOGTE GEBASEERD OP 2004-2013

Gertie Geertsema en Henk van den Brink

December 2014



foto: Wouter Knap

Dit rapport is een weerslag van de kennis die is verwerkt in de windkaart.

Samenvatting

De subsidie die binnen de Stimulering Duurzame energieproductie (SDE+) in 2015 wordt toegekend wordt bepaald door de gemiddelde windsnelheid op de locatie van de windturbine. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en het ministerie van Economische Zaken (EZ) hebben daarom aan het KNMI de opdracht gegeven om een accurate windkaart voor Nederland op 100 m hoogte te ontwikkelen. Om de gemiddelde wind op 100 m hoogte over Nederland over de afgelopen 10 jaar (2004-2013) te bepalen, is het operationele weermodel van het KNMI, HARMONIE, gebruikt om de uurlijkse wind te reconstrueren. Dit is gedaan op een horizontale resolutie van 2.5 km.

De gemiddelde wind van HARMONIE is vergeleken met verschillende meetmasten verspreid over Nederland, waaruit een correctie is afgeleid die is toegepast voor heel Nederland.

Voor kustlocaties lijkt HARMONIE licht te onderschatten; dit heeft vermoedelijk te maken met de land-zee overgang die door de beperkte resolutie van 2.5 km niet optimaal door HARMONIE gerepresenteerd wordt.

De onnauwkeurigheid van de gemiddelde wind binnen een gridcel van 2.5x2.5 km wordt geschat op ± 0.3 m/s.

Wij zijn Windunie, NOP Agrowind, Windpark Krammer B.V., Rijksuniversiteit Groningen, Energieonderzoek Centrum Nederland, Eneco, Enercon en Ecofys zeer erkentelijk voor het beschikbaar stellen van hun meetgegevens.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Historie	5
2	Methodologie	6
3	Modelbeschrijving	7
3.1	ERA-Interim	7
3.2	HARMONIE	7
3.2.1	Model set-up	8
3.2.2	Ruwheidskaart van HARMONIE	9
4	Resultaten	11
4.1	Inleiding	11
4.2	Profielen	12
4.2.1	Cabauw	12
4.2.2	Wieringermeer	16
4.2.3	OWEZ	17
4.3	Toegepaste correctie	18
4.4	windkaart	19
4.5	Jaarlijkse variaties	20
4.6	Nauwkeurigheid	22
5	Conclusies	25
A	Aanvullende meetmasten	27
A.1	Krammer	28
A.2	Lutjewad	29
A.3	Noordermeerdijk	30

1 Inleiding

In 2020 moet 14% van de Nederlandse energieproductie hernieuwbaar zijn, waarvan 6000 megawatt windenergie op land. Windenergie op land levert daarmee een belangrijke bijdrage om dat doel te bereiken. De komende jaren moet er nog ongeveer 4000 megawatt windenergie op land, in meer of op dijken worden bijgebouwd. De Rijksoverheid stimuleert bedrijven via de subsidieregeling SDE+ om te investeren in windenergie. Het subsidietarief hangt vanaf 2015 af van de gemiddelde windsnelheid op 100 meter hoogte.

In dit document wordt toegelicht hoe deze windsnelheid bepaald is.

1.1 Historie

De meest recente windkaart boven land op 100 m hoogte dateert uit 2005 en is ontwikkeld door SenterNovem/KEMA.¹ Deze is gebaseerd op de windobservaties van KNMI stations op 10 m hoogte, die via het programma WASP vertaald zijn naar een hoogte van 100 m.

Deze methodiek kent meerdere nadelen, zoals het relatief klein aantal KNMI stations (26) dat gebruikt is, wat de invloed van de ruimtelijke interpolatie vergroot. Daarnaast is de transformatie naar potentiële wind cruciaal, en daarmee de nauwkeurigheid van de schatting van de lokale ruwheid. Daarbij komt de (extra) correctie voor de stabiliteit die nodig bleek om realistische resultaten te krijgen.

De voortdurende toename van de kwaliteit van weersverwachting-modellen en van de observaties heeft er toe geleid dat deze modellen, die alle relevante weersvariabelen uitrekenen op basis van hun fysische samenhang, de 100 m wind klimatologie inmiddels beter representeren dan de getransformeerde 10 m observaties.

In dit document wordt de berekening van de 100 m windkaart op basis van het (sinds 2012) operationele weermodel HARMONIE toegelicht.

¹www.rvo.nl/sites/default/files/2014/01/windkaart_van_nederland.pdf

2 Methodologie

Om vanuit een beperkt aantal waarnemingen, met een afstand van tientallen kilometers, tot een hoge-resolutie windkaart te komen, is het nodig om 'downscaling' toe te passen. Hiervoor zijn twee mogelijkheden: statistische downscaling en dynamische downscaling. Bij statistische downscaling wordt de informatie van de ruwheidskaart gecombineerd met statistische relaties tussen de wind op 10 m en op 100 m. Eventueel wordt ook de stabiliteitsinformatie (d.w.z. de invloed van de temperatuur op de verandering van de wind met de hoogte) op een statistische manier verdisconteerd. De resolutie van het resultaat hangt af van de resolutie van de ruwheidskaart; de nauwkeurigheid wordt bepaald door de kwaliteit van de ruwheidskaart, en de statistische relaties. Voor individuele tijdstappen kunnen er aanzienlijke verschillen ontstaan tussen de werkelijkheid en de downscaling - tijdsgemiddelden worden aanzienlijk beter gerepresenteerd. De eerder genoemde SenterNovem/KEMA kaart is een voorbeeld van statistische downscaling.

In dit document beschrijven we een dynamische benadering, waarin voor elk gewenst tijdstap de toestand van de atmosfeer in zijn geheel beschreven wordt door het toepassen van de wetten van de dynamica op de beginsituatie. De resolutie van het resultaat hangt af van het rekenrooster van het model; de nauwkeurigheid wordt vooral bepaald door de nauwkeurigheid van de beginsituatie, de resolutie van het model, en de kwaliteit van het model.

Het gebruikte weermodel HARMONIE rekent momenteel op een horizontaal rooster van 2.5x2.5 km. Rekentechnisch is het niet mogelijk om dit wereldwijd te doen. Daarom wordt HARMONIE ingebed ("genest") in een wereldwijd weermodel, dat noodzakelijkerwijs op een (veel) lagere resolutie rekent. Hiervoor is de ERA-Interim database gebruikt. Zowel HARMONIE als ERA-Interim worden in resp. sectie 3.2 en 3.1 in meer detail besproken.

De berekeningen worden dus in twee stappen gedaan: Het wereldwijde ERA-Interim model verwerkt alle meteorologische meetgegevens (dus niet alleen de wind, maar ook de temperatuur, druk, neerslag, etc.) en beschrijft deze op een fysisch consistente manier in 3-dimensionale velden van alle meteorologische velden. Het ontbreken van veel windmetingen op grotere hoogten dan 10 m wordt zodoende (gedeeltelijk) gecompenseerd door andere metingen, bijvoorbeeld van temperatuur en druk. Deze analyse wordt elke 6 uur gedaan. Deze analyses van ERA-Interim zijn beschikbaar vanaf 1 januari 1979 tot heden op een resolutie van 80 km.

In de tweede stap zijn de ERA-Interim analyses vervolgens gebruikt om de (3-dimensionale) randen van HARMONIE van meteorologische informatie te voorzien. HARMONIE berekent vervolgens zelf, in het opgegeven domein, de weersvariabelen op een horizontale resolutie van 2.5x2.5 km. Deze hoge resolutie leidt er toe dat HARMONIE realistische weerfenomenen verwacht (zoals fronten, buienlijnen, etc.) die in ERA-Interim vanwege de lage resolutie ontbreken.

3 Modelbeschrijving

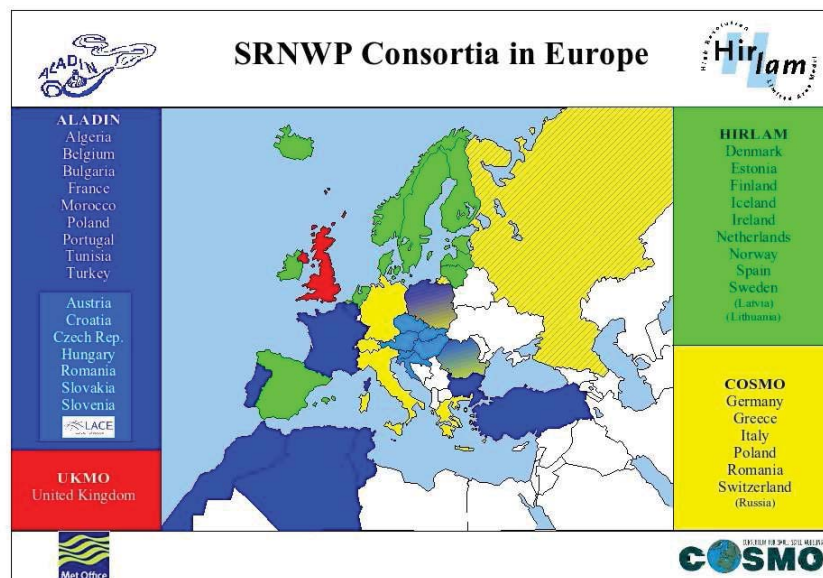
3.1 ERA-Interim

Het regionale model HARMONIE wordt aangedreven door de ERA-Interim analyses, berekend door het European Centre of Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF). Deze analyses zijn beschikbaar vanaf 1979.

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 3D analyses van de atmosfeer op een resolutie van ongeveer 80 km. De dataset die gebruikt is voor HARMONIE was 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 groot-schalige weerfenomenen worden door ERA-Interim gerepresenteerd, zoals depressies en hogedruk patronen. De bijbehorende kleinschalige fenomenen, zoals fronten en buien, zijn echter niet of nauwelijk in ERA-Interim waarneembaar.

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 (zie Figuur 3.1). Nauwe samenwerking met onder andere het ECMWF zorgt voor een continue borging en verdere verbetering van de kwaliteit.



Figuur 3.1: HIRLAM/ALADIN consortium

HARMONIE is de opvolger van de HIRLAM en ALADIN modellen. De belangrijkste ver-

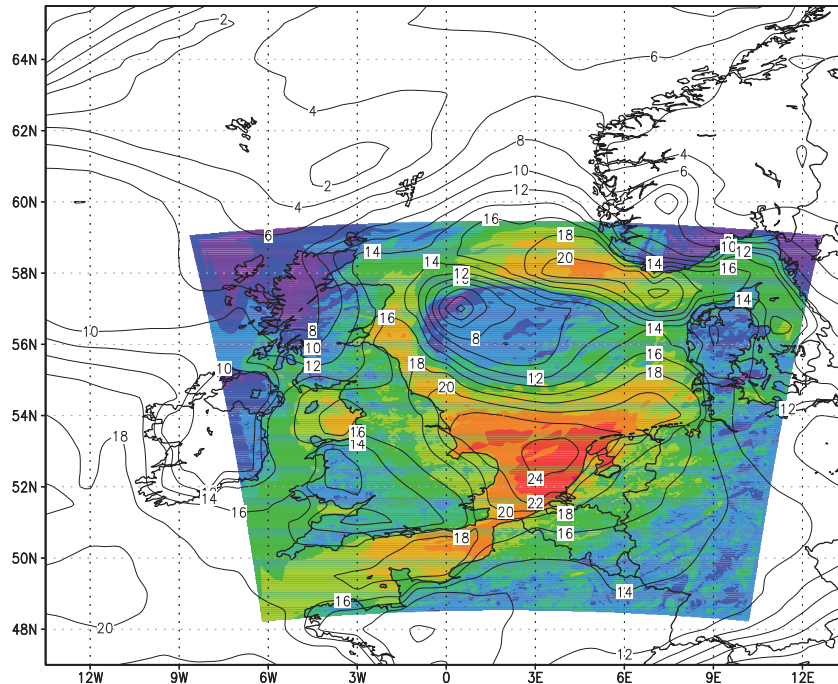
schillen zijn dat HARMONIE rekent op een rooster met een zeer hoge resolutie (standaard met een roosterpuntsafstand van 2.5 km) en dat het een zogenaamd non-hydrostatisch model is, wat betekent dat het een realistischer beschrijving geeft van de atmosferische processen. Het HIRLAM-ALADIN consortium heeft 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.

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 is. In dit geval van HARMONIE is deze roosterpuntsafstand 2.5x2.5 km. Het domein is gecentreerd op 54°N, 2°O (zie Figuur 3.2). 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.
- 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.

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.

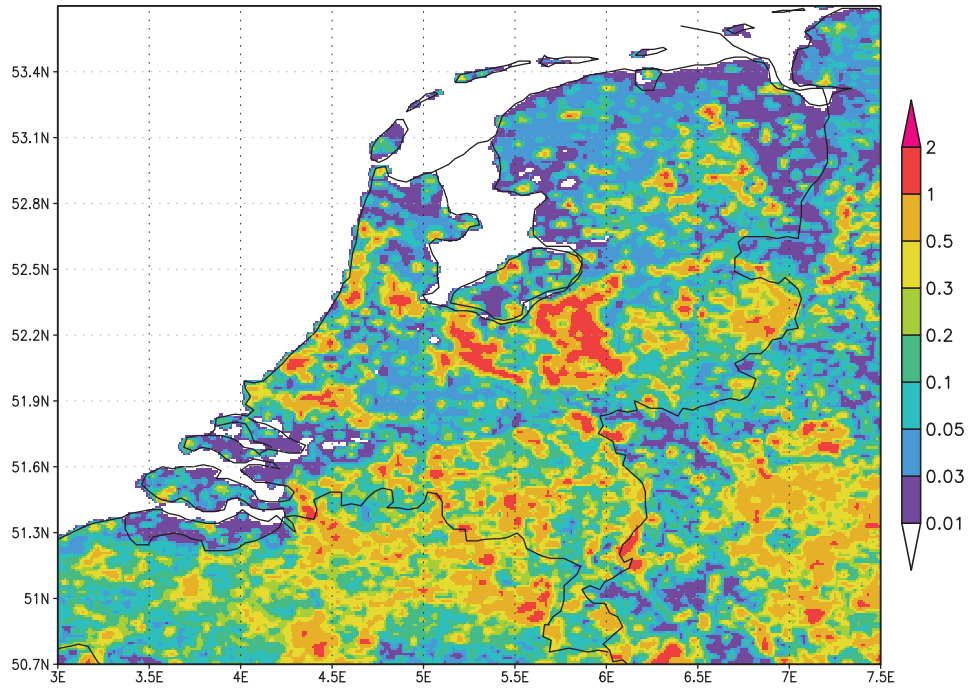


Figuur 3.2: Domein van HARMONIE (500x500 roosterpunten) zoals gebruikt in de huidige set-up. De kleuren geven de windsnelheid op 25 januari 1990, 18:00 UTC aan; de contouren op de achtergrond geven de windsnelheid voor hetzelfde moment volgens ERA-Interim. Duidelijk is het effect van HARMONIE te zien op de toename van de details in de wind.

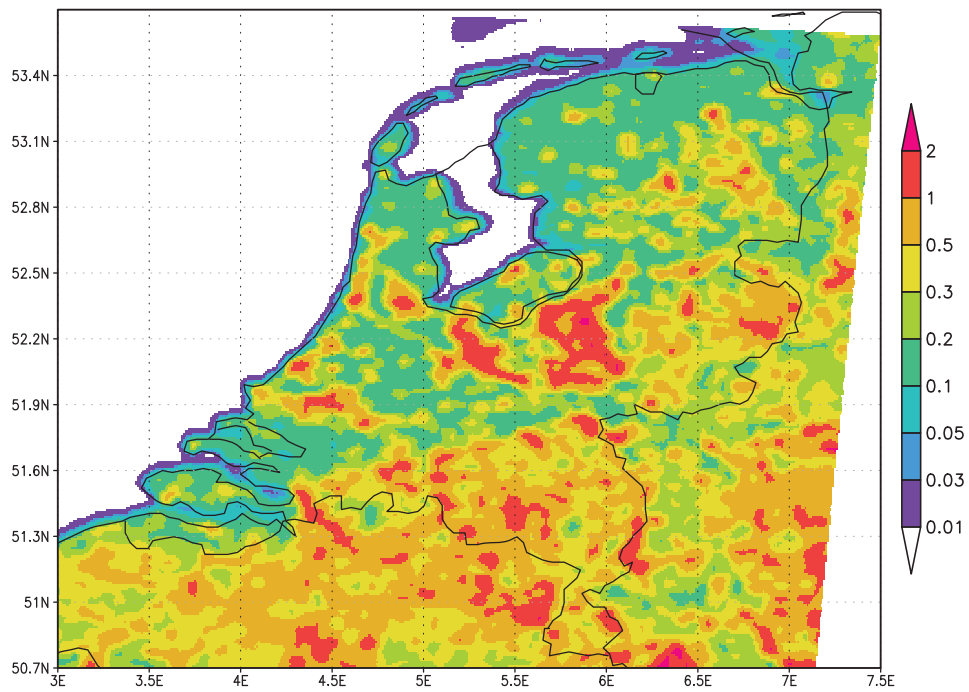
3.2.2 Ruwheidskaart van HARMONIE

De ruwheid van elk roosterpunt in HARMONIE wordt bepaald door de onderlinge verhouding van een groot aantal typen landgebruik die voor elke roosterbox gekwantificeerd zijn. Daarbij is aan elk type landgebruik een ruwheid toegekend, die voor vegetatie afhankelijk is van het seizoen.

Bij situaties van hoge windsnelheden (> 9 m/s) kan, gebruik makend van het dan geldend logaritmisch profiel, de effectieve ruwheid op verschillende hoogtes uitgerekend worden. Figuur 3.3 laat de berekende ruwheidslengte zien op 10 m en 100 m hoogte. De effectieve ruwheid op 100 m hoogte is het gevolg van een cumulatief effect van de stroomopwaartse ruwheid over een groter gebied dan door de wind op 10 m hoogte ervaren wordt. Dit is terug te zien in een gladder patroon van de van de effectieve ruwheid op 100 m (Figuur 3.3b) ten opzicht van de ruimtelijke variatie van de ruwheid op 10 m hoogte (Figuur 3.3a).



(a) ruwheidslengte (m) op 10 m hoogte



(b) ruwheidslengte (m) op 100 m hoogte

Figuur 3.3: Effectieve ruwheidslengte [m] op 10 m en 100 m hoogte.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de resultaten. Deze bestaan voor een deel uit verificatie, en voor een deel uit het presenteren van de windkaart op 100 m hoogte.

Voor de verificatie zijn observaties nodig van meetmasten, die moeten voldoen aan de volgende vereisten:

- *lang*; idealiter is 10 jaar beschikbaar van uurlijkse data, zodat de interjaarlijkse verschillen geanalyseerd kunnen worden, en de invloed van ongebruikelijk weer geminimaliseerd wordt.
- *gekalibreerd*; de onzekerheid in de metingen moet zo klein mogelijk, en goed gedocumenteerd zijn.
- *meerdere hoogten*; door te meten op meerdere hoogten, kan het verticale profiel van de meetmast vergeleken worden met die van HARMONIE. Hierdoor kan duidelijk worden waar de oorzaak van mogelijke afwijkingen ligt.
- *representatieve omgeving*; de meetlocatie moet representatief zijn voor een groot deel van de ruwheidsvariaties over Nederland. Kustlocaties zijn daarom minder geschikt, vanwege de grote variaties in ruwheid door de land/zee overgang.

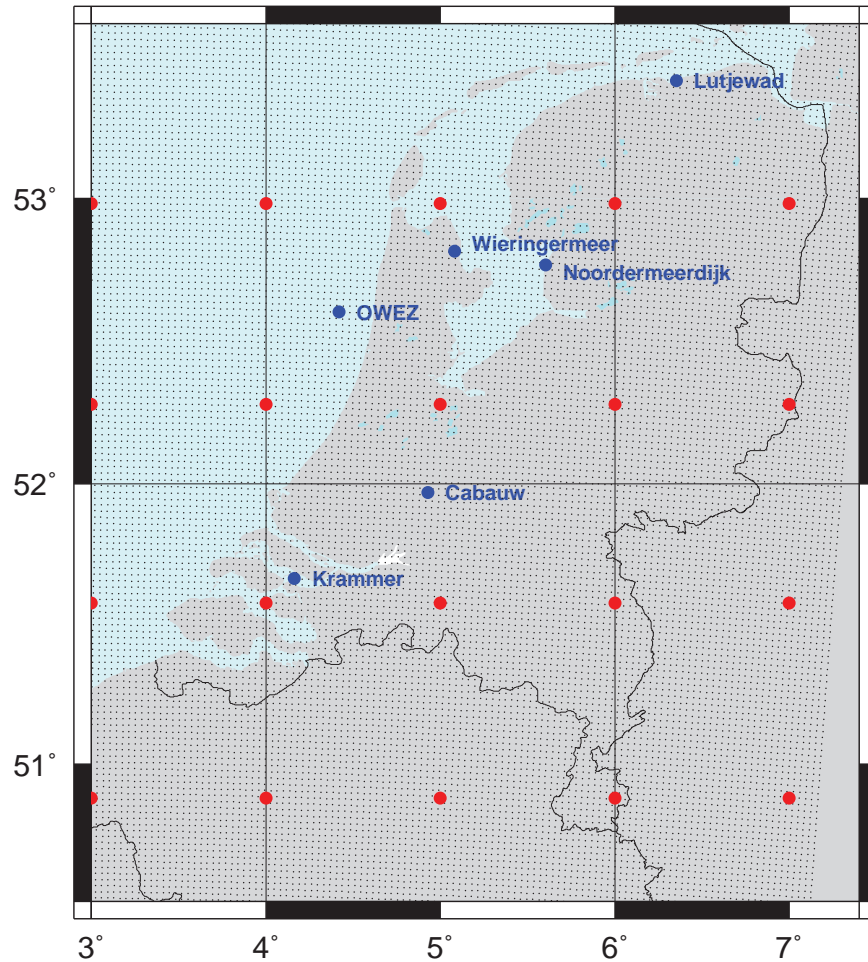
Van de beschikbare meetmasten Cabauw, Wieringermeer, Noordermeerdijk, Lutjewad, Krammer, en OWEZ (zie Figuur 4.1 en Tabel 4.1 voor de locaties van deze meetmasten) voldoen alleen Cabauw en Wieringermeer aan alle genoemde vereisten. De validatie concentreert zich op de meetmast van Cabauw. Deze meetmast is internationaal bekend vanwege de hoge kwaliteit van de (wind)metingen. Er zijn 10-minuut windmetingen beschikbaar vanaf 2001 voor 10, 20, 40, 80, 140 en 200 m hoogte.

De resultaten zijn vervolgens geverifieerd met Wieringermeer, en vergeleken met Noordermeerdijk, Lutjewad, Krammer, en OWEZ.

Paragraaf 4.2 toont de verticale profielen van de gemiddelde wind, paragraaf 4.3 de toegepaste correctie voor de wind boven land, paragraaf 4.4 geeft de windkaart op 100 m. In paragraaf 4.5 wordt ingegaan op de jaarlijkse variabiliteit van de wind, terwijl paragraaf 4.6 de nauwkeurigheid van de windkaart beschrijft.

Tabel 4.1: Locaties en meethoogtes van de gebruikte meetmasten

Naam	lat	lon	meethoogtes
Cabauw	51.97	4.93	10/20/40/80/140/200
Krammer	51.67	4.16	52.7/74.3/97.7/99.7
Lutjewad	53.40	6.35	60
Noordermeerdijk	52.77	5.60	73/97.5/115
OWEZ	52.61	4.42	21/70/116
Wieringermeer	52.82	5.08	80/108



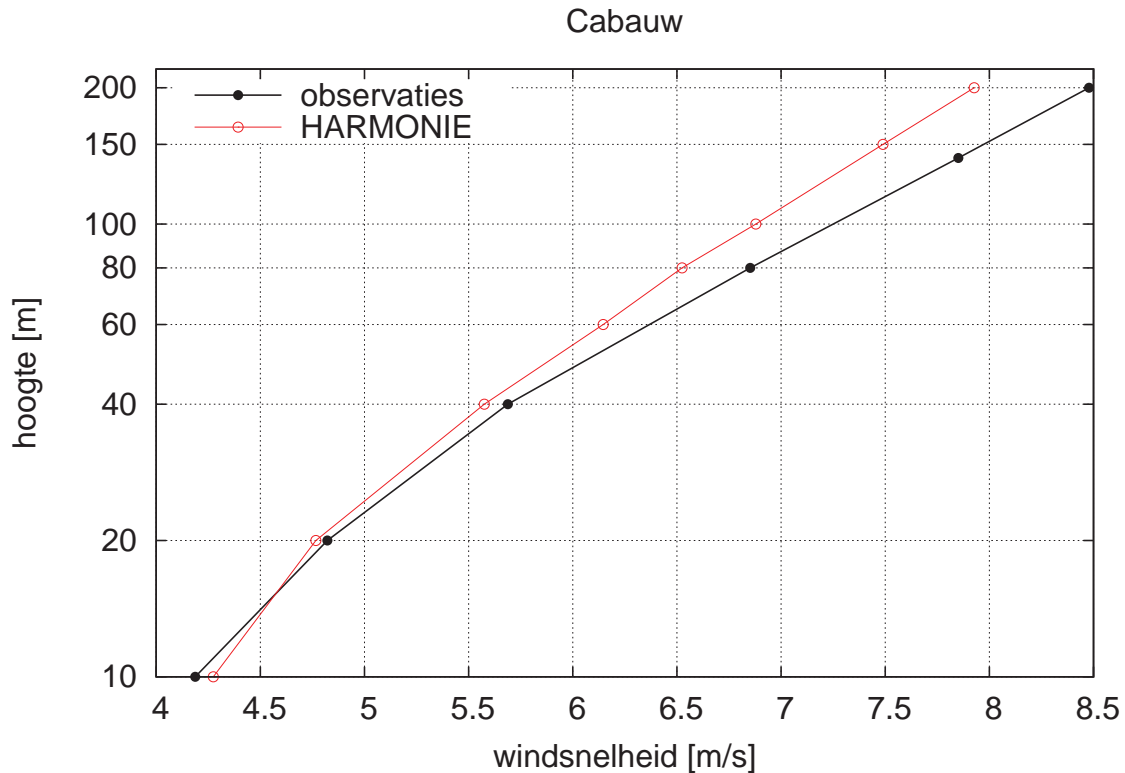
Figuur 4.1: Locaties van de gebruikte meetmasten. De zwarte puntjes geven het rekenrooster van HARMONIE aan, de rode punten het rekenrooster van ERA-Interim.

4.2 Profielen

4.2.1 Cabauw

Figuur 4.2 toont het verticale profiel van de gemiddelde windsnelheid over 2004-2013 voor HARMONIE (rood) en de observaties (zwart). De verticale as geeft de hoogte weer op een

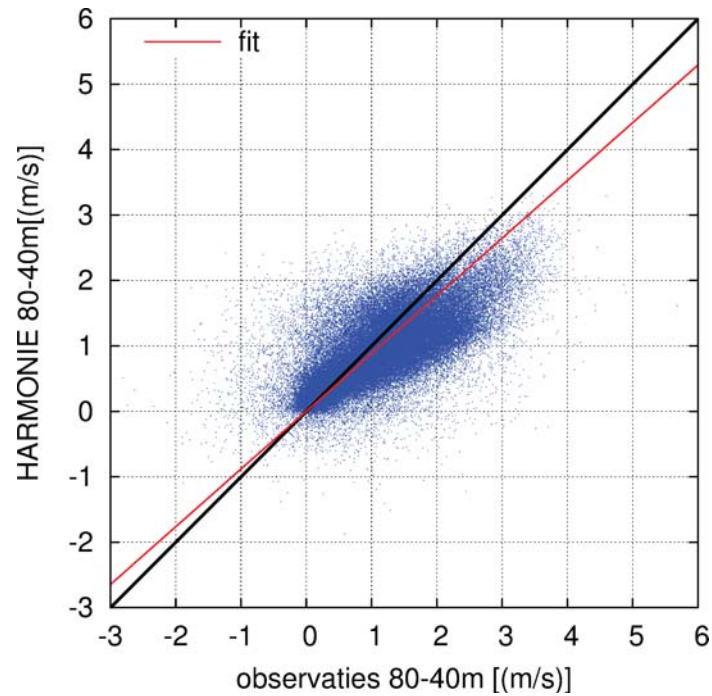
logaritmische as. Bij een logaritmisch windprofiel resulteert dit in een rechte lijn. Het logaritmische verband tussen de windsnelheid en de hoogte onder neutrale omstandigheden kan theoretisch afgeleid worden.



Figuur 4.2: Verticale profielen van de windsnelheid voor Cabauw gemiddelde over 2004-2013. Zwart: observaties, rood: HARMONIE.

Figuur 4.2 laat zien dat de windsnelheid boven ongeveer 20 m door HARMONIE onderschat wordt, en de 10 m windsnelheid wordt overschat. Dit wijst erop dat de verticale uitwisseling van impuls in HARMONIE wordt overschat: de impuls (en hiermee de kinetische energie, die weer gerelateerd is aan de windsnelheid) van de vrije atmosfeer wordt te veel doorgegeven aan de lagere luchtlagen, waardoor de stroming op grotere hoogte te veel afneemt. De verticale schering (engels: 'shear', dwz de verandering van de snelheid met de hoogte) wordt daarmee onderschat.

Figuur 4.3 laat de puntenwolk zien voor alle uurlijkse waarden van het waargenomen verschil tussen 80 en 40 meter hoogte ten opzichte van hetzelfde verschil voor HARMONIE. De figuur laat zien dat HARMONIE de schering met 15% onderschat.



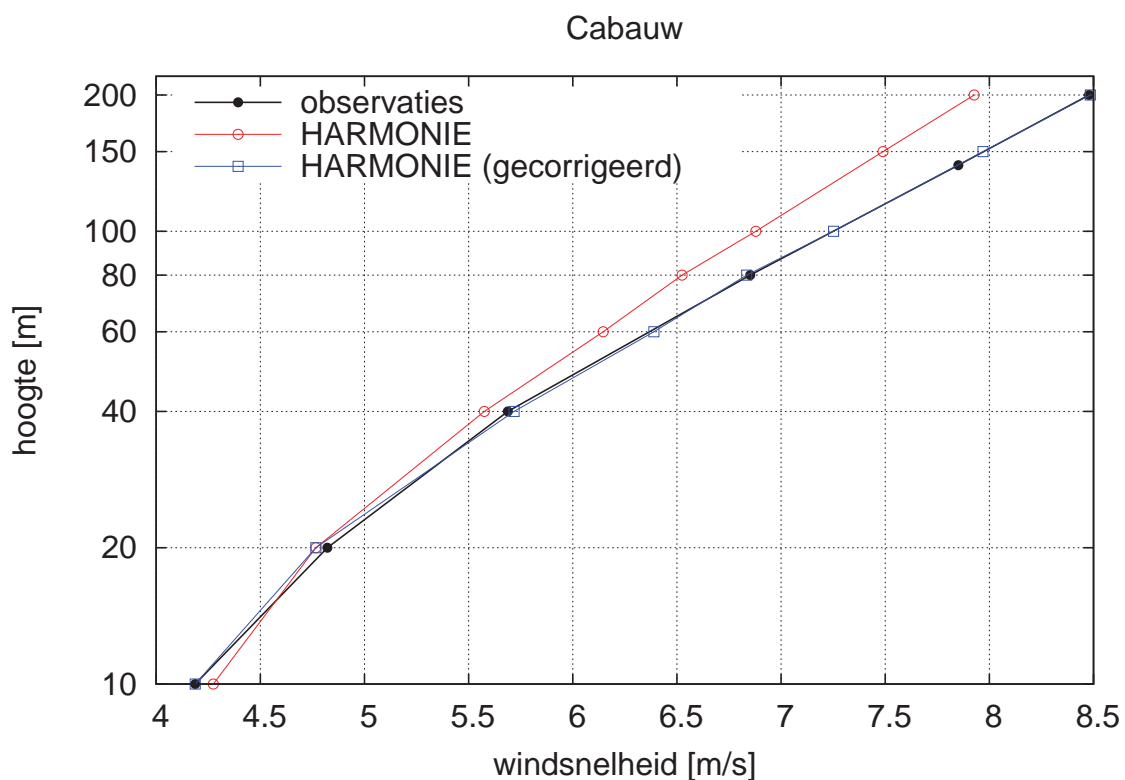
Figuur 4.3: Verband tussen het verschil in windsnelheid tussen 40 en 80 m voor HARMONIE en de observaties. De zwarte lijn geeft de een-op-een lijn aan, de rode lijn de fit met helling 0.85.

Door uit te gaan van de wind op 20 m hoogte, waarvoor HARMONIE nauwelijks afwijking vertoont ten opzichte van de observaties, kan voor elke tijdstap de windsnelheid op andere hoogten gecorrigeerd worden door het toepassen van de volgende correctie:

$$FF_{h,c} = FF_{20} + \frac{FF_h - FF_{20}}{0.85} \quad (4.1)$$

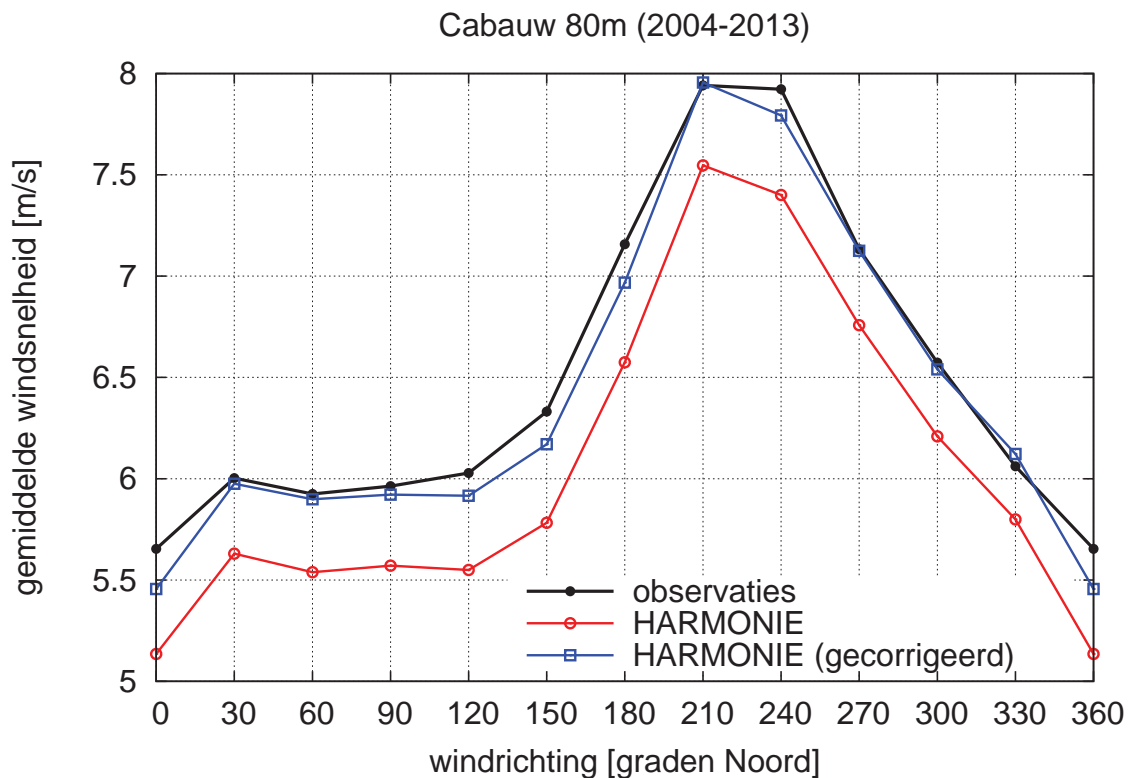
Hierin is FF_h de windsnelheid op hoogte h , en $FF_{h,c}$ de gecorrigeerde wind op hoogte h .

Het gecorrigeerde profiel van de windsnelheid voor Cabauw is weergegeven in Figuur 4.4 in blauw. Het laat zien dat deze eenvoudige correctie overeenstemming geeft tussen HARMONIE en de observaties in het gehele profiel.



Figuur 4.4: Verticale profielen van de windsnelheid voor Cabauw gemiddeld over 2004-2013. Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

Om te onderzoeken of de shear-correctie een algemene geldigheid heeft, zijn twee validaties uitgevoerd. Als eerste is onderzocht of de correctie geldig is voor de verschillende aanstroomrichtingen van Cabauw. Omdat de stroomopwaartse ruwheid varieert voor de verschillende sectoren, zal de geldigheid van de correctie voor de verschillende windrichtingen een indicatie zijn voor een algemenere geldigheid van de correctie.

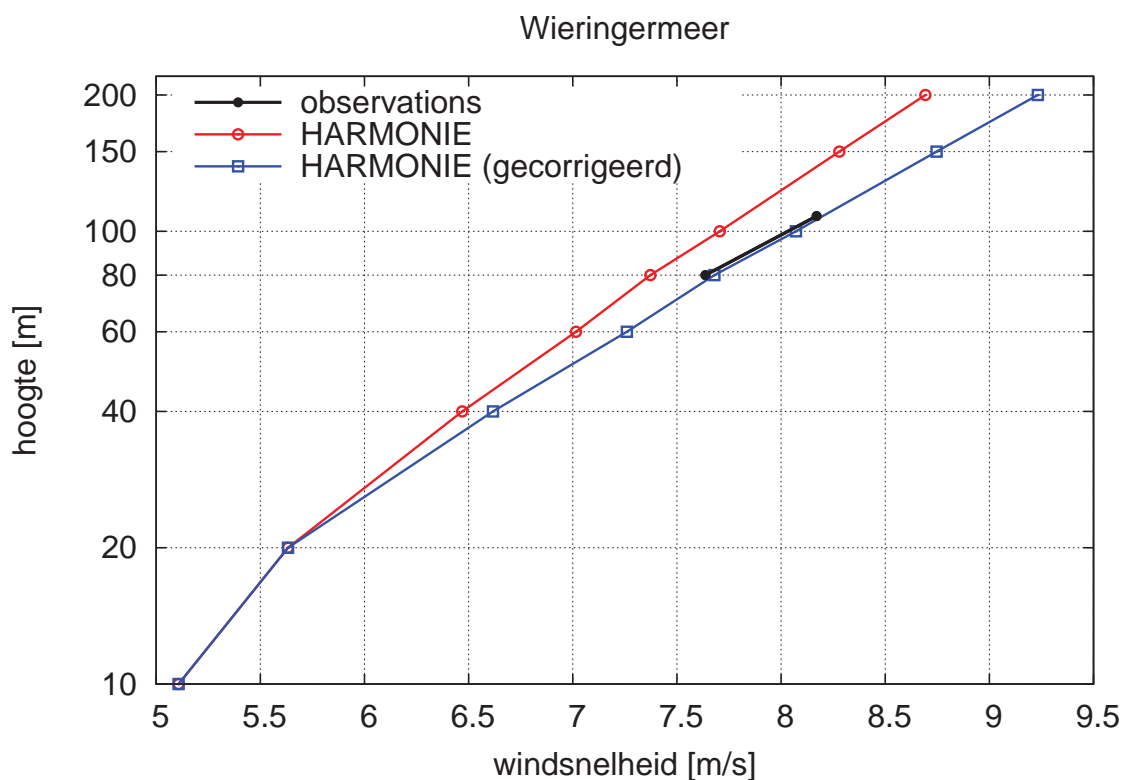


Figuur 4.5: Windrichtingsafhankelijke windsnelheid voor Cabauw (80 m, 2004-2013). Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

Figuur 4.5 laat zien dat de correctie voor alle windrichtingen tot een aanzienlijke afname van de afwijking leidt. De aanname dat de correctie gezocht moet worden in de verticale menging, en niet in de ruwheidskaart die HARMONIE gebruikt, wordt daarmee bevestigd.

4.2.2 Wieringermeer

Een tweede validatie is uitgevoerd door vergelijking 4.1 toe te passen op de HARMONIE tijdreeks van Wieringermeer. Figuur 4.6 laat de verticale profielen zien voor deze locatie.

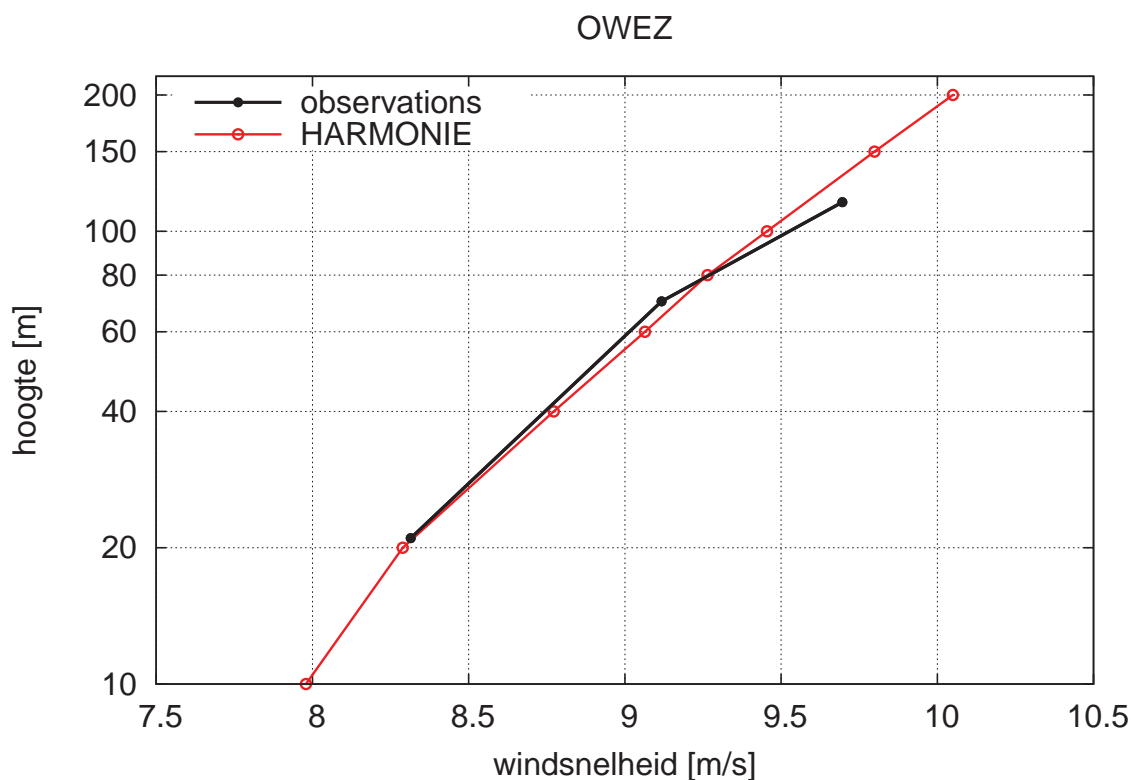


Figuur 4.6: Verticale profielen van de windsnelheid voor Wieringermeer gemiddeld over 2004-2013. Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

De uitstekende overeenkomst tussen het gecorrigeerde HARMONIE profiel en de observaties voor Wieringermeer is een tweede bevestiging van de aanname dat de shear-correctie een algemene geldigheid heeft boven land, en niet (sterk) plaatsafhankelijk is.

4.2.3 OWEZ

Figuur 4.7 laat de verticale profielen zien voor offshore windpark Egmond aan Zee (OWEZ), dat 10-18 km uit de kust ligt.



Figuur 4.7: Verticale profielen van de windsnelheid voor OWEZ gemiddeld over 2006-2010 . Zwart: observaties, rood: HARMONIE.

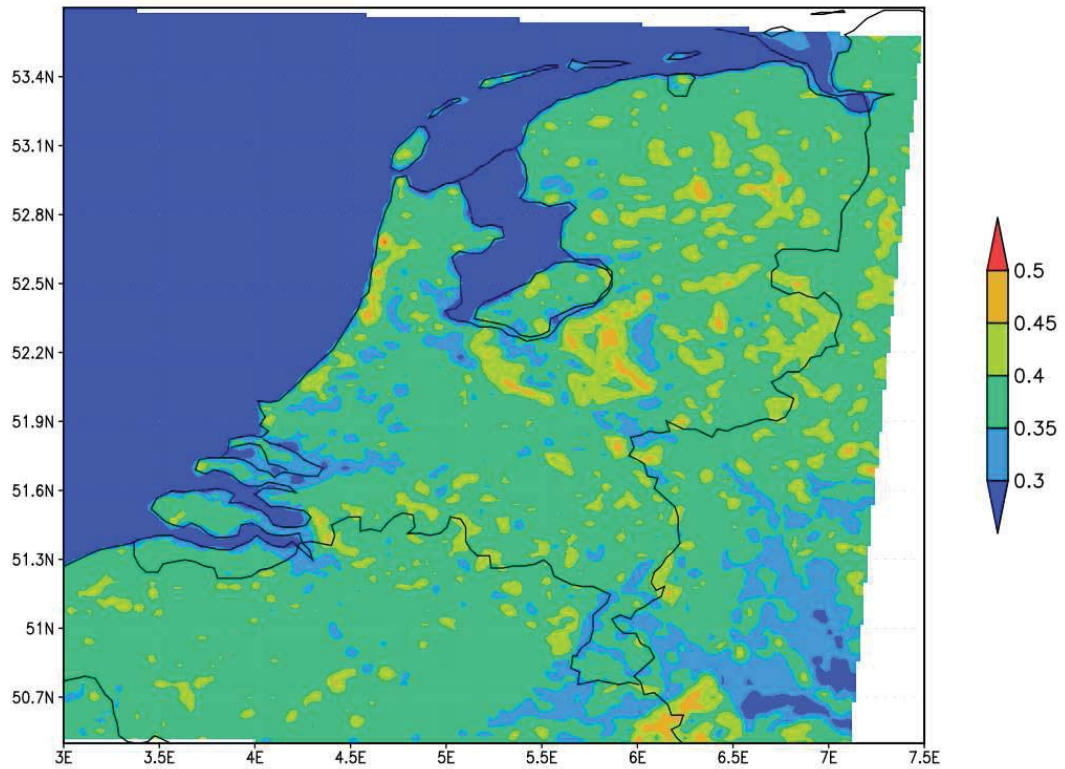
De goede overeenkomst tussen het HARMONIE profiel en de observaties voor OWEZ betekent dat boven zee geen shear-correctie noodzakelijk is. De kleine verschillen tussen observaties en HARMONIE hebben mogelijk te maken met verstoringen van het aanwezige windpark, dat niet door HARMONIE gemodelleerd wordt.

Op basis van OWEZ concluderen we dat vergelijking 4.1 alleen boven land toegepast dient te worden. Voor de roosterpunten die een deel land en een deel zee binnen hun roosterbox hebben wordt de correctie van vergelijking 4.1 vermenigvuldigd met de landfractie van het betreffende roosterpunt.

De overige meetmasten (Lutjewad, Krammer en Noordoostpolder) worden in Appendix A besproken omdat deze meetmasten niet lang genoeg gemeten hebben om correcties voor af te leiden, zich in de kuststrook bevinden, of niet op 100 m hoogte meten.

4.3 Toegepaste correctie

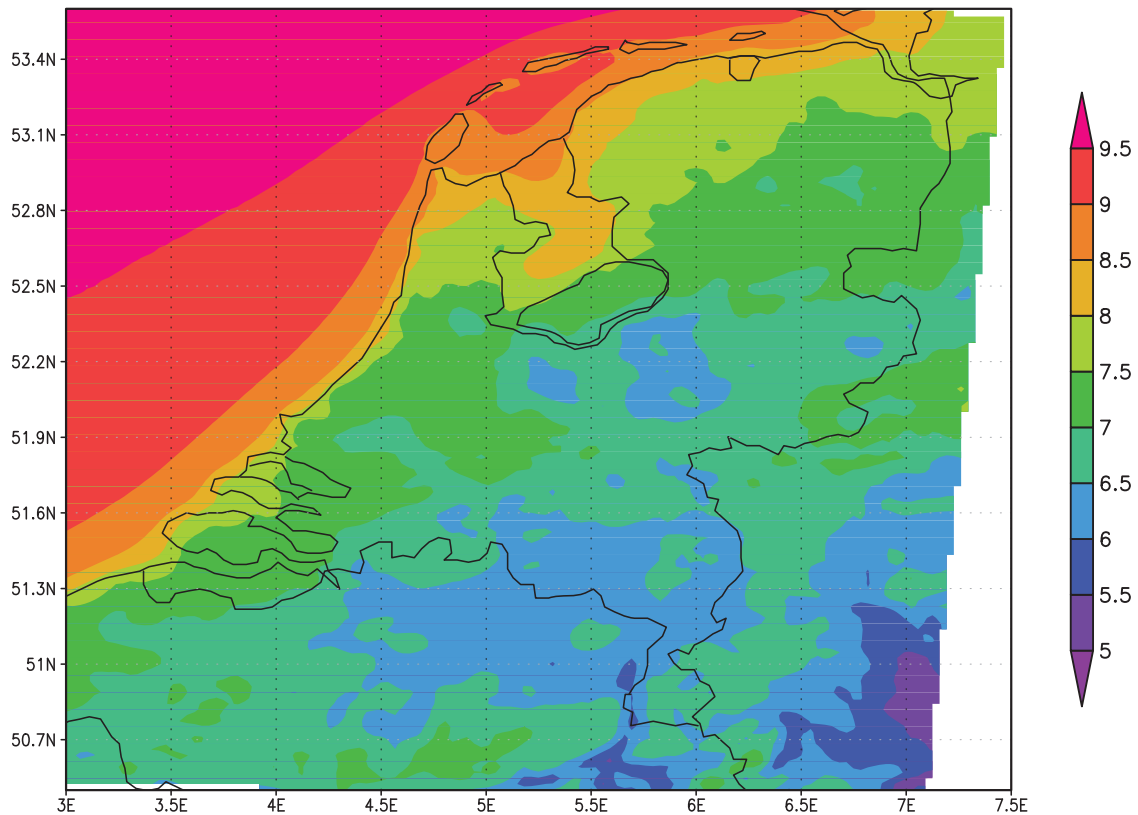
Figuur 4.8 geeft het effect de correctie van vergelijking 4.1 weer op de gemiddelde windsnelheid op 100 m hoogte. De correctie varieert (afhankelijk van de ruwheid) tussen de 0.3 en 0.5 m/s.



Figuur 4.8: Effect van de correctie van vergelijking 4.1 op de gemiddelde windsnelheid op 100 m hoogte voor het gebied rond Nederland.

4.4 windkaart

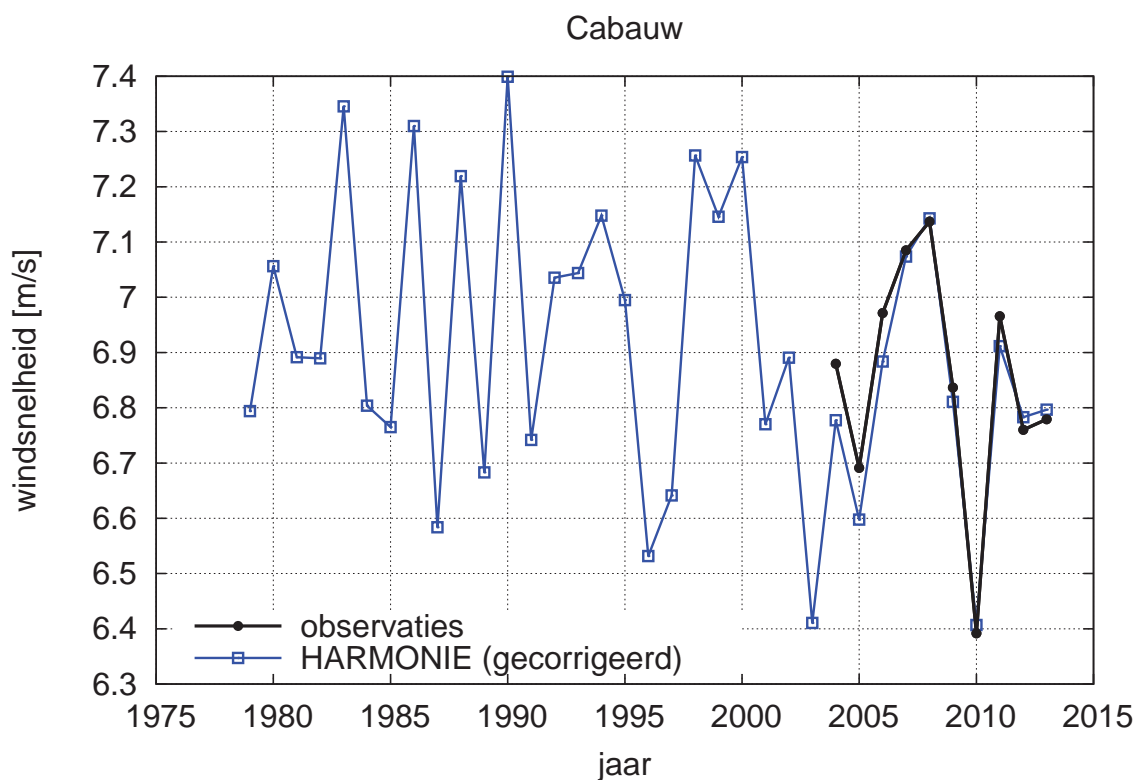
De beste schatting van de 2004-2013 gemiddelde windsnelheid op 100 m hoogte boven Nederland volgens HARMONIE is weergegeven in Figuur 4.9.



Figuur 4.9: Gemiddelde windsnelheid over 2004-2013 op 100 m hoogte boven Nederland volgens HARMONIE. De correctie van vergelijking 4.1 is hierin meegenomen.

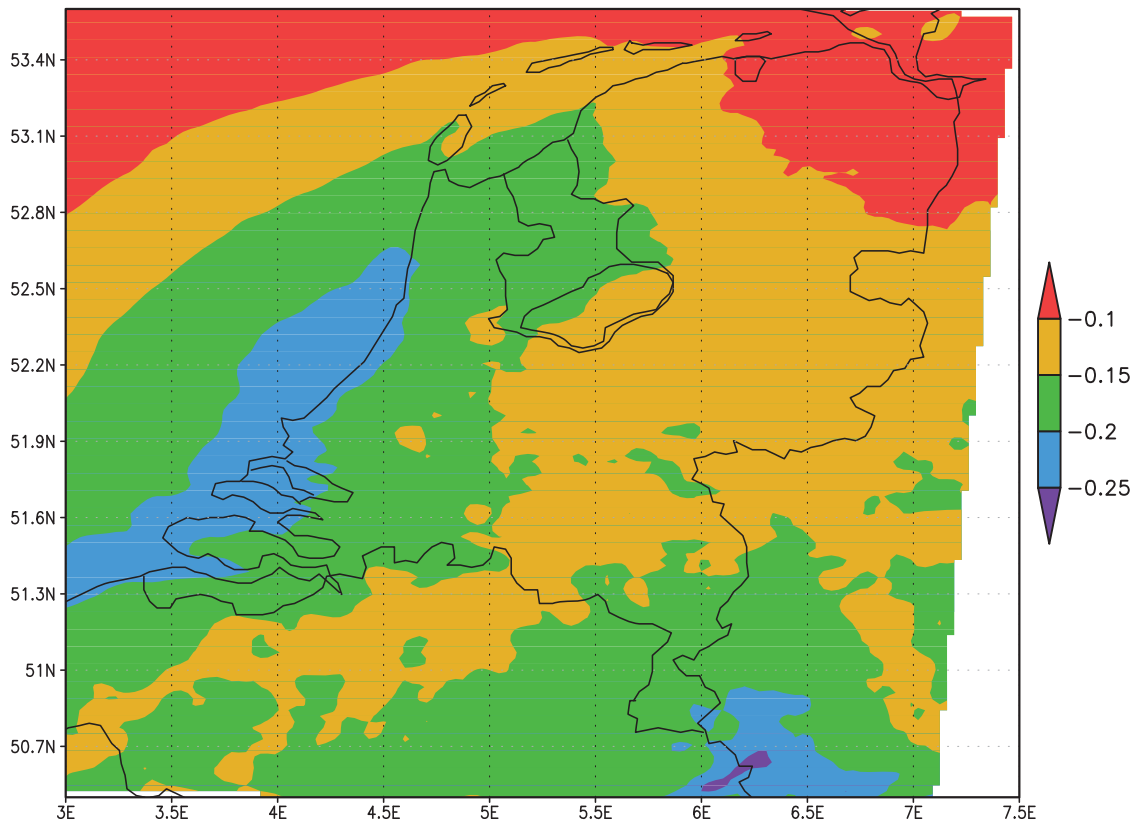
4.5 Jaarlijkse variaties

Figuur 4.10 laat voor de jaren 2004-2013 de jaargemiddelde wind op 80 m voor Cabauw zien. Gekozen is voor de 80 m wind, omdat voor dit niveau zowel observaties als HARMONIE waarden beschikbaar zijn. HARMONIE blijkt goed in staat te zijn om de jaar-op-jaar variabiliteit van het windklimaat te modelleren: na 2006 zijn de absolute verschillen in de jaargemiddelden kleiner dan 0.06 m/s; de grotere verschillen daarvoor zijn mogelijk het gevolg van de bouw van een nieuwe wijk in Lopik, of andere veranderingen in de omgevingsruwheid die niet verdisconteerd zijn in de ruwheidskaart die HARMONIE gebruikt heeft.



Figuur 4.10: Jaargemiddelde windsnelheid op 80 m hoogte voor Cabauw voor 2004-2013 op basis van de observaties (zwart) en de shear-gecorrigeerde HARMONIE waarden (blauw).

De gemiddelde wind over 2004-2013 is in Cabauw 0.09 m/s lager dan over de gehele periode 1979-2013, en 0.16 m/s lager dan over de periode die gebruikt was voor de SenterNovem/KEMA kaart (1983-2002). Het verschil voor heel Nederland is weergegeven in Figuur 4.11. De wind over 2004-2013 is over heel Nederland lager dan over 1983-2002, variërend van 0.1 m/s lager voor Noord-oost Nederland, tot 0.2 m/s lager in West Nederland.



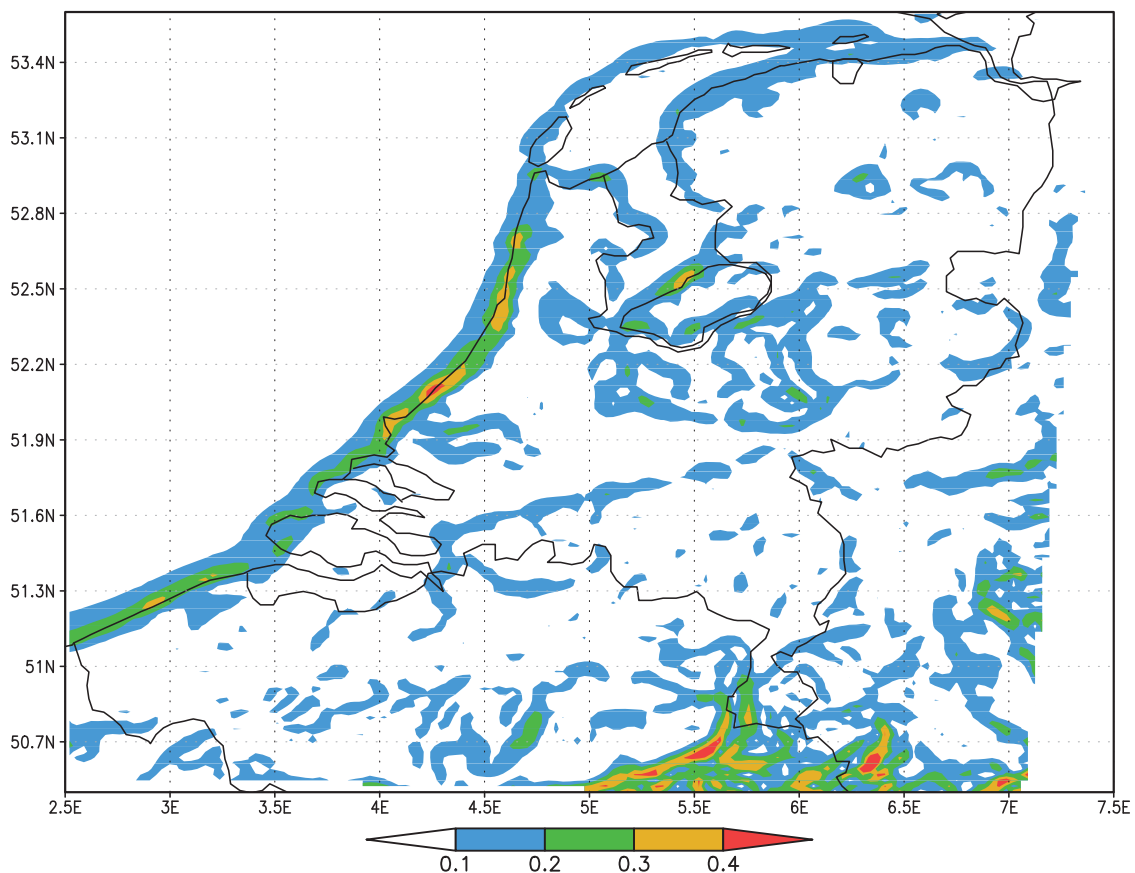
Figuur 4.11: Verschil in de gemiddelde windsnelheid op 100 m hoogte voor 2004-2013 ten opzichte van de periode 1983-2002, die gebruikt is voor de SenterNovem/KEMA kaart.

4.6 Nauwkeurigheid

Om de nauwkeurigheid van de windkaart te schatten, zijn de volgende onzekerheden beschouwd:

- **natuurlijke variabiliteit** De natuurlijke schommelingen in het klimaat bedragen ongeveer 0.3 m/s in de jaargemiddelden, en 0.1 m/s in de 10-jaargemiddelden.
- **overspeeding** Door de traagheid van de cup-anemometers kan er 'overspeeding' optreden, waardoor de cup na een vlaag harder gaat draaien dan behorend bij de windsnelheid. Dit effect bedraagt maximaal 0.1 m/s.
- **verloop in meetinstrumenten** Tussen twee ijkingen kan een meetinstrument verlopen, waardoor er een systematische fout van (maximaal) 0.1 m/s kan ontstaan.
- **verschil tussen meetinstrumenten** De afwijkingen tussen meetinstrumenten kan 0.1 m/s bedragen.
- **middelingsprocedure** Modellen berekenen de beide wind-componenten (oostwaartse component U en noordwaartse component V). Gemeten wordt echter de windsnelheid en -richting. Door middelingeffecten kan de windsnelheid van het model (maximaal) 0.1 m/s lager uitvallen.

- **verandering in ruwheid** In HARMONIE is een constante landgebruiksk kaart gebruikt voor de gehele periode. In werkelijkheid is de ruwheid rond meetmasten variabel in de tijd, o.a. door groei van vegetatie, bebouwing, of verandering in landgebruik. Het geschatte effect op de windsnelheid is (maximaal) 0.1 m/s voor de afgelopen 10 jaar.
- **grootte van HARMONIE roosterbox** Door de roosterpuntsafstand van 2.5 km in HARMONIE worden variaties in ruwheid binnen 2.5 km niet meegenomen. Figuur 4.12 geeft een schatting van dit effect door de variatie van de gemiddelde wind over een afstand van 2.5 km weer te geven. Vooral bij land-zee overgangen kan dit effect oplopen tot 0.4 m/s. Buiten het kustgebied is het effect kleiner dan 0.2 m/s. Een deel van de variatie kan ondervangen worden door niet het dichtstbijzijnde roosterpunt van HARMONIE te nemen, maar te interpoleren naar de locatie van de meetmast. Geschat wordt dat daarmee de onzekerheid van de resolutie buiten het kustgebied (maximaal) 0.1 m/s bedraagt.
- **verloop in HARMONIE verwachting** Omdat HARMONIE steeds een 6-uurlijkse verwachting maakt voordat nieuwe informatie uit ERA-Interim wordt aangeboden, is de gemiddelde wind op +1 uur anders dan op +6 uur. Dit effect is ongeveer 0.1 m/s.



Figuur 4.12: Variaties in de 2004-2013 gemiddelde windsnelheid tussen naastgelegen roosterpunten met een onderlinge afstand van 2.5 km.

Een ruwe schatting van de totale onzekerheid Δ wordt verkregen door alle bovengenoemde onzekerheden δ_i als onafhankelijk te beschouwen:

$$\Delta^2 \approx \sum_i \delta_i^2 \quad (4.2)$$

Als alle acht bovengenoemde onzekerheden afgeschat worden op 0.1 m/s, komt de totale onzekerheid uit op (afgerond) 0.3 m/s.

5 Conclusies

De volgende conclusies over de windkaart op 100 m hoogte boven Nederland op basis van HARMONIE worden getrokken:

- HARMONIE onderschat de wind boven land op 100 m hoogte met 0.3-0.5 m/s. Deze onderschatting heeft te maken met een overschatting van de verticale uitwisseling, waardoor de schering (Engels: 'shear') gemiddeld 15% te laag is.
- Boven zee heeft HARMONIE geen systematische onder- of overschatting van het windprofiel.
- Correctie van de shear met 15% levert een vertikaal profiel op voor meetmast Cabauw die boven 20 m hoogte vrijwel zonder systematische afwijking is ten opzichte van de observaties over de periode 2004-2013. Ook de windrichtingsafhankelijke windsnelheid voor Cabauw voor HARMONIE komt overeen met de observaties. Dit bevestigt dat de shear-correctie geldig is voor heel het binnenland van Nederland.
- Validatie met meetmast Wieringermeer laat zien dat ook hier de (gecorrigeerde) HARMONIE klimatologie een goede overeenstemming met de waarnemingen geeft.
- In de kustgebieden, waarin er een overgang is van ongecorrigeerde zee-wind naar gecorrigeerde land-wind, laat HARMONIE afwijkingen zien met observaties van maximaal 0.3 m/s. Naast de land-zee overgang speelt hierin de sterke gradient in de wind over de HARMONIE roosterpuntsafstand van 2.5 km een rol.
- De nauwkeurigheid van de windkaart wordt geschat op ± 0.3 m/s. Dit getal wordt in gelijke mate bepaald door onvolkomenheden in zowel het model als in de waarnemingen.
- De gemiddelde wind in de gebruikte laatste 10 jaar (2004-2013) is (varierend over Nederland) 0.1-0.2 m/s lager dan over de periode die gebruikt is voor de SenterNovem/KEMA kaart (1983-2002).

Dankwoord

Wij zijn Windunie, NOP Agrowind, Windpark Krammer B.V., Rijksuniversiteit Groningen, Energieonderzoek Centrum Nederland, Eneco, Enercon en Ecofys zeer erkentelijk voor het beschikbaar stellen van hun meetgegevens.

Ook bedanken wij Johannes van Steenis (RVO) en Anne-Marie Taris (DNV-GL) voor hun waardevolle commentaar op een concept van dit rapport.

Referenties

- Dee, D.P., Uppala, S.M, Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., and van de Berg, L. 2011. 'The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.', *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553597.
- Masson, V., Champeaux, J.L., Chauvin, F., Meriguet, C., and Lacaze, R. 2003. 'A global dataset of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models.', *Journal of Climate*, **16**, 1261–1282.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V. 2011. 'The arôme-france convective-scale operational model', *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 976–991.
- van den Brink, H.W., Baas, P., and Burgers, G. 2013. 'Towards an approved model set-up for HARMONIE Contribution to WP 1 of the SBW-HB Wind modeling.', Technical report KNMI.
- Weill, A., Eymard, L., Caniaux, G., Hauser, D., Planton, S., Dupuis, H., Brut, A., Guerin, C., Nacass, P., Butet, A., Cloche, S., Pedreros, R., Durand, P., Bourras, D., Goirdani, H., Lachaud, G., and Bouhours, G. 2003. 'Toward a better determination of turbulent airsea fluxes from several experiments', *Journal of Climate*, **16**, 600–618.

A Aanvullende meetmasten

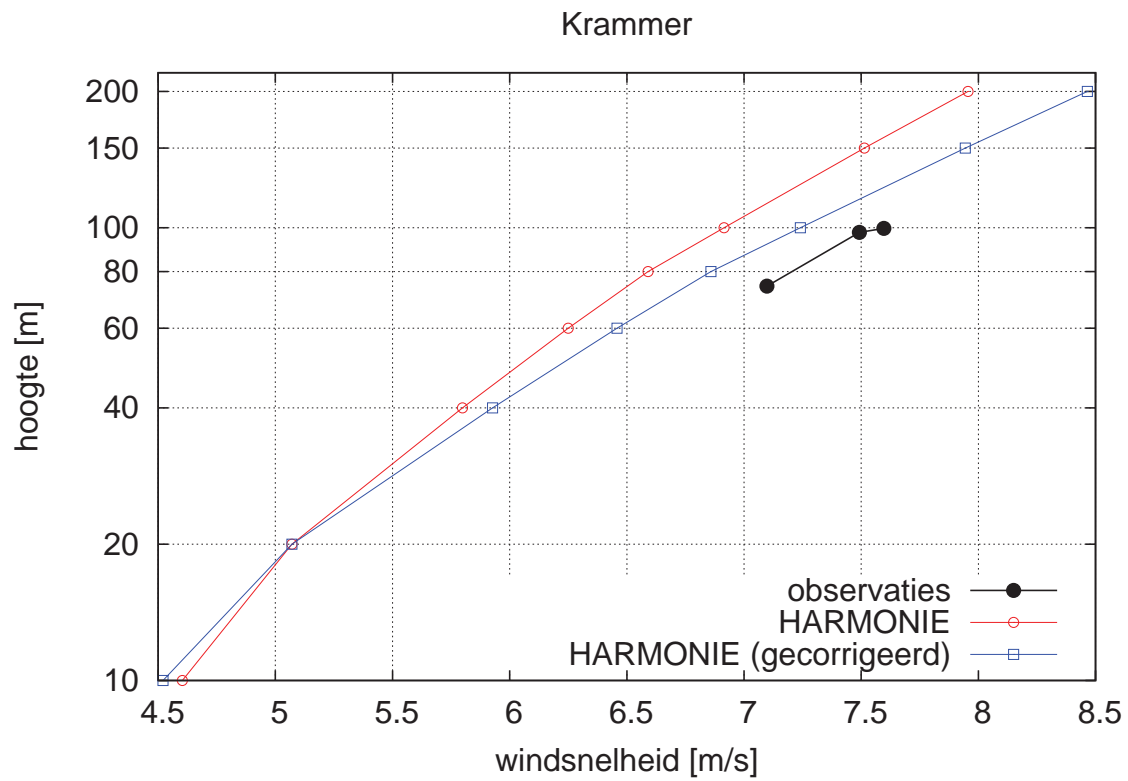
In deze Appendix worden de verticale profielen van Noordermeerdijk, Lutjewad, en Krammer getoond.

De afwijkingen van HARMONIE ten opzichte van de metingen voor voor alle gebruikte meetmasten zijn samengevat in Tabel A.1. De metingen zijn geïnterpoleerd naar 100 m, behalve voor Lutjewad, waar alleen op 60 m hoogte wordt gemeten.

Tabel A.1: Afwijkingen van HARMONIE ten opzichte van de metingen op 100 m hoogte

Naam	HARMONIE	HARMONIE (gecorrigeerd)
Cabauw	-0.37	0.00
Krammer	-0.68	-0.36
Lutjewad (60 m)	-0.33	-0.10
Noordermeerdijk	-0.37	-0.06
OWEZ	-0.07	-0.07
Wieringermeer	-0.33	0.04

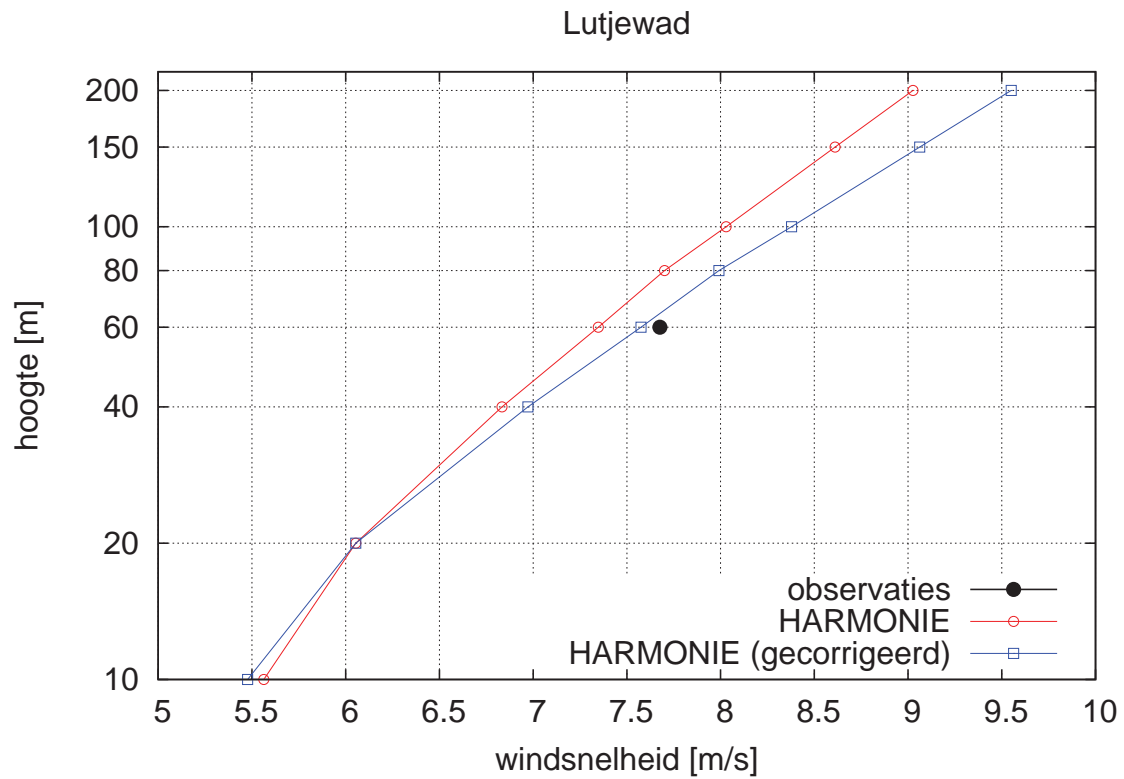
A.1 Krammer



Figuur A.1: Verticale profielen van de windsnelheid voor Krammer gemiddeld over Februari 2012 tm December 2013. Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

De onderschatting van ongeveer 0.3 m/s heeft vermoedelijk te maken met de complexe land-water overgangen rondom de locatie die niet nauwkeurig genoeg gerepresenteerd worden in de 2.5 km resolutie van HARMONIE.

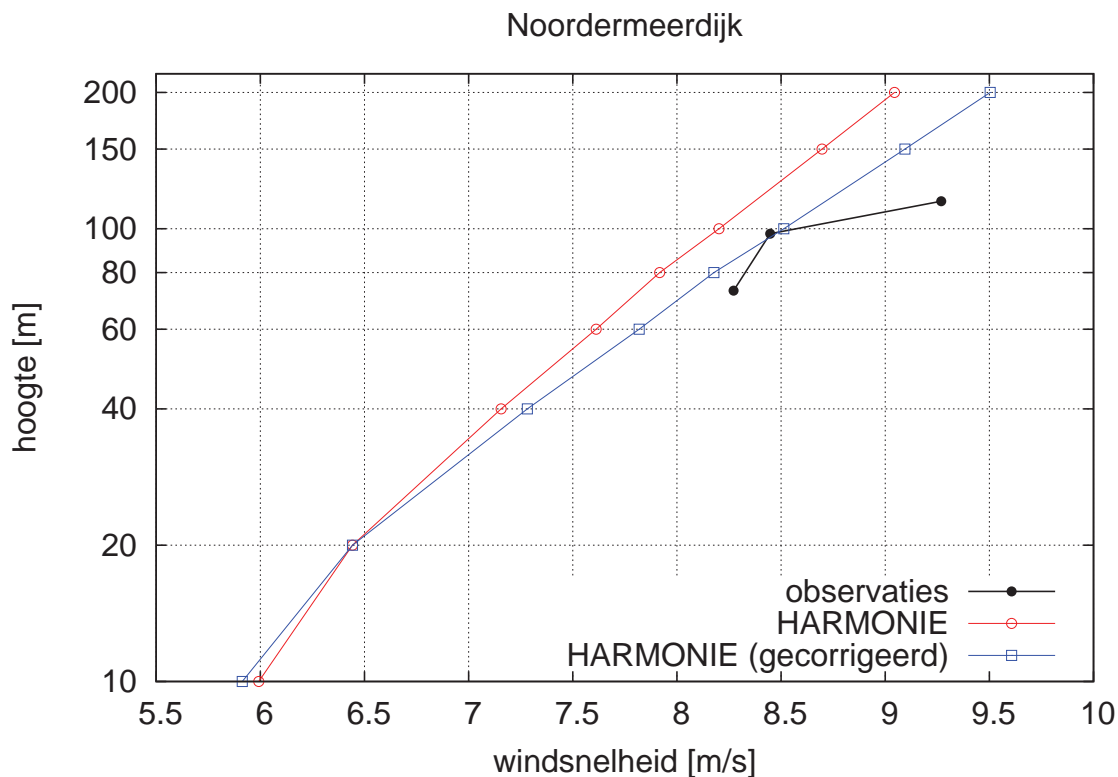
A.2 Lutjewad



Figuur A.2: Verticale profielen van de windsnelheid voor Lutjewad gemiddeld over 2004-2013. Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

Figuur A.2 laat zien dat het gecorrigeerde HARMONIE gemiddelde slechts 0.1 m/s lager is dan de observaties. Deze onderschatting ligt binnen de meetnauwkeurigheid van de observaties.

A.3 Noordermeerdijk



Figuur A.3: Verticale profielen van de windsnelheid voor Noordermeerdijk gemiddeld over September 2007 tot September 2008. Zwart: observaties, rood: HARMONIE, blauw: HARMONIE gecorrigeerd met vergelijking 4.1.

Figuur A.3 laat zien dat het gecorrigeerde HARMONIE gemiddelde goed overeenkomt met de observaties op 97.5 m, maar minder goed op de andere hoogten. Het grote verschil van 0.8 m/s tussen 115 en 97.5 m hoogte is een aanwijzing dat er onduidelijkheid is over de nauwkeurigheid en/of de representativiteit van de metingen. Detailanalyse heeft laten zien dat met name in mei 2008 het windsnelheidsverschil tussen deze twee hoogten zeer groot was. Dit verschil is gelieerd aan het optreden van low level jets - een fenomeen dat door HARMONIE niet volledig wordt gerepresenteerd.

Verder onderzoek naar dit ongewone verschil in windsnelheid valt buiten het bestek van dit rapport.

