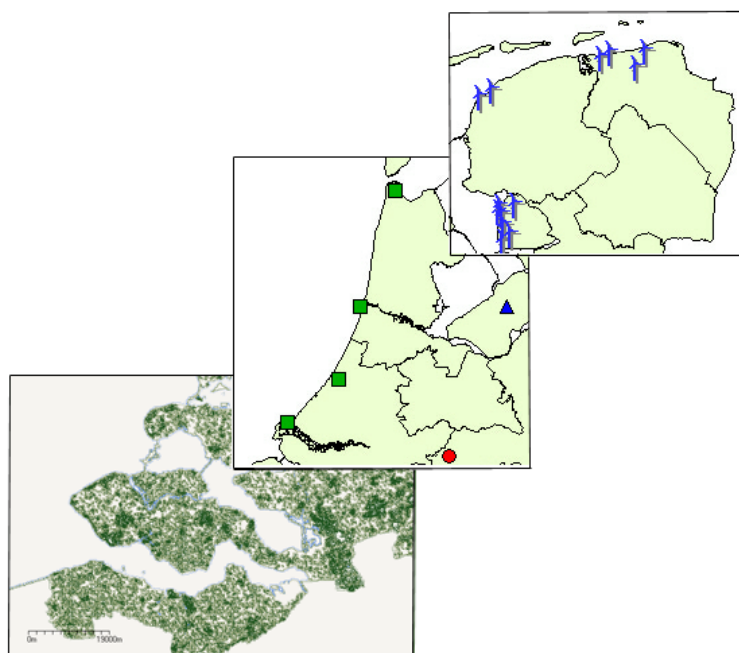


WINDSNELHEDEN EN RUWHEDEN – VERANTWOORDING



J P Coelingh
E Holtslag
J Verkaik (KNMI)
J W Cleijne (KEMA)

oktober 2002
E60065

in opdracht van:
Novem 224.312-0004

Voorwoord

Voor het ter beschikking stellen van de informatie gaat onze dank uit naar de volgende instanties:

- Alterra (voorheen Staring Centrum) uit Wageningen voor het gebruik van LGN3+.
- KNMI voor het ter beschikking stellen van de windsnelheidsgegevens.
- KEMA voor het gebruik van gegevens uit de Windmonitor.

Daarnaast heeft KNMI inhoudelijke kennis ingebracht die is opgebouwd in het HYDRA-project.

De informatie over ruwheden en windsnelheden voor windenergietoepassingen is ter beschikking gekomen door een project gefinancierd door NOVEM (224.312-0004). Het project is uitgevoerd door Ecofys met als subcontractanten KEMA en KNMI. Deze informatie is ook te vinden op de CD van NOVEM (“Met de wind in de rug”) en op de KNMI-website: <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/4wasp/>.

In het parallel verschenen rapport ‘Handleiding’ wordt uitgelegd hoe met de hier genoemde methode gewerkt kan worden, welke invoer gegevens nodig zijn en wat de resultaten hiervan zullen zijn.

Summary

In the practice of developing wind energy projects, the economic feasibility is studied. An important aspect is the estimation of the long-term mean electricity production. To assess these, oftenly yield calculations are being made. With a suitable software package (often WAsP or derived packages) and reliable input data a sufficiently good estimate can be obtained. Apart from technical data of the wind turbines, two types of data are needed: area roughnesses and reference wind speeds. On the basis of a land use data base (LGN3+) of Alterra it is possible to make roughness maps for The Netherlands with a resolution of $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. These maps are directly suitable for use within WAsP.

Furthermore, the KNMI has made available long-term wind speed information of a number of meteo stations also directly usable in WAsP.

The “Verantwoording” deals with the realization of the information. Also, several steps have been undertaken to verify this. In the “Handleiding” it is outlined how the user can obtain and use the information. All files and this information can also be found on the website: <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/4WAsP/>.

Samenvatting

In de praktijk van het ontwikkelen van windenergieprojecten wordt de economische haalbaarheid onderzocht. Een belangrijk aspect daarbij is de schatting van de gemiddelde langjarige electriciteitsproductie. Voor de bepaling hiervan worden vaak opbrengstberekeningen gedaan. Met een geschikt softwarepakket (vaak WAsP of daarvan afgeleide pakketten) en goede invoergegevens kan een voldoende goede schatting worden verkregen. Naast technische gegevens van de windturbines zijn twee typen gegevens benodigd: omgevingsruwheden en referentiewindsnelheden.

Op basis van een grondgebruiksbestand (LGN3+) van Alterra is het mogelijk ruwhedekaarten voor Nederland te maken met een resolutie van $100\text{ m} \times 100\text{ m}$. Deze kaarten zijn direct geschikt voor gebruik met WAsP.

Daarnaast is door het KNMI langjarige windsnelheidsinformatie beschikbaar gemaakt van een aantal meteostations die ook direct bruikbaar is in WAsP.

De “Verantwoording” gaat in op de totstandkoming van de informatie. Tevens is een aantal stappen ondernomen om deze te verifiëren. In de “Handleiding” staat aangegeven op welke wijze de gebruiker de informatie kan verkrijgen en gebruiken. Alle bestanden en deze informatie kunnen tevens gevonden worden op de website: <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/4wasp/>.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.1	Bepaling windaanbod	1
1.2	Gebruik WAsP	2
1.2.1	Windsnelheidsdata	2
1.2.2	Omgevingsbeschrijving	2
1.2.3	Technische specificaties	2
1.3	Doel	3
1.4	Opzet	3
2	Ruwheidskaart	4
2.1	LGN3+	4
2.2	Middeling	4
2.3	Ruwheidskaarten maken	5
2.4	Discussie	5
3	Windsnelheden	7
3.1	Windmetingen	7
3.2	Schoning windsnelheidsinformatie	8
3.3	Selectie windstations	9
4	Opbrengsten windturbines	10
5	Verificatie	13
5.1	Controle op consistentie	13
5.2	Verificatie met meteostations	14
5.2.1	West	14
5.2.2	Noord+Oost	15
5.2.3	Zuid+Oost	15
5.3	Verificatie met windturbineopbrengsten	16

6 Conclusies	17
Referenties	18
Bijlage: Overzicht klassen LGN3+	19

1 Inleiding

1.1 Kader

De toepassing van windenergie is voor de Nederlandse overheid een van de speerpunten voor het behalen van de doelstelling om 10% van de energievoorziening in 2020 met duurzame bronnen te realiseren. Daartoe is een convenant afgesloten (BLOW) tussen de lokale en de nationale overheid voor de plaatsing van 1.500 MW in 2020 op land (naast een aanzienlijke doelstelling voor windenergie op zee). Op dit moment (medio 2002) is ca. 600 MW gerealiseerd en meer dan 100 MW in voorbereiding. Daaruit volgt dat zeker de helft van de doelstelling door middel van toekomstige projecten gerealiseerd zal moeten gaan worden. Aangezien alleen vooraf rendabel geachte projecten gerealiseerd zullen worden dient daar inzicht in verkregen te worden.

Voor het bepalen van de financieel-economische haalbaarheid van een windproject is het belangrijk de kosten en baten vooraf goed in te schatten. De kosten volgen uit de investeringskosten en een aantal lopende kosten. De baten bestaan uit de opbrengsten (in kWh) van de windturbines maal de vergoeding per geleverde kWh die daarvoor verkregen wordt. Een essentiële factor in de bepaling van de elektriciteitsproductie van een gepland windpark is het windaanbod. Daarnaast spelen de technische specificaties van de windturbine(s) een rol. Deze laatste zijn meestal bekend via de fabrikant. De bepaling van het windaanbod is minder eenvoudig.

1.1 Bepaling windaanbod

Met de term 'windaanbod' wordt hier bedoeld de langjarige toekomstige gemiddelde windsnelheid op ashoogte op de beoogde locatie. Dit is namelijk de bepalende factor voor de exploitatieopzet van een te bouwen windturbine. Er moet inzicht zijn in de toekomstig te verwachten kosten én baten voor het kunnen maken van de investeringsbeslissing. Hier is al een probleem aangestipt: gevraagd wordt een prognose voor de toekomst te maken (10 jaar vooruit), terwijl in het algemeen bestaande gegevens gebruikt zullen worden.

In de praktijk zijn er voor haalbaarheidsstudies verschillende methodes waarop het windaanbod bepaald wordt. De eerste is door het uitvoeren van windmetingen. Dit is vooral aan de orde voor locaties waar weinig over bekend is, of die gekarakteriseerd kunnen worden als complex terrein (bergachtig, veel hoogteverschil). De tweede is door het uitvoeren van berekeningen. Bij relatief simpel terrein (zoals in Nederland) en beschikbaarheid van voldoende informatie zijn er rekenmodellen voorhanden waarbij het windaanbod en de elektriciteitsproductie van een windpark bepaald kunnen worden. Op deze laatste methode wordt hier verder ingegaan.

1.2 Gebruik WAsP

Voor windenergietoepassingen zijn verschillende softwarepakketten beschikbaar waarmee opbrengstberekeningen kunnen worden gedaan. Een daarvan is WAsP van het Deense instituut Risø, dat gebaseerd is op de Europese Windatlas [4]¹. Dit is het eerste en (waarschijnlijk) meest gebruikte pakket wereldwijd.

WAsP en ook de andere programma's kennen een structuur die min of meer hetzelfde is. Deze bestaat uit een rekenmodule waarvan de kern gevormd wordt door formules afkomstig uit de grenslaagmeteorologie. Deze formules beschrijven het windveld als functie van de plaats en de hoogte. Vervolgens is het mogelijk om hier de opbrengst van een windturbine (of een windpark) mee te berekenen. Als invoer zijn in het algemeen drie typen invoergegevens benodigd, die hieronder kort besproken zullen worden.

1.2.1 Windsnelheidsdata

Basis voor een goede berekening is op z'n minst één goede set van windsnelheden op een referentielocatie. Aangezien de klimatologische variaties in jaargemiddelde windsnelheden aanzienlijk zijn, is het nodig om gegevens te hebben van een voldoende lange periode. Van jaar tot jaar kan het gemiddelde tussen 5% en 10% afwijken van het langjarig (klimatologisch) gemiddelde, hetgeen betekent dat de opbrengst van een windpark tussen de 10% en de 20% afwijkt. Naast de gemiddelde windsnelheid is ook de frekwentieverdeling van de windsnelheid van belang, evenals de windrichting. De basisinformatie bestaat uit een tijdreeks van (uurlijkse) waarden voor windsnelheid en windrichting. Van daar dat het van essentieel belang is dat deze informatie voldoende betrouwbaar en nauwkeurig is.

1.2.2 Omgevingsbeschrijving

De beschrijving van het windveld op een locatie hangt sterk af van de omgeving. Op grotere hoogte (ca. 1 km) heerst de zgn. vrij wind (of geostrofe wind) die niet direct afhangt van het aardoppervlak. Echter, hoe dichterbij de grond, hoe meer de wind afgeremd wordt ten gevolge van de wrijving met het aardoppervlak. De mate van wrijving hangt sterk af van de ruwheid, deze wordt uitgedrukt in de zgn ruwheidslengte.

Naast de ruwheid kunnen obstakels een rol spelen. Door de aanwezigheid van nabijgelegen objecten zoals gebouwen en bomenrijen kan er een significante verstoring van de aanstroming van de wind optreden. Tenslotte kunnen van belang zijn eventuele hoogteverschillen (in het grootste deel van Nederland niet van toepassing).

1.2.3 Technische specificaties

Op basis van bovenstaande typen gegevens is WAsP in staat het windveld te beschrijven op een willekeurige locatie. Vervolgens zijn de technische gegevens van de windturbine nodig om de elektriciteitsproductie te berekenen. Allereerst gaat het om de ashoogte waarvoor de windsnelheid moet worden berekend. Dan geeft de vermogenskarakteristiek of Pv-curve de relatie tussen de windsnelheid en het geleverde vermogen. Door te sommeren over een jaar volgt hieruit de jaarproductie.

¹ dit boekwerk is het resultaat van een samenwerkingsproject van een groot aantal Europese instituten gesubsidieerd door de Europese Commissie.

In het geval er sprake is van meerdere windturbines in een parkopstelling kunnen er zog-
effecten optreden (ook wel parkeffect genaamd). Dit is het effect van onderlinge beïnvloeding. Dit effect kan ook berekend worden, en bedraagt in de meeste gevallen niet meer dan enkele procenten op jaarbasis.

1.3 Doel

Om goede opbrengstberekeningen voor windturbines in Nederland te kunnen maken heeft een gebruiker zoals hierboven uiteengezet in de praktijk in het algemeen vier elementen nodig: een model, de technische specificaties van de windturbines, windsnelheidsinformatie en een omgevingsbeschrijving. Ten aanzien van het gebruik van een model zoals WAsP is over het algemeen weinig discussie. Zoals met alle modellen is het een vereenvoudigde beschrijving van de werkelijkheid, maar in dit kader stellen we dat niet ter discussie. WAsP heeft een eenduidige handleiding en is inhoudelijk beschreven in de Europese Windatlas. Het heeft zich bewezen in de praktijk en kent vele gebruikers. De technische specificaties van de windturbines, met name de Pv-curve, worden volgens vastgestelde normen gemeten dan wel berekend. Ook daar is wel discussie over mogelijk, maar dat voert in dit verband te ver. Hier richten we ons op de laatste twee elementen: windsnelheidsinformatie en omgevingsbeschrijving.

Bij het KNMI is veel informatie beschikbaar in de vorm van windsnelheidsmetingen op de diverse meteorologische stations. Echter, door veranderingen in de opstelling, de directe omgeving of de wijze van verwerken van de gegevens is het niet zonder meer mogelijk deze windsnelheidsinformatie te gebruiken.

Tevens is recent informatie beschikbaar gekomen over de ruwheden van heel Nederland. De basis hiervoor is een bestand van het grondgebruik in Nederland genaamd LGN3+, samengesteld door het Wageningse instituut Alterra. Op grond hiervan is het mogelijk kaarten te maken met informatie over ruwheidslengtes door middel van omrekening van de gebruiksklassen.

Om de relevante informatie geschikt en beschikbaar te maken voor windenergieoepassing ten behoeve van de gebruiker, is een aantal werkzaamheden uitgevoerd zoals hieronder beschreven.

1.4 Opzet

Allereerst gaan we in op de ruwheidskaart (voor Nederland) zoals deze uit LGN3+ kan worden gemaakt. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de windsnelheidsdata zoals die zijn geselecteerd. Aangezien het erom gaat dat deze informatie geschikt is voor het maken van opbrengstberekeningen (met WAsP) zijn vervolgens verificatieberekeningen uitgevoerd. Ten eerste zijn berekeningen gedaan van het ene station naar het andere om te kijken of berekende windsnelheden overeenkomen met gemeten windsnelheden. Ten tweede is voor een geselecteerde set van windturbines (of windparken) waarvan opbrengsten beschikbaar zijn ook een vergelijking gemaakt met berekende opbrengsten.

Op grond hiervan worden de eindresultaten geproduceerd en gepresenteerd aan de gebruikers. Voor de concrete stappen om de resultaten te verkrijgen wordt verwezen naar de Handleiding.

2 Ruwheidskaart

2.1 LGN3+

De basis voor de ruwheidskaart is het LandGebruiksbestand Nederland (LGN3+) van het Wageningse instituut Alterra (voorheen Staring Centrum). Dit bestand bestaat uit informatie over landgebruiksklassen op een resolutie van $25\text{ m} \times 25\text{ m}$. Er zijn meer dan 40 landgebruikstypes gedefinieerd, waarbij het vooral gaat om type gewas. Voor ieder van deze klassen wordt een corresponderende ruwheidslengte z_0 gedefinieerd. In het algemeen worden ruwheidslengtes geschat aan de hand van een bepaalde landschapskwalificatie genoemd naar Davenport. Zo correspondeert open zee met $z_0 = 0,0002\text{ m}$, en stad of bos met $z_0 = 0,75\text{ m}$ (zie voor nadere uitleg hierover [4] of [7]). In de bijlage is het overzicht gegeven van de voorkomende gebruiksklassen en de bijbehorende ruwheidslengte.

Uit het LGN3+ bestand is de basis-ruwheidskaart (`cd10_100.bda`) gemaakt [`cd`: drag-coëfficiënt; `10`: hoogte (m) drag-coëfficiënt middeling; `100`: kaartresolutie (m)]. In dit bestand staat de ruwheid van heel Nederland beschreven op een resolutie van $100\text{ m} \times 100\text{ m}$. Het domein van de kaart strekt zich uit (in de Amersfoortse (x,y) coördinaten) van (0, 300000) tot aan (281850, 625000). Echter, alleen het grondgebied binnen de Nederlandse grenzen is geclassificeerd in LGN3+. Buiten Nederland is een dummy waarde van 0,15 m aangenomen voor de ruwheidslengte.

2.2 Middeling

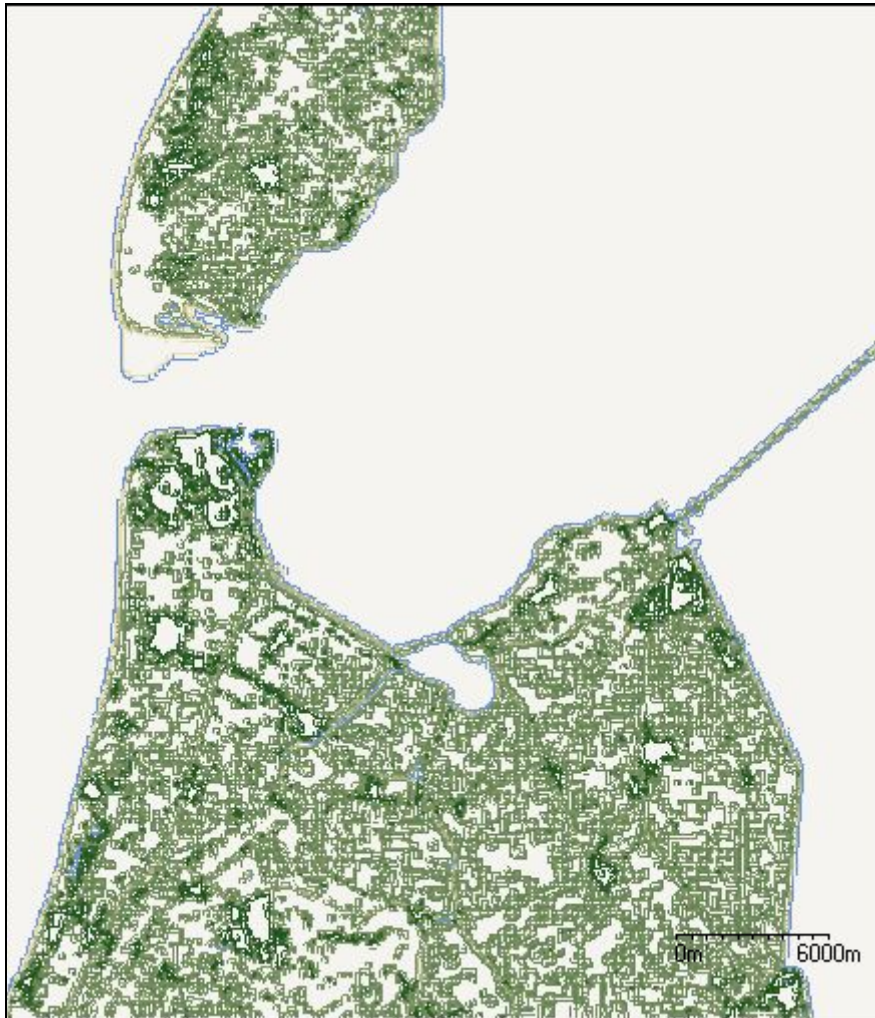
De ruwheidskaart heeft een resolutie van $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, terwijl het LGN3+ basisbestand een resolutie heeft van $25\text{ m} \times 25\text{ m}$. Dit betekent dat per pixel van de ruwheidskaart 16 landgebruikspixels zijn gemiddeld. De middeling van de ruwheid is gedaan door de drag-coëfficiënten op 10 m hoogte te middelen. Deze methode wordt ondermeer beschreven in [1] en [3]. De ruwheidslengte behorend bij een pixel kan daardoor elke waarde hebben tussen de minimale en maximale die toegekend is aan de landgebruikstypes.

WAsP interpreteert gebieden met ruwheidslengte 0 als water. Daarom is in de ruwheidskaart de ruwheid ook 0 wanneer meer dan 90% (15 of 16 van de 16 pixels) uit water bestaat. Wanneer in `WAsP_map` een grovere resolutie wordt gekozen is het opnieuw zo dat gebieden waarbij meer dan 90% uit water bestaat (ruwheid 0), als resulterende waarde in de “map”-file ook 0 terecht komt.

WAsP gebruikt geen pixel- maar contour-formats voor de ruwheidskaarten. Binnen `WAsP_map` wordt daarom een conversie gedaan. Echter, doordat er gemiddeld is over minimaal 16 ruwheidslengtes met mogelijk allemaal verschillende waarden, kan elk pixel in de uiteindelijke ruwheidskaart een unieke waarde hebben. Dit zou resulteren in een enorm aantal contouren. Om dit te voorkomen wordt in `WAsP_map` het aantal ruwheidsklassen gereduceerd tot 8. Deze klassen zijn gebaseerd op een mathematische schaalverdeling.

2.3 Ruwheidskaarten maken

Het Windows-programma “WASP_map” kan uit deze kaart uitsneden maken en de resolutie grover maken, indien gewenst, in veelvoud van 100 m. In dat geval wordt de ruwheid uit de ruwheidskaart volgens dezelfde methode gemiddeld als die aan de basis van de ruwheidskaart ligt. Als voorbeeld van het resultaat hiervan, is voor de kop van Noord-Holland een ruwheidskaart te zien in Figuur 1. In de “Handleiding” wordt vermeld hoe dit in zijn werk gaat.



Figuur 1: Voorbeeld van de ruwheidskaart voor de kop van Noord-Holland.

2.4 Discussie

Het toekennen van een ruwheidslengte aan een landgebruikstype kan niet volledig objectief gebeuren. Sommige landgebruikstypes zijn nooit in de literatuur omschreven en de ruwheidslengte wordt in die gevallen geschat. Een fout van een factor 2 in de ruwheidslengte doet de schatting van de windsnelheid zo'n 15% veranderen.

LGN3+ geeft geen informatie buiten de landsgrenzen van Nederland. Als standaardwaarde voor de ruwheid is 0,15 m gekozen. Uit tests waarbij de ruwheid van het buiten-

land werd gevarieerd van 0,03 tot 0,24 m blijkt dat de invloed van deze waarde op de schatting van het windklimaat op de KNMI-stations te verwaarlozen is. Dit komt doordat de gebruikte stations allemaal voldoende afstand tot de grens hebben. Dit is anders wanneer de ruwheidskaart wordt gebruikt voor (windturbine-)locaties nabij de grenzen. Het is aan de gebruiker om hiermee rekening te houden.

3 Windsnelheden

3.1 Windmetingen

Het windklimaat wordt bepaald uit de metingen van de oppervlaktewind op een aantal KNMI stations (zie Tabel 1). Over land wordt standaard op 10 m hoogte gemeten. Boven water meestal op grotere hoogte. De data die in dit project gebruikt wordt betreft uurgemiddelden van de grootte van de windvector (FH). Voor de windrichting is dit het laatste 10-minuut gemiddelde vóór het afsluiten van een uurvak (DD).

In het kader van het Hydra-project zijn de reeksen van uurlijkse windsnelheid van de meeste KNMI-stations beschikbaar gekomen op internet² in de vorm van potentiële wind. De potentiële wind is bepaald uit de FH en DD, maar is daarbij gecorrigeerd voor niet-standaard meethoogte en ruweheidsvariaties in de stationsomgeving die van richting en tijd kunnen afhangen. De ruweheidslengte die hiervoor nodig is, is bepaald uit vlagfactoranalyse (voor details over deze methode zie [6] en [5]). Een groot voordeel van het gebruik van potentiële wind ten opzichte van ruwe metingen is de correctie van trends ten gevolge van veranderingen in de omgevingsruweheid en de meethoogte: potentiële windreeksen zijn homogener.

WASP hanteert een andere methode om de gemeten wind te ontdoen van lokale ruweheidsvariaties. Uit de ruweheidskaart bepaalt WASP de interne grenslaag-structuur ter plaatse van de windmeting. Wanneer er obstakels in de nabije omgeving van de windmeter zijn, kan WASP hiervoor corrigeren. Het gebruikt daarvoor empirische relaties die de luwte achter obstakels beschrijven. Uit deze informatie bepaalt WASP een geschoonde windsnelheid en een effectieve ruweheidslengte. Deze tezamen geven de wind op grotere hoogte en hieruit berekend WASP de wind over terreinen met verschillende ruweheden en op verschillende hoogtes. Doordat de ruweheidsanalyse door WASP een soort tijdsopname is, is WASP niet in staat te corrigeren voor veranderingen in de stationsomgeving.

In principe is het mogelijk de potentiële wind data te gebruiken als invoer voor WASP. De potentiële wind, over land vermenigvuldigd met een schaalfactor 1,31, kan geïnterpreteerd worden als de gemeten wind op 60 m hoogte. Over zee is de schaalfactor 1,21. Blijven echter verschillen bestaan tussen de analyse van de gemeten wind en ruweheidskaart door WASP, en de potentiële wind. Deze komen voort uit de verschillen in de schatting van de ruweheid uit de kaart door WASP ten opzichte van de ruweheid die uit de vlaganalyse volgt. Verder is het concept van de atmosferische grenslaag zoals WASP dat hanteert niet uitwisselbaar met dat van de potentiële wind. In dit project is er daarom voor gekozen uit te gaan van de gemeten wind en de analyse met de ruweheidskaart door WASP, zodat de methode intern consistent is.

² <http://www.knmi.nl/samenw/hydra>

3.2 Schoning windsnelheidsinformatie

WAsP bepaalt het windklimaat niet uit tijdreeksen, maar uit frequentieverdelingen van de windsnelheid. Deze kunnen uit de tijdreeksen worden bepaald en in het juiste format aan WAsP aangeboden door de OWC Wizard applicatie die standaard bij WAsP geleverd wordt. In deze wizard moeten zaken als meethoogte, discretisatie van windsnelheid en -richting, schaalfactoren en offsets aangegeven worden. De OWC Wizard levert uiteindelijk de zogeheten “tab-files” waarin de windmetingen zijn samengevat.

Bij het bepalen van de tab-files moet dus rekening gehouden worden met de discretisatie van de windsnelheid. In klimatologische database van het KNMI is de windsnelheid in de periode t/m 30 juni 1996 vastgelegd in stappen van 1 knoop (= $1852 \text{ m}/3600 \text{ s} = 0,51 \text{ m/s}$) en opgeslagen met een resolutie van 0,1 m/s. Daarna is de windsnelheid vastgelegd in stappen van 1 m/s.

Bij zeestations en een aantal kuststations, waarbij de waarneemhoogte doorgaans groter dan 10 m is, is een herleidingsfactor toegepast. De factor is bedoeld om vanuit de gemeten wind, de wind op 10 m hoogte te schatten. Deze factor is toegepast vóór de afronding op knopen of hele meters per seconde. De waarde van de factoren is in 1995 een keer aangepast. In [2] zijn de factoren en de manier waarop ze zijn bepaald weergegeven. Echter, of de factoren toegepast zijn op de data zoals die in de klimatologische database van het KNMI staan, hangt af van het acquisitie-systeem waarmee ze zijn ingewonnen, en ook dit is in de loop van de testperiode voor sommige stations veranderd.

De windrichting is in de klimatologische database van het KNMI weergegeven in tientallen graden. Valide waarden zijn waarden in de range 10–360. De waarde 0 geeft windstille weer en de waarde 990 veranderlijke windrichting. Bij het bepalen van de TAB-files is met al deze factoren zo goed mogelijk rekening gehouden.

Tabel 1: Overzicht van de gebruikte meteostations.

Nummer	Naam	X-coördinaat	Y-coördinaat	Meethoogte (m)
210	Valkenburg	88750	464425	10,0
225	IJmuiden	98450	497450	18,5
235	De Kooy	114254	549042	10,0
269	Lelystad	164125	497125	10,0
270	Leeuwarden	178970	581970	10,0
273	Marknesse	188850	523975	10,0
275	Deelen	188330	451950	10,0
280	Eelde	235200	571350	10,0
290	Twenthe	257978	477076	10,0
308	Cadzand	15010	378610	17,1
312	Oosterschelde	32824	421369	16,5
323	Wilhelminadorp	51250	394325	10,0
330	Hoek van Holland	65550	445050	15,0
350	Gilze-Rijen	123731	397594	10,0
356	Herwijnen	138300	429900	10,0
370	Eindhoven	156800	383950	10,0
375	Volkel	177000	407500	10,0

3.3 Selectie windstations

Winddata van de stations vermeld in Tabel 1 is gebruikt in dit project. Van deze stations is de periode 1992–2001 gebruikt voor het vaststellen van het windklimaat. Zie voor de locaties ook Figuur 2 hieronder.

Omdat alleen in de tweede helft van deze periode ook data beschikbaar is van de opbrengsten van windturbines, zijn in dit project aparte tests op de periode 1997–2001 gedaan.



Figuur 2: Overzicht geselecteerde meteostations verdeeld naar drie regio's: Zuid+Oost, Noord+Oost en West.

4 Opbrengsten windturbines

Voor het verifiëren van de opbrengstberekeningen is gebruik gemaakt van gegevens uit de KEMA windmonitor. De Windmonitor bevat gegevens van een groot aantal windturbines en windparken die in Nederland zijn geïnstalleerd. De set gegevens valt in twee onderdelen uiteen:

- Gegevens die het windturbineproject beschrijven, zoals eigenaar, naam, windturbine-type, vermogen, ashoogte, aantal turbines en locatie
- Opbrengstgegevens van de windturbines. Per maand worden de energieopbrengsten van de parken of turbines door KEMA verzameld en in de Windmonitor opgeslagen. Het verzamelen van opbrengstgegevens gebeurt op twee manieren. Een aantal windturbine-eigenaren leest zelf de meterstand af en stuurt deze op aan KEMA. Bij andere parken hebben de windturbine-eigenaren aan de energiedistributiebedrijven toestemming gegeven om de gegevens automatisch aan KEMA te verstrekken.

Bij de selectie van projecten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De projecten zijn ruimtelijk goed gespreid over Nederland
- De gekozen windturbines zijn zo goed mogelijk representatief voor de huidige generatie turbines
- De opbrengstgegevens zijn betrouwbaar en de beschikbaarheid van de turbines was voldoende hoog
- De periode van opbrengstgegevens valt samen met de periode die voor de opbrengstberekeningen is gehanteerd

Dit heeft geleid tot de volgende set van selectiecriteria:

- De opbrengstgegevens zijn afkomstig uit de periode 1997–2001. In deze periode zijn van alle maanden opbrengstgegevens beschikbaar.
- De windturbine-eigenaren hebben toestemming verleend voor het automatisch inzamelen en publiceren van opbrengstgegevens
- De windturbines hebben een ashoogte van minimaal 40 m
- Bij controle vertoont het patroon van opbrengsten geen abnormaal verloop

De geselecteerde windturbines staan vermeld in Tabel 2. De locaties van de windturbines zijn aangegeven in Figuur 3.

Tabel 2: Overzicht van de locaties en de specificaties van de gebruikte windturbines.

Gemeente	Turbintype	Ashoogte (m)
Wieringermeer	M1500-600	46
Anna Paulowna	Bn 33/300	40
Franekeradeel	V44-600	40
het Bildt	NT 500/37	42
De Marne	Bn 41/500	40
De Marne	Bn 33/300	40
Eemsmond	Bn 41/600	40
Bedum	Bn 41/600	40
Zeewolde	NT 500/41	52
Noordoostpolder	TW600	50
Noordoostpolder	TW600	50
Noordoostpolder	V44-600	55
Noordoostpolder	TW600	50
Noordoostpolder	NT 500/41	40
Noordoostpolder	TW600	50
Noordoostpolder	NT 500/41	50
Schouwen-Duiveland	E33/400	30
Tholen	V29-225	36
Veere	M530	30
Schouwen-Duiveland	V29-225	31
Hontenisse	M530	30
Oostburg	NW 40/40	39
<i>Middelburg</i>	<i>NW 40/41</i>	<i>40</i>
Vlissingen	M530	30



Figuur 3: Overzicht van de locaties van de gebruikte windturbines in de verificatie.

5 Verificatie

De resultaten van de methode zijn getest door middel van drie typen berekeningen.

Ten eerste is een berekening gemaakt van de windsnelheid zoals die uit WAsP volgt op de locatie van het meteostation zelf. Dit is dus een test van de consistentie en de symmetrie van de methode. Ten tweede zijn berekeningen gemaakt van het ene meteostation naar het andere, waarbij drie regio's zijn onderscheiden. Ten derde zijn berekeningen gemaakt van opbrengsten van bestaande windturbines, waarvan de opbrengsten bekend zijn.

5.1 Controle op consistentie

De berekeningen zijn simpel: per meteostation is gerekend naar de locatie van het meteostation zelf. Hiermee wordt gecontroleerd of de methode (WAsP) met de gebruikte invoergegevens (ruwheidskaart en windsnelheden) consistent is. De resultaten staan in onderstaande tabel, met uitgerekend het relatieve verschil.

Tabel 3: Gemeten en teruggerekende windsnelheid op 10 m.

Station	Code	Gemeten	Teruggerekend	%verschil
Eindhoven	370	3,97	4,02	1%
Deelen	275	4,06	4,14	2%
Gilze-Rijen	350	3,85	3,88	1%
Herwijnen	356	4,29	4,31	0%
Volkel	375	3,87	3,92	1%
Twenthe	290	3,67	3,76	2%
Marknesse	273	4,39	4,41	0%
Eelde	280	4,55	4,52	-1%
Leeuwarden	270	4,89	4,86	-1%
Lelystad	269	4,44	4,45	0%
Valkenburg	210	5,30	5,34	1%
Wilheminaad.	323	4,90	4,86	-1%
Cadzand	308	6,45	6,46	0%
De Kooy	235	5,90	5,81	-2%
IJmuiden	225	7,83	7,81	0%
Hoek van Holland	330	7,73	7,67	-1%
OS4	316	6,93	6,86	-1%

Zoals te zien is in deze tabel, zijn de verschillen tussen de gemeten en de teruggerekende gemiddelde windsnelheid minimaal (hooguit 2%). Dit kan liggen aan afrondingsverschillen, maar leidt in ieder geval tot de conclusie dat de methode consistent is.

5.2 Verificatie met meteostations

De geselecteerde meteostations zijn in drie groepen (regio's) verdeeld: Zuid+Oost, Noord+Oost en West. Per meteostation in iedere regio is steeds een berekening gemaakt van de gemiddelde windsnelheid met WAsP met als invoer de windsnelheidsinformatie van elk van de andere meteostations in dezelfde regio.

In elke rij is gerekend naar de locatie in de linkerkolom, op grond van de windsnelheidsinformatie van de locatie genoemd in de bovenste rij. Op de diagonaal staan dus dezelfde getallen als in Tabel 3. De berekeningen zijn steeds uitgevoerd voor twee hoogtes: 10 m en 80 m. Hieronder staat de kleurcode zoals die op basis van de relatieve verschillen tussen de windsnelheden is gebruikt in de tabellen.

Tabel 4: Overzicht gebruikte kleurcodes.

	>5% te groot
	3-5% te groot
	-2% - +2%
	3-5% te klein
	>5% te klein

5.2.1 West

De regio West loopt van De Kooy helemaal tot Cadzand. Er zijn zeven stations geselecteerd, mede ook omdat de kuststrook het meest interessant is vanuit het oogpunt van windenergie (zie ook Figuur 2).

10m	Valkenburg	Wilhemina-dorp	Cadzand	DeKooy	IJmuiden	Hoek van H.	OS4
Valkenburg	5,34	5,54	4,77	5,48	5,39	5,43	4,52
Wilhemina-dorp	4,82	4,86	4,31	4,95	4,88	4,94	4,11
Cadzand	6,96	7,14	6,10	7,06	6,88	7,03	5,91
De Kooy	5,40	5,73	4,91	5,81	5,60	5,57	4,89
IJmuiden	7,12	7,51	6,48	7,39	7,28	7,37	6,32
Hoek van H.	7,14	7,41	6,40	7,35	7,22	7,32	6,22
OS4	7,40	7,72	6,66	7,67	7,59	7,61	6,49

80m	Valkenburg	Wilhemina-dorp	Cadzand	DeKooy	IJmuiden	Hoek van H.	OS4
Valkenburg	7,87	8,05	7,12	8,04	7,98	8,11	6,82
Wilhemina-dorp	8,22	8,26	7,51	8,43	8,47	8,59	7,29
Cadzand	8,86	9,28	7,96	9,02	8,94	9,12	7,72
De Kooy	8,55	8,90	7,88	8,82	8,87	8,96	7,67
IJmuiden	9,01	9,46	8,31	9,34	9,28	9,42	8,09
Hoek van H.	9,05	9,34	8,29	9,31	9,25	9,42	8,06
OS4	9,39	9,78	8,62	9,70	9,70	9,76	8,39

- Cadzand doet het slecht; ligt aan de rand van de kaart
- OS4 doet het slecht;
- Overige vijf doen het redelijk, ondanks soms grote onderlinge afstanden;

5.2.2 Noord+Oost

In de regio Noord+Oost zijn vijf meteostations geselecteerd (zie ook Figuur 2).

10m	Twente	Marknesse	Eelde	Leeuwarden	Lelystad
Twente	3,76	3,82	3,88	4,06	3,86
Marknesse	4,30	4,41	4,43	4,68	4,40
Eelde	4,27	4,71	4,52	4,76	4,49
Leeuwarden	4,47	4,57	4,61	4,86	4,59
Lelystad	4,34	4,44	4,47	4,73	4,45

80m	Twente	Marknesse	Eelde	Leeuwarden	Lelystad
Twente	6,18	6,33	6,37	6,71	6,34
Marknesse	6,83	6,98	7,00	7,37	6,99
Eelde	6,53	7,19	6,94	7,31	6,93
Leeuwarden	6,89	7,05	7,08	7,43	7,09
Lelystad	6,79	6,97	6,98	7,35	6,97

- Leeuwarden doet het slecht;
- Twente doet het matig; ligt aan de rand van de kaart en ligt in erg ruwe omgeving;
- Overige drie doen het goed;

5.2.3 Zuid+Oost

In de regio Zuid+Oost zijn vijf meteostations geselecteerd, zoals te zien in Figuur 2.

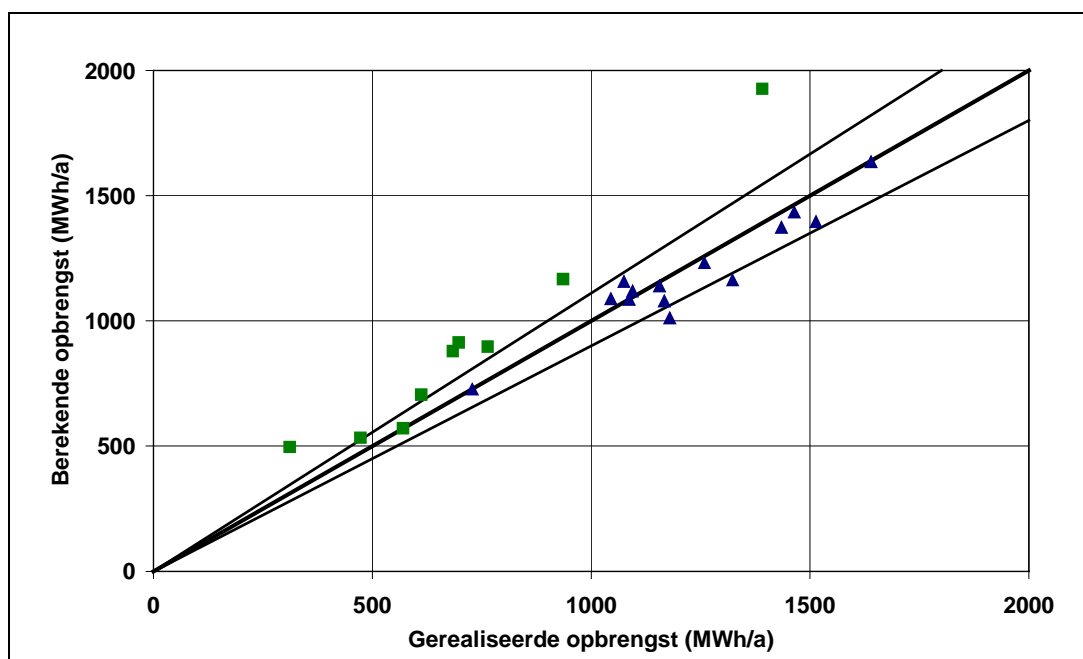
10m	Eindhoven	Deelen	Gilze-Rijen	Herwijnen	Volkel
Eindhoven	4,02	3,52	3,56	3,39	3,26
Deelen	4,74	4,14	3,79	3,99	3,85
Gilze-Rijen	4,88	4,25	3,88	4,09	3,95
Herwijnen	5,15	4,51	4,10	4,31	4,17
Volkel	4,83	4,23	3,84	4,06	3,92

80m	Eindhoven	Deelen	Gilze-Rijen	Herwijnen	Volkel
Eindhoven	6,64	5,92	5,41	5,68	5,49
Deelen	6,89	6,17	5,65	5,90	5,72
Gilze-Rijen	7,23	6,45	5,89	6,22	6,00
Herwijnen	7,69	6,93	6,31	6,56	6,41
Volkel	7,29	6,53	5,95	6,22	6,05

- Eindhoven doet het slecht; berekeningen naar de locatie Eindhoven toe geven altijd te lage windsnelheden; andersom: gebruikmakend van de windsnelheidsinformatie van Eindhoven naar de andere locaties toe geeft altijd te hoge windsnelheden;
- Deelen doet het matig;
- Overige drie doen het goed;

5.3 Verificatie met windturbineopbrengsten

Voor de door de KEMA geselecteerde turbines zijn met behulp van de meest nabijgelegen stations de opbrengsten berekend en vergeleken met de gerealiseerde opbrengsten. In onderstaande figuur zijn deze uitgezet. Hierin vormt de dikke lijn de 1-op-1 lijn en de dunne lijnen de waarden die 10% van het gemiddelde afwijken. In de figuur is onderscheid gemaakt naar de locatie van de windturbine volgens de indeling uit het vorige hoofdstuk. De blauwe driehoekjes zijn voor windturbines in de regio Noord+Oost, de groene driehoekjes voor windturbines in de regio West. In de regio Zuid+Oost zijn geen windturbines beschikbaar die aan de selectiecriteria voldoen.



Figuur 4: Berekende opbrengst versus gerealiseerde productie voor de geselecteerde windturbines.

Zoals te zien valt een groot aantal punten van Noord+Oost binnen de marge. Slechts een tweetal windturbines produceert in de werkelijkheid iets meer dan 10% beter dan op grond van de berekeningen verwacht mag worden.

Het beeld is voor Zuid+Oost minder gunstig: er lijkt een tendens te zijn dat de gerealiseerde opbrengsten te laag zijn ten opzichte van de berekeningen. Dit kan deels toe te schrijven zijn aan reële effecten zoals stilstand, parkeffect, obstakels en netverliezen die niet in de berekeningen zijn meegenomen.

Door de noodgedwongen beperkte selectie zijn slechts voor een vijftal meteostations berekeningen uitgevoerd, namelijk De Kooy, Marknesse, OS4, Lelystad en Leeuwarden.

6 Conclusies

De resultaten van de verificatie op windsnelheden laten zien dat er symmetrie aanwezig is: als een berekening van A naar B te hoog uitkomt, zal de berekening van B naar A te laag uitkomen. Verder, per regio is er zeker 1 meteostation dat uit de toon valt. De uitbijters zijn: Eindhoven, Deelen, Leeuwarden, Twente, Cadzand en OS4. Wat betreft Twente en Cadzand dient opgemerkt te worden dat deze dicht aan de rand van de ruweheidskaart liggen (dicht bij Duitsland respectievelijk België). Voor Eindhoven, Deelen en Leeuwarden zijn eigenlijk geen redenen te bedenken waarom deze niet goed zouden zijn. Kijkend naar Leeuwarden is alleen nog te zien dat de gemeten gemiddelde windsnelheid behoorlijk hoger is dan elders in de regio,

Een belangrijke overweging is verder dat het natuurlijk niet zo zou kunnen zijn dat met elk meteostation alle andere meteostations goed te berekenen zouden zijn. De realiteit is dat er klimatologische verschillen zijn ten gevolge van de geografische ligging. Om die reden kan het best zo zijn dat OS4 afwijkt wegens de vrije ligging in de Oosterschelde-monding. Om die reden is het ook niet per definitie zo dat veel rode of donker blauwe vlakjes op fouten wijzen.

De resultaten van de verificatie op opbrengsten laten zien dat de opbrengsten in de regio Noord+Oost goed berekend worden. Die in de regio West lijken overschat te worden.

Referenties

- [1] Agterberg, R., en J. Wieringa, 1989: Mesoscale terrain roughness mapping of the Netherlands, Technisch Rapport TR-115, KNMI.
- [2] Benschop, H., Windsnelheidsmetingen op zeestations en kust stations: herleiding waarden windsnelheid naar 10-meter niveau, Technisch Rapport TR-188, KNMI.
- [3] Claussen, M., 1990: Area-Averaging of Surface Fluxes in a Neutrally Stratified, Horizontally Inhomogeneous Atmospheric Boundary Layer, Atmospheric Environment 24A, p. 1349-1360.
- [4] Troen, I., en E. L. Petersen, 1989: *European Wind Atlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denemarken.
- [5] Verkaik, J. W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations, Journal of Applied Meteorology 39, 1613-1626.
- [6] Wieringa, J., 1976: An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 102, 241-253.
- [7] Wieringa, J., en P.J. Rijkoort, 1983: Windklimaat van Nederland, KNMI, Staatsuitgeverij, Den Haag.

Bijlage: Overzicht klassen LGN3+

ID	omschrijving	z ₀ (m)
0	geen data	0,03
1	gras	0,03
2	mais	0,17
3	aardappelen	0,07
4	bieten	0,07
5	granen	0,16
6	overige landbouwgewassen	0,04
7	buitenland	0,15
8	glastuinbouw	0,1
9	boomgaard	0,39
10	bollen	0,07
11	loofbos	0,75
12	naaldbos	0,75
16	zoet water	0,001
17	zout water	0,001
18	stedelijk bebouwd gebied	1,6
19	bebouwing in buitengebied	0,5
20	loofbos in bebouwd gebied	1,1
21	naaldbos in bebouwd gebied	1,1
22	Bos met dichte bebouwing	2
23	gras in bebouwd gebied	0,03
24	Kale grond in bebouwd buitengebied	0,001
25	hoofdwegen en spoorwegen	0,1
26	bebouwing in agrarisch gebied	0,5
27	start- en landingsbanen	0,0003
28	parkeerplaats	0,1
30	kwelders	0,0002
31	open zand in kustgebied	0,0003
32	open duinvegetatie	0,02
33	gesloten duinvegetatie	0,06
34	duinheide	0,04
35	open stuifzand	0,0003
36	heide	0,03
37	matig vergraste heide	0,04
38	sterk vergraste heide	0,06
39	hoogveen	0,06
40	Bos in hoogveengebied	0,75
41	overige moerasvegetatie	0,03
42	rietvegetatie	0,1
43	Bos in moerasgebied	0,75
44	veenweidegebied	0,07
45	overig open begroeid natuurgebied	0,03
46	Kale grond in natuurgebied	0,001