Februari 2003 ECN-C--03-018

AANBODVOORSPELLER DUURZAME ENERGIE

Deel 1: Korte termijn prognose van zonne-energie

N.J.C.M. van der Borg
A.J. Brand
S.H. van der Veen*

*KNMI

VERANTWOORDING

De in dit rapport beschreven werkzaamheden zijn uitgevoerd in het kader van het project "Aanbodvoorspeller Duurzame Energie (AVDE)" van het ENGINE programma van ECN.
De werkzaamheden zijn in 2000 uitgevoerd ten laste van budgetnummer 7.4558, in 2001 ten laste van 7.4103 en in 2002 ten laste van budgetnummer 8.44106.

INHOUD

SAMENVATTING 4

1. INLEIDING 5

2. ONDERZOCHTE PROGNOSEMODELLEN 7
2.1 METCAST 7
2.2 Persistentie 7

3. GEBRUIKTE WAARNEMINGEN 9
3.1 ECN 9
3.2 KNMI 9

4. VERGELIJKING WAARNEMINGEN MET PROGNOSE 11
4.1 METCAST 11
4.2 Persistentie 13
4.3 Vergelijking prognosemodellen 15

5. METCAST-PLUS 17

6. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN 19

7. REFERENTIES 21

SAMENVATTING

In de Elektriciteitswet van 1998 zijn regels geformuleerd ten aanzien van de zogenaamde "programmaverantwoordelijkheid" van elektriciteitsproducenten. Hierin is vastgelegd dat elke "programmaverantwoordelijke" dagelijks de prognose van de elektriciteitsleverantie (het "programma") kenbaar dient te maken aan TenneT, de landelijke netbeheerder.

Om te onderzoeken in hoeverre het mogelijk is om het dagpatroon van de energieleverantie van PV-systemen te voorspellen zijn de resultaten van enkele prognosemodellen vergeleken met waarnemingen. De belangrijkste conclusie is dat de energieprognose van een PV-systeem gebaseerd op persistentie niet verslagen wordt door de energieprognose gebaseerd op een meteorologisch model.

1. INLEIDING

In de Elektriciteitswet van 1998 zijn regels geformuleerd ten aanzien van de zogenaamde “programmaverantwoordelijkheid” van elektriciteitsproducenten. Hierin is vastgelegd dat elke “programmaverantwoordelijke” dagelijks zijn prognose van de elektriciteitsleverantie (het “programma”) kenbaar dient te maken aan TenneT, de landelijke netbeheerder. Het programma geldt voor een periode van 24 uur en heeft sinds 1 januari 2001 een tijdresolutie van 15 minuten. De "programma-verantwoordelijke" mag het ingediende programma 1500 maal per jaar wijzigen. De wijziging moet minimaal 1 uur van tevoren doorgegeven worden.

Door de werkelijke productie te meten en per tijdstap te vergelijken met het ingediende programma bepaalt TenneT de grootte van de overschatting (shortage) en van de onderschatting (surplus) van de energieproductie. De surplus-energie wordt voor een laag tarief opgekocht en de shortage-energie wordt voor een hoog tarief toegeleverd door TenneT. De tariefstructuur is tamelijk complex en wordt in dit document niet nader toegelicht. Een uitvoerige beschrijving van de tariefstructuur is te vinden in referentie [1].

Uit onderzoek van ECN-BS blijkt dat deze regels gericht zijn op productie-eenheden waarvan de opgestelde vermogens veel groter zijn dan de vermogens van de huidige zonne-energiecentrales. Echter zowel de vermogens van de toekomstige zonne-energiecentrales als de regels over de programmaverantwoordelijkheid zijn veranderlijk. Daarom worden toch werkzaamheden uitgevoerd om tot een prognose-procedure voor de opbrengst van zonne-energiecentrales (ZE-voorspeller) te komen.

In verband met de beschikbaarheid van prognoses en waarnemingen van zonne-instraling met een tijdresolutie van een heel uur, is de hier gerapporteerde studie gebaseerd op een tijdresolutie van 60 minuten. Het resultaat van deze studie moet daarom gezien worden als een ondergrens van de prognose-onzekerheid voor een tijdresolutie van 15 minuten.

Uit een eerder onderzoek (referentie [2]) is gebleken dat de onzekerheid in de prognose van de beschikbare elektrische energie van photovoltaïsche zonne-energiesystemen vooralsnog gedomineerd wordt door de onzekerheid van de prognose van de instraling op het horizontale vlak nabij het zonne-energiesysteem. Om deze reden wordt in het voorliggende rapport voornamelijk ingegaan op de onzekerheid van de instraling en veel minder op de additionele onzekerheden door de omrekening van de instraling naar het arrayvlak en ook niet op de additionele onzekerheden door overige aspecten van het PV-systeem.

2. ONDERZOCHTE PROGNOSEMODELLEN

2.1 METCAST

Het weermodel METCAST (METeosat Cloud Advection SysTem) is in ontwikkeling bij het KNMI om korte termijn prognoses te maken van de bewolking (referentie [3]). Daarbij wordt uitgegaan van de waargenomen bewolkingsgraad aan de start van de prognoseberekening. Deze bewolkingsgraad wordt verkregen door middel van infrarood- en zichtbare lichtwaarnemingen van de Meteosat sateliet.

Daarnaast wordt uitgegaan van temperatuur- en windsnelheidsprognoses, opgesteld met het programma HIRLAM (HIgh Resolution Limited Area Model; http://www.knmi.nl/hirlam/). HIRLAM is een gezamenlijke ontwikkeling van 9 Europese landen.

Vanaf het startmoment van de prognose door METCAST wordt de waargenomen bewolking "verplaatst" met behulp van de door HIRLAM berekende temperaturen en windsnelheden. Daarbij wordt rekening gehouden met het aangroeien of verdampen van de bewolking. Aan de hand van de bewolkingsprognose wordt een prognose bepaald van de totale kortgolvige instraling op het aardoppervlak. De prognosehorizon van METCAST bedraagt 12 uur, gerekend vanaf het begin van de berekening. De horizontale resolutie bedraagt ongeveer 0.277° (ca. 31 km). De prognose komt beschikbaar op ongeveer 45 minuten na het begintijdstip van de berekening.

2.2 Persistentie

Het "persistentiemodel" gaat uit van de veronderstelling dat het dagpatroon van de instraling van vandaag hetzelfde zal zijn als die van gisteren (1-daagse persistentie) of van het gemiddelde instralingpatroon van de afgelopen dagen (meerdaagse persistentie). In deze studie is gewerkt met de 1-daagse persistentie en met de 3-daagse persistentie. Op deze tijdschaal zal de verandering van het instralingpatroon door het seizoensverloop verwaarloosbaar zijn. Het voordeel van de 1-daagse persistentie is dat een weersomslag snel opgenomen wordt in de prognose. Een voordeel van de meerdaagse persistentie is dat instralingvariaties door gebroken bewolking "verzwakt" door zullen werken in de prognose. Voor het persistentiemodel is het uitsluitend nodig om de waargenomen instralingpatronen te registreren.

3. GEBRUIKTE WAARNEMINGEN

3.1 ECN

Op het ECN-terrein te Petten wordt de globale instraling op het horizontale vlak gemeten met een pyranometer (fabrikaat Kipp & Zonen, model CM21). De pyranometer staat opgesteld op het dak van een van de gebouwen en wordt ongeveer eenmaal per week ontdaan van stof en aanslag. De instraling wordt ongeveer eenmaal per seconde gemeten en vervolgens gemiddeld over aaneengesloten intervallen van 10 minuten. Omdat de prognoses van METCAST en ook de waarnemingen van het KNMI (zie 3.2) beschikbaar zijn als uurwaarden, zijn de 10-minuten gemiddelde waarden verder samengevoegd tot uurwaarden (Wh/m^2). De geregistreerde tijdsindicatie is teruggerekend vanuit MET (Midden Europese Tijd) in de winter en vanuit MEZT (Midden Europese Zomer Tijd) in de zomer tot UT (Universal Time, oftewel de vroegere Greenwich Mean Time).

3.2 KNMI

Door het KNMI wordt op diverse weerstations de globale instraling op het aardoppervlak gemeten met pyranometers en geregistreerd als uurwaarden. Van vier stations zijn de waarnemingen gebruikt in deze studie: De Bilt (Utrecht), Eelde (Drenthe), Berkhout (Noord Holland) en Vlissingen (Zeeland). De gegevens worden elke dag door ECN gekopieerd vanuit de KNMI-server. De geregistreerde tijdsindicatie staat in de UT (Universal Time).

4. VERGELIJKING WAARNEMINGEN MET PROGNOSE

4.1 METCAST

De resultaten van METCAST zijn beschikbaar voor een horizontaal rooster met een ribbe van ongeveer 0.277°. De instralingswaarden ter plaatse van de 5 testlocaties (zie hoofdstuk 3) zijn per testlocatie berekend uit de vier gridpunten waarbinnen de betreffende locatie ligt. De middeling is daarbij gebaseerd op een bi-lineaire weging met als gewicht de reciproque afstand van de hoekpunten tot de testlocatie. Deze procedure is dezelfde als de procedure die gebruikt wordt in de Aanbod Voorspeller Windenergie (ref. [4]).

Voor het vaststellen van de instralingprognose is gebruik gemaakt van de dagelijkse 00-runs (gestart op 00.00h UT) en van de dagelijkse 06-runs (gestart op 06.00h UT) van METCAST.

De resultaten van de 00-run komen vlak vóór 1.00h (UT) beschikbaar zodat om 1 uur de programmawijziging aan TenneT doorgegeven kan worden (zie inleiding). De wijziging gaat vervolgens 1 uur later in zodat de resultaten van de 00-run gebruikt kunnen worden vanaf 02:00h (UT).

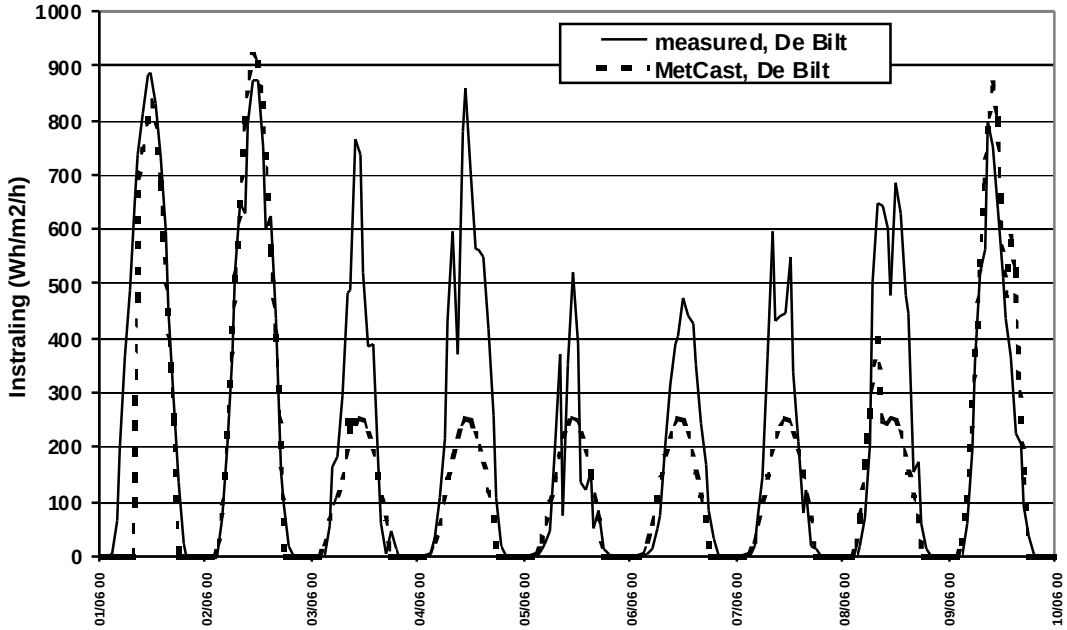
De resultaten van de 06-run komen vlak vóór 7.00h (UT) beschikbaar zodat om 7 uur de programmawijziging aan TenneT doorgegeven kan worden. De wijziging gaat vervolgens 1 uur later in zodat de resultaten van de 06-run gebruikt kunnen worden vanaf 08:00h (UT).
De uurwaarden van de instraling zijn berekend als het gemiddelde van de geprognosticeerde instralingwaarde op het begintijdstip en op het eindtijdstip van het betreffende uur. Op deze manier zijn de uurwaarden tussen 02.00h (UT) en 17.00h (UT) van elke dag bepaald uit de resultaten van de 00-run en van de 06-run (zie vetgedrukte tekst in tabel 1). Vanaf het tijdstip 19:00h (UT) zijn geen instralingwaarden berekend omdat de instraling vanaf dat moment (20:00h MET; 21:00h MEZT) verwaarloosbaar is. Hetzelfde geldt voor de eerste twee uren van de dag.

Tabel 1. *Bron van de gebruikte uurprognoses (vetgedrukt)*

Uur nr.	Tijd (UT)	Uurwaarde uit METCAST 00-run	Uurwaarde uit METCAST 06-run
0	00:00 - 01:00h	(G00:00h + G01:00h) / 2	
1	01:00 - 02:00h	(G01:00h + G02:00h) / 2	
2	02:00 - 03:00h	**($G_{02:00h}$ + $G_{03:00h}$) / 2**	
3	03:00 - 04:00h	**($G_{03:00h}$ + $G_{04:00h}$) / 2**	
4	04:00 - 05:00h	**($G_{04:00h}$ + $G_{05:00h}$) / 2**	
5	05:00 - 06:00h	**($G_{05:00h}$ + $G_{06:00h}$) / 2**	
6	06:00 - 07:00h	**($G_{06:00h}$ + $G_{07:00h}$) / 2**	($G_{06:00h}$ + $G_{07:00h}$) / 2
7	07:00 - 08:00h	**($G_{07:00h}$ + $G_{08:00h}$) / 2**	($G_{07:00h}$ + $G_{08:00h}$) / 2
8	08:00 - 09:00h	(G08:00h + G09:00h) / 2	**(G08:00h + G09:00h) / 2**
9	09:00 - 10:00h	($G_{09:00h}$ + $G_{10:00h}$) / 2	**($G_{09:00h}$ + $G_{10:00h}$) / 2**
10	10:00 - 11:00h	($G_{10:00h}$ + $G_{11:00h}$) / 2	**($G_{10:00h}$ + $G_{11:00h}$) / 2**
11	11:00 - 12:00h	($G_{11:00h}$ + $G_{12:00h}$) / 2	**($G_{11:00h}$ + $G_{12:00h}$) / 2**
12	12:00 - 13:00h	($G_{12:00h}$ + $G_{13:00h}$) / 2	**($G_{12:00h}$ + $G_{13:00h}$) / 2**
13	13:00 - 14:00h		**($G_{13:00h}$ + $G_{14:00h}$) / 2**
14	14:00 - 15:00h		**($G_{14:00h}$ + $G_{15:00h}$) / 2**
15	15:00 - 16:00h		**($G_{15:00h}$ + $G_{16:00h}$) / 2**
16	16:00 - 17:00h		**($G_{16:00h}$ + $G_{17:00h}$) / 2**
17	17:00 - 18:00h		**($G_{17:00h}$ + $G_{18:00h}$) / 2**
18	18:00 - 19:00h		**($G_{18:00h}$ + $G_{19:00h}$) / 2**
19	19:00 - 20:00h		
20	20:00 - 21:00h		
21	21:00 - 22:00h		
22	22:00 - 23:00h		
23	23:00 - 24:00h		

De zo vastgestelde uurprognoses zijn voor elk van de 5 testlocaties vergeleken met de waarnemingen. Als voorbeeld is in figuur 1 de prognose en de waarneming gegeven voor De Bilt op de eerste 9 dagen van juni 2002.

Voor elk uur van het jaar is er sprake van een overschatting of van een onderschatting van de instraling. Alle overschatte instraling en ook alle onderschatte instraling zijn afzonderlijk gesommeerd over de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De uren waarvan geen prognose of geen waarneming beschikbaar waren zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. De totale instraling, de bijbehorende prognose, de totale overschatting en totale onderschatting in het beschouwde jaar (exclusief de ontbrekende uren) staan in tabel 2. Uit de tabel blijkt dat er sprake is van een systematische onderschatting van de instraling van 20%. De totale overschatting bedraagt 10% en de totale onderschatting bedraagt 30% van de totale instraling.



Figuur 1. *METCAST-prognose en waarneming van de instraling in De Bilt op de eerste 9 dagen van juni 2002*

Tabel 2. *Vergelijking tussen de METCAST prognose en de waarneming voor de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De overschatting en onderschatting zijn afzonderlijk gesommeerd*

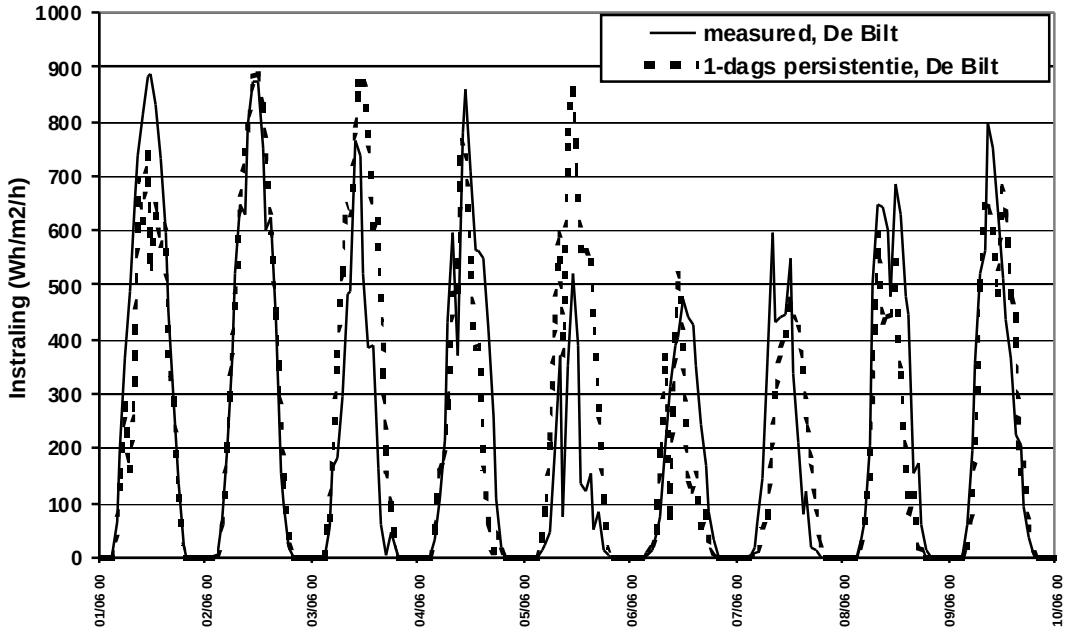
Jaarsom van de uren met waarneming én prognose				
	Waarneming	Prognose METCAST	Shortage (overschatting)	Surplus (onderschatting)
locatie	(kWh/m2)	(in % van de waarneming)		
Petten	1011	73.0	6.6	33.6
Berkhout	920	80.9	9.3	28.4
De Bilt	894	84.6	11.4	26.8
Eelde	858	84.1	13.2	29.1
Vlissingen	956	79.6	8.9	29.4
gemiddeld	928	80	10	30

4.2 Persistentie

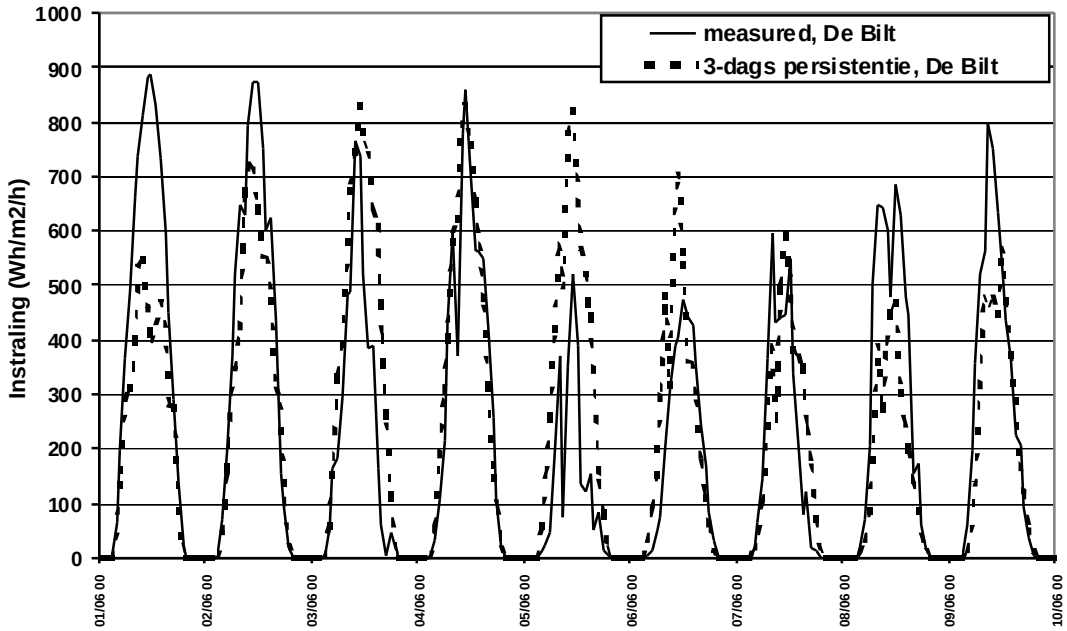
De prognose van de uurwaarden van de instraling is gemaakt op basis van 1-daagse persistentie en op basis van de 3-daagse persistentie voor de periode 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. Voor het maken van de prognose zijn de waarnemingen gebruikt van 17 augustus 2001 tot 17 augustus 2002 (1-daagse prognose) en van 15 augustus 2001 tot 17 augustus 2002 (3-daagse prognose). De prognose van de uurwaarden is gelijk gesteld aan de waarneming in hetzelfde uur van de vorige dag, respectievelijk het gemiddelde van de waarneming in hetzelfde uur van de drie vorige dagen. De op deze manier vastgestelde uurprognoses zijn voor elk van de 5 testlocaties vergeleken met de waarnemingen. Als voorbeeld is in de figuren 2 en 3 de prognose en de waarneming gegeven voor De Bilt op de eerste 9 dagen van juni 2002.

Voor elk uur van het jaar is er sprake van een overschatting of van een onderschatting van de instraling. Alle overschatte instraling en ook alle onderschatte instraling zijn afzonderlijk gesommeerd over de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De uren waarvan geen prognose of geen waarneming beschikbaar waren zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. De

totale instraling, de bijbehorende prognose, de totale overschatting en totale onderschatting in het beschouwde jaar (exclusief de ontbrekende uren) staan in de tabellen 3 en 4 voor respectievelijk de 1-daagse en de 3-daagse persistentie. Uit de tabellen blijkt dat er geen sprake is van een systematische onderschatting van de instraling, hetgeen inherent is aan persistentie. De totale overschatting en ook de totale onderschatting bedraagt 25% en 22% van de totale instraling voor respectievelijk de 1-daagse en de 3-daagse persistentie.



Figuur 2. *De 1-daagse prognose en de en waarneming van de instraling in De Bilt op de eerste 9 dagen van juni 2002*



Figuur 3. *De 3-daagse prognose en de waarneming van de instraling in De Bilt op de eerste 9 dagen van juni 2002*

Tabel 3. *Vergelijking tussen 1-daagse persistentie en waarneming voor de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De overschatting en onderschatting zijn afzonderlijk gesommeerd*

Jaarsom van de uren met waarneming én prognose				
	Waarneming	Prognose 1d-persist.	Shortage (overschatting)	Surplus (onderschatting)
locatie	(kWh/m2)	(in % van de waarneming)		
Petten	1120	100.3	24.5	24.2
Berkhout	1025	100.3	25.3	25.0
De Bilt	1000	100.3	25.5	25.2
Eelde	958	99.7	24.5	24.8
Vlissingen	1059	100.3	24.8	24.4
gemiddeld	1032	100	25	25

Tabel 4. *Vergelijking tussen 3-daagse persistentie en waarneming voor de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De overschatting en onderschatting zijn afzonderlijk gesommeerd*

Jaarsom van de uren met waarneming én prognose				
	Waarneming	Prognose 3d-persist.	Shortage (overschatting)	Surplus (onderschatting)
locatie	(kWh/m2)	(in % van de waarneming)		
Petten	1109	100.5	21.9	21.4
Berkhout	1018	100.0	22.0	21.9
De Bilt	993	100.1	22.6	22.5
Eelde	948	99.7	21.5	21.8
Vlissingen	1050	100.2	21.9	21.7
gemiddeld	1024	100	22	22

4.3 Vergelijking prognosemodellen

In de paragrafen 4.1 en 4.2 is beschreven wat de te verwachten totale overschatting en de te verwachte totale onderschatting is van de instraling op het horizontale vlak door gebruik te maken van METCAST en van het persistentie-model. Het doel van de aanbodvoorspeller is echter het prognosticeren van de energie-output van het betreffende zonne-energiesysteem. Hiervoor zijn aanvullende stappen nodig.

De METCAST prognose van de instraling op het horizontale vlak moet getransformeerd worden naar het vlak van de zonnepanelen en vervolgens naar de energie-output van het zonne-energiesysteem. Uit een case-studie is gebleken dat de eerstgenoemde stap een aanvullende overschatting geeft van ongeveer 5% en een aanvullende onderschatting van ongeveer 9% (zie tabel 3 van ref. [1]). De onzekerheid in de tweede genoemde stap wordt als verwaarloosbaar klein ingeschat. Op basis hiervan wordt de totale overschatting (shortage) ongeveer 15% en de totale onderschatting (surplus) ongeveer 39% van de jaarproductie van het zonne-energiesysteem in de beschouwde case-studie als gebruik gemaakt wordt van METCAST.

Aangenomen wordt dat de mate van persistentie van de energie-output van een zonne-energiesysteem ongeveer gelijk is aan de mate van persistentie van de instraling op het horizontale vlak. Daarmee wordt de shortage en het surplus van de energie-output van het zonne-energiesysteem, uitgedrukt in procenten van de jaaropbrengst, gelijk aan de waarden in de tabellen 3 en 4 als het persistentiemodel gevolgd wordt.

De schatting van de shortage en het surplus van de energie-output van het zonne-energiesysteem van de case-studie bij het gebruik van de beschreven prognosemodellen staan samengevat in tabel 5.

Tabel 5. *Schatting van de shortage en het surplus van de energie-output van een zonne-energiesysteem ten opzichte van het bij TenneT ingediende energieprogramma.*

prognosemodel	Shortage (%)	Surplus (%)	Som (%)
METCAST	15	39	54
1-daagse persistentie	25	25	50
3-daagse persistentie	22	22	44

5. METCAST-PLUS

Nadat de resultaten van paragraaf 4 beschikbaar gekomen zijn heeft het KNMI een aangepaste prognose gemaakt. Deze aangepaste prognose, METCAST plus, is voor elke uurwaarde gelijk aan de oorspronkelijke METCAST prognose vermeerderd met 25% van het verschil tussen de oorspronkelijke METCAST prognose en de instraling op dat tijdstip als het onbewolkt zou zijn geweest. Hiermee zijn de resultaten verkregen zoals vermeld in tabel 6.

Tabel 6. *Vergelijking tussen de METCAST-plus prognose en de waarneming voor de periode van 18 augustus 2001 tot 18 augustus 2002. De overschatting en onderschatting zijn afzonderlijk gesommeerd*

Jaarsom van de uren met waarneming én prognose				
	Waarneming	Prognose MC-plus	Shortage (overschatting)	Surplus (onderschatting)
locatie	(kWh/m2)	(in % van de waarneming)		
Petten	1011	91.0	13.1	21.9
Berkhout	920	100.4	17.3	16.8
De Bilt	894	104.9	20.5	15.5
Eelde	858	106.0	22.5	16.5
Vlissingen	956	99.1	16.9	17.8
gemiddeld	928	100.3	18.1	17.7

Vergelijking van de oorspronkelijke METCAST prognose (tabel 2) met de aangepaste METCAST prognose (tabel 6) laat zien dat de oorspronkelijke "bias" verdwenen is en dat de som van de overschatting en onderschatting met 4% afgenomen is.

6. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

De studie heeft geleid tot de volgende conclusies:

- De instralingprognose verkregen met METCAST is enigszins beter dan de instralingprognose verkregen met de persistentiemodellen.
- De instralingprognose verkregen met METCAST-plus is beter dan de oorspronkelijke instralingprognose verkregen met METCAST.
- De energieprognose op basis van persistentie wordt echter niet verslagen door de energieprognose op basis van METCAST of op basis van METCAST-plus.

De 3-daagse persistentieprognose scoort enigszins beter dan de 1-daagse. Naar verwachting zal dit onderlinge verschil groter worden als een prognose gemaakt wordt met een tijdstap van 15 minuten in plaats van de onderzochte stappen van 1 uur, hetgeen het huidige doel is.

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Herhaal de hier beschreven studie zodra er verbeterde modellen beschikbaar zijn voor instralingprognoses.
- Baseer het energieprogramma van zonne-energiesystemen vooralsnog op het persistentie-model. Gebruik daarbij het gemiddelde van de gemeten energiepatronen van de afgelopen 3 dagen als prognose van het energiepatroon van de huidige dag.

Onderzoek of het technisch en economisch mogelijk is om de energieproductie van een zonne-energiesysteem aan te passen aan het ingediende energieprogramma door gebruik te maken van lokale energieopslag in accu's.

7. REFERENTIES

[1] Yves-Marie Saint-Drenan: Wind power prediction analysis, Part 1: TenneT imbalance price system; Development of a model for TenneT imbalance price"; ECN-I--02-010, Petten, Augustus 2002

[2] N.J.C.M. van der Borg, W.D. van den Berg (Meteo Consult): "Korte termijn voorspelling van de opbrengst van PV-systemen"; ECN-C--01-128, Petten december 2001

[3] S.H. van der Veen: "Zeer korte termijn bewolkingsverwachting met behulp van METCAST"; KNMI-Technisch rapport TR-213; De Bilt 1998.

[4] Yves-Marie Saint-Drenan: Wind power prediction analysis, Part 2: Economical analysis"; ECN-I--02-011, Petten, Augustus 2002