



SOLAR FORECASTING & SMART GRIDS

Eindrapport ontwikkeling zon voorspellingssysteem

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RvO)

Rapport nr.: 15-0675 Rev.3

Datum: 2016-09-07

Projectnaam:	Solar Forecasting & Smart Grids	DNV GL – Energy (penvoerder)
Rapport titel:	Eindrapport ontwikkeling zon voorspellingssysteem	KEMA Nederland B.V.
Klant:	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RvO), Prinses Beatrixlaan 2, 2595 AL Den Haag	Utrechtseweg 310-B50 6812 AR ARNHEM Postbus 9035 6800 ET ARNHEM The Netherlands
Contactpersoon:	Ing. M.A. Marco Kolkman	
Datum:	2016-09/07	
Project nr.:	TKISG02017	
Projectperiode:	1 maart 2013 – 1 juli 2016	Tel: +31 26 356 9111
Rapport nr.:	15-0675 Rev.3	KvK nummer 09080262

Geschreven door:



M. van Melzen - Consulatnt
B. Elsinga - PhD Student

Beoordeeld door:



P.H. Raats
Senior Consultant

Goedgekeurd door:



P. de Boer - Meulman
Head of Section
Renewables

Dit onderzoek is mede tot stand gekomen in samenwerking met:



Universiteit Utrecht

Copyright © DNV GL 2016 All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV GL undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited. DNV GL and the Horizon Graphic are trademarks of DNV GL AS.

DNV GL Distribution:

- ☒ Unrestricted distribution (internal and external)
☐ Unrestricted distribution within DNV GL Group
☐ Unrestricted distribution within DNV GL contracting party
☐ No distribution (confidential)

Keywords:

Solar Forecasting, PV, energy prediction

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Versie	Datum	Reden voor uitgave	Auteur	Beoordeeld	Goedgekeurd
0	2015-03-12	Eerste uitgave	S. Penate-Vera	B. Vet	J.W. Cleijne
1	2016-07-01	Follow up	P. Raats	T. Slot	J.W. Cleijne
2	2016-08-10	Vertaalde verkorte versie	M. van Melzen	J.W. Cleijne	P. de Boer- Meulman
3	2016-09-06	Uitbreiding technische achtergrond	M. van Melzen	P. H. Raats	P. de Boer- Meulman

KEMA Nederland B.V.

Inhoud

1	SAMENVATTING	1
2	INTRODUCTIE	2
3	DOELSTELLING.....	5
4	WERKWIJZE	6
5	RESULTATEN.....	8
5.1	Projectresultaten	8
5.2	Mogelijkheden voor spin-off en vervolgactiviteiten	12
6	DISCUSSIE	14
7	CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN.....	15
8	UITVOERING PROJECT.....	16
9	REFERENTIES.....	17

1 SAMENVATTING

Momenteel zijn er in Nederland steeds meer ontwikkelingen op het gebied van *Smart Grids*. Tegelijkertijd groeit de productie van zonnestroom bijzonder snel. Meer zonne-energie leidt tot noodzakelijke inpassing van PV in het elektriciteitsnet en tot een grotere onvoorspelbaarheid in het aanbod van energie. Dit kost geld.

Hoe kan de integratie van een grote hoeveelheid PV kosteneffectief worden gerealiseerd? Hoe kunnen *Smart Grids* en *Demand Response* zorgen voor een effectieve koppeling tussen aanbod en afname van zonne-energie?

Het project 'Solar Forecasting & Smart Grids' levert een belangrijke bijdrage aan de oplossing door het aanbod van zonne-energie accuraat te voorspellen en door het voorspelbare aanbod van zonne-energie lokaal en regionaal zoveel mogelijk direct te gebruiken door toepassing van *Demand Response*. In een samenwerkingsverband tussen Ecofys, DNV GL en de Universiteit Utrecht wordt een voorspelsysteem gerealiseerd. Daarbij werken individuele PV-installaties als vermogenssensoren; deze functie is impliciet al aanwezig in elke installatie.

Het eerste prototype van het voorspelsysteem is in 2014 gevalideerd. Dit maakt gebruik van real-time data van 200 Utrechtse huishoudens met eigen zonnepanelen. Elke 2 seconden wordt de data naar een centrale computer verzonden. Daarvoor zorgen monitoringsystemen van de firma Upp Energy die in de huishoudens zijn geïnstalleerd. Een computer berekent voor de komende minuten tot uren hoeveel zonnestroom er wordt opgewekt door elke PV-installatie.

Het voorspelsysteem maakt een betere balanshandhaving mogelijk tussen elektriciteitsvraag en –aanbod, zowel op lokaal als op regionaal en landelijk niveau. Door middel van Solar Forecasting kan de inzet van conventionele productie, vraagsturing en ook energieopslag beter gepland en aangestuurd worden dan nu het geval is. Hierdoor is de functionaliteit van Solar Forecasting uitermate zinvol voor PV-bezitters/huiseigenaren, distributienetbeheerders en programmaverantwoordelijken. Het voorspelsysteem is bovendien in te zetten als lokaal weerbericht.

Uiteindelijk is er een gedeeltelijk model tot stand gekomen waarmee de technische haalbaarheid van het concept bewezen is. Door de hoge complexiteit veroorzaakt door de omzettingen van gemeten opwekking naar berekende zoninstraling en inconsistente kwaliteit in dataverzameling is het uiteindelijke doel deels behaald. Er is verder een business case analyse gedaan aan de hand van technische en bijbehorende economische potentie welke een positief resultaat heeft opgeleverd.

2 INTRODUCTIE

Zonnestroom gaat een grote rol spelen in de toekomstige energievoorzieningen. Kosten van zonnestroominstallaties zijn gestaag gedaald gedurende de laatste decennia. Vandaag de dag is zonnestroom een kostenefficiënte investering op de Nederlandse markt sinds 2011 en in zonnige gebieden zoals Spanje en Chili kan zonnestroom al concurreren met de prijzen op de energiemarkt. Er is veel potentie voor zonnestroom in Nederland; alleen al op de Nederlandse daken is er een potentieel van 66 GWp voor zonnestroominstallaties. Zodoende



Figuur 1: Nederland heeft voldoende dakoppervlakte om 66 GWp aan zonnestroomopwekking te plaatsen

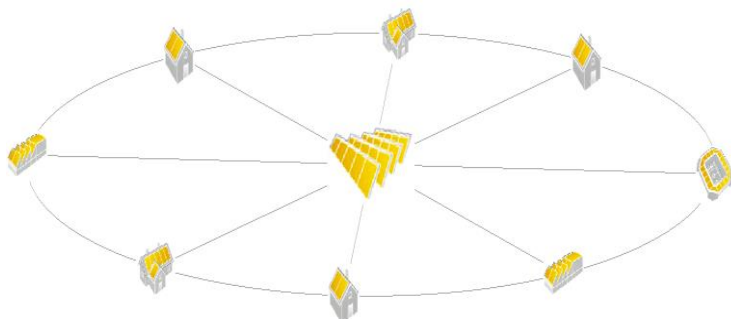
was bij het begin van dit project al duidelijk dat zonnestroom een belangrijke energiebron gaat worden. Naar schatting (anno 2011) werd verwacht dat er 4 GWp in 2020, 6 GWp in 2025 en 20 GWp in 2030 geïnstalleerd zou worden in Nederland, verwachtingen waar men behoorlijk zeker over lijkt blijkens de laatste ontwikkelingen. Sinds september 2014 ligt er al 1 gigawattpiek aan fotonvoltaïsche systemen (PV-systemen) op de daken van de Nederlandse huizen en dit aantal van zo'n vier miljoen zonnepanelen neemt gestaag toe tot een voorspelde 10 GWp in 2023 volgens de laatste voorspellingen; hiermee kan tegen die tijd 7% van de elektriciteit in Nederland uit zonneenergie komen.

Nederland wordt in het bijzonder gekenmerkt door een grote hoeveelheid potentieel geschikt dakoppervlakte en weinig geschikt grondoppervlakte voor zonnestroom. Zodoende zal de meeste energie uit zon decentraal en kleinschalig opgewekt gaan worden. Als gevolg hiervan zullen deze installaties veel gebruik gaan maken van het distributienetwerk wanneer productie eigen gebruik overschrijdt. Zonneenergie is een fluctuerende stroombron en de productie uit een PV-installatie is sterk afhankelijk van externe invloeden zoals de weersomstandigheden. Als een gevolg zullen PV-installaties een geheel andere invloed op het energiedistributiesysteem uitoefenen dan traditionele bronnen welke juist centraal en volledig afroepbaar werken.

Het lokaal opwekken van elektriciteit gaat wat geïnstalleerde capaciteit betreft voor de wind. Maar er is ook een keerzijde aan dit succes: in Duitsland bijvoorbeeld is de hoeveelheid PV-electriciteit die het netwerk ingevoerd wordt tientallen malen hoger dan in Nederland. Dat heeft op piekmomenten in sommige (zuidelijke) deelstaten tot gevolg dat deze elektriciteit opgeslagen of tijdelijk begrensd moet worden: vergelijk het met filevorming in het elektriciteitsnet. Een ander probleem ontstaat als veel PV-systemen gelijktijdig beïnvloed worden door overtrekkende bewolking. Als dit bijvoorbeeld in een wijk met veel zonnepanelen gebeurt, kunnen de schommelingen in vermogen, maar ook in voltage de veiligheidsmarges overschrijden, met alle gevolgen van dien. Om dergelijke problemen in Nederland in de toekomst te voorkomen, is het goed om te weten hoeveel zonneinstraling er te verwachten valt. Dit is op meerdere tijdschalen van belang.

Om zonnestroom in de bestaande infrastructuur op te nemen, terwijl huidige veiligheidsniveaus en betrouwbaarheid van de energievoorziening gehandhaafd blijven, is een uitdaging. Energieproducenten zijn belast met het ondervangen van effecten teweeggebracht door de fluctuerende productie van decentrale energiebronnen. Dit betekent dat toekomstige stroomnetten ontworpen moeten worden om energie bidirectioneel uit te kunnen wisselen en bestand moeten zijn tegen verhoogde piekbelasting. Het

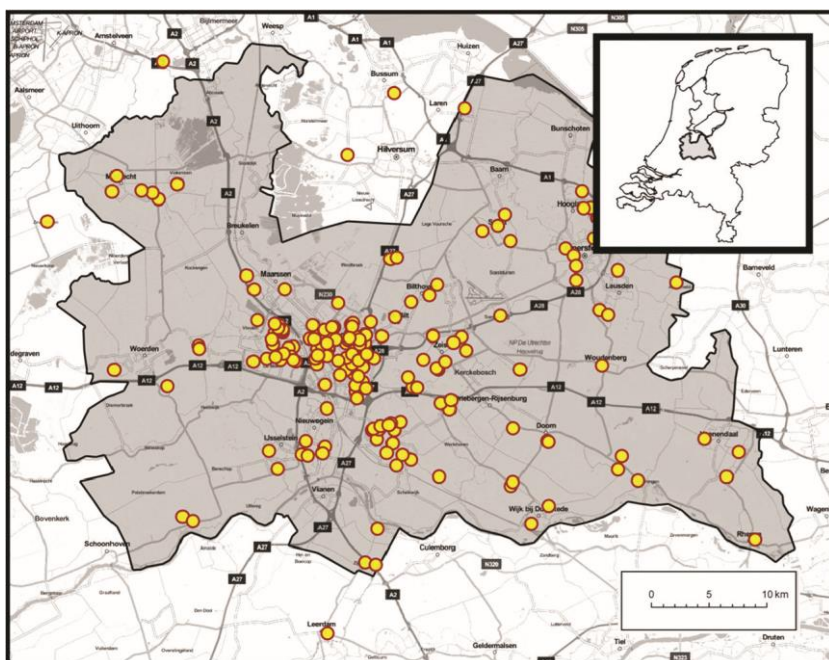
is echter ook mogelijk om de bestaande infrastructuur aan te passen om toekomstbestendig te worden zonder netverzwaring toe te passen. Dit zijn 'Smart Grid' oplossingen (ook wel bekend als slimme netten) die gebruik maken van Demand Response, een energiebeheersysteem en energieopslag.



Figuur 2: Een gedistribueerd netwerk van PV installaties kan gebruikt worden om zon instroom te bepalen ten behoeve van een opwekvoorspellingsmodel

Om deze Smart Grid oplossingen effectief toe te passen, is het noodzakelijk dat er kortetermijnvoorspellingen van zonnestroomproductie beschikbaar zijn. Met een nauwkeurige voorspelling kunnen netbeheerders en energiebedrijven inspelen op de fluctuaties van decentrale energieopwekking in PV installaties en de invloed die ze op het netwerk en de productie hebben. De waarde van zonnestroomvoorspellingen is direct gerelateerd aan de nauwkeurigheid van de voorspelling.

Bestaande zonnestroomvoorspellingsmethoden gebruiken weermodellen en satellietfoto's waarmee redelijk nauwkeurige resultaten behaald kunnen worden (tot 37% afwijking) op de middenlange tot lange termijn (30 minuten tot een dag), echter op een grove resolutie van ongeveer 1x1 km of groter. Deze methodes zijn gebaseerd op extrapolatie van de wolkenverplaatsing, of op numeriek weervoorspellingsmodellen die op basis van natuurkundige wetten de verschijnselen in de atmosfeer simuleren. Om een hogere nauwkeurigheid te bereiken (minder dan 25% voor korte termijn voorspellingen van 15 a 60 minuten en een fijnere resolutie van 0,1x0,1 km) is een andere aanpak noodzakelijk. Er kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van camera's die het wolkendek in beeld brengen. Ook kan gebruik worden gemaakt van grondgebonden instralingsmetingen (pyranometers) in een netwerk van dicht bij elkaar geplaatste weerstations. Deze aanpak heeft een hoge slagingskans.



Figuur 3: Overzicht van de 202 deelnemende PV-systemen in en om de provincie Utrecht.
Kaart: ©2015 OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org

In plaats van pyranometers te plaatsen, zijn in het onderhavige project feitelijk opgestelde PV-systemen op daken van voornamelijk particulieren als meetpunten toegepast. Een groot deel van de locaties zijn via Google Maps™ gevonden, een ander deel van de particulieren heeft zich via-via aangemeld.

Het gemiddelde systeemvermogen is 2 kWp. De opbrengst van de PV-systemen wordt met een zeer hoge frequentie gemeten (elke vijf seconden) en heeft een resolutie van 0,7 W. Hiermee kan het opgewekt vermogen, en dus de instraling, zeer gedetailleerd worden vastgelegd. Het gebruik van een sensornetwerk voor het voorspellen van de PV-opbrengst is niet nieuw, er wordt al meerdere jaren door verschillende groepen wereldwijd aan gewerkt. Het voornaamste doel is het trainen van zogenaamde kunstmatige neurale netwerken (artificial neural networks, ANN's). Hierbij wordt gezocht naar statistische overeenkomsten in verandering van instraling in onder andere historische meetgegevens op een manier die analoog is aan hoe een biologisch neurale netwerk leert. Op die manier probeert men de instraling te voorspellen door overeenkomsten in patronen te zoeken: "deze wolk lijkt erg op een wolk die we vorig jaar april voorbij zagen komen, dan zal de instraling over tien minuten dus wel vergelijkbaar zijn als toen ..."

Het project is volgens de in het volgende hoofdstuk gestelde doelstellingen uitgevoerd op basis van de voorgaande introductie. De werkwijze wordt in hoofdstuk 4 besproken waarna de resultaten in hoofdstuk 5 te lezen zijn. Uiteraard zijn er ook punten ter discussie van de resultaten en conclusies welke opvolgend in hoofdstuk 6 en 7 behandeld worden. Tot slot wordt in hoofdstuk 8 nog kort toelichting gegeven op de wijze van uitvoering van het project. Ten behoeve van kennisgeving is er een website opgezet (www.solarforecasting.nl) waarop bevindingen inzichtelijk zijn gemaakt.

3 DOELSTELLING

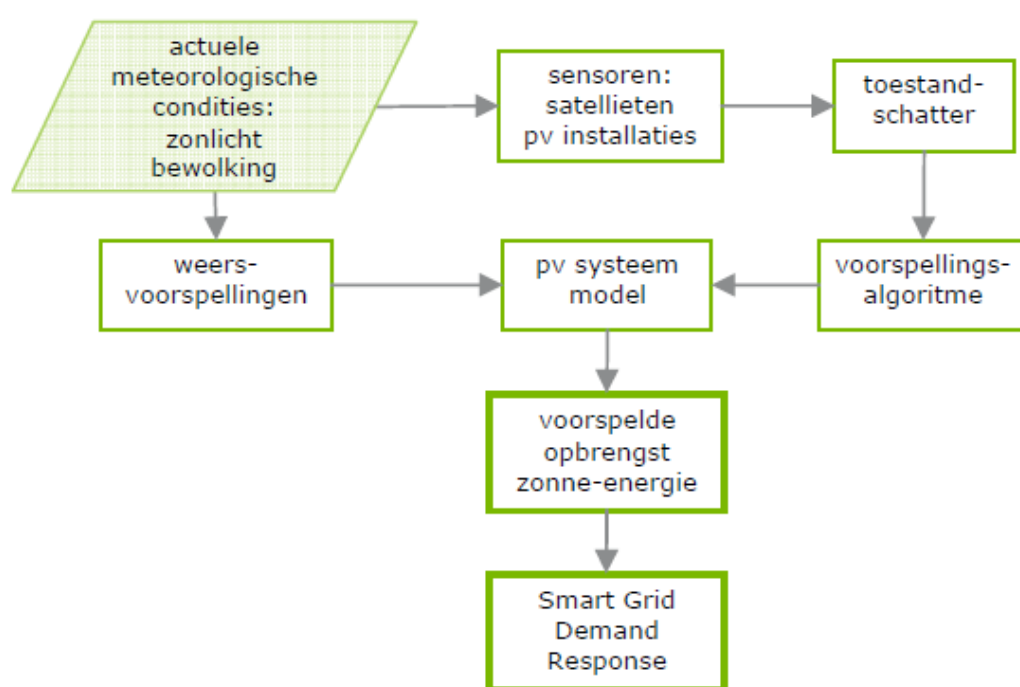
Het project "Solar Forecasting & Smart Grids" heeft als doel het ontwikkelen van een voorspellingssysteem gebaseerd op informatie verkregen uit over een gebied verspreide PV-systemen.

Onder de doelstellingen valt:

- Ontwerp en ontwikkeling van voorspellingsalgoritme
- Ontwerp en ontwikkeling van toestandbenaderingslogica en configuratie van sensoren
- Ontwerp en ontwikkeling van een zonnestroomsysteemmodel
- Valideren nauwkeurigheid zonnestroom-voorspellingsalgoritme
- Valideren van resulterende invloed op elektriciteitsnetwerk in vergelijking tot voorspellingsmodel
- Bepalen waarde van voorspellingsmodel voor gebruik in Smart Grids.

4 WERKWIJZE

Het project Solar Forecasting & Smart Grids heeft als doel om een voorspellingsalgoritme te ontwikkelen dat gebaseerd is op verkregen informatie uit gedistribueerde PV-installaties. Het ontwerp van het voorspellingssysteem wordt weergegeven in het blokdiagram in de volgende afbeelding. De actuele meteorologische condities worden gemeten door de zonnestroominstallaties. Upp-energy dataloggers meten de productie van installaties en geven deze continue door ten behoeve van het onderzoek. De resulterende combinatie van sensoren vormt een PV-sensorveld. Hiermee worden meteorologische condities bepaald en ook voorspeld door het voorspellingsalgoritme. De resultaten hiervan worden weer gebruikt om de zonnestroomproductie te voorspellen aan de hand van de verwachte instraling. Hierbij kan eventueel gebruik gemaakt worden van conventionele weersvoorspellingen.



Figuur 4: Blokdiagram van het voorspellingsysteem

Het project bestaat uit 3 fasen:

- Fase 1 bestaat uit de initiële ontwikkeling van het voorspellingsalgoritme als mede een waardeanalyse van het marktpotentieel.
- Fase 2 bestaat uit een standalone validatie. Er wordt gebruik gemaakt van een portfolio van 200 bestaande zonnestroominstallaties van woningeigenaren in de regio Utrecht.
- Fase 3 bestaat uit het valideren van elektriciteitsnet gerelateerde resultaten en een analyse van de commerciële waarde van het gevalideerde voorspellingssysteem.

De eerste taak die wordt uitgevoerd is het ontwerpen en ontwikkelen van een PV-systeem model. Dit model wordt gebruikt om de zonnestroomproductie te berekenen voor een specifieke installatie als functie van voorspelde zoninstraling. Vervolgens wordt er een inverse variant van dit model gemaakt om de zoninstraling te bepalen als functie van de zonnestroomproductie.



De tweede taak is het bepalen van de meteorologische staat van het voorspellingsgebied. Dit betekent dat bepaald moet worden hoe hoog de zoninstraling in het gehele gebied is. Om dit te bepalen wordt gebruik gemaakt van de gemeten zonnestroomproductie in het gebied. Door middel van het in de eerste taak ontwikkelde inverse PV-systeem model wordt zoninstraling berekend. Om tussen de sensoren de instraling te bepalen wordt een interpolatie algoritme ontwikkeld.

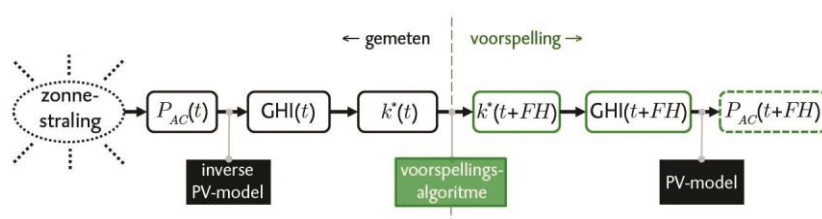
De derde taak is de ontwikkeling van het uiteindelijke voorspellingsmodel aan de hand van het in de vorige taak ontwikkelde resultaten. Door correlatie en vertraging te bepalen tussen de metingen van de verschillende sensoren (PV-installaties) kan een voorspelling worden gedaan voor installaties verderop in het gebied.

5 RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het project besproken. Als eerst zullen de technische resultaten besproken worden. In het daaropvolgende hoofdstuk worden de voor commerciële toepassing belangrijke resultaten besproken.

5.1 Projectresultaten

De methode die gebruikt wordt maakt gebruik van het vergelijken van de patronen die wolken achterlaten in de meetreeksen van opbrengst, maar dan uitsluitend van de daadwerkelijk aanwezige wolken die over de het meetnetwerk (provincie Utrecht) bewegen. Deze methode die peer-to-peer solar forecasting (P2P) heet, dankt zijn naam aan het feit dat alle PV-systemen onderling van elkaar afhankelijk zijn voor voorspellingen voor elkaars opbrengst.



Figuur 5: Stroomschema van het gebruik van de meetgegevens voor het onderzoek. De voorspelling vindt plaats bij de clearness index k^* en kan later weer terug worden geconverteerd naar instraling GHI en eventueel vermogen P

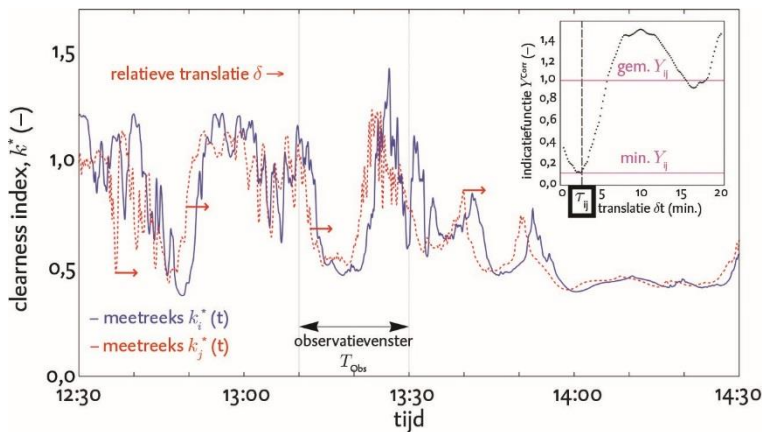
Om het gemeten vermogen (P_{AC}) te kunnen relateren aan de lokale zonne-instraling, is ten eerste de oriëntatie en hellingshoek van de zonnepanelen van belang; deze is tijdens de installatie van het meetsysteem vastgelegd. Ten tweede is het geïnstalleerde vermogen (wattpiek) nodig. Met deze gegevens kan via een in ons project ontwikkeld model teruggerekend worden wat de instraling (*global horizontal irradiance*, GHI) is bij een gegeven uitgangsvermogen. Zo kunnen alle variaties in opgewekt vermogen eenduidig vergeleken worden, of een zonnepaneel nu onder 40 graden naar het zuiden staat of onder 17 graden naar het westnoordwesten.

De derde stap is deze GHI te normaliseren naar wat er op een onbewolkte dag op dat moment aan instraling geweest zou moeten zijn (clearness index, k^*). Op deze manier kunnen alle meetgegevens gedurende de dag op gelijke manier vergeleken worden: deze k^* is in principe gelijk aan 1 op een onbewolkt moment en afwijkingen worden dan geïnterpreteerd als schaduw ($k^* < 1$) of verstrooiing ($k^* > 1$) van een wolk. Omdat er niet met ideale sensoren wordt gewerkt, maar met enigszins beschaduwde of deels verouderde PV-systemen, moet de methode het vooral hebben van het grote aantal, de 202 PV-systemen. Voor het volgen van wolken (veranderlijk als ze zijn), is een exacte match ook niet noodzakelijk. Er wordt gezocht naar correlaties tussen paren van in de tijd verschoven meetreeksen.

Het vinden van de gelijkheid tussen clearness index-meetreeksen wordt gedaan door de methode van cross-correlatie. Hierbij wordt gekeken naar de Pearsoncorrelatie van twee relatief ten opzichte van elkaar in de tijd getransleerde meetreeksen, binnen een observatievenster T_{Obs} :

$$r_{k^*}^{cross}(\delta t) = 1 - \text{Correlatie} \left(k^*(t), k^*(t - \delta t) \right) \quad \text{voor } t \in T_{Obs}$$

Doorgaans is dit observatievenster een periode van tien tot dertig minuten in het verleden. De translatie δt waarbij de indicatiefunctie $Y_{ij}^{clear}(\delta t)$ minimaal is, wordt als het tijdsverschil τ_{ij} tussen de meetreeksen i en j geduid.



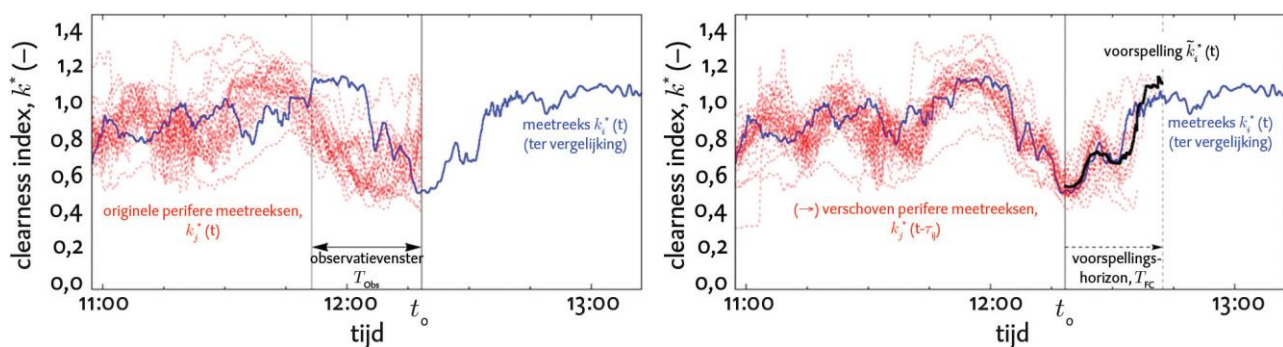
Figuur 6: Voorbeeld van $k^*(t)$ meetreeksen van twee PV-systemen die vlak na elkaar door dezelfde wolk zijn beïnvloed: de rode grafiek lijkt op de blauwe, maar ondervindt de gevolgen van de wolk op een eerder tijdstip. De kleine grafiek rechtsboven laat het resultaat van de indicatiefunctie Y_{ij}^{clear} als functie van de relatieve translatie δt zien. Bij het minimum van deze functie hoort het tijdsverschil τ_{ij} , in dit geval gelijk aan $\sim 2,5$ minuut

Uit het correleren van twee meetreeksen volgt, indien aanwezig, een tijdsverschil τ tussen twee schaduwgebeurtenissen. Het op deze manier vinden van het tijdsverschil maakt het meten/opvragen van de windsnelheid en het zoeken naar de wolkhoopte voor de geprojecteerde wolksnelheid overbodig en kan uit het tijdsverschil en de locaties worden bepaald. Hiermee is onze methode eenvoudiger dan eerdergenoemde voorspellingsmethoden en kan zelfs onafhankelijk van meteorologische gegevens worden gewerkt.

Voor de voorspelling van de toekomstige $k^*(t)$ en dus zonne-instraling voor een gegeven doellocatie i , zijn de tijdsverschillen met de omliggende (perifere) locaties j nodig. De bijbehorende meetreeksen worden met de gevonden tijdsverschillen in tijd naar voren geschoven en de resulterende voorspelling bestaat uit het gemiddelde van deze meetreeksen:

$$k_i^*(t) = \frac{1}{N_i(t)} \sum_{j \in I_i(t)} k_j(t - \tau_{ij}) \quad \text{voor } t_0 \leq t \leq \text{HORA}(x_{i,j})$$

Hierbij bestaat de verzameling $I_i(t)$ uit het aantal perifere locaties waarvan het tijdsverschil ($\tau_{ij} \geq t$) zodanig is, dat de verschoven reeks nog waarden bevat en $N_i(t)$ is het aantal locaties op dat moment. Dit laatste om te voorkomen dat gegevens uit de toekomst worden meegenomen, immers een locatie waarvan het tijdsverschil maar twee minuten is, kan niet gebruikt worden om vijf minuten vooruit te voorspellen.



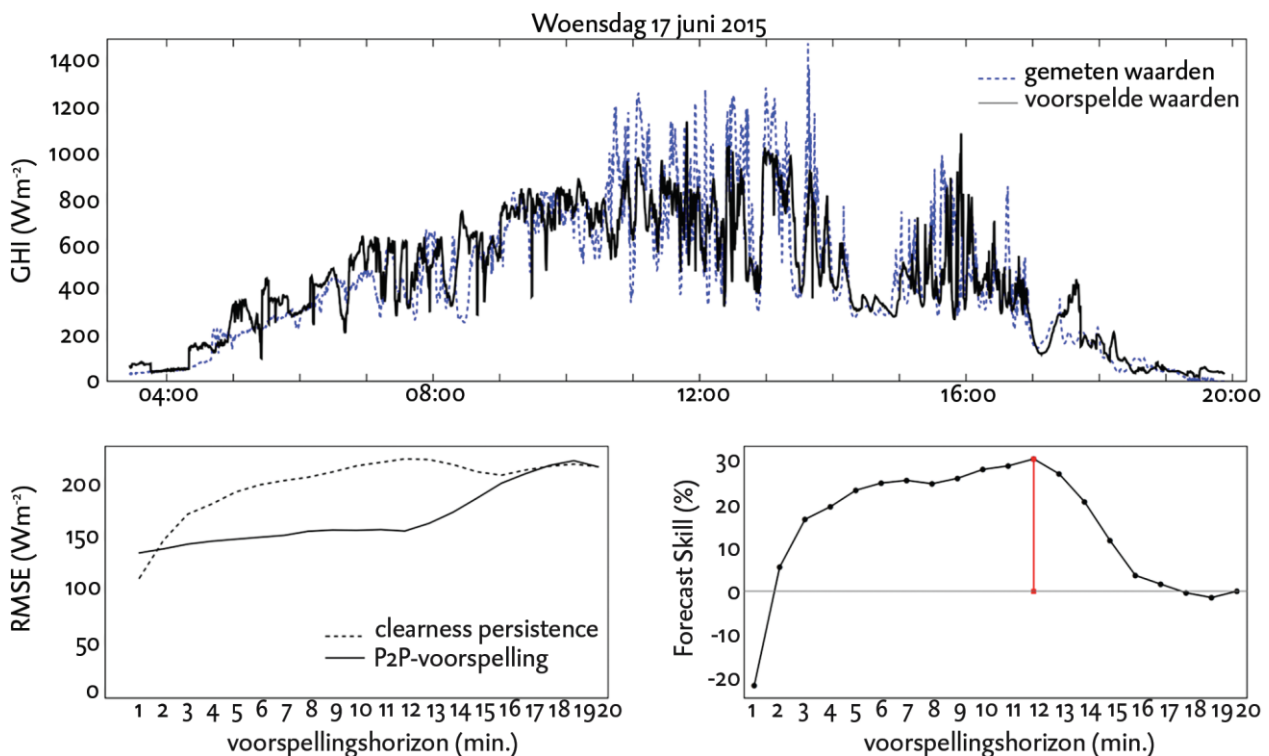
Figuur 7: Links: de meetreeksen van de locaties die met de doellocatie zijn gecorreleerd. Rechts: de perifere meetreeksen (rood) zijn ieder afzonderlijk naar voren geschoven en het gemiddelde hiervan vormt de voorspelling $\tilde{k}_i^*(t)$. De overeenkomst met de meetreeks van de doellocatie (blauw) is goed zichtbaar

Om in de wereld van de zonne-energievoorspellingen mee te doen, is het van belang dat de voorspelling voor een willekeurig gekozen horizon kan worden gegeven, bijvoorbeeld vijftien minuten in het geval van de elektriciteitsmarkten. Hiertoe worden opeenvolgende voorspellingen $\tilde{k}_i^*(t)$ gecombineerd tot een uiteindelijke voorspelling $\tilde{k}_i^*(t)$, die bestaat uit het middelen van beschikbare voorspellingen tot aan een gekozen voorspellingshorizon. Wanneer er geen beschikbare goede voorspellingen $\tilde{k}_i^*(t)$ zijn (als het totaal bewolkt of juist volledig helder is), wordt er gebruikgemaakt van het principe van persistence. Persistence betekent: het doen alsof de toestand van de lucht op een moment zich identiek voortzet. Het vergelijken van de uiteindelijke voorspelling met die van persistence levert tegelijkertijd een goede inschatting in de kwaliteit ervan. Zo wordt de forecast skill (FS) als volgt gedefinieerd:

persistence

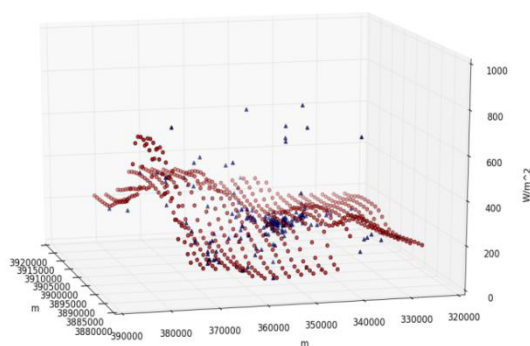
Hierbij staat RMSE voor de root mean square error van de voorspelling, die dus achteraf pas bekend is door de voorspelling te vergelijken met de uiteindelijk gemeten zonne-instraling. De drie mogelijkheden voor FS zijn: bij $FS < 0$ is persistence beter dan de gebruikte methode (bijvoorbeeld als het de hele dag helder is). Bij $FS = 0$ is de voorspelling even goed als (maar niet per se gelijk aan) persistence. Bij $FS > 0$ is de voorspelling beter dan persistence. Deze waarden worden doorgaans voor de hele dag ineens uitgerekend. Uit de voorspelling van de clearness index k^* , kan vervolgens weer de instraling (GHI) en uiteindelijk het PV-vermogen worden teruggerekend. In figuur 6 is een aardig voorbeeld te zien van een dag waarop de P2P-methode een FS van 31% heeft gehaald: dit is dus een duidelijke verbetering ten opzichte van de persistenciemethode en bovendien een score die kan wedijveren met andere methoden op deze tijdschaal. Via ruimtelijke interpolatie kan een voorspelling gemaakt worden voor een locatie die niet is aangesloten op het meetnetwerk.

De hier gepresenteerde voorspelmethode is eenvoudiger vergeleken met eerdergenoemde ANN's of satellietbeelden. De maximale voorspellingshorizon reikt echter niet verder dan enkele tientallen minuten. Dit is afhankelijk van de grootte van het sensorveld, de wolken snelheid en de tijd waarover wolken quasi-statisch voortbewegen. Uiteindelijk kan deze methode als toevoeging dienen om de grove voorspellingen op de langere termijn van meer detail te voorzien. Hiermee kan er voor elektriciteit uit zonnepanelen meer ruimte gemaakt worden op het elektriciteitsnetwerk en kan kennis van de te verwachten opbrengst gebruikt worden om bijvoorbeeld slimme applicaties te bedienen (denk aan het opladen van elektrische auto's).

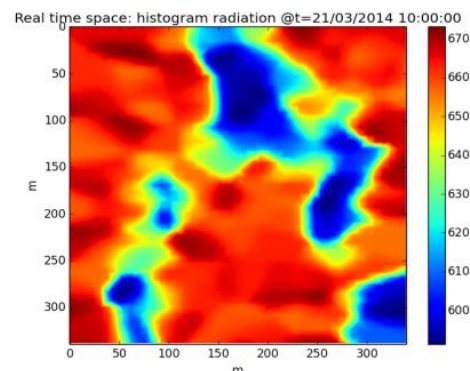


Figuur 8: Boven: het resultaat van het P2P-voorspellingsalgoritme op een dag met een variabel karakter voor een locatie in het centrum van Utrecht. De dikke, zwarte lijn is de voorspelling, twaalf minuten vooruit. De blauwe stippellijn geeft de daadwerkelijk gemeten instraling weer. Onder: de afhankelijkheid van de kwaliteit van de voorspelling ten opzichte van de gekozen voorspellingshorizon. De maximale *forecast skill* in dit geval was 31% bij twaalf minuten

De volgende afbeeldingen laten zien hoe het algoritme in staat is om zoninstraling ruimtelijk te voorspellen. Te zien in de linker afbeelding zijn de metingen van de virtuele sensoren in blauw (de zonnepanelen) en in rood de door het algoritme benaderde zoninstraling. Een 2D weergave van de virtuele sensoren is in de rechter afbeelding te vinden. Er is een interpolatie methode ontwikkeld om deze resultaten te verkrijgen welke metingen van verschillende sensoren aggregereert tot een veld van waarden.



Figuur 9: Benadering van het helderheidsindexveld gerepresenteerd door virtuele sensoren (rood) en gegeven door echte sensormetingen (blauw)



Figuur 10: Een 2D weergave van de 3D figuur aan links

Er is als alternatief geprobeerd door middel van camera's een optische analyse te maken van het wolkendek. Deze methode bleek echter onbetrouwbaar. De ontwikkelde interpolatie methode bleek ondanks de combinatie van meerdere technieken niet de resultaten te bieden zoals vooraf voorzien. De beste resultaten realiseerde het algoritme tijdens overwegend heldere dagen. Dus is gezocht naar een onderliggende oorzaak, mogelijk zou de gebruikte data onopgemerkte inconsistenties kunnen bevatten. De bruikbaarheid van de vergaarde data ten behoeve van een voorspellingsmodel bleek niet altijd aan de verwachtingen te voldoen. In zulke mate dat de resulterende betrouwbare data niet van voldoende kwaliteit is door de gaten welke overblijven na opschoning. Na vergaande pogingen om de kwaliteit van vergaarde en te vergaren data te verbeteren hebben beperkingen in tijd geleid tot het staken van het onderzoek. Het onderliggende algoritme is gedeeltelijk doorontwikkeld ten behoeve van dataopschoning maar heeft verder onderzoek en nieuwe data.

Combinatie van het ontwikkelde algoritme met beeldanalyse van satellietfoto's ter controle van het bestaan van wolken en de richting waarin zij bewegen, levert potentieel een zeer betrouwbaar algoritme op met het voordeel van een veel fijnere resolutie (qua afstand en op kortere tijdschaal). Het is bewezen dat het technisch haalbaar is zonnepanelen te gebruiken om zoninstraling te bepalen en zodoende is het technisch gezien mogelijk dat er een voorspellingsmodel gemaakt kan worden.

5.2 Mogelijkheden voor spin-off en vervolgactiviteiten

Het Solar Forecasting & Smart Grids concept heeft potentie op de energiemarkt, het heeft namelijk de potentie om onbalans van programma verantwoordelijke partijen (PV's) te verminderen. De tweede potentiële markt is het beter kunnen aansturen van productiecapaciteit van conventionele eenheden waardoor ze efficiënter ingezet kunnen worden. PV's kunnen dankzij het voorspellingsalgoritme een nauwkeuriger portfoliobeheer bereiken. Tot slot kunnen netbeheerders beter inspelen op onbalans en dus effectiever met fluctuerende productie omgaan. Conventionele voorspellingsmodellen worden gekenmerkt door een afwijking van 30%, er wordt bij het beschrijven van de volgende analyse rekening gehouden dat deze afwijking kan worden teruggebracht tot 5%.

Om een inschatting te kunnen maken van het verdienpotentieel is een business case onderzocht voor de doelgroep die ook heeft deelgenomen aan de pilot, namelijk de 200 deelnemers uit de stad Utrecht. Er wordt gezien of een voorspellingsdienst op de markt kan worden gebracht welke PV's, netbeheerders en zonnestroominstallatie-eigenaren. Voorkomen uitgaven, verhoogde efficiëntie en een betrouwbaarder net zijn van waarde en worden beoordeeld betreft verdienpotentiaal. Overall gezien is er een positieve business case. Afhankelijk van het scenario betreft het een interne opbrengstvoet (IRR) van 8 a 310% en een netto contante waarde (NCW of NPV) tussen de 0 en 48 miljoen euro. De resultaten zijn te vinden in de volgende tabel. Naast financiële voordelen van de dienst zijn er maatschappelijke voordelen zoals verhoogde capaciteit voor zonnestroominstallaties en efficiënter gebruik van de infrastructuur wat leidt tot lagere maatschappelijke kosten.

Tabel 1: Business Case resultaten van de Solar Forecasting Service

Scenario	Omzetstijging	Operationele kosten (aantal werknemers)	IRR	NPV (miljoen EUR)
Geleidelijke groei	Lineaire groei tot 12 MEUR in jaar 10	8 in jaar 2 en 15 vanaf jaar 4	100%	25.7
Snelle groei 1	Snelle groei tot 8 MEUR in jaar 2 en tot 12 MEUR in jaar 10	Tot 15 in jaar 2 en daarna stabiel	310%	48.2
Snelle groei 2	Lineaire groei tot 6 MEUR in jaar 10	Geleidelijk tot 15 in jaar 7 en daarna stabiel	52%	9.0
Langzame groei	Snelle groei tot 1,7 MEUR in jaar 2 en tot 2 MEUR in jaar 10	8 in jaar 2 en 15 vanaf jaar 4	8%	0.0

De voornaamste aannames omtrent de vorming van de business case zijn:

- Balanceringskosten voor zonnestroom worden met solar forecasting gereduceerd van 30% tot 5%
- De helft van dit voordeel komt ten goede aan solar forecasting serviceprovider
- Onbalanskosten zijn 21.21 euro per MWh
- Investeringskosten zijn 1 miljoen euro
- De salariskosten van de serviceprovider worden geacht in elk scenario anders te zijn

Er is door middel van interviews onderzocht of een solar forecasting service commercieel haalbaar is. Interviews hebben plaatsgevonden met verschillende PV's, namelijk: Eneco, Essent, GDF Nederland, E.on Benelux

In deze interviews werd bevestigd dat de onbalanskosten kunnen worden beperkt met nauwkeurige voorspellingen. Nauwkeurige voorspellingen leveren verder op dat andere installaties effectiever ingezet kunnen worden. Als Nederland 4% van haar elektriciteitsverbruik uit zonnestroom haalt zou er met de gebruikte onbalansprijs $30\% * 4,000,000 \text{ MWh} * 21.21 \text{ €/MWh} = 25,452$ miljoen euro per jaar aan onbalansvergoeding betaald worden. Als de onbalans tot 5% kan worden teruggebracht en 50% van de bespaarde onbalansvergoedingen ten goede komen aan de voorspelling serviceprovider kan er 10,1 miljoen euro per jaar aan worden verdiend.

6 DISCUSSIE

Het zonnestroom systeemmodel dat zonnestroomproductie kan voorspellen heeft *live* data nodig van een groot aantal zonnestroominstallaties. Het gebruiken van opbrengst uit een installatie waarbij omzettingen plaatsvinden, introduceert een verdere foutmarge welke niet aanwezig is bij het gebruik van functie specifieke sensoren. Een landelijke dekking zou de hoogste betrouwbaarheid bieden. Echter zijn de installaties eigendom van vele private partijen zoals woningeigenaren en bedrijven. Het resulterende systeem is dus sterk afhankelijk van veel partijen en de betrouwbaarheid van het systeem is afhankelijk van de voortduren hoge kwaliteit van aangeleverde data. Daarbij in acht genomen dat de systemen van verschillende leveranciers afkomstig zijn kan enig twijfel worden getrokken of het systeem voldoende betrouwbaar kan zijn. Bovendien is gedurende dit onderzoek het niet mogelijk gebleken een voldoende betrouwbaar algoritme te ontwikkelen voor het voorspellen van zonnestroomopbrengst.

7 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Het voorspellen van zonnestroomproductie is een belangrijke functie vereist bij het gebruik van Smart Grid toepassingen. Bestaande voorspellingsalgoritmen worden gekenmerkt door een lage ruimtelijke resolutie en een lage tijdsresolutie. Deze algoritmen zijn gebaseerd op meteorologische modellen en satelliet data. Om de tekortkomingen in bestaande algoritmen te overwinnen en een verbeterd voorspellingsalgoritme te ontwikkelen wordt in dit project gebruik gemaakt dicht netwerk van grondgebonden sensoren. De gebruikte sensoren bestaan uit woning gebonden zonnestroominstallaties die hun productiegegevens live doorgeven ten behoeve van het voorspellingsalgoritme.

Dit document beschrijft het proces van het project en hoe het voorspellingsalgoritme en inverse PV-systeem model tot stand zijn gekomen. Een belangrijke rol is het voorspellingsmodel is de toestand schatter die de zonne-instraling in een gebied kan benaderen. Gedurende de uitvoering van het project zijn aan de hand van verkregen inzichten kleine aanpassingen gedaan aan de geplande taken.

Het P2P algoritme is het meest ver ontwikkeld mede dankzij grote inspanningen om de datakwaliteit te verbeteren en de uitkomsten van het algoritme te verbeteren. Echter zijn er nog inspanningen nodig om het algoritme geschikt te maken voor grootschalige commerciële toepassing. Op basis van aannames op het gebied van technologische opschaling en onbalans kostenbesparingen zijn er in dit onderzoek verschillende business case scenario's onderzocht. Er kan worden geconcludeerd dat een dergelijk zonne-voorspellingsdienst in de provincie Utrecht een positieve business case oplevert. Een dergelijke dienst levert afhankelijk van het scenario en de marktacceptatie een IRR op tussen de 8 en 310% met een NPV tot 48 miljoen euro. Al met al zeer veelbelovende resultaten met een marktpotentieel van 55 miljoen euro per jaar aan onbalanskostenbesparing.

Een belangrijk risico behorende bij de implementatie van een dergelijke dienst is de afhankelijkheid van vele private partijen voor het verkrijgen van de benodigde data. Naar schatting zijn zo'n 10.000 zonnestroom installaties nodig om een nauwkeurige voorspelling voor Nederland te kunnen maken en benodigd daarmee een groot aantal overeenkomsten met al deze dataverstrekters. De overhead en afhankelijk kunnen een groot risico vormen voor het behartigen van datakwaliteit en daarmee de kwaliteit van de dienstverlening.

8 UITVOERING PROJECT

Gedurende de uitvoering van het project zijn aan de hand van verkregen inzichten meerdere taken aangepast op gebied van scope en inhoud. Er is bijvoorbeeld gebleken dat de datakwaliteit waarborgen een grote op zichzelf staande taak vormde en hiervoor is ruimte gemaakt door minder essentiële taken te verkleinen. Als gevolg van de inzichten verkregen tijdens de uitvoering van het project is duidelijk dat er meer tijd nodig was dan verwacht daar er geen volledig functioneel voorspellingsalgoritme is opgeleverd. De onvoorziene investering in databeheer heeft echter veel opgeleverd betreft kennis en ervaring.

Gedurende de uitvoering van het project is er veel geleerd over de complexiteit van zonnestroomvoorspellingen. Als een gevolg hiervan zijn de taken zoals vooraf bepaald in het projectplan herzien, zodat er optimaal gebruik kon worden gemaakt van de beschikbare tijd om een voorspellingsalgoritme te ontwikkelen.

Ten behoeve van kennisspreiding is er een website opgezet (www.solarforecasting.nl) waarop bevindingen inzichtelijk zijn gemaakt. Uiteraard is het project uitstekend bekend bij de 200 Utrechtse huishoudens die het project hebben geholpen door data te voorzien uit de zoninstallaties. Over de zeer geslaagde bijeenkomst voor deelnemers is te lezen op de website.

9 REFERENTIES

1. **KEMA**. Particuliere zonnestroom kan in 2020 verveertigvoudigen. *Persbericht*. 2011.
2. **Eclareon**. *4th PV Grid Parity Monitor*. 2014.
3. **FIRST SOLAR**. First Solar completes Barilla solar project; brings competitively priced solar power to the Texas market. *Photon Newsletter*. 2014.
4. **PBL & DNV GL**. *PV Potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland*. 2014.
5. **DNV GL**. *Nationaal Actieplan 2013*. 2013.
6. **Hoof, Wijnand van**. *Het TKI SOLAR ENERGY in het Nederlandse Energie- / Topsectorenbeleid*. 2014.
7. **Meteocontrol**. *Solar Power Forecast*. 2014.
8. **Lorenz, E. and Heinemann, D.** Prediction of Solar Irradiance and Photovoltaic Power. [book auth.] A. Sayig and Wilfried van Sark. [ed.] A. Sayig. *Comprehensive Renewable Energy*. 2012, pp. 239-292.
9. *Solar electricity forecast: Approaches and first results*. **Bofinger, S. and Heilscher, G.** Dresden : s.n., 2006. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. pp. 2641–2645.
10. *Operational forecast of PV production*. **Remund, J., et al., et al.** Valencia : s.n., 2008. Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. pp. 3138 - 3140.
11. *A Tool for the 24 Hours Forecast of Photovoltaic Production*. **Pivert, X. Le, Sicot, L. and Merten, J.** Hamburg : s.n., 2009. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition. pp. 4076 - 4079.
12. *Regional PV power prediction for improved grid integration*. **Lorenz, E., et al., et al.** 7, Valencia : s.n., November 2011, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 19, pp. 757–771.
13. **Solem, Jan Erik**. *Programming Computer Vision in Python*. s.l. : O'Reilly, 2012.
14. **Raudies, Florian**. *Optic_flow*. scholarpedia. [Online] 2013.
http://www.scholarpedia.org/article/Optic_flow.
15. *Optical flow for verification*. **Sandgate, Caren Marzban and Scott**. 2010, American meteorological society, p. 16.
16. *Application of optical-flow technique to significant convection nowcast for terminal areas in Hong Kong*. **P.Cheung, H.Y. Yeung**. 2012, The 3rd WMO international symposium on nowcasting and very short range forecasting (WSN12).
17. **Wayne Bresky, Jaime Daniels**. *The feasibility of an optical flow algorithm for estimating atmospheric motion*. Camp Springs Maryland 20746 : NOAA/NESDIS Center for satellite applications and research.
18. *Cloud tracking with optical flow for short-term solar forecasting*. **Philip Wood-Bradley, José Zapata, John Pye**.
19. *A fourier approach to cloud estimation*. **Arking, Albert**. 1978, Journal of applied meteorology.
20. *An Application of Statistic to Meteorology: Estimation of Motion*. **Brillinger, David R.** 1994.
21. *Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes*. **Richard G. Allen, Ricardo Trezza, Masahiro Tasumi**. 2005, Agricultural and Forest Meteorology.
22. *Cloud Motion Detection from Infrared Satellite Images*. **Remus BRAD, Ioan Alfred LETIA, Lucian Blaga**.
23. *CLOUD MOTION ESTIMATION IN SEVIRI IMAGE SEQUENCES*. **Javier Marcello, Francisco Eugenio, Ferran Marqués**. 2009, IGARSS 2009.
24. *CLOUD VELOCITY ESTIMATION FROM AN ARRAY OF SOLAR RADIATION MEASUREMENTS*. **Juan L. Bosch, Yuehai Zheng, Jan Kleissl**.
25. *Estimation of Cloud Motion Using Cross Correlation*. **Jun, Li Zhen**. 1998, Advances in atmospheric sciences.
26. *Dynamic Models for Spatio-Temporal Data*. **Jonathan R. Stroud, Peter Muller, Bruno Sansó**.
27. *COMPUTING CLOUD MOTION USING A CORRELATION RELAXATION ALGORITHM*. **WU, Q. X.**
28. *FFT and MCC Algorithms Comparison in the Identification of Tracers for Atmospheric Motion Estimation*. **R.K. Giri, R.K. Sharma**. 2011, International Journal of Science & Emerging Technologies.
29. *FORECASTING SOLAR POWER INTERMITTENCY USING GROUND-BASED CLOUD IMAGING*. **Vijai Thottathil Jayadevan, Jeffrey J. Rodriguez, Vincent P. A. Lonij, Alexander D. Cronin**.
30. *Monitoring Cloud Motion in Cyprus for Solar Irradiance Prediction*. **Charalambides, Rogiros D. Tapakis and Alexandros G.** 2013, Conference Papers in Energy.
31. *Motion estimation of 2D atmospheric layers from satellite image sequences*. **Patrick Heas, Nicolas Papadakis, Etienne Memin, Andre Szantai**.
32. **Cedeño, Gracelis Zayas**. *Motion estimation of cloud imaged*. s.l. : Massachusetts Institute of Technology, 1998.

33. **Matthew J. Reno, Clifford W. Hansen, Joshua S. Stein.** *Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis*. Albuquerque, New Mexico : Sandia National Laboratories, 2012.
34. *Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis.* **Marquez, R and Coimbra, C.F.M.** s.l. : Elsevier, 2013, Solar Energy, Vol. 91, pp. 327-336.
35. **DNV GL.** *Projectplan Solar Forecasting & Smart Grids*.
36. **Schoren, J. Van.** Machine Learning. [interv.] B. Vet, et al., et al. *Machine Learning*. 13 March 2014.
37. *Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface.* **Orgill, J.F. and Hollands, K.G.T.** 1977, Solar Energy, Vol. 19, pp. 357-359.
38. **Jong, J.B.R.M. de.** *Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland*. Vakgroep Warmte- en Stromingstechniek, Afdeling Werktuigbouwkunde. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 1980.
39. **Velds, C.A.** *Zonnestraling in Nederland*. Baarn, Thieme : KNMI, 1992.
40. *The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050).* **Michalsky, J.J.** 1988, Solar Energy, Vol. 40, pp. 227-235.
41. **Duffie, J.A. and Beckman, W.A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1991.
42. *A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces.* **Perez, R., et al., et al.** 1987, Solar Energy, Vol. 39, pp. 221-231.
43. *Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance.* **De Soto, W., Klein, S.A. and Beckman, W.A.** 2006, Solar Energy, Vol. 80, pp. 78-88.
44. **Wikipedia.** Boyce-Codd normal form. *Wikipedia*. [Online] 14 3 2016. [Cited: 14 3 2016.] https://en.wikipedia.org/wiki/Boyce%E2%80%93Codd_normal_form.
45. *Proposed Metric for Evaluation of Solar Forecasting Models.* **Marquez, R., Coimbra, C.F.M.** 1, s.l. : Journal of Solar Energy Engineering, 2013, Vol. 135. 011016.
46. *Short-term peer-to-peer Solar Forecasting in a Network of Photovoltaic Systems.* **Elsinga B., Van Sark, W.** submitted, s.l. : Solar Energy, 2016.
47. *UPOT: The Utrecht Photovoltaic Outdoor Test Facility.* **Van Sark W.G.J.H.M., Louwen A., De Waal A.C., Elsinga B., Schropp R.E.I.** s.l. : 27th EU PVSEC, 2012.
48. **Elsinga, B., Sark, W. van** *Short-term peer-to-peer Solar Forecasting in a Network of Photovoltaic Systems*, Solar Energy, (submitted per 10-3-2016)
49. **Marquez, R., Coimbra, C. F. M.** *Proposed Metric for Evaluation of Solar Forecasting Models*. Journal of Solar Energy Engineering 135 (1), 011016.
50. **Van Sark, W. G. J. H. M., Louwen, A., De Waal, A. C., Elsinga, B., Schropp, R. E. I.** UPOT: The Utrecht Photovoltaic Outdoor Test Facility. In: 27th EU PVSEC. pp. 3247-3249.
51. **Raats, P.H.** *Waarde analyse PV Forecasting, Limiting power imbalance*, 13 January 2014, DNV KEMA, 74104494-MPD/NET14-0150
52. 150127 PHR Q&A on technical feasibility Solar4all, DNV GL, December 2014
53. **Johnson, E.J., & Goldstein, D.** (2003). *Do Defaults Save Lives?*, Science, VOL 302, 1338-1339
54. Aanhangsel van de Handelingen, Antwoorden Minister Kamp (Economische Zaken), vergaderjaar 2014-2015, aanhangselnummer 1965, d.d. 16 april 2015
55. Kamerstuk 2014-2015, 34199, nr. 7
56. <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/experimenten-elektriciteitswet> (in Dutch)



ABOUT DNV GL

Driven by our purpose of safeguarding life, property and the environment, DNV GL enables organizations to advance the safety and sustainability of their business. We provide classification and technical assurance along with software and independent expert advisory services to the maritime, oil and gas, and energy industries. We also provide certification services to customers across a wide range of industries. Operating in more than 100 countries, our 16,000 professionals are dedicated to helping our customers make the world safer, smarter and greener.