

Scoping studie

Effect van de variabiliteit in het weer en klimaat op de productie van duurzame energie met zon en wind en de weersafhankelijke energievraag in Nederland

Weather Impact BV
Stadsring 57
3811 HN Amersfoort
033-4753535
weatherimpact.nl

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van RVO.nl voor de Topsector Energie op verzoek van TKI Urban Energy en TKI Wind op Zee

Door: Stefan Ligtenberg
April 2022

Weather Impact

Inhoud

1	Inleiding.....	1
2	Inventarisatie energiesector	2
	2.1 Energievraag	2
	2.2 Energieproductie	3
	2.3 Overige	7
3	Overzicht literatuur en huidig onderzoek	9
4	Samenvatting en conclusie.....	15
5	Aanzet onderzoeksopzet	18
6	Literatuurlijst	20
Bijlage A	Overzicht gesprekken.....	21

1 Inleiding

In dit rapport worden de bevindingen en conclusies beschreven van de scoping studie naar “het effect van de variabiliteit in het weer en klimaat op de productie van duurzame energie met zon en wind en het weersafhankelijke energieverbruik in Nederland” die Weather Impact heeft uitgevoerd in opdracht van RVO, TKI Wind op Zee en TKI Urban Energy. Het doel van deze studie is om de behoeften en vragen van de energiesector op het gebied van meteorologie en klimaat te inventariseren, de relevante kennis in het meteorologische vakgebied in kaart te brengen en beide vervolgens te combineren om zo concrete onderzoeksvragen op te stellen.

Het weer, en de variabiliteit daarin, zijn een belangrijke factor in de energiesector, maar tegelijkertijd ook een lastige factor. Er is veel wetenschappelijke kennis over het weer en over klimaatverandering, maar dit is moeilijk te combineren met de alledaagse praktijk. Tot voor kort was de invloed van het weer vooral belangrijk voor de vraag naar energie. Maar door het toenemende aandeel van duurzame energieproductie, gebaseerd op zon en wind, is de invloed van het weer op de aanbodkant ook steeds belangrijker. Als in de toekomst energie uit duurzame bronnen het merendeel van de energieproductie betreft, is kennis over het weer en de variaties daarin essentieel.

Er is al onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de variabiliteit in het weer op de productie van duurzame energie. Ook zijn er studies uitgevoerd naar bijvoorbeeld het verbinden van verschillende energieproductielocaties om ruimtelijke variaties op te vangen. Deze onderzoeken zijn van groot belang, want de resultaten vormen de basis voor het maken van beleid en het vormgeven van de toekomstige energie-infrastructuur in Nederland. Daarbij kan het gaan om de verwachte energieproductie en -vraag, maar ook over de transportcapaciteit van energie en de benodigde capaciteit voor het tijdelijk opslaan van energie.

Gedurende de winter 2021/2022 heeft Weather Impact ca. 20 interviews afgenomen met verschillende partijen in de energiesector, zoals bijvoorbeeld beleidsmakers, netbeheerders, energiebedrijven en wetenschappelijke instituten. In Appendix A is een overzicht van de gesprekken te vinden. Ook is er een beknopt literatuuronderzoek gehouden. Hierdoor is een goed en breed beeld ontstaan van de huidige kennis en gebruik van meteorologische data en waar dit verbeterd zou kunnen of moeten worden.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de opgehaalde informatie uit de energiesector op basis van gevoerde gesprekken, terwijl hoofdstuk 3 een beknopt overzicht geeft van de beschikbare kennis in de literatuur en de huidige onderzoeken. In Hoofdstuk 4 wordt deze informatie samengevoegd tot conclusies en een onderzoeksagenda, een lijst van openstaande vragen op het gebied van meteorologie en klimaat in de energiesector. Hoofdstuk 5 geeft een aanzet tot een onderzoeksvoorstel voor de openstaande vraag met de hoogste prioriteit.

2 Inventarisatie energiesector

Het onderwerp van deze scoping studie is breed ingestoken, met zowel de invloed van het weer op energievraag als -productie en op verschillende tijd- en ruimteschalen. Voor het overzicht is er gekozen om langs deze parameters een verdeling te maken waarbij er voor elke parameter twee opties zijn. Allereerst het type energie met een duidelijk verschil tussen duurzame energieproductie door middel van zon en wind, en de weersafhankelijkheid van de energievraag. Bij de tijdschaal ligt het onderscheid tussen weer (variëaties op korte termijn) en klimaat (trends en variëaties van meerdere jaren tot decades). Weervariëaties op uur-, dag- en seizoensschaal vallen hierbij onder 'weer'. Qua ruimte is het onderscheid logischerwijs tussen de kleine ruimtelijke schaal (gedetailleerde gegevens op het niveau van bijvoorbeeld een windturbine, wind/zon-park en een stad of wijk) en de grote ruimtelijke schaal (op landsniveau, dus Nederland en de omliggende landen). De verdeling is in onderstaande tabel te zien. Hieruit volgt dat de resultaten van deze scoping studie zijn onderverdeeld in 8 subcategorieën.

Tabel 1 - Verdeling in subcategorieën op basis van verschillende i) type energie, ii) tijdschalen en iii) ruimte.

Categorie	Energie (-productie of -vraag)	Tijd (klimaat of weer)	Ruimte (klein of groot)
1. Productie-Weer-Klein	Productie	Weer	Klein
2. Productie-Weer-Groot	Productie	Weer	Groot
3. Productie-Klimaat-Klein	Productie	Klimaat	Klein
4. Productie-Klimaat-Groot	Productie	Klimaat	Groot
5. Vraag-Weer-Klein	Vraag	Weer	Klein
6. Vraag-Weer-Groot	Vraag	Weer	Groot
7. Vraag-Klimaat-Klein	Vraag	Klimaat	Klein
8. Vraag-Klimaat-Groot	Vraag	Klimaat	Groot

2.1 Energievraag

Categorie 5 & 6 (energievraag op korte termijn) blijken voor deze scoping studie het minst relevant. Hier zijn weinig open vragen over binnen de energiesector. De vraag naar energie (naast elektriciteit ook gas en warmte) is erg gestoeld op basis van historische weer- en energievraagdata. Deze data is beschikbaar voor de afgelopen 30-40 jaar en daarmee afdoende om voor de komende jaren goede korte termijn verwachtingen van de vraag te kunnen maken. Momenteel vinden er wel transities plaats (bijv. woningen van gas naar elektriciteit of eventueel energiegebruik industrie) maar die zijn allemaal nog relatief zo kleinschalig dat de historische modellen hiervoor momenteel nog prima geschikt zijn. Een veelgenoemde

toevoeging is betere maand- of seizoensverwachtingen. Hierdoor kan een beter inschatting worden gemaakt van de benodigde opslagcapaciteit of gasvoorraad (in de toekomst energievoorraad). Zeker gezien de lage gasvoorraad de afgelopen winter en de huidige geopolitieke ontwikkelingen is dit de komende jaren een punt van aandacht.

In tegenstelling tot de korte termijn, zijn er bij **categorie 7 & 8** (energievraag op lange termijn) wel veel open vragen. Over de energievraag (gas, warmte, elektriciteit) in de toekomst is nog veel onduidelijk en deze hangt af van veel socio-economische factoren. Bijvoorbeeld de hiervoor genoemde transitie van gas naar elektriciteit voor het verwarmen van gebouwen, het variabel energieverbruik in de industrie, of welke energiedragers er kunnen en gaan worden gebruikt. Maar ook het toekomstige weer (en dus klimaatverandering) speelt hier in een grote rol. Hoeveel minder koud worden toekomstige winters gemiddeld, en hoe koud gaan de koudste winters zijn? En aan de andere kant, de koeltevraag; hoeveel warmer worden zomers en hoeveel airco's komen er daardoor bij?

De toekomstige warmte- en koeltevraag van gebouwen is een belangrijke inputparameter voor energie(transitie)modellen en er is nog onvoldoende consensus tussen de verschillende schattingen die hiervoor beschikbaar zijn. Momenteel zijn er een handvol organisaties (waaronder PBL en TNO) die deze input leveren. Een betere schatting met transparante aannames wordt meermaals genoemd als belangrijk aandachtspunt. TNO heeft recent een onderzoek afgerond hierover en de ontwikkelde tool zou dit voorjaar online moeten komen.

Qua energievraag door de industrie in de toekomst (over 15-20 jaar) zijn **categorie 4 en 8** niet makkelijk meer te scheiden. Nu – en de komende jaren – is deze energiemarkt voornamelijk vraag-gestuurd, als er energie nodig is dan wordt deze geproduceerd door bijvoorbeeld extra capaciteit in een centrale of via de (internationale) markt. In de toekomst zal dit langzaam evolueren richting een tweezijdige vraag- en aanbod-gestuurde markt. Vooral tijdens de extremen van energieproductie door wind/zon, zowel positief als negatief, zal de energievraag zich daarop aanpassen.

Daarnaast is in de toekomst ook nog interessant of er een correlatie is tussen de ruimtelijke patronen in energievraag en -productie. Door de locaties van grote industrieën en steden is de energievraag in tijd en plaats niet homogeen en er zijn scenario's denkbaar dat de energieproductie vooral aan één kant van het land is, bijvoorbeeld door opklaringen, terwijl de energievraag toevallig vooral gecentreerd is in het deel van het land waar de zon niet schijnt.

2.2 Energieproductie

Korte termijn (1-2 dagen vooruit)

Voor **categorie 1 en 2** (energieproductie op de korte termijn) is de meteorologie erg belangrijk. Energieproductie (en -vraag) bepalen voor een groot deel de energieprijzen. Daardoor is meteorologische informatie in de vorm van weersverwachtingen cruciale informatie voor TSO's en energiebedrijven. Doordat deze financiële prikkel aanwezig is (betere weersverwachting leidt tot betere prijsverwachting en daarmee een concurrentievoordeel) wordt hier flink in geïnvesteerd waardoor de meteorologische expertise bij energiebedrijven erg hoog

is. De meest recente modeldata en inzichten worden hiervoor gebruikt. Dit geldt met name voor de zeer korte termijn, tot 1,5 dag vooruit; de day-ahead markt is hierbij in de energiesector het belangrijkste. Voor 12:00u wordt de verwachte energieproductie en -vraag voor morgen doorgegeven en deze is leidend voor de energieprijzen.

Op de dag zelf, de intra-day markt, worden de meest recente weersverwachtingen ook nog gebruikt om eventuele onbalans te ondervangen, maar dit gaat om kleinere volumes en bedragen dan de day-ahead. Voor de intra-day verwachtingen is informatie op de zeer korte termijn nodig, zogenaamde nowcasts. Voor een nowcast worden voornamelijk real-time observaties gebruikt en geëxtrapoleerd in de toekomst in tegenstelling tot de traditionele weersverwachtingen op basis van weermodellen. Door het groter wordende aandeel van duurzame energie door wind en zon worden nowcasts ook steeds belangrijker om de netbelasting accuraat te verwachten.

In de windsector is het gebruik van bovenstaande weersverwachtingen om energieverwachtingen te maken gemeengoed. Zowel voor de productie in totaal (**categorie 2**) als op windpark-schaal (**categorie 1**) is dit al jaren de standaard praktijk. Voor de opwek door zon wordt dit ook gedaan op landsschaal (**categorie 2**); wat is de zonneschijnduur en hoeveel energie wordt daardoor verwacht. Tot enkele jaren geleden was het aandeel zon relatief zo klein dat variabiliteit hierin (zowel in tijd als in ruimte) minder relevant was. Met de enorme toename van zonnepanelen wordt deze variabiliteit echter steeds belangrijker. Zonklimaat is daarbij ook een stuk variabelere dan wind door het soms grilligere karakter van bewolking. Hierdoor vinden er nu ontwikkelingen plaats op het gebied van satellietdata en nowcasting om lokale veranderingen in bewolking en zonneschijnduur accurater te kunnen verwachten. Waar is bewolking of mist aanwezig, en wanneer trekt deze op? Hoe laat en waar worden opklaringen verwacht? Hoe schoon is de lucht?

Het fenomeen “ramping” – een plotse en grote verandering in energiestromen op het net – hangt ook samen met accurate nowcasts (en weersverwachtingen). Als er plots een sterk windveld opsteekt en/of de bewolking boven heel Nederland lost op dan krijgt het net een enorme hoeveelheid energie te verstouwen. Aan de andere kant kunnen wind en zon ook plots wegvallen waardoor er een tekort aan energie aan het net wordt geleverd. Bij een toekomstig groter aandeel van duurzame energie door wind/zon kunnen dit soort weersomslagen leiden tot lokale ramping problemen. Het is niet bekend hoe groot zulke weersomslagen potentieel kunnen zijn en dus ook niet hoe groot de capaciteit moet zijn om deze ramping pieken te kunnen opvangen.

Verder vooruit kijken

Verder vooruit kijken dan één dag vooruit wordt wel gedaan, maar is een minder belangrijke factor. Als er een omslag in het weer wordt verwacht, bijvoorbeeld een vorstnival, storm, of juist een windluwe en zonnige periode kan dit reden zijn om hierop te anticiperen. Echter, de belangrijkste verwachting in data is de day-ahead forecast. Om financieel voordeel te behalen wordt wel gepoogd om de relatie tussen weersverwachting en energieprijzen voor steeds langere verwachtingstermijnen te gebruiken. Bij een groter aandeel in duurzame energieproductie wordt deze langere verwachtingstermijn ook steeds belangrijker. Bijvoorbeeld, om extremen in energieproductie met flexibele opslag te kunnen opvangen. De

verwachtingstermijn van 10-90 dagen vooruit staat in de meteorologie te boek als één van de moeilijkste om een correcte verwachting voor te maken. Hier ligt dus een belangrijk vraagstuk, vooral met het oog op de toekomst als het aandeel wind/zon groter is.

Categorie 3 & 4: de energieproductie op de lange termijn, over 10-30 jaar. Om de energieproductie van de toekomst te voorspellen wordt momenteel voornamelijk historische data gebruikt. Het klimaat van 1980-2020 en karakteristieke jaren daaruit worden gebruikt als indicatie voor de toekomst. Voor wind wordt hiervoor vaak de Dutch Offshore Wind Atlas (DOWA) van het KNMI¹ gebruikt, of andere databronnen zoals klimaat re-analysis datasets². Hierbij wordt dus impliciet de aanname gemaakt dat er geen significante trend in windklimaat optreedt. Voor zon zijn vergelijkbare dataset beschikbaar, zoals de open source Europese dataset van PV-GIS³. Voor zon is de aanname dat het verleden representatief is voor de toekomst niet zo makkelijk en duidelijk als voor wind. De afgelopen 50 jaar is de zonneshijnduur in Nederland toegenomen (KNMI, 2021), voornamelijk veroorzaakt door schonere lucht. Het is onduidelijk of en in welke mate deze trend zich in de toekomst zal voortzetten. Bij het gebruik van historische stralingsdata is het dus van belang om relatief recente jaren te gebruiken.

Goede schattingen voor het wind- en zonklimaat in 2030-2050 zijn niet beschikbaar of bevatten zeer grote onzekerheidsmarges. Dit is een duidelijk gemis dat veelvuldig wordt genoemd. Een oplossing zou zijn om een benchmark dataset voor veranderingen in wind/zon in 2050 op te stellen á la de KNMI klimaatscenario's (KNMI, 2015) voor temperatuur en neerslag. Als deze dataset beschikbaar zou zijn is het nog wel de vraag wie deze wel/niet zou gebruiken. Voor de planning van toekomstige wind- en zonneparken is meteorologie eigenlijk ondergeschikt. Nederland is relatief klein en vlak waardoor het zon/wind-klimaat redelijk homogeen is. De relatief kleine verschillen daarin zijn ondergeschikt aan ruimtelijke planning, zoals natuur, wonen, (energie)infrastructuur, etc. Ook voor ontwikkelaars van wind/zon-parken is de onzekerheid in het toekomstige weer niet de grootste onzekerheid.

Naast een trend in toekomstig wind- en zonklimaat, moet bij zo'n benchmark dataset ook een sterke focus op de extremen liggen. Deze extremen bepalen namelijk voor een groot gedeelte de randvoorwaarden van het toekomstige energiesysteem en de benodigde flexcapaciteit. Wat zijn de minimum condities qua wind- en zonproductie (zogenaamde dunkelflautes)? En, belangrijker dan het uiterste minimum, hoe lang houden zulke condities aan? Een goede inschatting hiervan is essentieel voor de toekomstige leveringszekerheid en de benodigde flexcapaciteit door middel van energiedragers (bijv. batterijen of groene waterstof). Op dit moment ontbreekt de kennis of er in de toekomst significante veranderingen in de extremen van het zon/wind klimaat zullen zijn.

In lijn met het opvangen van potentiële lage energieproductie is een grotere samenwerking en uitwisseling op de Europese markt ook van belang. Weerextremen zijn vaak (anti-)gecorreleerd met weerextremen op andere plekken en de mate waarin die invloed heeft op de wind/zon-energieproductie in verschillende landen kan zeer belangrijk zijn in de

¹ <https://www.dutchoffshorewindatlas.nl/>

² <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>

³ https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

toekomst. Bijvoorbeeld, de landen rondom de Noordzee die voor een groot deel afhankelijk worden van wind op zee, of de mogelijke correlatie tussen windstilte in Noord-Europa en veel bewolking in Zuid-Europa. Hier is en wordt onderzoek naar gedaan, maar dit wordt in het nationale beleid maar mondjesmaat meegenomen. Veel geïnterviewden benadrukten het belang van internationale samenwerking, zowel bij de uitbreiding van de energie-infrastructuur als bij het doen van onderzoek en maken van beleid. Ook dienen in modellen en rekenmethodes op z'n minst de buurlanden van Nederland te worden meegenomen.

Naast de grote landelijke schaal, is het ook belangrijk om bewust te kijken naar de energieproductie op kleine schaal (**categorie 4**). Zoals bekend, wordt er bij duurzame energieproductie energie uit windsnelheid of zonnestraling omgezet in elektrische energie. Hierdoor wordt er logischerwijs energie onttrokken aan het atmosferische systeem. Bij windturbines is dit het duidelijkst door de sterke zog- en wake-effecten achter een turbine, terwijl bij zonnepanelen er een minder duidelijk direct terugkoppelingseffect is op de atmosfeer. Echter, als in de toekomst de capaciteit van zowel wind als zon vele malen groter is dan nu, is het denkbaar dat de invloed van grote windparken en veel zonnepanelen een significant effect hebben op de atmosfeer.



Figuur 1 - Zog- en wake-effecten duidelijk zichtbaar in wolkenvorming achter de windturbines.

Bijvoorbeeld, als er veel windparken op zee zijn dan is de energieproductie bij bepaalde windrichtingen en -snelheden wellicht een stuk lager dan van te voren geschat op basis van winddata zonder turbines. Naast dat de windsnelheid afneemt door turbines neemt de turbulentie juist toe wat weer effect heeft op het windklimaat en mogelijk ook op bewolking en daarmee op zonne-instraling. Op het eerste gezicht lijkt het echter dat dit bewolkingseffect zowel positief als negatief is; soms zorgt meer turbulentie voor wolkenvorming en soms juist voor wolkenafname.

Voor één zonnepaneel geldt dat deze geen meetbaar effect heeft op de atmosfeer. Dit is echter anders als er zonneweides van meerdere hectares of km² boven vegetatie of op water zouden worden gerealiseerd. Het is waarschijnlijk niet de hoeveelheid zonne-energie die wordt omgezet die de grootste verandering zal veroorzaken maar vooral het grondoppervlak dat wordt afgedekt van directe zonne-instraling. Hierdoor verandert de energiebalans van het oppervlak – de voelbare en latente warmteflux – mogelijk dusdanig dat dit effect heeft op de atmosfeer. Hoe groot deze invloed is, is momenteel moeilijk te kwantificeren door het gebrek aan data hierover.

Als in de toekomst het (overgrote) merendeel van de energie duurzaam wordt geproduceerd op basis van wind en zon zijn er scenario's denkbaar dat het systeem of de flexcapaciteit toch niet toereikend zijn (ondanks goede berekeningen vooraf!). Als dit soort momenten tijdig worden gesignaleerd op basis van weersverwachtingen dan is het mogelijk nuttig om de energievraag hierop af te stemmen. Energieweerwaarschuwingen, vergelijkbaar met bijvoorbeeld de weerwaarschuwingen van het KNMI voor extreem weer of oproepen van waterbedrijven tot gelimiteerd watergebruik tijdens droge zomers, zouden hiervoor een geschikt mechanisme kunnen zijn. Stel dat er over 3 dagen een mogelijk ernstig energietekort wordt verwacht en hier kan maatschappijbreed voor worden gewaarschuwd, dan kunnen er energiebesparende maatregelen worden genomen door burgers en bedrijven. In hoeverre zo'n systeem kan bijdragen aan benodigde flexcapaciteit is een interessant onderzoeksgebied en passend in de transitie van schijnbaar oneindige energiebeschikbaarheid op basis van fossiele bronnen naar een variabelere energieaanbod op basis van wind/zon.

2.3 Overige

Naast de logische wens naar informatie over toekomstige veranderingen in windsnelheid en zonneshijn duur die direct invloed hebben op de energieproductie, zijn er ook nog andere meteorologische parameters die interessant zijn, al is de impact wel een stuk kleiner.

Zo kan windrichting belangrijk zijn voor windparken die in een bepaalde configuratie zijn gebouwd. Mochten er in de toekomst grote verschillen gaan optreden in windrichting dan is dit van invloed op de energieproductie. Bij wind op land is dit wellicht een groter probleem, omdat deze vaak in één lijn zijn geplaatst. Ook moet er bij bepaalde windrichtingen meer rekening worden gehouden met slagschaduw en geluidsoverlast, waardoor turbines wellicht vaker uit staan.

Daarnaast zijn voor windturbines de windprofielen van belang; hoe varieert de windsnelheid met de hoogte. Bij berekeningen en scenario's van wind turbines met een bepaalde hoogte wordt nu uitgegaan van een windprofiel op basis van historische data. Als een toekomstig windprofiel eventueel zou veranderen dan is dit belangrijk om mee te nemen.

Toekomstige temperatuur is ook belangrijk voor zowel wind- als zon-energieproductie. De opbrengst van een turbine hangt af van de windsnelheid en luchtdichtheid, waarbij de laatste onder andere afhankelijk is van de temperatuur en luchtdrukpatronen. In een opwarmend klimaat is het te verwachten dat dit een negatief effect heeft, warmere lucht heeft immers gemiddeld een lagere luchtdichtheid. Van zonnepanelen is bekend dat ze minder efficiënt produceren bij hogere temperatuur, waardoor een opwarmend klimaat ook een negatief effect heeft.

Daarnaast is de frequentie en hevigheid van stormen ook interessant. Bij te hoge windsnelheden worden turbines uitgeschakeld en bij erg extreme waarden is er zelfs kans op schade. Ook bij zonnepanelen kan dit belangrijk, getuige de hoeveelheid zonnepanelen die in februari 2022 (stormen Dudley, Eunice en Franklin) van daken werden geblazen.

Voor het onderhoud van windturbines is (extreme) neerslag en hagel ook nog van belang. Als er meer neerslag of hagel valt kan dit de levensduur van de bladen verkorten, waardoor de huidige onderhoudsschema's en -contracten wellicht te positief zijn.

3 Overzicht literatuur en huidig onderzoek

In dit hoofdstuk volgt een beknopte analyse van de beschikbare kennis over de effecten van meteorologische variabiliteit op de duurzame energieproductie. Deze inventarisatie richt zich op internationale wetenschappelijke literatuur, nationaal beschikbare informatie voor Nederland en eventueel lopende onderzoeksprojecten.

Historische meteorologische data

Voor historische klimaatgegevens worden vaak de mondiale re-analysis datasets, zoals ERA5 of MERRA2, gebruikt. Deze bieden consistente en continue data aan op een vast grid voor een lang tijdsperiode, vaak 40 jaar of meer. Hierdoor is deze data zeer bruikbaar voor allerlei onderzoek, waaronder in de energiesector. Met behulp van observaties is het goed mogelijk om de re-analysis data te downscalen tot fijnere resoluties in ruimte en tijd. Voor het windklimaat heeft het KNMI twee toegepaste producten ontwikkeld; de KNMI North Sea Wind atlas (KNW)⁴ en de Dutch Offshore Wind Atlas (DOWA)⁵. KNW bevat informatie voor de afgelopen 40 jaar en is bij uitstek geschikt voor lange termijn statistische analyses, terwijl DOWA meer en hogere resolutie informatie bevat maar slechts beschikbaar is vanaf 2008. De verschillen en overeenkomsten tussen DOWA en KNW staan hier⁶ beschreven. Momenteel is het KNMI betrokken bij het WINS50 project⁷ dat als doel heeft om deze huidige windatlassen te verbeteren en uit te breiden met toekomstige windinformatie voor 2050. Hiervoor is de invloed van windparken op de atmosfeer erg belangrijk en dat is dan ook een speerpunt binnen dit project.

Op basis van windatlassen of re-analysis data is al onderzoek gedaan naar ramping situaties bij wind en zon. Voor wind ramping blijkt dat de DOWA een zeer goede representatie geeft van geobserveerde wind ramps (Kalverla et al., 2020). Dit geeft vertrouwen dat ramps ook goed voorspeld kunnen worden door middel van weersverwachtingen. Voor ramps in zonne-energie is gekeken naar kleinschaligere systemen en blijkt dat energiever verschillen tot 20% mogelijk zijn in een tijdsbestek van enkele seconden (Kreuwel et al., 2020). Dit wordt vooral geobserveerd op half bewolkte dagen waarbij zon en wolken elkaar afwisselen. Een opvallende conclusie hierbij is dat deze sub-minuut variaties in energieproductie volledig wegvallen als er 15-min gemiddeld data wordt gebruikt, zoals gebruikelijk bij energiemodelberekeningen. Voor dit soort type studie is dus data met een veel hogere resolutie nodig.

Toekomstig wind- en zonklimaat

Om de effecten van klimaatverandering voor Nederland te bepalen maakt het KNMI specifieke klimaatscenario's. Op dit moment zijn die van 2014 de meest actuele, maar deze worden naar verwachting in 2023 geüpdatet met de laatste inzichten en scenario's. Tussentijds is er een rapport verschenen met de huidige staat van klimaatverandering in Nederland: KNMI Klimaatsignaal '21 (KNMI, 2021). Dit rapport richt zich vooral op de effecten op de

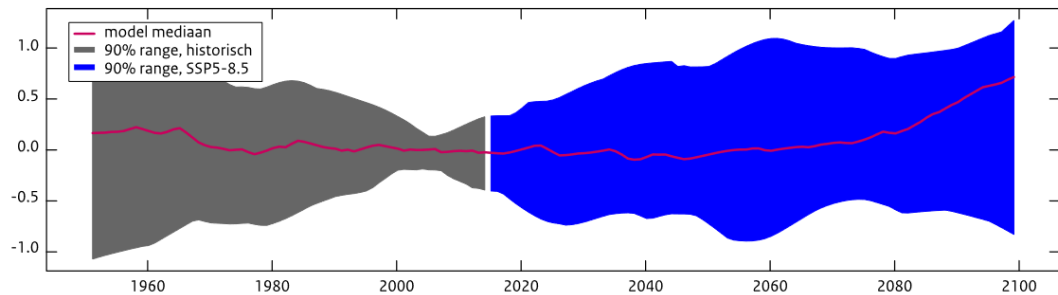
⁴ <https://www.knmiprojects.nl/projects/knw-atlas>

⁵ <https://www.dutchoffshorewindatlas.nl/>

⁶ <https://www.dutchoffshorewindatlas.nl/about-the-atlas/difference-dowa--knw>

⁷ <https://www.wins50.nl/>

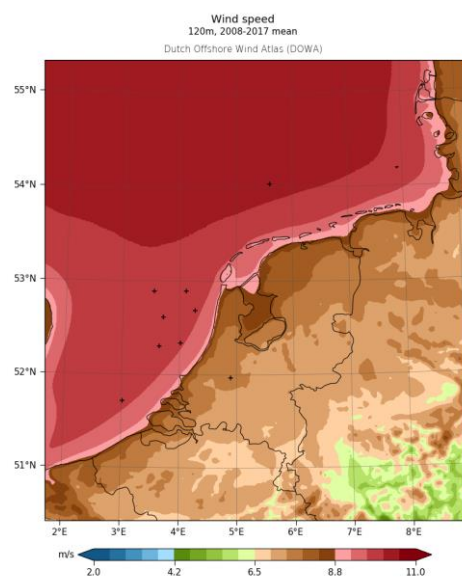
maatschappij en burgers, en niet zo zeer op energiesector. Over de laatste 60 jaar is zonne-schijn toegenomen met 4%. Daarentegen is de windsnelheid juist met 4% afgenomen, maar zit hierin ook een grote decadale variabiliteit. In windrichting vindt men geen trend, maar is wel een grote decadale variabiliteit waargenomen. De klimaatprojecties voor de toekomst laten geen significante verandering zien in zowel de gemiddelde windsnelheid als de maximale windsnelheid per jaar. Figuur 2 laat bijvoorbeeld zien dat stormen voor de Nederlandse kust niet noemenswaardig zullen toenemen; het gemiddelde (rode lijn) blijft de komende 50 jaar rond de 0, al is de onzekerheid (blauwe band) wel groot. Veranderingen in zonne-instraling niet wordt genoemd.



Figuur 2 - Figuur 8.2 uit het KNMI Klimaatsignaal '21 (KNMI, 2021): Ontwikkeling van de maximale windsnelheid op een locatie voor de Nederlandse kust in de winter (december-februari) voor het hoge emissiescenario (SSP5 8.5) op basis van CMIP6 modelsimulaties (26 modellen). Getoond zijn de afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde in de referentieperiode 1991-2020. De gekleurde banden geven de zeer waarschijnlijke range (90%) van de 26 klimaatmodellen weer, en de rode lijn hun mediaan.

In internationaal onderzoek is de consensus dat klimaatverandering op grote schaal niet tot een significante verandering in windklimaat leidt. In een review paper (Pryor et al., 2020) over het effect van klimaatverandering op mondiaal windklimaat is de conclusie dat natuurlijke variabiliteit van interne klimaat modi dominant is over veranderingen veroorzaakt door mondiale opwarming van de aarde. Overigens zijn er wel signalen dat in Noord Europa en het binnenland van de VS er tegen het eind van deze eeuw (ca. 2080) wel hogere gemiddelde windsnelheden zouden kunnen voorkomen. Het feit dat decadale variabiliteit bij wind belangrijk is wordt bevestigd door meerdere andere onderzoeken (bijv. Neubacher et al., 2021). Doordat luchtdrukpatronen mogelijk persistenter worden in de toekomst neemt de homogeniteit van de windverdeling boven Europa toe, wat een groter beslag zou betekenen op benodigde flexcapaciteit (Wohland et al., 2017).

In Nederland is enkele jaren geleden ook onderzoek gedaan waar het windklimaat in Nederland het meest gunstig zou zijn voor energieproductie. De bevindingen zijn beschreven in een notitie "Als het aan de wind lag.." (Wijnant, 2018) en zijn in enkele vuistregels samengevat: 1) de potentiële windenergieopbrengst is hoger en minder variabel op het noordelijke deel van de Nederlandse Noordzee (zie Figuur 3), 2) bouw zo min mogelijk windparken achter elkaar in zuidwestelijke richting, 3) het Nederlandse gebied van de Noordzee is niet groot genoeg om door middel van spreiding



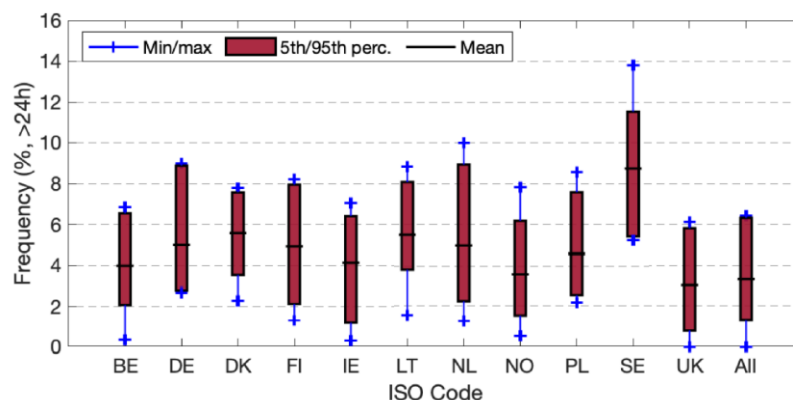
Figuur 3 - Gemiddelde windsnelheid (m/s) op 120 m hoogte (bron: DOWA).

van windparken ‘winddroogte’ (perioden met weinig tot geen wind) goed op te vangen, 4) windparken verstoren het windklimaat tot 20 km achter windparken. Ondanks deze duidelijke conclusies zijn voor de planning van offshore windparken andere ruimtelijke ordeningsaspecten ook zeer belangrijk, zoals scheepvaartroutes, afstand tot de kust, natuur en ecologie.

Energieschaarste door meteorologische extremen

Eén van de grote uitdagingen van het toekomstige energiesysteem is hoe energieschaarste door een tekort aan wind en zon kan worden opgevangen door flexcapaciteit van energiedragers, zoals batterijen of groene waterstof. Om het type en hoeveelheid flexcapaciteit goed in te schatten is er kennis nodig van de situaties die tot een lage energieproductie door wind en zon leiden. Deze zogenaamde “dunkelflautes” zijn perioden variërend van enkele uren tot dagen/weken waarin het nauwelijks waait en er weinig zonne-instraling is, meestal in de winter.

Li et al., 2021 hebben recent een studie afgerond naar de huidige karakteristieken van dunkelflautes in 11 landen rondom de Noordzee en Oostzee (inclusief Nederland, zie Figuur 4). Logischerwijs komen de meeste dunkelflautes voor in de wintermaanden (Nov, Dec, Jan) met gemiddeld 300-500 uur dunkelflaute-condities per jaar (een dunkelflaute is hier gedefinieerd als < 20% zon- en windcapaciteit). Opvallend genoeg komt dit gemiddeld in bijna alle landen even vaak voor, alleen in Zweden komt het significant meer uur per jaar voor. Het tegelijkertijd voorkomen van dunkelflautes in buurlanden is relatief hoog ($r = 0.4$) voor bijvoorbeeld Nederland-België en Denemarken-Zweden. Maar bij niet-buurlanden is de correlatie meestal erg laag ($r < 0.2$), wat betekent dat energietekort in het ene land theoretisch kan worden opgevangen door een andere land. Per land komt een dunkelflautes en bijbehorend energietekort in een gemiddeld jaar 3-9% van de tijd voor, maar bij een volledig aangesloten internationaal netwerk neemt dit af tot 3.5% voor alle landen samen. In extreme jaren is dit 6-14% per individueel land en 6.5% voor een volledig verbonden internationaal netwerk.



Figuur 4 - Figuur 8 uit Li et al., 2021; frequentie boxplot van dunkelflaute gebeurtenissen per land voor de 11 landen rondom de Noordzee en Oostzee, en voor alle landen samen als het elektriciteitsnet volledig gekoppeld zou zijn ('All').

Naast een puur meteorologische analyse, zoals hierboven door Li et al, 2021, is het ook belangrijk om naar het energiesysteem als geheel te kijken. Wanneer is het verschil tussen lage energieproductie en hoge energievraag het grootst? Want op dat moment is de grootste

flexcapaciteit nodig om dit tekort op te vangen. Door middel van vele klimaatsimulaties te combineren met simpele energiemodellen maakt Van der Wiel et al., 2019 inzichtelijk wat de maximaal te verwachten tekorten zijn voor 1-, 7-, en 14-daagse perioden voor 15 West-Europese landen. Daarbij wordt specifiek gekeken naar extreme omstandigheden die typisch 1 keer per 10 jaar voorkomen. Opvallend is dat situaties met extreem lage energieproductie relatief vaak (21%) samenvallen met hoge energievraag, waardoor er een extra groot energietekort ontstaat. Een belangrijke conclusie daarnaast is dat als men aanneemt dat enkel een lage energieproductie leidt tot energietekort dit leidt tot een ernstige onderschatting van dit risico; energievraag is hiervoor net zo belangrijk.

Weersverwachtingen en nowcasts

Weersverwachtingen op basis van weermodellen zijn continue onderhevig aan veranderingen en verbeteringen om een zo accuraat mogelijke voorspelling te genereren. Dit is voor de energiesector van essentieel belang voor de verwachting van de duurzame energieproductie en energievraag, maar uiteraard ook voor vele andere sectoren. Verbeteringen in weermodellen die voor de energiesector relevant zijn richten zich vooral op het verfijnen van de resolutie, verbeteren van atmosferische grenslaag (onderste 500-1000m van de atmosfeer) processen in modellen en toevoegen van *wind farm parameterizations*.

De verfijning van de resolutie vindt op 3 manieren plaats die allen nuttig zijn voor de energiesector; in de tijd, horizontaal en verticaal. Hogere resolutie in de tijd maakt de verwachtingen geschikter om accurate energieverwachtingen te genereren waardoor weerdata op sub-uur niveau gewenst is. Doordat de verticale resolutie toeneemt is het model beter in staat op de atmosfeer nabij het oppervlak (onderste 100-200 m) beter te simuleren waardoor mist, bewolking en wind snelheden nabij de grond accurater kunnen worden verwacht. Hetzelfde geldt eigenlijk voor een verfijning in de horizontale resolutie, dit zorgt er voor dat lokale processen zoals wolken en verschillen in landoppervlak beter worden meegenomen in de verwachting. Zowel de resolutie van de mondiale weermodellen (ECMWF < GFS) als die van de mesoschaal modellen (bijv. Harmonie) worden steeds fijner door de vooruitgang in computerrekenkracht.

Mede doordat de resolutie van de weermodellen toeneemt is het ook steeds beter mogelijk om de fysische processen in de atmosfeer -en de grenslaag in het bijzonder- beter te simuleren. Deze parameterisaties worden constant verbeterd, waarbij het grenslaagschema van Harmonie recent een grote update heeft gekregen (de Rooy et al., 2022). Het duidelijkste voorbeeld hiervan is het verschil tussen conventionele (hydrostatische) weermodellen, waarin turbulentie is geparameteriseerd, en LES-modellen, waarin turbulentie expliciet wordt opgelost.

Een recente toevoeging in weermodellen die specifiek verband houdt met de energiesector is het expliciet meenemen het effect van windparken op de atmosfeer. Grootschalige windparken zorgen met hun zog-effect voor een dusdanige verstoring van de atmosfeer welke meegenomen moet gaan worden in weermodellen. Hiervoor is een *wind farm parameterization* ontwikkeld en geïmplementeerd in Harmonie (van Stratum et al., 2021), welke in het WINS50 project ook gebruikt zal worden voor toekomstsimulaties. Hoe groter het windpark, hoe groter ook deze invloed. Uit modelresultaten blijkt dat de invloed van een groot

windpark (bijv. Gemini) een windsnelheidsafname tot 1 m/s kan veroorzaken, terwijl een kleiner park (bijv. Egmond aan Zee) voor een afname van ca. 0.5 m/s zorgt.

Indirect interessant voor betere weersverwachtingen is de lancering van de derde generatie MeteoSat satellieten⁸, die gaan voorzien in veel betere 3-D observaties van vocht, temperatuur en bewolking in de atmosfeer boven Europa. Als deze data in weermodellen wordt geassimileerd dan verbetert daardoor de initiële conditie van het weermodel en daarmee waarschijnlijk ook de simulatie van toekomstig weer. Door betere observaties van de verticale structuur van de atmosfeer zullen vooral bewolking en de gehele grenslaag beter worden gesimuleerd, welke beide erg belangrijk zijn voor wind- en zonne-energieverwachtingen.

De nieuwe MeteoSat satellietdata is daarnaast ook nuttig voor de ontwikkeling van een betere nowcasting voor zonnestraling. Op basis van 2^{de} generatie MeteoSat data is er al onderzoek gedaan naar zo'n nowcast algoritme (Wang et al., 2019). Door de toename van zonnepanelen komt hier steeds meer aandacht voor en nauwkeurigere wolkenobservaties door de satelliet zijn hier essentieel voor. Het KNMI en de WUR zijn hier dit jaar een nieuw project voor gestart: nowcastsun⁹.

Overig

Naast dit wetenschappelijk onderzoek worden er ook studies gedaan naar mogelijke manieren om toekomstig onderzoek beter te laten aansluiten op de wensen. In Craig and Wohland et al (2022, submitted) wordt het probleem dat er ligt tussen de energiesysteem modelleers en klimaatonderzoekers benoemd en besproken. Beide wetenschapsgroepen zien en gebruiken klimaatdata op verschillende manieren, omdat ze verschillende uitgangspunten hebben. Een klimaatwetenschapper wil een model maken en data genereren die het huidige en toekomstige klimaat zo goed mogelijk benadert, inclusief de daarbij horende onzekerheden. De energiemodelleur daarentegen wil met behulp van duidelijke data op hoge resolutie zo goed mogelijk de relatie tussen meteorologie en energieproductie en -vraag vatten om uiteindelijk de juiste praktische beslissing te kunnen nemen. Kortgezegd komt het er op neer dat in de energiesector vrijwel altijd slechts één (historische) tijdserie wordt gebruikt, terwijl klimaatonderzoekers vinden dat er ensembles datatsets moeten worden gebruikt om de onzekerheid van het toekomstige klimaat correct te representeren. Hier zit een groot en duidelijk gat tussen beide groepen.

Voor een juiste inschatting van de randvoorwaarden van het toekomstige energiesysteem is de kennis en kunde van beide groepen en de combinatie daarvan essentieel. De auteurs stellen daarom 3 punten voor: 1) er dient historische en toekomstige klimaatdata te worden opgeleverd die specifiek is afgesteld op energiemodellen, zoals uurlijkse data van specifieke variabelen en wind op turbine-hoogte; 2) anderzijds moeten energiemodellen moeten worden uitgerust zodat ze kunnen omgaan met niet-deterministische (ensemble) klimaatdata; en 3) stimuleren van verregaande samenwerking en communicatie tussen beide groepen.

⁸ <https://www.eumetsat.int/meteosat-third-generation>

⁹ <https://www.knmi.nl/research/1/projects/nowcastsun>

Overigens worden er wel stappen gezet om de bovenstaande groepen beter op elkaar af te stemmen. Zo werken ENTSO-E en C3S (Europees klimaatcentrum Copernicus) aan het aanleggen van een European Energy Climate Database¹⁰ om klimaatdata beter vindbaar en bruikbaar te maken voor en de energiesector. Ook start er bijvoorbeeld binnenkort een project om historische en toekomstige weerdata te downscalen in de tijd (upgraden van de resolutie van 6u/3u naar 1 uur).

In Duitsland is begin dit jaar (2022) een vergelijkbaar project (KliWiSt¹¹) gestart dat de invloed van klimaatverandering op individuele windenergie locaties onderzoekt. In het projectplan is ook specifiek tijd en budget gealloceerd om de ruimte tussen industrie en wetenschap te overbruggen. De verwachte eindproducten van het project zijn hoge resolutie historische en toekomstige tijdseries per locatie.

Een laatste punt dat veel wordt genoemd door onderzoekers is de beschikbaarheid van data van operationele parken (voornamelijk windparken). Het is nu vaak onduidelijk hoeveel vermogen waar precies staat opgesteld en hoeveel energie deze parken produceren onder bepaalde meteorologische condities. Dit soort operationele data is echter belangrijk voor het valideren van energiemodellen. Manieren om deze data publiek toegankelijk (of in ieder geval voor onderzoek) te maken moeten worden onderzocht zodat dit geen belemmering vormt voor toekomstige ontwikkelingen.

¹⁰ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-energy-explorer-europe?tab=overview>

¹¹ <https://www.gerics.de/science/projects/detail/103308/index.php.en>

4 Samenvatting en conclusie

De rol van meteorologie in de energiesector neemt toe en zal in de toekomst nog veel groter worden. Tot voor kort was enkel de warmtevraag van gebouwen gerelateerd aan weersomstandigheden, terwijl de rest van de energiemarkt vooral vraaggestuurd was. Met de ingezette energietransitie zal dit compleet veranderen, veel processen worden geëlektrificeerd (CV-ketel naar warmtepomp, brandstof auto naar elektrische auto's (EV), minder gebruik fossiele brandstoffen) waardoor de elektriciteitsvraag sterk toeneemt terwijl tegelijkertijd de elektriciteitsproductie grotendeels zal overstappen op duurzame bronnen (wind en zon). Hierdoor speelt het weer een belangrijke en essentiële rol in de toekomstige energiemarkt.

Het doel van deze scoping studie is om een lijst met onderzoeksvragen op te stellen op basis van i) een inventarisatie van de behoeften en vragen van de energiesector op het gebied van meteorologie en klimaat en ii) de beschikbare kennis en data in het meteorologische vakgebied. Deze lijst geeft een overzicht van de open vragen die momenteel spelen in de energiesector op het gebied van meteorologie, klimaatverandering en variabiliteit daarin. Het is belangrijk om het merendeel van deze vragen in de komende jaren te kunnen beantwoorden, omdat deze rechtstreeks de randvoorwaarden scheppen van de energietransitie. Het investeren in deze benodigde meteorologische kennis, informatie en data moet niet ondergeschikt zijn aan de enorme investeringen die worden gemaakt om in snel tempo windparken en zonnepanelen te installeren en tegelijkertijd de infrastructuur klaar te maken voor de energietransitie.

Samenvatting

Eén van de belangrijkste conclusies aan het einde van deze inventarisatie is dat er een verregaandere samenwerking nodig is tussen de vakgebieden van de energiesystemen enerzijds en weer- en klimaatonderzoek anderzijds. Beide doen al veelvuldig en uitgebreid onderzoek en werk in de energietransitie, maar doen dit wel vooral vanuit hun eigen expertise terwijl het voor de complexe aanpak van de energietransitie juist nodig is om dit op een holistische manier te doen. In een zeer recent onderzoek beschrijft dit uitvoerig (Craig en Wohland et al., 2022). De drie hoofdpunten van de auteurs zijn een leidraad voor toekomstige projecten en onderzoek: 1) verregaande samenwerking en communicatie tussen energiesysteemmodellen en klimaatonderzoekers; 2) historische en toekomstige klimaatdata moet specifiek worden afgesteld op energiemodellen; en 3) energiemodellen moeten worden uitgebreid zodat deze ensemble klimaatdata kunnen verwerken.

Qua energievraag is de toekomstige warmtevraag in de winter (en in mindere mate ook de koeltevraag in de zomer) van gebouwen de grootste onzekerheid. Of en hoe het toekomstige klimaat verandert is hiervoor van belang. Gemiddeld zal de warmtevraag afnemen omdat winters minder koud worden, maar in hoeverre strengere winters nog voor zullen komen is een belangrijke onzekerheid. Daarnaast spelen socio-economische factoren een grote rol, zoals de isolatie van huizen, overgang naar warmtepompen en beschikbare flexcapaciteit, waarvan de onzekerheid erg groot is. Een veelgenoemde vraag is dan ook het gebrek aan duidelijke en transparante aannames en brandbreedtes voor bovengenoemde onderzoekheden waardoor scenario's voor de toekomstige warmtevraag lastig te maken zijn.

Meteorologie is de essentiële inputparameter voor een energiesysteem dat grotendeels draait op energie uit duurzame, hernieuwbare bronnen (zon/wind). Door de onzekerheden in klimaatverandering, natuurlijke variabiliteit en weersverwachtingen aan sich is het logisch dat veel van de open vragen zich toespitsen op de toekomstige energieproductie door wind/zon. De onzekerheid in het toekomstige wind- en zonklimaat is groot en bij het gebrek aan een significante trend worden er momenteel vaak historische gegevens gebruikt. Voor de totaal benodigde productiecapaciteit, de verdeling tussen wind en zoncapaciteit en de grootte van de flexcapaciteit om tekorten op te vangen zijn echter duidelijkere randvoorwaarden nodig. Voor het laatste zijn zogenaamde dunkelflautes, perioden met weinig wind én weinig zon, zeer belangrijk, en dan met name de duur en de ruimtelijke spreiding van deze events. Dunkelflautes vallen vaak in de winterperiode en dus samen met hoge energievraag wat leidt een extra grote energie-onbalans.

Open vragen energiesector over meteorologie en klimaat

De open vragen zijn verdeeld op basis van relevantie. Bovenaan staan twee grote vraagstukken; deze onderwerpen worden breed gedragen, de onzekerheden erin zijn essentieel voor toekomstige ontwikkelingen en beide vergen een grootschalig aanpak. Hierna volgt een drietal van wat kleinere onderwerpen die met gericht en relatief kleinschalig onderzoek kunnen worden beantwoord. Vanaf vraag 6 staan de overige open vragen in willekeurige volgorde.

1. Wat zijn in de toekomst de extremen in energie-onbalans, een lage energieproductie en een hoge energievraag (zogenaamde dunkelflautes):
 - Wat zijn de omstandigheden rondom zo'n minimum?
 - Hoe lang kunnen zulke periodes aanhouden en hoe groot zijn zulke gebieden?
 - Hoe vertaalt zich dat naar randvoorwaarden voor aan te leggen flexcapaciteit?
 - Zijn deze extremen (anti-)gecorrigeerd boven verschillende Europese landen?
 - Wat betekent dat voor de netverbindingen tussen Europese landen?
2. Een betere schatting voor de energievraag in de toekomst:
 - transparante aanname over socio-economische factoren; zoals van gas naar elektriciteit, isolatie van gebouwen, variabele energiegebruik industrie.
 - hoeveel minder koud worden de winters gemiddeld, en hoe koud gaan de koudste winters nog zijn?
 - de koeltevraag in de zomer; hoeveel warmer worden de zomers?
 - transparantie over de aannames en scenario's die hierbij worden gekozen
3. Hoe groot zijn potentiële "ramping" situaties (grote energieverschillen door plotse toe-/afname van wind/zon) in de toekomst bij een groot aandeel duurzame energie? En is hierin een verschil tussen wind en zon?
4. Hoe groot is de invloed van grote windparken en zonneweides op de atmosfeer, en daarmee mogelijk om de energieproductie?
 - Wind: windafname achter turbines
 - Zon: verandering oppervlakte energiebalans: albedo en afdekking oppervlak

5. Hoe nuttig zijn energieweerwaarschuwingen in de toekomst? Hoe zouden deze moeten worden vormgegeven? En kan dit mogelijk een deel van de benodigde flexcapaciteit opvangen?
6. Hoe kunnen intra-day verwachtingen, op basis van nowcasts voor wind en zon, worden ingezet op dagen dat er grote weersomslagen worden verwacht.
7. Ontwikkeling en verbetering van nowcasts voor wind en zon door waarnemingen (van bijv. satellieten) te combineren met hoge resolutie weermodel data.
8. Gebruik van seizoensverwachtingen om beter te anticiperen op benodigde flexcapaciteit of energievoorraad (of gasvoorraad de komende jaren).
9. Is er (anti-)correlatie tussen de ruimtelijke patronen van duurzame energieproductie en energievraag? En wat zijn de gevolgen daarvan?
10. Toekomstig wind- en zonklimaat:
 - wat is de toekomstige trend in windsnelheid?
 - wat is de toekomstige trend in zonne-instraling?
 - opstellen van nationale energiescenario's (naar voorbeeld van de KNMI klimaat-scenario's)
 - er is vraag naar een benchmark dataset voor 2050 voor energievariabelen; het liefst op Europees niveau.
11. Wat is de invloed van mogelijk toekomstige veranderingen in andere meteorologische variabelen op de energieproductie, -vraag, en -sector?
 - Zijn er grote verschillen in overheersende windrichting te verwachten?
 - Is het waarschijnlijk dat verticale windprofielen veranderen in de toekomst?
 - Als temperatuur en luchtdrukpatronen veranderen, hoe beïnvloedt dit de energieproductie?
 - Neemt de frequentie en hevigheid van stormen toe in de toekomst, en hoe beïnvloedt dit duurzame energieproductie?
 - Wat is de invloed van toekomstig weer op het onderhoud van windturbines?

5 Aanzet onderzoekopzet

Op basis van de inventarisatie (hoofdstuk 2 & 3) en de lijst met open vragen (hoofdstuk 4) wordt er in dit hoofdstuk een onderzoekopzet voor één van de meest relevante vragen beschreven. Er is gekozen om de vraag rondom de dunkelflautes en benodigde flexcapaciteit verder uit te werken, omdat de uitkomst hiervan een grote impact heeft op grote infrastructurele investeringen op het gebied van energiedragers en opslag daarvan.

Hieronder staan de hoofdvraag en bijbehorende subvragen voor dit onderzoek op het snijvlak van meteorologie, klimaatverandering en energiesysteemmodellen. Het antwoord op de laatste subvraag is de belangrijkste uitkomst van dit onderzoek, deze schatting met onzekerheidsband is leidend voor de ontwikkeling van flexcapaciteit: de totale benodigde capaciteit, het type en verdeling energiedragers en opwek- en opslaglocaties.

Onderzoeksvraag: Wat zijn in de nabije toekomst (2030-2050) de extremen in energie-onbalans voor Europa tijdens een zogenaamde dunkelflaute, het tegelijkertijd optreden van een lage energieproductie en een hoge energievraag?

Subvragen:

- Wat zijn de meteorologische omstandigheden rondom zo'n minimum en hoe lang kunnen zulke periodes aanhouden?
- Wat is de ruimtelijke correlatie tussen zulke extremen boven het Europese continent?
- In hoeverre zijn huidige en toekomstige netverbindingen tussen Europese landen toereikend voor de herverdeling van energie?
- Hoe vertaalt zich dat naar benodigde hoeveelheden en locaties voor flexcapaciteit op verschillende tijdschalen (dag, week, maand en seizoen)?

Het is duidelijk dat voor het beantwoorden van deze onderzoeksvragen een **multidisciplinair team nodig is met zowel klimaatonderzoekers als energiesysteemdeskundigen**. Op deze manier is het mogelijk om zowel de onzekerheden in het toekomstige klimaat als in de toekomstige energievraag en netcapaciteit correct mee te nemen. Ook is het essentieel dat dit onderzoek een zo groot mogelijk gebied beslaat, **ten minste de landen van de Europese Unie**. De Europese energiemarkt is al grotendeels afhankelijk van elkaar en bij grotere aandelen energie uit wind en zon zal dit enkel toenemen.

Enkele voorbeelden van mogelijke concrete uitkomsten van dit voorgestelde onderzoek kunnen bijvoorbeeld zijn; hoe verhoudt een verdubbeling van netwerkconnecties tussen Europese landen zich tot een uitbreiding van lokale opslag- en omzetcapaciteit en wat is eventueel een betere infrastructurele investering? Of, welke landen of regio's zijn logische locaties voor opslag- en omzetcapaciteit van energie en is grootschalig daarbij beter dan kleinschalig, of vice versa?

Het voorgestelde onderzoek zal niet volledig vanaf nul moeten worden opgezet, want er is vanuit beide werkvelden al veel informatie en kennis beschikbaar die een goede basis vormt.

Een goede blauwdruk is de **onderzoeksopzet van Van der Wiel et al., 2019**, die de toekomstige energiemarkt van heel Europa en de onzekerheden daarin als een holistisch concept beschouwen. Dat wil zeggen dat er rekening moet worden gehouden met i) energieproductie door wind en zon per locatie/land, ii) weersafhankelijke energievraag per locatie/land, iii) andersoortige energieproductie (bijv. kernenergie) en -vraag, en iv) energietransport van productielocatie naar vraaglocatie.

Een aantal aannames en/of databronnen in dit voorgestelde onderzoek zullen in ieder geval aangepast moeten worden ten opzichte van Van der Wiel et al., 2019. Voor een meer realistische energieproductie is klimaatdata met een hogere resolutie in tijd en ruimte nodig. In plaats van dagelijkse data op 100x100 km resolutie zou dit moeten worden verkleind naar minimaal tijdstappen van 1 uur en ca. 30x30 km. Voor windproductie is een fijnere verticale resolutie ook belangrijk voor de juiste windsnelheid op turbinehoogte. Qua energievraag nemen Van der Wiel et al., 2019 alleen de weersafhankelijke energievraag mee, maar voor de totale energie-onbalans is de weersónafhankelijke energievraag net zo belangrijk. Ook gebruiken ze de zogenaamde “*copper-plate assumption*” waardoor er geen limiet en verlies is bij energietransport. Hiervoor in de plaats zouden realistischer netwerkconnecties voor verschillende gebieden en landen moeten worden geïmplementeerd. Tenslotte zal de resultante een energie-onbalans zijn per locatie die kan worden gematcht met geplande en theoretische flexcapaciteit, waarbij ook omzettings- en opslagverliezen moeten worden meegenomen. Interessante bijvangst van dit onderzoek zal zijn dat het ook uitwijst in hoeverre de verwachte overcapaciteit in de zomer voldoende is om de flexcapaciteit te vullen voor de energie-onbalans gedurende de winter.

Het bovenstaande is grofweg samen te vatten in activiteiten en een tijdsplanning, zoals in Tabel 2. Gezien de complexiteit van het vraagstuk, zowel energieproductie als -vraag en op Europese schaal, is de verwachting dat zo'n project 3 á 4 jaar zal duren. Belangrijk hierbij is dat het onderzoeksteam uit ca. 6 experts bestaat met verschillende achtergronden; klimaatonderzoek, toekomstige energievraag en continentale energiesystemen. Samenwerking met andere Europese organisaties of instituten lijkt hierbij ook essentieel.

Tabel 2 - Grove tijdsplanning voor een onderzoek naar de toekomstige extremen in energie-onbalans.

Activiteit	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4
1. Energieproductie per gebied				
Ensemble klimaatdata op juiste tijd- en ruimteresolutie voor heel Europa	■	■		
Scenario's voor toekomstige wind- en zoncapaciteit		■		
Ensemble van energieproductie door wind/zon		■	■	
Scenario's voor overige energieproductie (bijv. gas, kernenergie)		■		
2. Energievraag per gebied				
Weersafhankelijke energievraag	■	■		
Scenario's voor overige energievraag bijv. (industrie, mobiliteit)		■		
3. Energietransport tussen gebieden				
Implementatie huidige netconnecties	■			
Scenario's voor toekomstige netconnecties		■		
4. Energie-onbalans				
Koppeling scenario's voor energieproductie, -vraag, en -transport		■	■	
Ensemble energie-onbalans voor verschillende tijdschalen		■	■	
5. Consequenties				
Implementatie flexcapaciteit per gebied: type energiedrager, omzettingsefficiëntie en opslag			■	■
Beschikbare overcapaciteit in zomer			■	■
Benodigde flexcapaciteit in winter			■	■
Aanbevelingen voor de ontwikkeling van flexcapaciteit per gebied			■	■

6 Literatuurlijst

Craig et al., 2022: Overcoming the disconnect between energy system and climate modelling. *Joule*, in review.

De Rooy et al., 2022: Model development in practice: a comprehensive update to the boundary layer schemes in HARMONIE-AROME cycle 40. *Geoscience Model Development*, 15, 1513-1543, doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1513-2022>

Klaverla et al., 2020: Quality of wind characteristics in recent wind atlases over the North Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 728, 1489-1515, doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3748>

KNMI 2021: KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp.

KNMI, 2015: KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.

Kreuwel et al., 2020: Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations. *Solar Energy*, 206, 381-389, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.093>

Neubacher et al., 2021: Multi-decadal offshore wind power variability can be mitigated through optimized European allocation. *Advances in Geosciences*, 54, 205-215, doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-54-205-2021>

Pryor et al., 2020: Climate change impacts on wind power generation. *Nature Review Earth & Environment*, 1, 627-643, doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0101-7>

Van der Wiel, 2019: Meteorological conditions leading to extreme low variable renewable energy production and extreme high energy shortfall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 261-275, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.065>

Van Stratum et al., 2021: A year-long evaluation of a wind-farm parameterisation in HARMONIE-AROME. *Earth and Space Science Open Archive*, in press, doi: <https://doi.org/10.1002/es-soar.10509415.1>

Wang et al., 2019: Surface solar radiation forecasts by advecting cloud physical properties derived from Meteosat Second Generation observations. *Solar Energy*, 177, 47-58, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.073>

Wohland et al., 2017: More homogeneous wind conditions under strong climate change decrease the potential for inter-state balancing of electricity in Europe. *Earth System Dynamics*, 8, 4, 1047-1060, doi: <https://doi.org/10.5194/esd-8-1047-2017>

Wijnant, 2018: Weergave van de eerste sessie "Als het aan de wind lag, waar zou ze dan toekomstige nieuwe windgebieden inrichten op de Noordzee?". KNMI, De Bilt.

Bijlage A Overzicht gesprekken

Datum	Geïnterviewde(n) en organisatie
26-12-2021	Martien Visser Hanze Hogeschool/Gasunie
05-01-2022	Erik ten Elshof Ministerie van Economische Zaken
06-01-2022	Marijke Kellner Gasunie
19-01-2022	Sabine Jansen Ministerie van Binnenlandse Zaken
21-01-2022	Rene Peters TNO
26-01-2022	Mathijs Heit Vestas
02-02-2022	Frank Wiersma, Emma van der Veen, William Zappa, Rick Scharrenberg TenneT
04-02-2022	Marco Londo NVDE (Nederlandse Vereniging Duurzame Energie)
04-02-2022	Alexander Wirtz Quintel
07-02-2022	Piet Harlaar RWE
09-02-2022	Hans Grünfeld VEMW (Vereniging voor Energie, Milieu en Water)
09-02-2022	Yannick Heijne Windunie
09-02-2022	Cees Volkers, Paul Vethman PBL
10-02-2022	Martin Dörenkämper, Elke Keup-Thiel, Johanna Borowski, Jan Wohland, Laura Scheffer Climate Service Center Germany (GERICS) & Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems (IWES)
21-02-2022	Laurens Stoop KNMI, TenneT, Universiteit Utrecht
07-03-2022	Karin van der Wiel KNMI
10-03-2022	Bart Hoefakker, Tom Obdam Windpark Gemini
14-03-2022	Wijnand van Hooff Holland Solar
16-03-2022	Ine Wijnant, Jan Fokke Meirink KNMI