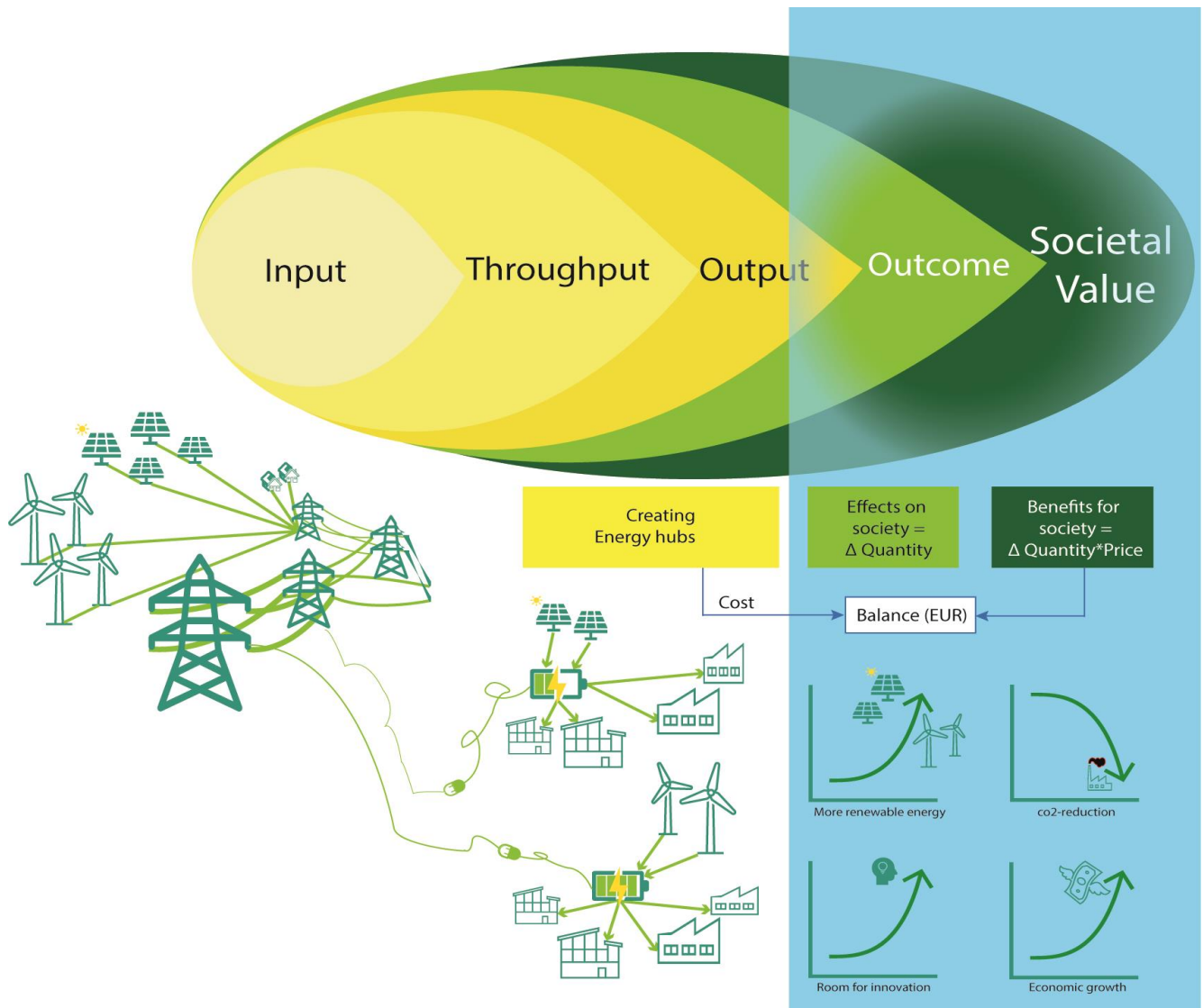




Verkenning maatschappelijke baten van energy hubs op bedrijventerreinen

Colofon

Datum 5 juni 2025

Referentie

Versie 1.2

Afdeling Lectoraat Modelleren van Maatschappelijke Impact

Auteur Natalia Kuznetsova, Attila Németh, Michel Linnenbank

Datum 5 juni 2025

Titel Verkenning maatschappelijke baten van energy hubs op bedrijventerreinen

Pagina 3 / 41

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	5
1. Inleiding	8
2. Onderzoeksvraag en methode	9
3. Beschrijving energy hubs	10
4. Scenario's.....	12
4.1 Scenario A: Huidige situatie + autonome ontwikkeling	12
4.2 Scenario B: Huidige situatie + autonome ontwikkeling + energy hubs	13
5. Concept causaal model.....	14
6. Effecten van energy hubs.....	16
6.1 Onafhankelijkheid; Afname afhankelijkheid fossiele energiebronnen	16
6.2 Vraag en aanbod afstemmen.....	16
6.3 Vertrouwen.....	17
6.4 Voorspelbare en/of lagere eindkosten energie	18
6.5 Kunnen ondernemen.....	18
6.6 Regio ontwikkeling	19
6.7 Risico op stroomuitval.....	19
6.8 Systeembeheersing complexer.....	19
6.9 Digitale veiligheid	20
6.10 Interne en externe veiligheid	21
6.11 Financiële deelname aan energietransitie	22
6.12 Reductie CO ₂	22
6.13 Vermindering milieuschade en sociale problemen	23
6.14 Verbetering luchtkwaliteit	24
7. Maatschappelijke baten van energy hubs.....	25
7.1 Toename economische groei: Eerder en meer	25
7.2 Minder schuldenproblematiek	25
7.3 Verandering slachtoffers ongevallen.....	26
7.4 Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren.....	27
7.5 Toename beleefde kwaliteit van leven.....	28
7.6 Verandering woongenot.....	29
7.7 Verandering biodiversiteit.....	30
7.8 Bijdrage tegen klimaatverandering	30
8. Conclusies	32
9. Literatuurlijst	35

Datum 5 juni 2025

Titel Verkenning maatschappelijke baten van energy hubs op bedrijventerreinen

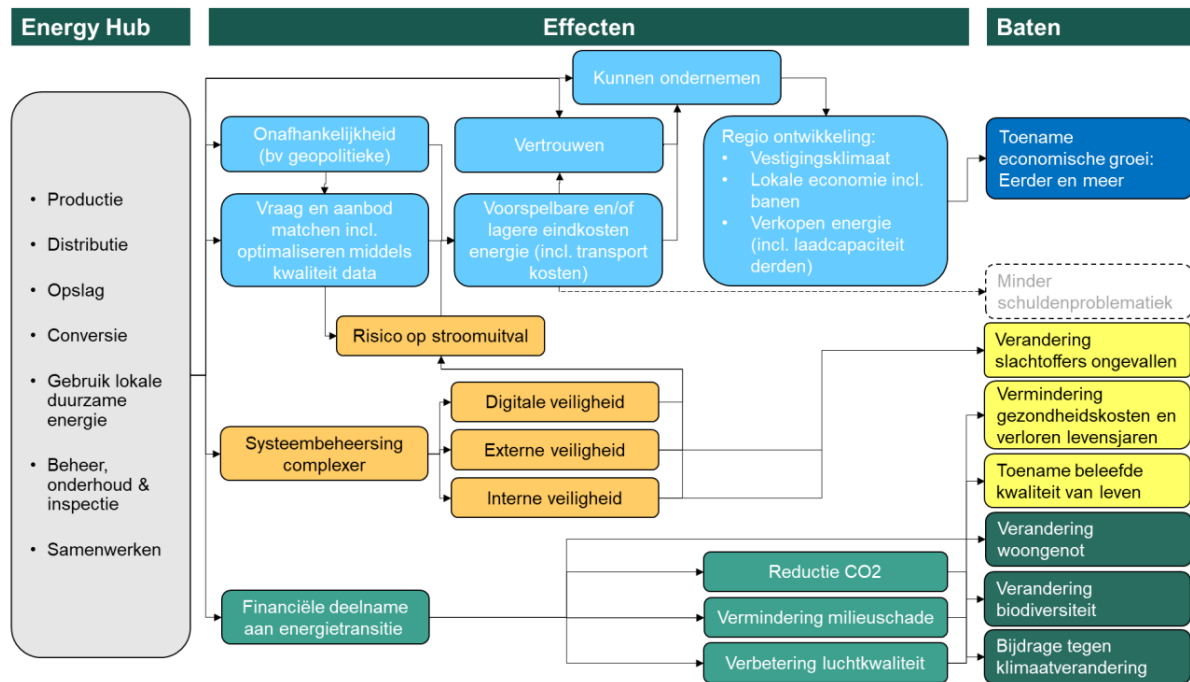
Pagina 4 / 41

Samenvatting

Energy hubs vormen een mogelijke oplossing om het centrale energiesysteem op lokaal (regionaal/decentraal) niveau te versterken en (duurzaam) te innoveren. Bij het ontwerp van energy hubs op regionale bedrijventerreinen is het verstandig om niet alleen naar de technologische en procesmatige aspecten te kijken, maar ook naar de mogelijke maatschappelijke effecten ervan. Inzicht hierin kan van belang zijn om mogelijk meer maatschappelijke waarde te realiseren, maar ook om aan de voorkant mogelijke partijen waar maatschappelijke effecten terechtkomen meteen mee te nemen in het ontwerp.

Om hier inzicht in te krijgen zijn ten eerste twee werksessies binnen het consortium MOOI-EIGEN gehouden. Tijdens deze werksessies en aanvullende gesprekken hebben we in kaart gebracht wat een energy hub is, wat de mogelijke effecten en neveneffecten kunnen zijn en hoe deze zich mogelijk vertalen naar baten voor de maatschappij. Vervolgens hebben we een causaal model ontwikkeld dat beschrijft langs welke routes mogelijk maatschappelijke impact wordt bereikt. Dit model hebben we vervolgens onderbouwd (inclusief kengetallen voor kwantificering en monetarisering waar mogelijk) middels een literatuuronderzoek.

Deze verkennende analyse laat een heel aantal mogelijke effecten en welvaartseffecten voor energy hubs zien. Deze zijn te vinden in het onderstaande causale model (Figuur I). De mogelijke baten betreffen ten eerste een toename aan economische groei. Hierbij kan het gaan over het versnellen en/of vergroten van de economische groei. Daarnaast zijn er baten rond gezondheidskosten en slachtoffers door veranderingen in milieukwaliteiten en/of ongevallen. Tevens is het van belang rekening te houden met eventuele veranderingen in woongenot en kwaliteit van leven. Wanneer er sprake is van een dusdanig groot aantal energy hubs waardoor de energieprijzen daalt is het denkbaar dat het reduceren van energiearmoede optreedt, waardoor schuldenproblematiek wordt voorkomen. Voor individuele energy hubs is dit echter niet aan de orde. Tenslotte zijn er maatschappelijke baten mogelijk rond biodiversiteit en kunnen energy hubs een bijdrage leveren aan klimaatverandering.



Figuur I. Conceptueel causaal model maatschappelijke impact van energy hubs

Aan de hand van dit schema is het mogelijk om in de ontwerpfase voor een energy hub snel te inventariseren welke effecten en maatschappelijke baten mogelijk van toepassing zijn. Om vervolgens snel een eerste beeld te krijgen van wat de mogelijke omvang van de maatschappelijke impact is van een ontwerp van een energy hub hebben we voor de baten waar dit mogelijk was kengetallen in kaart gebracht. Aan de hand van deze kengetallen kunnen een heel aantal baten gekwantificeerd en gemonetariseerd worden. De gevonden kengetallen zijn samengevat in de onderstaande tabel (Tabel I). Deze kunnen gebruikt worden om een eerste indicatie te krijgen van wat de mogelijke maatschappelijke baten zijn in termen van maatschappelijke waarde. In Tabel II is verder aangegeven bij welke partijen de maatschappelijke baten onder andere terecht komen. Wanneer deze baten in een project aan de orde zijn en de verwachte baten een significante omvang hebben is het interessant om te kijken of deze partijen betrokken kunnen worden bij de ontwikkeling van de energy hub.

We hebben een zo volledig mogelijk beeld aan mogelijke effecten en baten proberen op te stellen, maar het kan altijd zijn dat (in een specifiek geval) er toch nog aanvullende effecten en baten optreden. Bovendien bevinden energy hubs zich zowel technisch als organisatorisch nog in een ontwikkelingsfase. Dat betekent dat het aannemelijk is dat deze technologie en de wijze van gebruik in de toekomst nog zal veranderen. De kengetallen zijn verder bruikbaar om een eerste beeld te geven van de omvang van baten, maar wat precies de omvang van de maatschappelijke baten is zal naar verwachting nader onderzoek vragen.

Tabel I: Kengetallen voor kwantificering en monetarisering baten van energy hubs

Baat	Kwantificering	Monetarisering	Referenties kengetallen
Toename economische groei	Aantal MWh geplande EH	€ 3.499 per MWh - € 11. 656 per MWh	Ecorys (2024)
Verandering slachtoffers ongevallen	Kolen 0.0013 per TWh Olie 0.0041 per TWh Gas 0.0018 per TWh Nuclear 0.0097 per TWh Wind 0.0350 per TWh Zon 0.0190 per TWh Biofuels 0.0048 per TWh Biomassa 0.0164 per TWh	€ 6,5 miljoen per persoon	Sovacool <i>et al.</i> (2015) Van der Horst (2022)
Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren	NO _x 0,71 g/kWh PM 0,03 g/kWh VOS 0,56 g/kWh SO ₂ 0,39 g/kWh	PM ₁₀ € 69,3 per kg PM _{0,1} € 438 per kg NO _x € 29,9 per kg SO ₂ € 57,5 per kg NH ₃ € 49,3 per kg NMVOS € 2,73 per kg € 6,5 miljoen per persoon	De Bruyn <i>et al.</i> (2023) Van der Horst (2022)
Toename kwaliteit van leven	PM	PM	PM
Verandering woongenot	Aantal woningen binnen 1 km (zonneweide) Aantal woningen binnen 2,25 km (windmolen)	Zonneweide: 3,7% waardedaling per woning Windmolen H <50m: gem <1% waardedaling per woning Windmolen H 50-100m: gem 2% waardedaling per woning Windmolen H >150m: gem 5% waardedaling per woning Windmolen, 500-750 m afstand: circa 3% waardedaling per woning Windmolen, 2500 m afstand: circa 0% waardedaling per woning	Dröes en Koster (2021)
Verandering biodiversiteit	Aantal ha geplande EH	160 euro per ha per jaar	Schellekens <i>et al.</i> (2020)
Bijdrage tegen klimaatverandering	Aardgas: 0,38 kg CO ₂ per kWh Steenkool: 0,83 kg CO ₂ per kWh 2000-5000 ton CO ₂ per hub	2024: € 170 per ton CO ₂ 2030: € 222 per ton CO ₂ 2050: € 516 per ton CO ₂	CBS (2025) Graaf <i>et al.</i> (2024) Bruyn <i>et al.</i> (2023) Van Capellen <i>et al.</i> (2024)

Tabel II: Partijen waar maatschappelijke baten van energy hubs mogelijk terecht komen

Baat	Baathouders
Toename economische groei	Gehele regio, provincie, gemeente, bedrijven, overige private en publieke organisaties
Verandering slachtoffers ongevallen	Professionals, omwonenden
Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren	Verzekeringsmaatschappijen, inwoners
Toename kwaliteit van leven	Inwoners
Verandering woongenot	Omwonenden, eigenaren vastgoed
Verandering biodiversiteit	(Lokale) overheden, natuurorganisaties, landbouworganisaties, maatschappij
Bijdrage tegen klimaatverandering	Maatschappij

1. Inleiding

De energietransitie is een complex proces dat moet leiden naar een duurzaam en betrouwbaar energiesysteem (zie kader). Het huidige energiesysteem is gebaseerd op het principe van centraal opwekken van energie door gebruik te maken van voornamelijk fossiele energiebronnen. De economische groei zorgt op verschillende plaatsen voor een tekort aan transportcapaciteit voor levering. Hierdoor kunnen nieuwe bedrijven niet aangesloten worden op het netwerk of kunnen zij geen aanvullende capaciteit krijgen. Door de sterke toename van het gebruik van hernieuwbare (duurzame) energie ontstaan er bovendien problemen op het bestaande elektriciteitsnetwerk. Het probleem bij zonne-energieprojecten is het tekort aan beschikbare capaciteit voor teruglevering op piekmomenten.

Energy hubs kunnen in deze context een oplossing vormen om het centrale energiesysteem op lokaal (regionaal/decentraal) niveau te versterken en te innoveren. Er zijn verschillende initiatieven ontstaan rondom energy hubs op regionale bedrijventerreinen, waarbij de rijksoverheid, provincies, gemeenten, waterschappen, netbeheerders, bedrijfsclusters, onderwijsinstellingen, maatschappelijke organisaties en andere betrokkenen op verschillende niveaus samenwerken aan dit concept. Bij het inzetten en het exploiteren van energy hubs op regionale bedrijventerreinen ontstaat de behoefte om niet alleen technologische en procesmatige aspecten te onderzoeken, maar ook de maatschappelijke effecten ervan.

Hernieuwbare energie

De vraag naar energie blijft onophoudelijk groeien waardoor de klassieke manier van energie opwekken niet meer toereikend is. Niet alleen zijn de klassieke energiebronnen eindig maar hebben deze ook een grote impact op het klimaat. Door meer in te zetten op hernieuwbare energie is de verwachting dat de vraag naar energie in de toekomst kan worden gewaarborgd en dat de klimaat impact van energie beduidend minder wordt. In de afgelopen decennia is er meer geïnvesteerd in zonne-energie en windenergie. Dit heeft er toe geleid dat de achterliggende energietechnologieën steeds efficiënter werden en de kosten aanzienlijk daalden. De Nederlandse overheid heeft verschillende beleidsmaatregelen geïmplementeerd om de ontwikkeling van hernieuwbare energie verder te bevorderen. Dit moet leiden tot een energietransitie naar hernieuwbare energie. De Nederlandse overheid heeft ambitieuze doelstellingen gesteld en streeft ernaar om in 2050 een klimaat neutrale samenleving te hebben, waarbij hernieuwbare energie een belangrijke rol speelt.

In dit onderzoek wordt de mogelijke maatschappelijke impact van energy hubs op regionale bedrijventerreinen verkend. Het onderzoek is gericht om voor potentiële initiatiefnemers en deelnemers inzichtelijk te maken en handvatten te bieden waar de mogelijke meerwaarde zit bij energy hubs. Dit moet leiden tot betere en weloverwogen keuzes die kunnen leiden tot energy hubs op lokale bedrijventerreinen.

2. Onderzoeksvraag en methode

Dit onderzoek is gericht op het in kaart brengen van de mogelijke maatschappelijke impact van energy hubs op lokale bedrijventerreinen. Hiervoor wordt een verkennende analyse uitgevoerd aan de hand van het raamwerk van een maatschappelijke kosten-batenanalyse. In het onderzoek zal de nadruk liggen om in verkennende zin de maatschappelijke baten in kaart te brengen. De centrale vraag voor dit onderzoek is:

Welke maatschappelijke baten treden mogelijk op na het opzetten en gebruiken van energy hubs op bedrijventerreinen?

Om een antwoord te krijgen op de onderzoeksvraag zijn de volgende werkstappen uitgevoerd:

1. Twee werksessies binnen het consortium MOOI-EIGEN waarbij we in kaart hebben gebracht wat een energy hub is, wat de mogelijke effecten en neveneffecten kunnen zijn en hoe deze zich mogelijk vertalen naar baten voor de maatschappij;
2. Ontwikkeling van een causaal model dat illustreert langs welke routes mogelijk maatschappelijke impact wordt bereikt;
3. Gesprekken met verschillende specialisten en betrokkenen rond energy hubs om het conceptueel causaal model verder te ontwikkelen;
4. Een literatuuronderzoek ter onderbouwing van de mogelijke maatschappelijke effecten inclusief kengetallen voor kwantificering en monetaarisering waar mogelijk.

In dit onderzoek vergelijken we twee scenario's. Scenario A betreft een situatie zonder en scenario B met energy hubs. In beide scenario's wordt uitgegaan van de autonome ontwikkeling van het huidige energiesysteem inclusief de reeds geplande netwerkuitbreiding en de verandering in energiebehoefte. Het verschil in de scenario's is dat bij scenario B er gebruikt wordt gemaakt van energy hubs.

3. Beschrijving energy hubs

Om de maatschappelijke baten van energie inzichtelijk te kunnen maken is het van belang om te duiden wat er wordt verstaan onder een energy hub binnen de context van deze verkennende maatschappelijke kosten en baten analyse. In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van energy hubs die is gebruikt voor deze verkenning.

Over het algemeen vormen energy hubs een systeem dat verschillende energiebronnen, energieopwekkings- en opslagtechnologieën en energiediensten integreert om de efficiëntie, flexibiliteit en duurzaamheid van het energienetwerk te verbeteren (Topsector Energie, 2021). Energy hubs fungeren als een “centraal punt” waar energie wordt gegenereerd, opgeslagen, gedistribueerd en beheerd. Het kan verschillende vormen van energieopwekking combineren, zoals zonne-energie, windenergie, waterkracht, biomassa, restwarmte en geothermische energie. Energy hubs kunnen verschillende vormen aannemen, variërend van kleinschalige gemeenschapshubs tot grootschalige regionale hubs.

Bij energy hubs is sprake van een fysieke laag waarin de technische aspecten centraal staan zoals opwekken, opslaan en distributie van energie. Daarnaast is er sprake van een virtuele laag waarin de organisatorische aspecten centraal staan (De Bruin *et al.*, 2023). Hierbij gaat het vooral om afspraken tussen verschillende stakeholders te organiseren om tot energie uitwisseling te komen (zie Figuur 1).



Figuur 1: Fysieke en virtuele aspecten van energy hubs¹

¹ Bruin, R. de, Kleiwegt, E., Boer, H. de (2023). *Handreiking slimme energiesystemen*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) op verzoek van de Topsector Energie .

Bij het ontwikkelen van een energy hub voor een lokaal bedrijventerrein is het – op basis van de gehouden werksessie – de vraag of het gaat om:

1. Een nieuw te ontwikkelen bedrijventerrein;
2. Een uit te breiden bestaand bedrijventerrein;
3. Een bestaand bedrijventerrein dat meer energiec capaciteit nodig heeft
4. Of een bedrijventerrein dat meer gebruik wil maken van hernieuwbare energie om duurzaamheidsdoelstellingen te behalen.

Een bijkomende factor is in welke mate het bedrijventerrein is aangesloten op het bestaande netwerk en welke ruimte er is op het netwerk.

Naast de toegankelijkheid tot het bestaande energienetwerk is het van belang om de afhankelijkheden tussen de bedrijven voor het lokaal opwekken en afnemen van energie in kaart te brengen. Naarmate de afhankelijkheden niet evenredig zijn, zullen er meer waarborgen moeten komen om tot een betrouwbare energievoorziening te komen op lokaal niveau. Dit vraagt om enige vorm van organiseren om vraag en aanbod op een goede manier op elkaar af te stemmen. Dit zal van invloed zijn op de transactiekosten van de ontwikkeling van een energy hub. Dit zal ook meegenomen moeten worden in de kosten voor het opzetten en exploiteren van een energy hub.

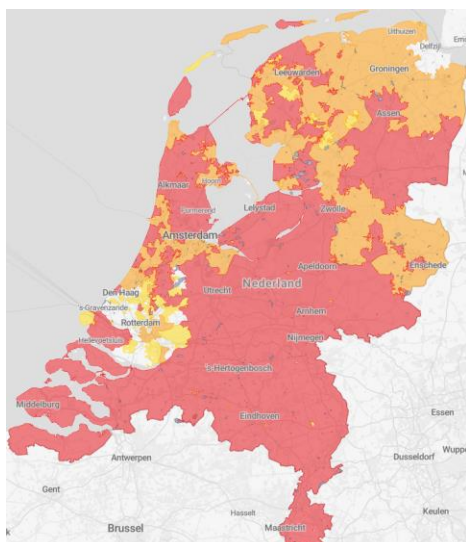
4. Scenario's

De maatschappelijke baten van energy hubs zijn mede afhankelijk van de ontwikkelingen rond netcongestie, innovaties, beleid en wet- en regelgeving. Dit maakt de analyse niet eenvoudig gegeven de onzekerheden hierin. Dit is bijzonder het geval wanneer het gaat over niet te voorspellen innovaties en de effecten daarvan. Om toch een verkenning te kunnen maken worden er twee mogelijke scenario's beschreven als uitgangspunt om de mogelijke maatschappelijke baten in kaart te brengen door deze twee scenario's met elkaar te vergelijken.

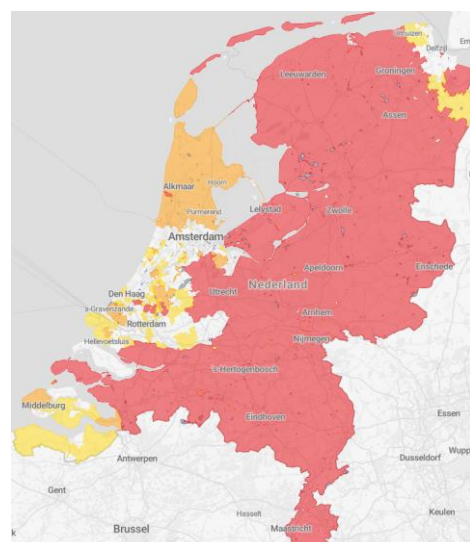
4.1 Scenario A: Huidige situatie + autonome ontwikkeling

In het eerste scenario wordt uitgegaan van het huidige energiesysteem en de verder autonome ontwikkeling hiervan waarbij het bestaande netwerk wordt uitgebreid om aan de verandering van energiebehoefte te kunnen voldoen. Als er sprake is van netcongestie wordt dit voornamelijk door netbeheerders aangepakt. De oplossing voor netcongestie wordt vaak gevonden in meerdere verbindingen voor het transport van energie en de daarmee verbonden transformatoren, schakelaars, verdeelstations, onderstations en andere technische hulpmiddelen buiten de technische installaties van de producent en de afnemer van de energie geïnstalleerd door de netbeheerder.

Inzicht in de transportcapaciteit biedt informatie voor partijen die van plan zijn om een zware netaansluiting aan te vragen en voor producenten van duurzame energie. Het geeft een beeld van de beschikbare capaciteit in verschillende regio's in Nederland. Op basis van Figuur 2 en 3 van Netbeheer Nederland (2024) wordt duidelijk dat rood gearceerd betekent dat er een *tekort aan transportcapaciteit is met een wachtrij*, in het rode gebied is er een capaciteitsprobleem en in de oranje/gele gebieden zal in de huidige situatie een capaciteitsprobleem binnen afzienbare tijd ontstaan.



Figuur 2: Capaciteitskaart afname elektriciteitsnet (Netbeheer Nederland, 2024)



Figuur 3: Capaciteitskaart teruglevering elektriciteitsnet (Netbeheer Nederland, 2024)

Om het huidige netwerk autonoom uit te breiden zijn er voldoende middelen en technisch gekwalificeerd personeel nodig, naast administratief personeel om vergunningen tijdig te regelen bij

regionale en/of lokale overheidsinstanties waar zij rekening moeten houden met de wettelijke kaders die invloed kunnen hebben op werkzaamheden in de openbare ruimte. De netbeheerder, als eigenaar van het door hen beheerde net, beschikt over zowel economisch als technisch eigendom van het net en voert congestiemanagement uit.

Voor afnemers van energie betekent dit dat zij voor een nieuwe aansluiting op het netwerk, evenals voor tijdelijke aansluitingen of wijzigingen in de aansluiting (vergroten of verkleinen), bij de netbeheerder terecht kunnen. Voor grotere elektriciteitsaansluitingen van meer dan 10 MVA kan de afnemer een andere specialist inschakelen. Verwachte aansluittermijnen, volgens de Autoriteit Consument & Markt (z.d.), verschillen in dit geval tussen kleine gebruikers en grootgebruikers van het net. Voor kleine elektriciteitsaansluitingen geldt een maximale aansluittermijn, terwijl voor grote elektriciteitsaansluitingen vaak meer tijd nodig is.

4.2 Scenario B: Huidige situatie + autonome ontwikkeling + energy hubs

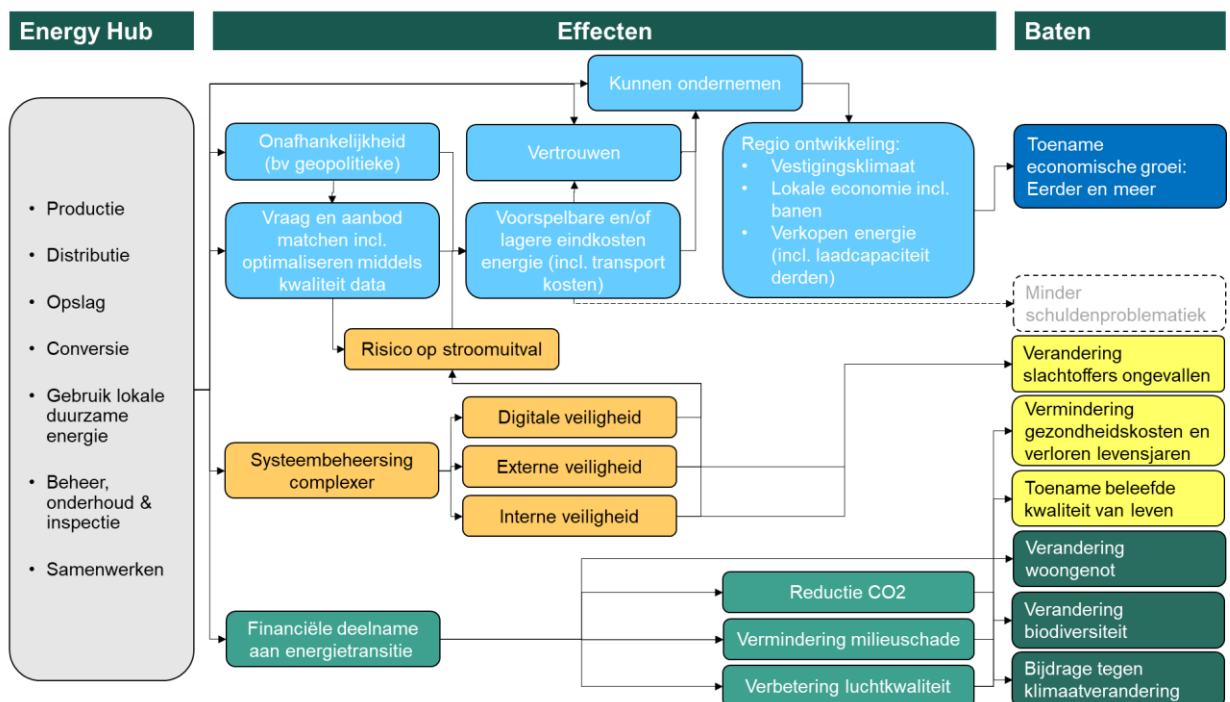
In het tweede scenario wordt er wederom uitgegaan van autonome ontwikkeling van het huidige energiesysteem waar het netwerk wordt uitgebreid om te kunnen voldoen aan de verandering van energiebehoefte. Daarnaast wordt er dit scenario gebruikt gemaakt van energy hubs om aan de verandering van de energiebehoefte te kunnen voldoen.

In deze situatie wordt netcongestie niet meer alleen geregeld door netbeheerders. Maar in aanvulling hierop ontstaat er ook een samenwerking van diverse partijen en netbeheerders om netcongestie aan te pakken die uitvloeit in een energy hub. Deze partijen bestaan zowel uit afnemers als producenten van energie die gezamenlijk met de netbeheerder een actieve rol hebben in het oplossen van situaties met tekorten aan capaciteit in congestiegebieden, eventueel aangevuld met andere partijen. De energy hub fungeert in dit geval als zowel afnemer als producent van energie binnen een specifiek geografisch gebied waar alle gebruikers en deelnemers van de hub zich bevinden. Het energiesysteem van de hub wordt in de basis voorzien van een aansluiting op het centrale net dat voldoet aan alle technische en organisatorische aspecten en mogelijkheden van het systeem van de hub.

5. Concept causaal model

Om de mogelijke maatschappelijke impact van energy hubs inzichtelijk te maken is er een conceptueel causaal model (zie Figuur 4) ontwikkeld die mogelijke effecten en baten grafisch weergeven. Voor het opstellen van het conceptueel causaal model zijn er twee werksessies gehouden met specialisten op het gebied van energy hubs. Daarnaast zijn er gesprekken geweest met verschillende specialisten en betrokkenen rond energy hubs om het conceptueel causaal model verder te ontwikkelen. Als uitgangspunt voor dit model worden alle mogelijke activiteiten binnen een energy hub meegenomen. Vervolgens zijn de mogelijke effecten en neveneffecten van deze activiteiten beschreven, gevolgd door de mogelijke maatschappelijke baten.

Dit model kan bij de start van de ontwikkeling van een energy hub gebruikt worden als checklist om na te gaan of bepaalde effecten en baten relevant zijn voor de te ontwikkelen energy hub. Tevens vormt dit model een startpunt om te bepalen welke belanghebbenden hier mogelijk bij horen en betrokken kunnen worden en welk mogelijk belang zij hebben. Het model kan tevens helpen om in een vroegtijdig stadium van de ontwikkeling van een energy hub keuzes te maken om de gewenste maatschappelijke impact te versterken. Dit kan helpend zijn in besluitvormingsprocessen rond de ontwikkeling van een energy hub.



Figuur 4. Conceptueel causaal model maatschappelijke impact van energy hubs

In het volgende hoofdstuk worden de beredeneringen achter de effecten verder uiteengezet en hoe deze de opmaat vormen voor mogelijke maatschappelijke baten. In hoofdstuk 7 worden de maatschappelijke baten toegelicht en is op basis van dit hoofdstuk mogelijk om een eerste berekening te maken van wat de mogelijke maatschappelijke baten zijn van een energy hub die ontwikkeld wordt.

Zowel in de scenario's als in het conceptueel causaal model is er geen rekening gehouden met het eventueel voorkomen van investeringen in het centrale energie netwerk door energy hubs. Hoewel volgens Mikulski & Tomczewski (2021) energy hubs kunnen bijdragen aan het opwaarderen van het huidige netwerk en daarmee uitbreidingen van het netwerk uitstellen of zelfs vermeden worden, wordt er vanuit gegaan dat de toenemende vraag aan energie uitbereiding van het netwerk onvermijdelijk is en investeringen in het totale energie netwerk (met of zonder energy hubs) noodzakelijk blijven.

6. Effecten van energy hubs

In het een conceptueel causaal model (zie Figuur 4) zijn de mogelijke maatschappelijke effecten van energy hubs in relatie ten opzichte van elkaar weergegeven en hoe deze kunnen leiden tot maatschappelijke baten. In dit hoofdstuk worden deze mogelijke effecten uiteengezet door eerst de beredenering achter het effect te benoemen om vervolgens te onderbouwen hoe het betreffende effect van invloed is op de mogelijke maatschappelijke baten.

6.1 Onafhankelijkheid; Afname afhankelijkheid fossiele energiebronnen

Basisredenering: Wanneer een energy hub ervoor zorgt dat op een bedrijventerrein grotendeels lokale duurzame energie voor alle processen wordt gebruikt, vermindert dit de afhankelijkheid van fossiele energiebronnen, die grotendeels uit andere landen worden geïmporteerd.

Het gebruik van verschillende bronnen van hernieuwbare energie betekent onafhankelijkheid van één type energie of energieleverancier. De stijgende gasprijzen en hun afhankelijkheid van internationale markten benadrukken het belang van diversificatie van energiebronnen. Afhankelijkheid van gasimport maakt landen kwetsbaar voor schommelingen in wereldwijde prijzen en politieke instabiliteit in exporterende landen. De hoge prijzen voor aardgas en elektriciteit hebben veel invloed op de winstgevendheid van energie-intensieve bedrijven, op de financiële positie van sommige energieleveranciers en op de koopkracht van burgers. Deze problemen veroorzaakt door hoge energieprijzen onderstrepen de noodzaak van nationale strategieën die gericht zijn op het verminderen van de importafhankelijkheid. Door het ontwikkelen van hernieuwbare energiebronnen en het verbeteren van energie-efficiëntie, kunnen landen hun energievoorziening diversifiëren en zo hun economische stabiliteit versterken. Dit vermindert niet alleen de economische kwetsbaarheid, maar draagt bij grootschalige inzet ook bij aan geopolitieke onafhankelijkheid (Herder *et al.*, 2014, Mulder 2021).

Voor een individuele energy hub levert dit vooral op dat de invloed van één type energie en/of energieleverancier afneemt. Wanneer er in Nederland op grote schaal duurzame bronnen worden ingezet kan dit bovendien leiden tot een verandering in geopolitieke afhankelijkheden.

6.2 Vraag en aanbod afstemmen

Basisredenering: Wanneer er bij een energy hub sprake is van lokale productie, transport, opslag, conversie en distributie van duurzame energie kan dit leiden tot een efficiëntere match van vraag en aanbod van energie, onder meer door de actuele en kwalitatieve gegevens over het energiegebruik van individuele en van alle energiegebruikers.

Het is van belang om vraag en aanbod zo efficiënt mogelijk op elkaar af te stemmen. Dit geldt in het bijzonder wanneer er sprake is van de inzet van duurzame energiebronnen. Dit komt doordat in dat geval niet alleen de vraag een dynamisch karakter heeft, maar er ook sprake is van het dynamische karakter van de duurzame energiebronnen. In tegenstelling tot centrale energiesystemen, waar energie wordt opgewekt en geleverd wanneer er vraag is, wordt bij duurzame energiebronnen de energie opgewekt wanneer de bron beschikbaar is, en niet noodzakelijkerwijs wanneer de vraag ernaar is. Dit betekent dat het nodig is om de dynamische opwekking met een dynamische vraag te matchen. Energiematching draagt bij aan de energietransitie door gebruiksprofielen te koppelen aan lokaal energieaanbod (Den Ouden & Valkenburg, 2021). Om vraag en aanbod van netwerkcapaciteit in de energietransitie af te stemmen, moet er een structurele en duurzame visie worden gevormd. Hierbij

moeten op technisch, juridisch en gebruikersniveau duidelijke randvoorwaarden worden afgestemd tussen alle betrokkenen om netbeheersing en energievoorziening effectiever te maken. Dit is alleen mogelijk met de ontwikkeling van nieuwe technische oplossingen, waarbij elektriciteitsproductie, beschikbare netwerkcapaciteit en opslagmogelijkheden integraal worden bekeken. Dit is noodzakelijk omdat de verschillende energiedragers en energienetwerken steeds meer met elkaar verweven raken (Lavrijssen & Braggaar, 2020).

Het gebruik van data kan de voorspelbaarheid rond duurzame opwekking vergroten. Het gebruik van meteorologische data is de afgelopen decennia sterk ontwikkeld in relatie tot de kwantificatie en voorspelbaarheid van zonne- en windenergie. Het is bewezen dat meteorologische patronen een aanzienlijke invloed hebben op de voorspelbaarheid. Seizoensgebonden en geografische factoren beïnvloeden de nauwkeurigheid van energievoorspellingen op basis van weersgegevens, wat de voorspelbaarheid voor energieplanning kan verbeteren (Krakauer & Cohan, 2017). Dit wordt bevestigd door Zhang (2023) die liet zien dat het gebruik van geavanceerde weersvoorspellingen de nauwkeurigheid van windenergievoorspellingen aanzienlijk verbetert en door Cros *et al.*, (2020) die de voorspelbaarheid van zonne-energie vergroot met behulp van weersvoorspellingen gebaseerd op satelliet gegevens.

Daarnaast is effectieve vraagplanning, met bijvoorbeeld focus op het verschuiven van de vraag naar energie van piekuren naar daluren of naar periodes waarin er veel energie beschikbaar is. Dit vereist kwalitatieve energiedata over het gebruiksprofiel van elke gebruiker binnen een bepaald gebied.

Lokale energieopslag en productie kunnen de voorspelbaarheid en flexibiliteit van energiegebruik verbeteren (Fichera *et al.*, 2021). Decentrale energieopslag en productie kan de afhankelijkheid van centrale netwerken verminderen, wat leidt tot stabielere en meer voorspelbare energievoorzieningen. Energieopslagsystemen worden beschouwd als effectieve methode om fluctuaties op te vangen en de voorspelbaarheid van energieverbruik te vergroten. Weliswaar helpt energieopslag om de stabiliteit van het systeem te verbeteren, maar de hoge kosten en technische beperkingen zoals lage energieconversie-efficiëntie zorgen voor een minder efficiënte oplossing dan verwacht (Mitali *et al.*, 2022; Maia & Zondervan, 2019). Dit alles vergt wel afstemming, want zonder efficiënt matchen van vraag en aanbod kan de energietransitie naar duurzame bronnen leiden tot instabiliteit in de energievoorziening, wat veel technische, economische en ecologische gevolgen heeft (Balasubramanian & Balachandra 2021, Mertens 2022).

Om meer inzicht te krijgen in het aspect voorspelbaarheid vormt de Plan & Design Toolsuite² ontwikkeld binnen MOOI-EIGEN een ingang om dit meer concreet te maken voor een lokaal project.

6.3 Vertrouwen

Basisredenering: *Het inzetten en exploiteren van energy hubs vergroot de voorspelbaarheid van kosten wat bijdraagt aan het vertrouwen om te ondernemen. Verder versterkt het inzetten op nieuwe vormen van duurzame energie het vertrouwen in de bedrijven zelf en in innovaties in de duurzame energiesector in het algemeen.*

Het inzetten en exploiteren van energy hubs vergroot de voorspelbaarheid van kosten wat bijdraagt aan het vertrouwen om te ondernemen.

² <https://www.eigen-energyhubs.nl/kennisdeling/>

Verder versterken bedrijven die investeren in maatschappelijke verantwoordelijkheid (MVO) en duurzame bedrijfsstrategieën, het vertrouwen van belanghebbenden. Een goed uitgevoerde MVO-strategie kan leiden tot meer vertrouwen in de desbetreffende bedrijven. Dit kan weer tot een verbetering in de concurrentiepositie van deze bedrijven leiden (Stawicka, 2021).

Verder speelt vertrouwen een cruciale rol bij het verspreiden en gebruiken van innovaties in de sector van hernieuwbare energie. Dit vertrouwen bevordert het investeren en daarmee de creatie van nieuwe kennis en innovaties (Stawicka, 2021).

6.4 Voorspelbare en/of lagere eindkosten energie

Basisredenering: Lokale productie van energie van duurzame bronnen als wind en zon levert voorspelbare prijzen op en kan mogelijk op de lange termijn kosten voor energie reduceren.

Volgens Hogan (2022) hebben nieuwe duurzame technologieën hoge kapitaalkosten, maar lage variabele kosten, in tegenstelling tot oudere technologieën. Dit betekent dat de inzet van nieuwe duurzame technologieën voorspelbare kosten opleveren, doordat deze voornamelijk aan de voorkant gemaakt moeten worden. Wanneer er met energyhubs een verdienmodel ontstaat wordt het interessant om regie te pakken op je energievoorziening inclusief de kosten daarvan en komen meer partijen in beweging om te investeren in duurzame energie. In de afgelopen 12 jaar zijn de kosten van nieuwe zonnepanelen met 85% gedaald, waardoor investeren in hernieuwbare energiebronnen nu goedkoper is dan in kolen en kernenergie. Technologische innovatie zal de kosten van duurzame energieopwekking verder verlagen, waardoor investeren in hernieuwbare bronnen aantrekkelijker en voorspelbaarder wordt voor de particuliere sector. De economische levensduur van windenergie is 25 tot 30 jaar, en voor zonne-energie tot 35 jaar, waarbij de technische levensduur de economische levensduur met enkele jaren overstijgt (Bergsma, 2022).

Daarnaast zijn de kosten van energie verbonden aan energieverliezen, die weer verbonden zijn met de afstand tussen de energieproducent en de eindgebruiker. Deze verliezen kunnen significant zijn, vooral over lange afstanden en bij inefficiënte infrastructuur. Een geïntegreerde benadering van het beheer van transmissie- en distributiesystemen kan tot betere resultaten leiden in termen van verliesreductie en spanningsbeheer (Marujo *et al.*, 2021).

Verder kan het gebruik van batterijopslag in combinatie met hernieuwbare energiebronnen effectief bijdragen aan het verminderen van transmissieverliezen. Dit kan leiden tot lagere verliezen en een verbeterde efficiëntie van het elektriciteitsnet. Een optimale samenwerking tussen transmissie- en distributiesystemen resulteert in verbeterde spanningsprofielen en verminderde energieverliezen.

6.5 Kunnen ondernemen

Basisredenering: Wanneer bedrijven geen aansluiting of uitbreiding kunnen krijgen door netcongestie, kan een energie hub het mogelijk maken om alsnog te ondernemen.

De economische groei zorgt op verschillende plaatsen voor een tekort aan transportcapaciteit voor levering. Hierdoor kunnen nieuwe bedrijven niet aangesloten worden op het netwerk of kunnen zij geen aanvullende capaciteit krijgen. Een samenwerking van diverse partijen en netbeheerders die komt tot een energy hub kan een oplossing vormen om vervolgens wel te kunnen ondernemen.

6.6 Regio ontwikkeling

Basisredenering: Een betrouwbare energievoorziening zorgt voor een stabielere infrastructuur, wat het vestigingsklimaat verbetert en de lokale economie stimuleert.

Toegang tot en betrouwbaarheid van elektriciteit zijn essentieel voor economische groei (Stern *et al.*, 2019; Topolewski, 2021; Hassan *et al.*, 2022). Energy hubs kunnen helpen bij het voorkomen van overbelasting van het elektriciteitsnet, het stimuleren van gezamenlijke investeringen en het creëren van toegang tot energiemarkten (denk aan verkopen van energie). Zij kunnen bijdragen aan een betrouwbaardere energievoorziening die het vestigingsklimaat positief beïnvloedt en daarmee de lokale economie stimuleert. Zij kunnen bedrijven helpen duurzamer en kostenefficiënter te opereren, met voordelen op het gebied van o.a. kosten, productie en milieu (Dekker *et al.*, 2023). Een verschuiving van geïmporteerde brandstoffen naar lokale investeringen in infrastructuur voor hernieuwbare energie kan verder de economische groei (lokaal) stimuleren (Connolly *et al.*, 2016). Investeren in duurzame bedrijfsstrategieën, kan bovendien het vertrouwen in bedrijven vergroten en daarmee hun concurrentiepositie versterken (Stawicka, 2021). Ook kan dit vertrouwen doorwerken richting verspreiden, gebruiken en ontwikkelen van innovaties in de sector van hernieuwbare energie (Stawicka, 2021).

6.7 Risico op stroomuitval

Basisredenering: Door de eigen elektriciteitsproductie, opslag, distributie en het groeiende aandeel van hernieuwbare energie verandert het risico op stroomuitval.

Stroomuitval kan worden veroorzaakt door zowel interne als externe factoren. Verstoringen in de productie en distributie van elektriciteit vinden vaker plaats door interne factoren zoals storingen in de elektrische installaties, onder andere door onvoldoende inspectie en onderhoud. Maar storingen kunnen ook optreden door fouten in het ontwerp, de aanleg van de elektrische installatie of door fouten in de marges bij de vraag-, productie- of opslagvoorspelling. Externe factoren omvatten bijvoorbeeld extreme weersomstandigheden waardoor windturbines stilgezet moeten worden, of extreme hitte en droogte die meerdere incidenten met stroomuitval kunnen veroorzaken. Wateroverlast door groeiende regenval vergroten ook het risico op stroomuitval. Veranderingen in het centrale elektriciteitsnet tijdens de energietransitie kunnen eveneens stroomuitval veroorzaken door storingen in het centrale netwerk (Devogelaer, 2014; Hansler *et al.*, 2022).

Hierbij is het van belang om de verandering in risico's te beschouwen en niet alleen de risico's van de energy hubs zelf. Zo zal in het scenario van autonome ontwikkeling er ook een risico op stroomuitval zijn. Of het risico groter of kleiner wordt is op dit moment niet te zeggen.

6.8 Systeembeheersing complexer

Basisredenering: Het beheren van een decentraal gesloten energiesysteem is een complex proces dan een centraal gestuurd proces, doordat voor ieder gesloten energiesysteem er naast de technische complexiteit er steeds weer sprake is van organisatie en afstemming rond de rollen van producent, netwerkbeheerder, leverancier, administratieve actoren en eindgebruikers.

Het energiesysteem van een hub vertoont alle kenmerken van een complex systeem, zoals de aanwezigheid van verschillende actoren, sociale en fysieke netwerken, bepaalde dynamieken, zelforganisatie, afhankelijkheid van de gekozen strategie, co-evolutie en de noodzaak om te leren en

zich aan te passen (Bale *et al.*, 2015; Gunnarsdóttir *et al.*, 2021). De noodzaak om vraag en aanbod in evenwicht te brengen, energie te transformeren die gelijktijdig wordt gegenereerd door verschillende soorten bronnen, die variabel kunnen zijn (bijvoorbeeld wind en zon), en de noodzaak om batterijen te gebruiken en te onderhouden om reserves van overtollige opgewekte energie te vormen en het gebrek aan energieopwekking uit hernieuwbare energie te compenseren, is op zich al een complex proces.

Daar komt bovenop dat een energy hub om een samenwerkingsvorm vraagt met meerdere spelers met verschillende behoeften en belangen. Het vraagt daarom om actuele gegevens over het energieverbruiksprofiel van alle deelnemers aan de energy hub. Daarnaast vraagt dit om organisatie en afstemming rond de rollen van producent, netwerkbeheerder, leverancier, administratieve actoren en eindgebruikers.

6.9 Digitale veiligheid

Basisredenering: *Bij de exploitatie en het gebruik van een energy hub worden digitale middelen ingezet, wat mogelijk aanvullende digitale veiligheidsrisico's met zich meebrengt.*

Slimme apparaten verzamelen continu energiedata, nodig om beslissingen te nemen en de energievoorziening te garanderen. Data wordt bijvoorbeeld gebruikt om de opwekking en het gebruik van energie te plannen, de spanningskwaliteit te monitoren en om te factureren. Omdat de opwekking en het gebruik van duurzame energie grotendeels afhankelijk zijn van weersomstandigheden, is de kwaliteit en betrouwbaarheid van deze data essentieel voor alle processen van het opwekken en leveren van duurzame energie. Onbetrouwbare data en/of verkeerd datagebruik kunnen leiden tot verschillende negatieve gevolgen, variërend van stroomuitval tot manipulatie van eindprijzen voor de eindgebruikers. De noodzaak om energiedata niet alleen binnen de energy hub te verzamelen, te gebruiken en op te slaan, maar deze data ook uit te wisselen met andere partijen op energiemarkt zoals producenten, leveranciers, gebruikers van duurzame energie, maar ook systeembeheerders, brengt verschillende digitale risico's met zich mee (Dekker *et al.*, 2022).

Hier komt bij dat AI veelal een belangrijke rol speelt in het verwerken van de verzamelde data. Om te beginnen zijn er problemen met de kwaliteit van de data en de effectiviteit van AI. Ook is er een tekort aan gekwalificeerde experts op het gebied van energiedata. De transparantie van AI-technologie is vaak onvoldoende, wat het moeilijk maakt om de werking ervan te begrijpen. AI-systemen hebben ook moeite met de verwerking van ongestructureerde data. Het gebruik van grote hoeveelheden gevoelige en soms persoonlijke data maakt AI-toepassingen kwetsbaar voor identiteitsdiefstal en gegevensinbreuken (Ahmad *et al.*, 2021).

De energiesector wordt bovendien steeds vaker geconfronteerd met complexe cyberaanvallen, spionage en sabotage, die zowel directe als indirecte schade kunnen veroorzaken. Door toegenomen connectiviteit, zoals bij smart meters en smart grids, ontstaan nieuwe kwetsbaarheden. De ketenafhankelijkheid in de sector maakt dat een geslaagde aanval op één partij ingrijpende gevolgen kan hebben voor de hele keten (Paques & Waalewijn 2014; Priyadarshini *et al.*, 2021).

Daarnaast, doordat bijna elk proces binnen een energy hub wordt ondersteund of volledig uitgevoerd door digitale middelen is het systeem kwetsbaar voor technische storingen van al deze middelen. De complexiteit van automatiseringsalgoritmen maakt het vervolgens lastig om de oorzaken van storingen te achterhalen (Ahmad *et al.*, 2021).

6.10 Interne en externe veiligheid

Basisredenering: *Bij de exploitatie en het gebruik van een energy hub kunnen zowel een verandering in interne als externe veiligheidsrisico's opleveren.*

In dit gedeelte worden alleen de effecten besproken die verband houden met omgevingsveiligheid en de fysieke veiligheid van mensen en natuur die zich op het terrein en/of in de omgeving van een energy hub bevinden. Andere aspecten van interne veiligheid zijn in dit onderzoek niet behandeld.

Tijdens de exploitatie en het onderhoud van de hub-infrastructuur kunnen er verschillende lokale veiligheidsrisico's optreden. Mogelijke bronnen hiervoor zijn onder andere zonnepanelen, batterijen en kabels (connectoren). Daarbij kunnen ook menselijke factoren, zoals fouten bij de installatie of onderhoud van het systeem de kans op problemen vergroten (Bende & Dekker, 2019). Hier staat tegenover dat ook in geval van centrale opwekking er sprake is van interne en externe veiligheidsvraagstukken.

Batterijen kunnen verschillende gevaren opleveren. Zo zijn Li-ion-batterijen bijvoorbeeld gevoelig voor o.a. lekkage van elektrolyt, brand, rook en explosies (Jeevarajan *et al.*, 2022). Zonnepaneelinstallaties zijn ook gevoelig voor brand. Oorzaken hiervoor zijn o.a. installatiefouten, slechte kwaliteit van PV-modules, gebrek aan afwatering van PV-systemen, veroudering van kabels, het hotspot-effect en externe invloeden op de panelen, zoals het neerslaan van stof of schade door vallende steentjes. Bij brandincidenten met zonnepanelen resulteert dit niet alleen in een vermindering van de stroomopwekking, maar veroorzaakt het ook secundaire schade, zoals de risico op letsel voor het personeel door de hoge spanning of de uitstoot van giftige gassen, waaronder koolmonoxide (CO), acetaldehyde, aromatische zuren, vinylesters, waterstoffluoride, waterstofchloride, waterstofcyanide, zwaveldioxide, brandbare gassen (Wu *et al.*, 2020) en glasdeeltjes die via de rook in de omgeving terecht komen (Van Veen *et al.*, 2022). De aanwezigheid van deze gevaarlijke stoffen tijdens een brand kan ernstige gezondheidsrisico's met zich meebrengen voor mensen in de nabijheid. Hoewel er maatregelen bestaan om brandrisico's te verminderen, blijft het gevaar van brand een aandachtspunt, gezien de complexiteit van het systeem.

Maar ook windmolens op land brengen verhoogde risico's met zich mee voor de gezondheid en veiligheid van onderhoudspersoneel en omwonenden. Wereldwijd zijn tot 31 december 2014 in totaal 1662 incidenten met windturbines geregistreerd, waarbij 151 mensen omkwamen, waaronder 90 werknemers uit de windindustrie en ondersteunend personeel. De belangrijkste risico's voor omwonenden zijn verwondingen door verplaatsing in de nabijheid van turbines. Voor windparkmedewerkers zijn de belangrijkste beroepsrisico's: werken op hoogte, branden, werken in afgesloten ruimtes en verwondingen tijdens elektrotechnische en mechanische werkzaamheden. Structurele schade aan funderingen en oppervlakken van turbines vormen eveneens een veiligheidsrisico. Daarnaast kunnen omgevingsfactoren zoals extreme wind, temperaturen en seismische activiteit ongelukken veroorzaken. "Blade throw" en "ice throw" zijn specifieke gevaren. Blade throw is het ongecontroleerd loskomen van een turbineblad, wat kan leiden tot schade en letsel. Ice throw verwijst naar ijs dat van de turbinebladen loskomt en met hoge snelheid wegvliegt, wat gevaarlijk is voor mensen, voertuigen en gebouwen in de buurt (Garcia & Bruschi, 2016).

Om een idee te krijgen van de verschillen in risico's per energiebron kan als startpunt gebruik worden gemaakt van het onderzoek door Sovacool *et al.* (2015). Zij hebben het aantal doden door ongevallen voor verschillende vormen van energievoorzieningen in kaart gebracht:

- Kolen 0.0013 per TWh
- Olie 0.0041 per TWh
- Gas 0.0018 per TWh
- Nuclear 0.0097 per TWh
- Wind 0.0350 per TWh
- Zon 0.0190 per TWh
- Biofuels 0.0048 per TWh
- Biomassa 0.0164 per TWh.

Deze getallen moeten wel in perspectief worden geplaatst. Het aantal datapunten voor nieuwe technologie is beperkt ten opzichte van oude technologie. Individuele incidenten bij nieuwe technologie kunnen daardoor een relatief grote invloed hebben op het eindresultaat. Het is aannemelijk dat de verdere ontwikkeling van nieuwe technologieën inclusief veiligheidsmaatregelen en het verzamelen van meer datapunten voor de analyse hiervan zullen leiden tot lagere aantallen doden door ongevallen met nieuwe technologieën. De bovenstaande getallen vormen daarmee mogelijk een overschatting, maar ze geven een eerste beeld.

6.11 Financiële deelname aan energietransitie

Basisredenering: Wanneer bedrijven financieel gaan bijdragen aan energy hubs, die gebruik maken van duurzame energiebronnen, dragen bedrijven bij aan de energietransitie.

Wanneer bedrijven bij de ontwikkeling en onderhoud van energy hubs financieel gaan bijdragen en deze energy hubs gebruik maken van duurzame energiebronnen, dan dragen bedrijven meteen bij aan de energietransitie.

6.12 Reductie CO₂

Basisredenering: Wanneer er bij een energy hub sprake is van lokale productie en gebruik van hernieuwbare duurzame energie wordt uitstoot van CO₂ voorkomen.

Het gebruik van fossiele energiebronnen in industriële en energie sector leidt tot uitstoot van CO₂ en daardoor veranderingen in het klimaat met maatschappelijke schade tot gevolg. De toename in de opwekking en het gebruik van duurzame energie leidt tot een vermindering van de uitstoot van broeikasgassen. Er is relatief veel onderzoek gepubliceerd over de impact van de opwekking en het gebruik van niet-hernieuwbare energiebronnen op de groei van CO₂-uitstoot. Onder andere studies van Shafiei & Salim (2014), Bilgen (2014), Timmerman *et al.* (2014), Al-Mulali *et al.* (2015), Mujtaba *et al.* (2022), Olabi en Abdelkareem (2022), Aziz & Sarwar (2023), De Rosa *et al.* (2023) en Bazuin (2023) laten dit zien. In al deze studies is aangetoond dat de opwekking en het gebruik van duurzame energiebronnen effectieve oplossingen vormen voor emissiereductie. Bovendien levert een energy hub mogelijk efficiëntie voordelen op waardoor CO₂ uitstoot wordt vermeden.

Graaf *et al.* (2024) heeft becijferd dat voor een kansrijke energy hub circa 2000-5000 ton CO₂ bespaard kan worden. Hoeveel dit in een specifiek geval is, is afhankelijk van meerdere factoren en zal

per geval nader bepaald moeten worden. De website [CO2emissiefactoren.nl](https://co2emissiefactoren.nl)³ geeft handvatten voor de CO₂ emissies per eenheid van verschillende brandstoffen voor energieopwekking. Belangrijk hierbij is overigens het onderscheid dat hier gemaakt wordt tussen *tank-to-wheel* (TTW) en *well-to-wheel* (WTW) emissies. Het CBS (2025) geeft aan dat het aantal kg CO₂ per kWh in 2021 voor respectievelijk aardgas en steenkool 0,38 en 0,83 bedroeg.

6.13 Vermindering milieuschade en sociale problemen

Basisredenering: *Wanneer er bij een energy hub sprake is van lokale productie en gebruik van hernieuwbare duurzame energie worden mogelijk milieuschade en sociale problemen voorkomen.*

De levenscyclus van traditionele energiebronnen zoals aardolie, aardgas en steenkool bestaat uit de fasen: exploratie, winning, transport, opslag en gebruik. Verschillende activiteiten die tijdens elke fase worden uitgevoerd leiden tot milieuvervuiling. Belangrijke bronnen van milieuvervuiling zijn o.a. seismisch onderzoek, boren, affakkelen van gas, accidentele olielozingen en explosies, geproduceerd formatiefijn materiaal en zand, boorsnijdsels, boorvloeistoffen, afvalwater en afvallozingen van raffinaderijen. Milieuvervuiling heeft vervolgens diepgaande gevolgen voor ecosystemen. De chemische en fysische samenstelling van water en bodem verandert als gevolg van vervuiling, wat een negatieve invloed heeft op micro-organismen, planten en dieren. Hierdoor worden hun natuurlijke habitats en voedselketens verstoord. De afbraakproducten van traditionele energiebronnen en andere eerder genoemde vervuilende stoffen zijn veelal giftig. Wanneer deze stoffen neerslaan op het bodemoppervlak, beïnvloeden ze de groei en vruchtbaarheid van planten en de kwaliteit en vruchtbaarheid van de bodem. Bij een olielekage vormt olie een onoplosbare film op het wateroppervlak die de zuurstoftoevoer belemmert. Naarmate olie zich met het water mengt, ontstaan oliedeeltjes die bellen vormen die jarenlang kunnen blijven drijven en schade toebrengen aan de waterflora en -fauna. Via het bodemoppervlak kunnen giftige stoffen bovendien ook in het grondwater terechtkomen, wat onder andere impact heeft op de drinkwaterkwaliteit. Toxische stoffen kunnen vervolgens ernstige ziektes en veranderingen in het DNA van planten, dieren, vissen en mensen veroorzaken. Deze en vele andere negatieve gevolgen voor het milieu worden beschreven in onder andere Khan *et al.* (2018), Ossai *et al.* (2020), Haider *et al.* (2021), Ogolo *et al.* (2022).

Daarnaast is er het probleem van sociale condities bij de winning van grondstoffen. De condities waaronder gewerkt wordt in veel landen waar grondstoffen vandaan komen is slecht.

Of er sprake is van een verbetering of verslechtering ten aanzien van milieuschade wanneer er overgaan wordt op duurzame energiebronnen is lastig te zeggen en hangt van de specifieke situaties af. Het proces van het vervangen van traditionele energiebronnen door hernieuwbare bronnen leidt namelijk mogelijk ook weer tot negatieve effecten voor het milieu en sociale condities tijdens de productie, exploitatie en onderhoud. Algemene kengetallen voor deze milieu- en sociale effecten zijn bovendien lastig te definiëren (De Bruyn *et al.*, 2023). Wel is meer informatie te gebruiken voor eigen specifieke ontwerpen te vinden in het *Handboek Milieuprijzen, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts* (De Bruyn *et al.*, 2023).⁴

³ co2emissiefactoren.nl/factoren/2024/10/brandstoffen-energieopwekking/

⁴ <https://ce.nl/publicaties/handboek-milieuprijzen-2023/> en <https://ce.nl/method/milieuprijzen/>

6.14 Verbetering luchtkwaliteit

Basisredenering: Wanneer er bij een energy hub sprake is van lokale productie en gebruik van hernieuwbare duurzame energie leidt dit tot een verbetering van de luchtkwaliteit.

Industriële activiteit en verkeer spelen een belangrijke rol in luchtvervuiling. Slechte luchtkwaliteit veroorzaakt gezondheidsproblemen bij de bevolking. Door de vervanging van traditionele fossiele brandstoffen door schone energiebronnen draagt een energy hub mogelijk bij aan een betere luchtkwaliteit. Een verbetering in luchtkwaliteit resulteert vervolgens in gezondheidsvoordelen voor de bevolking lokaal en/of landelijk. In het bijzonder kunnen energiehubs dienen als laadstations voor elektrische voertuigen, waardoor de adoptie van emissievrij transport wordt gestimuleerd en de luchtkwaliteit lokaal in steden wordt verbeterd.

Hierbij kan het gaan om heel veel verschillende stoffen. Gekoppeld aan gezondheidsrisico's benoemt Markandya en Wilkinson (2007) in ieder geval de volgende stoffen:

- Gekoppeld aan overlijden: PM_{2,5}, zwaveldioxide, stikstof, oxiden, ozon, benzeen benzo(a)pyreen, dieseldeeltjes en 1,3-butadieen
- Gekoppeld aan ziekte: PM₁₀, zwaveldioxide, PM_{2,5}, ozon, PM₁₀, koolmonoxide, benzeen, benzo(a)pyreen, dieseldeeltjes en 1,3-butadieen

Kengetallen voor de luchtvervuilende ketenemissies voor de productie van grijze stroom die een idee geven van de vermeden emissies wanneer overgegaan wordt op duurzame energie zijn (Ott en Afman, 2015):

- NO_x 0,71 g/kWh
- PM 0,03 g/kWh
- VOS 0,56 g/kWh
- SO₂ 0,39 g/kWh

Hier moeten eventuele emissies betrokken bij de productie en vervoer van de duurzame energiebronnen zelf van worden afgehaald.

7. Maatschappelijke baten van energy hubs

De laatste stap in deze verkennende analyse is het inzichtelijk maken van de mogelijke maatschappelijke baten. In dit hoofdstuk zijn de mogelijke baten in kaart gebracht en waar mogelijk op basis van kerngetallen zijn de baten gekwantificeerd en gemonetariseerd. Voor elke maatschappelijke baat is een basisberedering opgezet die vervolgens verder is uitgewerkt om tot een monetarisering te komen van de baten. Op basis van de kengetallen voor kwantificering en monetarisering is het mogelijk om bij het ontwikkelen van een energy hub een eerste indicatie te berekenen van de mogelijke maatschappelijke baten. Door deze analyse naast het concept ontwerp te leggen is het vervolgens mogelijk om inzichten te krijgen hoe deze maatschappelijke baten mogelijk te vergroten zijn.

7.1 Toename economische groei: Eerder en meer

Basisredenering: *Het inzetten van energy hubs creëert extra en andere mogelijkheden om in de energiebehoefte te voorzien van bedrijven wat bijdraagt aan economische groei, doordat bedrijven (1) eerder en (2) meer kunnen ondernemen.*

Toegang tot en betrouwbaarheid van elektriciteit zijn essentieel voor economische groei (Stern *et al.*, 2019; Topolewski, 2021; Hassan *et al.*, 2022). Energy hubs kunnen helpen bij het voorkomen van overbelasting van het elektriciteitsnet, het stimuleren van gezamenlijke investeringen en het creëren van toegang tot energiemarkten (denk aan verkopen van energie). Zij kunnen bijdragen aan een betrouwbaardere energievoorziening die het vestigingsklimaat positief beïnvloedt en daarmee de lokale economie stimuleert. Zij kunnen bedrijven helpen duurzamer en kostenefficiënter te opereren, met voordelen op het gebied van o.a. kosten, productie en milieu (Dekker *et al.*, 2023). Een verschuiving van geïmporteerde brandstoffen naar lokale investeringen in infrastructuur voor hernieuwbare energie kan verder de economische groei (lokaal) stimuleren (Connolly *et al.*, 2016). Investeren in duurzame bedrijfsstrategieën, kan bovendien het vertrouwen in bedrijven vergroten en daarmee hun concurrentiepositie versterken (Stawicka, 2021). Ook kan dit vertrouwen doorwerken richting verspreiden, gebruiken en ontwikkelen van innovaties in de sector van hernieuwbare energie (Stawicka, 2021).

De omvang hiervan bepalen voor een specifieke situatie is niet eenvoudig op voorhand te zeggen. Een eerste indruk hiervoor levert Ecorys (2024), die heeft becijferd wat de waarde is van de toegevoegde waarde die niet additioneel gerealiseerd kan worden wanneer bedrijven in hun ontwikkeling gehinderd worden door netcongestie. Gemiddeld komen zij uit op € 3.499 per MWh. Zij geven verder aan dat wanneer in de toekomst steeds meer bedrijven meer moeten verduurzamen er meer bedrijfsprocessen geëlektrificeerd gaan worden. Dit heeft consequenties voor de waarde van de netcongestie per MWh. Deze neemt dan toe tot € 11.656 per MWh. Zie Ecorys (2024)⁵ voor uitsplitsingen van deze waarden naar typen industrie en bandbreedtes.

7.2 Minder schuldenproblematiek

Basisredenering: *Wanneer schaarste aan energie door grootschalige inzet van energiehub wordt verkleind zou dit de prijs voor de particulier positief kunnen beïnvloeden. In dat geval zou dit de energiearmoede/schuldenvraagstukken voor bepaalde huishoudens kunnen beperken.*

⁵ <https://www.ecorys.com/app/uploads/2019/02/Maatschappelijke-kostprijs-van-netcongestie-2024.pdf>

Energiearmoede is een steeds relevanter en groeiend probleem, dat zich niet alleen voordoet in ontwikkelingslanden, maar ook in ontwikkelde economieën, waaronder Europa. Hoewel uit het huidige literatuuronderzoek geen direct oorzakelijk verband blijkt tussen een toename van het gebruik van hernieuwbare energie door bedrijven en de stabilisatie van energieprijzen voor burgers, kan er wel een indirecte relatie worden aangetoond. De volgende factoren spelen hierbij o.a. een belangrijke rol: vermindering van de vraag naar fossiele brandstoffen, toename van het aanbod van hernieuwbare energie en lagere operationele kosten (Varo *et al.*, 2022; Baiwei *et al.*, 2023).

Wanneer gekeken wordt naar de maatschappelijke kosten en baten van een enkele energy hub is het niet aannemelijk dat deze baat aan de orde zal zijn. Dit wordt pas aannemelijk wanneer de energieprijzen dalen voor particulieren. Dat speelt dan pas een mogelijke rol wanneer er grootschalig en/of landelijk wordt ingezet op verduurzaming.

7.3 Verandering slachtoffers ongevallen

Basisredenering: *De complexiteit van het beheer van duurzame energiesystemen beïnvloedt de veiligheid van mensen, wat kan resulteren in veranderingen in het aantal levensjaren.*

De grootschalige uitrol van nieuwe duurzame infrastructuur brengt verhoogde veiligheidsrisico's met zich mee voor mensen, dieren en de omgeving. Dit komt doordat elektrificatie steeds vaker gepaard gaat met het werken met hoge spanning. Door het tekort aan gekwalificeerd personeel in de energiesector en het gebruik van nieuwe technologie is er een verhoogd risico op ongevallen, wat de omgeving en de gezondheid van omwonenden in gevaar kan brengen tijdens de aanleg en exploitatie van deze infrastructuur. Bij ongevallen bestaat de kans op dodelijke slachtoffers (Groningen Provincie, 2023). In Nederland komen er doorgaans weinig rampen of incidenten met gevaarlijke stoffen voor waarbij slachtoffers vallen in de omgeving van een bedrijf. Desondanks vallen er jaarlijks tientallen dodelijke slachtoffers bij arbeidsongevallen, waarbij de bouwsector als de meest risicovolle sector wordt beschouwd. Voor de bouwsector speelt het werken op hoogte een belangrijke rol. Het installeren en onderhouden van windturbines op grote hoogte brengt bijvoorbeeld een groter risico op valongevallen met zich mee dan het onderhoud van buurtbatterijen. Naarmate het aantal nieuwe installaties toeneemt, neemt ook het arbeidsrisico (de kans op ongevallen) proportioneel toe (Gooijer en Mennen, 2021).

Een eerste kwantificering van het aantal overleden personen door ongevallen is mogelijk met de getallen gegeven door Sovacool *et al.* (2015) (ook al weergegeven in de paragraaf rond *Interne en externe veiligheid*). Zij hebben het aantal doden door ongevallen voor verschillende vormen van energievoorzieningen in kaart gebracht:

- Kolen 0.0013 per TWh
- Olie 0.0041 per TWh
- Gas 0.0018 per TWh
- Nuclear 0.0097 per TWh
- Wind 0.0350 per TWh
- Zon 0.0190 per TWh
- Biofuels 0.0048 per TWh
- Biomassa 0.0164 per TWh.

Vervolgens zijn deze te combineren met de maatschappelijke waarde van een mensenleven. Deze bedraagt circa € 6,5 miljoen op basis van een actuele raming voor verkeersslachtoffers (Van der Horst, 2022).

7.4 Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren

Basisredenering: Door een verbetering van de luchtkwaliteit dalen de maatschappelijke kosten die samenhangen met gezondheidsproblemen en sterfte.

Op mondiaal niveau levert het verbeteren van de waterkwaliteit door de vermindering van vervuiling door de winning en verwerking van fossiele brandstoffen, zoals olie en gas, een significante afname van gezondheidskosten (Landrigan *et al.*, 2020).

Verder worden gezondheidseffecten verwacht door een vermindering van luchtvervuiling. Slechte luchtkwaliteit veroorzaakt namelijk gezondheidsproblemen bij de bevolking. Bijzonder gevoelig voor de luchtkwaliteit zijn kwetsbare groepen, zoals kinderen, mensen met chronische ziektes en oudere mensen. Slechte luchtkwaliteit leidt tot het optreden van ernstige en chronische ziekten van de luchtwegen en het hart en beïnvloedt het verloop van chronische ziektes. Leven in een schadelijke omgeving met slechte luchtkwaliteit heeft impact op de gezondheid van de bevolking, het aantal levensjaren en, als gevolg, de gezondheidskosten. Mensen met gezondheidsklachten door ziekte zijn vaker afwezig op hun werkplek, wat invloed kan hebben op de arbeidsproductiviteit en extra kosten voor werkgevers om de bedrijfscontinuïteit te waarborgen. Impact van luchtkwaliteit op gezondheid is in verschillende studies onder de loep genomen zoals Schraufnagel *et al.* (2019), Van der Ree *et al.* (2019), Manisalidis *et al.* (2020), Horsselenberg en Heijmans (2022), Kanhai *et al.* (2024) en Wang *et al.*, (2024).

Markandya en Wilkinson (2007) presenteren hiervoor bruikbare kwantificeringen van gezondheidseffecten van gebruik van de gepresenteerde energiebronnen (zie Tabel 1). Hierbij gaat het om zowel gezondheidseffecten door ongevallen als gezondheidseffecten door luchtvervuiling. Wanneer er gekozen wordt voor een oplossing waarbij luchtvervuiling wordt gereduceerd zouden deze getallen per TWh uur als uitgangspunt kunnen worden gebruikt.

Tabel 1: Gezondheidseffecten (doden of gevallen per TWh) van verschillende energiebronnen in Europa (Markandya en Wilkinson, 2007)

	Sterfgevallen door ongevallen		Effecten gerelateerd aan luchtvervuiling		
	Onder het publiek	Beroepsmatig	Sterfgevallen	Ernstige ziekte	Milde ziekte
Bruinkool	0-02 (0.005-0.08)	0-10 (0.025-0.4)	32.6 (8.2-130)	298 (74.6-1193)	17676 (4419-70704)
Steenkool	0-02 (0.005-0.08)	0-10 (0.025-0.4)	24.5 (6.1-98.0)	225 (56.2-899)	13288 (3322-53150)
Gas	0.02 (0.005-0.08)	0.001 (0.0003-0.004)	2.8 (0.70-11.2)	30 (7.48-120)	703 (176-2813)
Olie	0.03 (0.008-0.12)	--	18.4 (4.6-73.6)	161 (40.4-645.6)	9551 (2388-38204)
Biomassa	--	--	4.63 (1.16-18.5)	43 (10.8-172.6)	2276 (569-9104)
Nucleair	0.003	0.019	0.052	0.22	--

Ten aanzien van de sterfgevallen zijn deze vervolgens te combineren met de maatschappelijke waarde van een mensenleven. Deze bedraagt circa € 6,5 miljoen op basis van een actuele raming voor verkeersslachtoffers (Van der Horst, 2022). Ten aanzien van de ernstige en/of milde ziekte is het lastig om hier een eenduidig prijskaartje aan te hangen.

Een alternatief voor de bovenstaande werkwijze is de manier van kwantificeren die wordt geboden door De Bruyn *et al.* (2023). Hierin wordt een lijst gepresenteerd met daarin de integrale maatschappelijke waarde van het beperken van emissies van luchtverontreinigende stoffen in Nederland met prijspeil 2021 (zie Tabel 2).

*Tabel 2: Middenwaardes van milieuprijzen voor emissies van luchtverontreinigende stoffen in Nederland, in € per kg, prijspeil (2021)**

Stof	Korte benaming	Middenwaarde per kg
Fijnstof	PM _{2,5}	€ 121
Fijnstof	PM ₁₀	€ 69,3
Ultrafijnstof	PM _{0,1}	€ 438
Stikstofoxiden	NO _x	€ 29,9
Zwavel dioxide	SO ₂	€ 57,5
Ammoniak	NH ₃	€ 49,3
Vluchtige organische stoffen (niet-methaan)	NMVOS	€ 2,73
Methaan	CH ₄	€ 4,70

*Op basis van De Bruyn *et al.* (2023)

7.5 Toename beleefde kwaliteit van leven

Basisredenering: Een verbetering van de luchtkwaliteit en vermindering van geluidsoverlast verhoogt de beleefde kwaliteit van leven.

Luchtvervuiling en geluidsoverlast hebben invloed op de beleefde kwaliteit van leven van de bevolking. Of dit meer of minder aanwezig is hangt af van het ontwerp van een energy hub of verzameling aan energy hubs. Er is echter aanvullend onderzoek nodig om de interactie tussen luchtkwaliteit en kwaliteit van leven verder te verduidelijken. Krefis *et al.* (2018) constateren in hun studie een gebrek aan interdisciplinaire onderzoeken die de complexiteit van stedelijke structuren en dynamiek, evenals hun mogelijke invloed op stedelijke gezondheid en welzijn, onderbouwen. Verschillende studies beschrijven wel de impact van luchtvervuiling en geluidsoverlast, vooral afkomstig van verkeer en industriële activiteiten, op de gezondheidsgerelateerde kwaliteit van leven (HRQOL). Zo laat Shepherd *et al.* (2016) zien dat luchtvervuiling vooral invloed heeft op het fysieke domein van HRQOL, terwijl geluidsoverlast van invloed is op de psychologische, sociale en omgevingsdomeinen.

Een kwantificering en monetarisering op projectniveau is op dit moment lastig te maken.

7.6 Verandering woongenot

Basisredenering: *De inrichting van energy hubs kan invloed hebben op het woongenot van omwonenden door ruimtelijke aanpassingen.*

Uit het literatuuroverzicht blijkt dat de infrastructuur van windparken in de nabijheid van woningen kan leiden tot bezorgdheid en stress bij omwonenden. Veel onderzoek bestaat uit casestudies die de impact van de infrastructuur van windparken op de omgeving analyseren. Vieveen & Van der Schoor (2023) laten zien dat inwoners van het Drentsche Aa-gebied het van groot belang achten dat waarden zoals het landschap, de natuur en het woongenot worden meegenomen bij keuzes omtrent energieopwekking. Meer dan 80% van de respondenten vond grootschalige zonnepanelen onacceptabel, en meer dan 90% van de respondenten beschouwde windparken met grote turbines als onaanvaardbaar. Zonnepanelen op daken werden daarentegen door de inwoners als een acceptabele maatregel gezien.

De energietransitie leidt tot een toename van het aantal windturbines op land, wat bij omwonenden zorgen oproept over mogelijke waardevermindering van hun woning. De aanwezigheid van windturbines hebben een duidelijk negatief effect heeft op waarde van woningen (Tigelaar, 2019). Naarmate mensen dichterbij windturbines wonen, ervaren zij meer hinder, wat leidt tot een negatieve houding ten opzichte van de windparken. Bewoners melden klachten zoals geluidsoverlast, trillingen en slagschaduw. Dit resulteert in een vermindering van hun woongenot. Wettelijke compensaties voor planschade blijken onvoldoende om de overlast, gezondheidsproblemen, waardevermindering van woningen en verhuislasten volledig te dekken. Sommige bewoners zijn zelfs verhuisd vanwege deze problemen. Aanpassingen aan woningen, zoals het plaatsen van rolluiken, hebben in sommige gevallen de ervaren hinder verminderd en zijn positief ontvangen door de bewoners (Peuchen *et al.*, 2022). Mulder *et al.* (2022) laten zien dat het mediane woningwaardeverlies per turbine €583.000 bedraagt. Dit komt overeen met circa 17% van de investeringskosten van een turbine.

De impact van windmolens op woningwaarden is afhankelijk van (1) de afstand van een windmolen tot woningen en (2) de hoogte van de windmolen(s). De waardevermindering is zichtbaar voor woningen met een afstand tot en met circa 2 kilometer van een windmolen (Dröes en Koster, 2021). Tussen de 500 en 750m is het effect circa 3%. Dit effect daalt tot 2500 meter tot nul. Blijkbaar is de maximale reikwijdte van de impact op woongenot circa 2250 meter. De waardevermindering treedt vooral op bij de plaatsing van de eerste windmolen. Verder lijken turbines tot 50 meter een effect te hebben van minder dan 1%, dat bovendien statistisch gezien niet significant is. Middelgrote turbines van 50 tot 150 meter hebben een significant effect van circa 2%. Turbines groter dan 150 meter hebben een significant effect van circa 5% waardevermindering van woningen (Dröes en Koster, 2021).

De impact van zonneparken op woningwaarden binnen een straal van 1 km van een zonnepark bedraagt circa 3,7% van de woningwaarde. Dit komt door mogelijk geluidsoverlast, weerkaatsing van de zon en zichtvervuiling. Deze effecten zijn vrij lokaal door de hoogte en doordat eventuele geluidsoverlast niet ver te horen zal zijn (Dröes en Koster, 2021).

Bij zowel zonneparken als windmolens is de waardevermindering bovendien afhankelijk van de mate waarin maatregelen zijn genomen om horizonvervuiling, slagschaduw en geluidsoverlast te voorkomen.

7.7 Verandering biodiversiteit

Basisedenering: *Door de productie en het gebruik van lokaal geproduceerde duurzame energie wordt milieuschade voorkomen, wat resulteert in een toename van de biodiversiteit.*

Het succes van de transformatie naar meer duurzame vormen van energievoorziening moet niet alleen worden gemeten aan de hand van emissiereducties, maar ook aan de hand van de bredere ecologische gevolgen (Holland *et al.*, 2019). Het verband tussen lokaal geproduceerde hernieuwbare energie en biodiversiteit is echter complex en afhankelijk van verschillende factoren. Het is dan ook niet eenduidig te concluderen dat duurzame energie per definitie minder schadelijk is voor biodiversiteit of deze bevordert in vergelijking met fossiele brandstoffen. Zonne- en windparken op land zijn relatief nieuwe ontwikkelingen en bevinden zich in een fase van snelle groei, wat verdere studie vereist. Naarmate de schaal van hernieuwbare energie-infrastructuur toeneemt, kunnen bovendien aanvankelijk kleine effecten aanzienlijk worden, met grotere gevolgen voor biodiversiteit (Nazir *et al.*, 2020; Hamed & Alshare, 2022; OECD, 2024; Lafitte *et al.*, 2023). Gasparatos *et al.* (2017) hebben de impact van verschillende hernieuwbare energiebronnen op ecosystemen en biodiversiteit onderzocht, evenals de implicaties daarvan voor de transitie naar groene energie. Hoewel hernieuwbare energie cruciaal is voor deze transitie, wijst het onderzoek ook op mogelijke negatieve effecten. Deze effecten worden geanalyseerd aan de hand van factoren zoals habitatverlies, vervuiling en de introductie van invasieve soorten. De specifieke impact verschilt per energiebron en technologie. Ondanks de aanzienlijke milieu- en sociaaleconomische voordelen van hernieuwbare energie, is het essentieel om rekening te houden met mogelijke negatieve effecten op biodiversiteit.

Lokaal kan een zonneweide overigens een positieve verandering betekenen voor de bodemkwaliteit en biodiversiteit in het geval het een vervanging betreft voor agrarisch gebruik (Van der Ree *et al.*, 2019). In welke mate dit is, is afhankelijk van de ruimte tussen de zonnepanelen. Een waarde hieraan koppelen is niet eenvoudig. Het leidt niet direct tot meer natuurbeleving voor mensen. Wel is het denkbaar dat wanneer de oppervlakte groot wordt het indirect kan bijdragen aan ecosystemendiensten. Maar dit gaat pas spelen wanneer er daadwerkelijk een significante (lees: grote) verandering plaatsvindt in termen van biodiversiteitstoename. Om hier toch een waarde voor mee te nemen stelt Schellekens *et al.* (2020) voor om wanneer er voldoende ruimte tussen panelen zit, de kosten van extensief vruchtbaar grasland (€ 0,017 per m² per jaar) in mindering te brengen op de kosten voor intensieve gewassen (€ 0,033 euro per m² per jaar). Dit komt neer op een verschil van 160 euro per hectare per jaar. Hiermee breng je de waarde van biodiversiteit zelf nog niet echt in beeld, maar de baten zijn er wel.

Het in kaart brengen, kwantificeren en moneteriseren van deze baat is helaas niet eenvoudig en hangt van verschillende factoren af die nader onderzoek vragen voordat deze goed meegenomen kunnen worden.

7.8 Bijdrage tegen klimaatverandering

Basis redenering: *Het gebruik van duurzame energie binnen een energy hub leidt tot een reductie van CO₂-uitstoot en draagt daarmee bij aan het tegengaan van klimaatverandering.*

Negatieve emissietechnologieën, waaronder hernieuwbare energiebronnen zoals zon en wind, worden door Fawzy *et al.* (2020) genoemd als een van de drie hoofdstrategieën om klimaatverandering aan te

pakken. Karlilar Pata & Balcilar (2024) benadrukken dat hernieuwbare energiebronnen een cruciale rol spelen in het vervangen van fossiele brandstoffen, die verantwoordelijk zijn voor klimaatverandering.

Wanneer CO₂ uitstoot wordt voorkomen, levert dit een bijdrage aan het tegengaan van klimaatverandering. Hoeveel CO₂ uitstoot er wordt voorkomen zal afhangen van het ontwerp van een energy hub. Graaf *et al.* (2024) heeft becijferd dat voor een kansrijke energy hub circa 2000-5000 ton CO₂ bespaart kan worden.

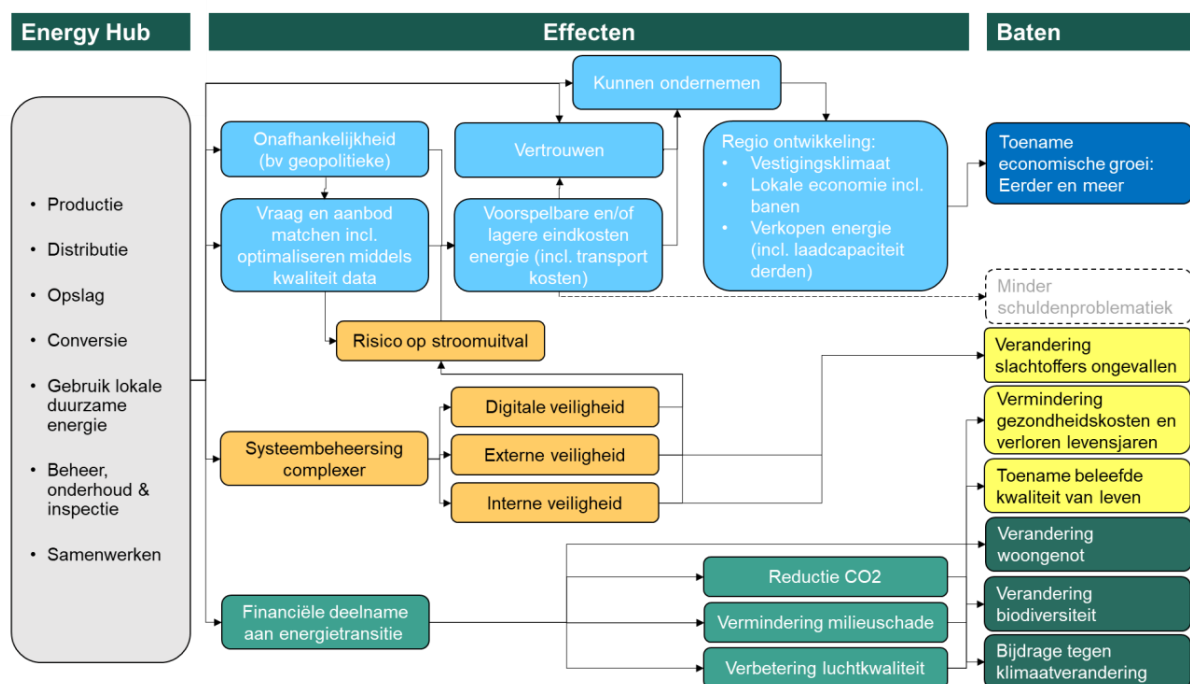
De Bruyn *et al.* (2023) geeft aan dat in de basis de CO₂ prijzen van PBL en CPB uit 2016 gebruikt moeten worden. Echter komt er een nieuwe analyse aan in 2025 waarin de prijzen een stuk hoger gaan zijn. Hierop voorsortend is het mogelijk verstandig om gebruik te maken van de prijspaden van het IPPC voor de 1,5 graad variant. Dit komt inclusief BTW neer op de volgende getallen per ton CO₂ (Van Capellen *et al.*, 2024):

- 2024: € 170
- 2030: € 222
- 2050: € 516

Daarnaast wordt geadviseerd om in de gaten te houden welke nieuwe getallen er komen vanuit het CPB en PBL in 2025 (Van Capellen *et al.*, 2024).

8. Conclusies

Deze verkennende analyse laat een heel aantal mogelijke effecten en welvaartseffecten voor energy hubs zien. Deze zijn de te vinden in het onderstaande causale model (Figuur 5). De mogelijke baten betreffen ten eerste een toename aan economische groei. Hierbij kan het gaan over het versnellen en/of vergroten van de economische groei. Daarnaast zijn er baten rond gezondheidskosten en slachtoffers door veranderingen in milieukwaliteiten en/of ongevallen. Tevens is het van belang rekening te houden met eventuele veranderingen in woongenot en kwaliteit van leven. Wanneer er sprake is van een dusdanig groot aantal energy hubs waardoor de energieprijzen daalt is het denkbaar dat het reduceren van energiearmoede optreedt, waardoor schuldenproblematiek wordt voorkomen. Voor individuele energy hubs is dit echter niet aan de orde. Tenslotte zijn er maatschappelijke baten mogelijk rond biodiversiteit en kunnen energy hubs een bijdrage leveren aan klimaatverandering.



Figuur 5. Conceptueel causaal model maatschappelijke impact van energy hubs

Aan de hand van dit schema is het mogelijk om in de ontwerpfase voor een energy hub snel te inventariseren welke effecten en maatschappelijke baten mogelijk van toepassing zijn. Om vervolgens snel een eerste beeld te krijgen van wat de mogelijke omvang van de maatschappelijke impact is van een ontwerp van een energy hub hebben we voor de baten waar dit mogelijk was kengetallen in kaart gebracht. Aan de hand van deze kengetallen kunnen een heel aantal baten gekwantificeerd en gemonetariseerd worden. De gevonden kengetallen zijn samengevat in de onderstaande tabel (Tabel 3). Deze kunnen gebruikt worden om een eerste indicatie te krijgen van wat de mogelijke maatschappelijke baten zijn in termen van maatschappelijke waarde. In Tabel 4 is verder aangegeven bij welke partijen de maatschappelijke baten onder andere terecht komen. Wanneer deze baten in een project aan de orde zijn en de verwachte baten een significante omvang hebben is het interessant om te kijken of deze partijen betrokken kunnen worden bij de ontwikkeling van de energy hub.

We hebben een zo volledig mogelijk beeld aan mogelijke effecten en baten proberen op te stellen. Maar het kan altijd zijn dat (in een specifiek geval) er toch nog aanvullende effecten en baten optreden. Bovendien bevinden energy hubs zich zowel technisch als organisatorisch nog in een ontwikkelingsfase. Dat betekent dat het aannemelijk is dat deze technologie en de wijze van gebruik in de toekomst nog zal veranderen. De kengetallen zijn verder bruikbaar om een eerste beeld te geven van de omvang van baten, maar wat precies de omvang van de maatschappelijke baten is zal naar verwachting nader onderzoek vragen.

Tabel 3: Kengetallen voor kwantificering en monetarisering baten van energy hubs

Baat	Kwantificering	Monetarisering	Referenties kengetallen
Toename economische groei	Aantal MWh geplande EH	€ 3.499 per MWh - € 11. 656 per MWh	Ecorys (2024)
Verandering slachtoffers ongevallen	Kolen 0.0013 per TWh Olie 0.0041 per TWh Gas 0.0018 per TWh Nuclear 0.0097 per TWh Wind 0.0350 per TWh Zon 0.0190 per TWh Biofuels 0.0048 per TWh Biomassa 0.0164 per TWh	€ 6,5 miljoen per persoon	Sovacool <i>et al.</i> (2015) Van der Horst (2022)
Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren	NO _x 0,71 g/kWh PM 0,03 g/kWh VOS 0,56 g/kWh SO ₂ 0,39 g/kWh	PM ₁₀ € 69,3 per kg PM _{0,1} € 438 per kg NO _x € 29,9 per kg SO ₂ € 57,5 per kg NH ₃ € 49,3 per kg NMVOS € 2,73 per kg € 6,5 miljoen per persoon	De Bruyn <i>et al.</i> (2023) Van der Horst (2022)
Toename kwaliteit van leven	PM	PM	PM
Verandering woongenot	Aantal woningen binnen 1 km (zonneweide) Aantal woningen binnen 2,25 km (windmolen)	Zonneweide: 3,7% waardedaling per woning Windmolen H <50m: gem <1% waardedaling per woning Windmolen H 50-100m: gem 2% waardedaling per woning Windmolen H >150m: gem 5% waardedaling per woning Windmolen, 500-750 m afstand: circa 3% waardedaling per woning Windmolen, 2500 m afstand: circa 0% waardedaling per woning	Dröes en Koster (2021)
Verandering biodiversiteit	Aantal ha geplande EH	160 euro per ha per jaar	Schellekens <i>et al.</i> (2020)
Bijdrage tegen klimaatverandering	Aardgas: 0,38 kg CO ₂ per kWh Steenkool: 0,83 kg CO ₂ per kWh 2000-5000 ton CO ₂ per hub	2024: € 170 per ton CO ₂ 2030: € 222 per ton CO ₂ 2050: € 516 per ton CO ₂	CBS (2025) Graaf <i>et al.</i> (2024) Bruyn <i>et al.</i> (2023) Van Capellen <i>et al.</i> (2024)

Tabel 4: Partijen waar maatschappelijke baten van energy hubs mogelijk terecht komen

Baat	Baathouders
Toename economische groei	Gehele regio, provincie, gemeente, bedrijven, overige private en publieke organisaties
Verandering slachtoffers ongevallen	Professionals, omwonenden
Vermindering gezondheidskosten en verloren levensjaren	Verzekeringsmaatschappijen, inwoners
Toename kwaliteit van leven	Inwoners
Verandering woongenot	Omwonenden, eigenaren vastgoed
Verandering biodiversiteit	(Lokale) overheden, natuurorganisaties, landbouworganisaties, maatschappij
Bijdrage tegen klimaatverandering	Maatschappij

Samengevat is het aan de hand van het gepresenteerde causaal model mogelijk om in de ontwerpfase voor een energy hub snel te inventariseren welke effecten en maatschappelijke baten mogelijk van toepassing zijn. Om vervolgens een eerste beeld te krijgen van de mogelijke omvang van de maatschappelijke impact van een energy hub kan aan de hand van de gevonden kengetallen (Tabel 3) een heel aantal baten inzichtelijk gemaakt worden. Wanneer er baten zijn met een significante omvang is het interessant om te kijken of de partijen waar de desbetreffende baten (Tabel 4) terecht komen niet bij de ontwikkeling van de energy hub betrokken moeten worden.

9. Literatuurlijst

Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125834.

Al-Mulali, U., Weng-Wai, C., Sheau-Ting, L., & Mohammed, A. H. (2015). Investigating the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis by utilizing the ecological footprint as an indicator of environmental degradation. *Ecological indicators*, 48, 315-323.

Autoriteit Consument & Markt (z.d.). Aansluiting op elektriciteitsnet en gasnet. Geraadpleegd op 10 april 2024, van <https://www.acm.nl/nl/energie/elektriciteit-en-gas/netbeheer/>.

Aziz, G., & Sarwar, S. (2023). Empirical evidence of environmental technologies, renewable energy and tourism to minimize the environmental damages: Implication of advanced panel analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6), 5118.

Balasubramanian, S., & Balachandra, P. (2021). Effectiveness of demand response in achieving supply-demand matching in a renewables dominated electricity system: A modelling approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111245.

Baiwei, X., Hanif, I., Wasim, S., & Rehman, S. (2023). Sustainable finance, natural resource abundance, and energy poverty trap: the environmental challenges in the era of COVID-19. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 26535-26544.

Bale, C. S., Varga, L., & Foxon, T. J. (2015). Energy and complexity: New ways forward. *Applied Energy*, 138, 150-159.

Bazuin, L. (2023). Nederland in 2050. *Grondboor & Hamer*, 77(5/6), 194-198.

Bende, E. E., & Dekker, N. J. J. (2019). Brandincidenten met fotovoltaïsche (PV) systemen in Nederland: een inventarisatie. Petten: ECN TNO.

Bergsma, J. (2022). Hernieuwbare energie in de beleggingsportefeuille. *vba Journaal*, 25.

Bilgen, S. E. L. Ç. U. K. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 890-902.

Bruin, R. de, Kleiwegt, E., Boer, H. de (2023). Handreiking slimme energiesystemen. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) op verzoek van de Topsector Energie .

CBS (2025). Emissiefactoren van elektriciteit uit steenkool en aardgas, 2000-2021, I, geraadpleegd op 14 mei 2025.

Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1634-1653.

Corona Bellostas, B. (2021, 24 februari). *Is de productie van windturbines en zonnepanelen schadelijk voor het milieu?* KlimaatHelpdesk. Reviewer: W. van Sark. Redacteur: S. Borghart. Beschikbaar op <https://www.klimaathelpdesk.org/answers/is-de-productie-van-windturbines-en-zonnepanelen-schadelijk-voor-het-milieu/>.

Cros, S., Badosa, J., Szantaï, A., & Haeffelin, M. (2020). Reliability predictors for solar irradiance satellite-based forecast. *Energies*, 13(21), 5566.

Dekker, R., Masson, E., de Jong, R., & van Est, R. (2022). Stroom van data: Energiedata benutten voor een maatschappelijk verantwoorde energietransitie.

Dekker, I., van de Krol, S., Van Der Schoor, H., van der Spek, A., van den Top, R., Kuis, E. E., ... & Definitief, A. (2023). SMART.

De Bruyn, S., De Vries, J., Juijn, D., Bijleveld, M., Giesen, C. van der, Korteland, M., Santen, W. van, Pápai, S. (2023). Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts, CE Delft.

Den Ouden, E., & Valkenburg, A. C. (2021). EnergyMatch: Systeemarchitectuur & dataplatform voor een eerlijke, inclusieve en democratisch bestuurbare oplossing voor energiedelen. Technische Universiteit Eindhoven.

De Rosa, M., Bianco, V., Barth, H., Pereira da Silva, P., Vargas Salgado, C., & Pallonetto, F. (2023). Technologies and Strategies to Support Energy Transition in Urban Building and Transportation Sectors. *Energies*, 16(11), 4317.

Devogelaer, D. (2014). Belgische black-outs berekend. Een kwantitatieve evaluatie van stroompannes in België, Brussels: Federal Planning Bureau.

Dröes, M.I. en Koster, H.R.A. (2021). Wind turbines, solar farms, and house prices, *Energy Policy*, Vol. 155, 112327, Elsevier.

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069-2094.

Fichera, A., Pluchino, A., & Volpe, R. (2021). Local production and storage in positive energy districts: the energy sharing perspective. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 690927.

Gasparatos, A., Doll, C. N., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161-184.

Garcia, D. A., & Bruschi, D. (2016). A risk assessment tool for improving safety standards and emergency management in Italian onshore wind farms. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 18, 48-58.

Graaf, R. de, Jong, J. de, Koolman, G., Laban, M., Pfeiffer, E., Siebers, V., Steenbruggen, L.R., Thijssen, J., Wit, C. de (2024). De Families van Energy Hubs in Nederland, BJ6162, Royal HaskoningDHV.

Groningen, Provincie (2023). Impactanalyse externe veiligheid.

Gooijer, L., & Mennen, M. G. (2021). Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland.

Gunnarsdóttir, I., Davidsdóttir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdóttir, S. (2021). Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110770.

Haider, F. U., Ejaz, M., Cheema, S. A., Khan, M. I., Zhao, B., Liqun, C., ... & Mustafa, A. (2021). Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*, 197, 111031.

Hansler, R., Keijzer, P., & Smets, N. (2022). Stroomuitval bij risicovolle bedrijven: oorzaken, gevolgen en de invloed van de energietransitie. RIVM rapport 2022-0013.

Hamed, T. A., & Alshare, A. (2022). Environmental impact of solar and wind energy-a review. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(2), 1-23.

Hassan, M. S., Mahmood, H., & Javaid, A. (2022). The impact of electric power consumption on economic growth: a case study of Portugal, France, and Finland. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30), 45204-45220.

Herder, P. M., Verbong, G. P. J., Smit, G. J. M., & Buisman, C. J. (2014). Decentrale, duurzame energiesystemen en-opslag. In *Agenda voor Nederland* (pp. 8-13). Technische Universiteit Eindhoven.

Hogan, W. W. (2022). Electricity market design and zero-marginal cost generation. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 9(1), 15-26.

Holland, R. A., Scott, K., Agnolucci, P., Rapti, C., Eigenbrod, F., & Taylor, G. (2019). The influence of the global electric power system on terrestrial biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(51), 26078-26084.

Horsseleberg, M., & Heijmans, M. (2022). Verbeteren luchtkwaliteit kan luchtwegklachten van mensen met een longziekte aanzienlijk verminderen. Utrecht: Nivel.

Jeevarajan, J.A. Joshi, T., Parhizi, M. Rauhala, T. Juarez-Robles, D. (2022). Battery Hazards for Large Energy Storage Systems, *ACS Energy Lett.*, 7, 8, pp. 2725 – 2733.

Kanhai, K., Jans, H., Veen, H. I. T., & Kleer, I. D. (2024). Long-en luchtwegaandoeningen in relatie met luchtkwaliteit. *Huisarts en wetenschap*, 67(2), 28-31.

Krakauer, N. Y., & Cohan, D. S. (2017). Interannual variability and seasonal predictability of wind and solar resources. *Resources*, 6(3), 29.

Karlilar Pata, S., & Balcilar, M. (2024). Decarbonizing energy: Evaluating fossil fuel displacement by renewables in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 31304-31313.

Khan, M. A. I., Biswas, B., Smith, E., Naidu, R., & Megharaj, M. (2018). Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil-a review. *Chemosphere*, 212, 755-767.

Krefis, A. C., Augustin, M., Schlünzen, K. H., Oßenbrügge, J., & Augustin, J. (2018). How does the urban environment affect health and well-being? A systematic review. *Urban science*, 2(1), 21.

Lafitte, A., Sordello, R., Ouédraogo, D. Y., Thierry, C., Marx, G., Froidevaux, J., ... & Reyjol, Y. (2023). Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. *Environmental Evidence*, 12(1), 25.

Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., ... & Rampal, P. (2020). Human health and ocean pollution. *Annals of global health*, 86(1).

Lavrijssen, S., & Braggaar, D. (2020). Kink in de kabel: Voorstellen voor het proactiever afstemmen van vraag en aanbod van netwerkcapaciteit in de energietransitie. *Het Nederlands Tijdschrift voor Energierecht*, 2020(2), 60-71.

Maia, L.K.K., & Zondervan, E. (2019). Optimization of energy storage and system flexibility in the context of the energy transition: Germany's power grid as a case study. *BMC Energy*, 1, 1-17.

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 505570.

Markandya A, Wilkinson P. (2007). Electricity generation and health. *Lancet*. 2007 Sep 15, 370(9591):979-90. PMID: 17876910.

Marujo, D., Zanatta, G. L., & Floréz, H. A. R. (2021). Optimal management of electrical power systems for losses reduction in the presence of active distribution networks. *Electrical Engineering*, 103(3), 1725-1736.

Mertens, S. (2022). Design of wind and solar energy supply, to match energy demand. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100402.

Mikulski, S., & Tomczewski, A. (2021). Use of energy storage to reduce transmission losses in meshed power distribution networks. *Energies*, 14(21), 7304.

Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166-216.

Mujtaba, A., Jena, P. K., Mishra, B. R., Kyophilavong, P., Hammoudeh, S., Roubaud, D., & Dehury, T. (2022). Do economic growth, energy consumption and population damage the environmental quality? Evidence from five regions using the nonlinear ARDL approach. *Environmental Challenges*, 8, 100554.

Mulder, M. (2021). Hoge energieprijzen tonen belang van beperken gas-afhankelijkheid. ESB Economisch Statistische Berichten, 106(4804), 570-573.

Mulder, P., Boonman, H., Sterkenburg, R. (2022). De verwachte impact van windturbines op huizenprijzen in Nederland. Een ruimtelijke analyse voor de periode 2020-2030, TNO 2022 P10374, TNO.

Nationaal Programma Res Regionale Energie Strategie (2024). *RES en voortgang rapportage per regio*. Regionale-energiestrategie.nl. Geraadpleegd op 7 mei 2024, van <https://www.regionale-energiestrategie.nl/resregios/resen+per+regio/default.aspx>.

Nazir, M. S., Bilal, M., Sohail, H. M., Liu, B., Chen, W., & Iqbal, H. M. (2020). Impacts of renewable energy atlas: Reaping the benefits of renewables and biodiversity threats. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 22113-22124.

Netbeheer Nederland (2024). <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/> , geraadpleegd op 13 november 2024.

OECD (2024). Mainstreaming biodiversity into renewable power infrastructure. Organisation for Economic Co-operation and Development.

Ogolo, N. A., Anih, O. C., & Onyekonwu, M. O. (2022). Sources and effects of environmental pollution from oil and gas industrial operations. *Arabian Journal of Chemical and Environmental Research*, 9(01), 98-121.

Olabi, A. G. & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, 112111.

Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100526.

Otten, M.B.J. en Afman, M.R. (2015). Emissiekentallen elektriciteit, Kentallen voor grijze en 'niet-geormerkte stroom' inclusief upstream-emissies, CE Delft.

Peuchen, R., Kox, E., Klösters, M., Straver, K., & Nederland, O. (2022). Beleving windenergie op land; inzichten uit vier windparken. Amsterdam: TNO.

Priyadarshini, I., Kumar, R., Sharma, R., Singh, P. K., & Satapathy, S. C. (2021). Identifying cyber insecurities in trustworthy space and energy sector for smart grids. *Computers & Electrical Engineering*, 93, 107204.

Rijksoverheid (2024). *Dashbaord klimaatbeleid*. Dashboardklimaatbeleid.nl. Geraadpleegd op 7 mei 2024, van <https://dashboardklimaatbeleid.nl>.

Schellekens, J. Terwel, R. Tiihonen, T., Coenen, M. en Kerkhoven, J. (2020). MKBA inpassing zonne-energie Maatschappelijke kosten-batenanalyse naar toekomstige inpassing van drie alternatieven voor opwek van zonne-energie, Berenschot, Kalasta CLimate Neutral Strategies.

Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., De Matteis, S., Hoffman, B., Kim, W. J., Perez-Padilla, R., ... & Wuebbles, D. J. (2019). Health benefits of air pollution reduction. *Annals of the American Thoracic Society*, 16(12), 1478-1487.

Shafiei, S., & Salim, R. A. (2014). Non-renewable and renewable energy consumption and CO2 emissions in OECD countries: a comparative analysis. *Energy policy*, 66, 547-556.

Shepherd, D., Dirks, K., Welch, D., McBride, D., & Landon, J. (2016). The covariance between air pollution annoyance and noise annoyance, and its relationship with health-related quality of life. *International journal of environmental research and public health*, 13(8), 792.

Sovacool, B.K., Kryman, M., Laine, E. (2015). Profiling technological failure and disaster in the energy sector: A comparative analysis of historical energy accidents, *Energy*, Volume 90, Part 2, October 2015, Pages 2016-2027.

Stawicka, E. (2021). Sustainable business strategies as an element influencing diffusion on innovative solutions in the field of renewable energy sources. *Energies* 2021, 14, 5453.

Stern, D. I., Burke, P. J., & Bruns, S. B. (2019). The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective.

Tigelaar, L. (2019). Kunnen omwonenden van windturbines eventuele gezondheidsschade en waardedaling van hun woning gecompenseerd krijgen?. *Ars Aequi*, 68(11), 865-874.

Timmerman J., Deckmyn C., Vandeveld L. & Van Eetvelde G. (2014). Leidraad voor het verminderen van CO2-uitstoot op bedrijventerreinen.

Topsector Energie (2021). *Energyhubs vitale knoopsystemen*. Topsector Energie – Systeemintegratie.

Topolewski, Ł. (2021). Relationship between energy consumption and economic growth in European countries: Evidence from dynamic panel data analysis. *Energies*, 14(12), 3565.

Van Cappellen, L., Bongaerts, M., Groenewegen, H., Van Santen, W. en Vendrik, J. (2024). Wat is de toegevoegde waarde van energiehubs? Mkba, businesscases en belemmeringen voor 2025 tot 2035, 24.230257.176, CE Delft.

Van der Horst, M. (2022). Actualisatie maatschappelijke kosten van verkeersongevallen, Overzichtsnotitie, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Van der Ree, J., Honig, E., Uijt de Haag, P. A. M., Kelfkens, G., & Van de Ven, M. F. (2019). Klimaatakkoord: effecten op veiligheid, gezondheid en natuur.

Varo, A., Jigla, G., Grossmann, K., & Guyet, R. (2022). Addressing energy poverty through technological and governance innovation. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1), 49.

Vieveen, M. & Van der Schoor, T. (2023). Rapport Inwonersvisie Drentsche Aa – Landschap & Energie

Veen, N. W. van, Mennen, M.G., Bos, P.M.J., Engering, T.W.J.A., Gerssen, A. Lasaroms, J.J.P. (2022). Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.

Wang, S., Song, R., Xu, Z., Chen, M., Di Tanna, G. L., Downey, L., Jan, S. & Si, L. (2024). The costs, health and economic impact of air pollution control strategies: a systematic review. *Global Health Research and Policy*, 9(1), 30.

Wu, Z., Hu, Y., Wen, J. X., Zhou, F., & Ye, X. (2020). A review for solar panel fire accident prevention in large-scale PV applications. *IEEE Access*, 8, 132466-132480.

Zhang, V. (2023). Improving Predictability of Wind Power Generation Using Empirical Data.