

Verkenning veiligheid van energiehubs



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweerzorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2025

Auteurs	H. Brans, T. van Harn en M. Duyvis
Contactpersoon	I. Janssen

Datum	9 december 2025
-------	-----------------

Coverfoto	Shutterstock
-----------	--------------

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Samenvatting

Energiehubs zijn decentrale energiesystemen waarin lokaal vraag en aanbod van verschillende energiedragers op elkaar worden afgestemd en opgeslagen of geconverteerd. Op basis hiervan kunnen energiehubs bijdragen aan het verminderen van netcongestie en het vergroten van de flexibiliteit van een duurzaam energiesysteem. In deze verkenning is onderzocht welke typen energiehubs in Nederland voorkomen en welke veiligheidsrisico's zij mogelijk met zich meebrengen. De studie is uitgevoerd via een literatuuronderzoek, gesprekken met deskundigen en een beschouwing van de auteurs.

Een energiehub bestaat in de kern uit drie componenten: inkomende energiestromen (zoals elektriciteit, restwarmte of waterstof), conversie- en opslagsystemen (zoals warmtepompen, batterijen of warmtekrachtkoppelingen) en uitgaande energiestromen naar lokale gebruikers of het openbare net. Energiehubs variëren sterk in schaal, functie en technische opzet. Soms betreft het een samenwerkingsverband tussen twee bedrijven die elektriciteit delen (zogeheten *cable pooling*), terwijl andere energiehubs bestaan uit geavanceerdere systemen waarin meerdere energiedragers en conversietechnieken zijn geïntegreerd. In deze studie zijn energiehubs in vier categorieën energiehubs uiteengezet: residentiële energiehubs, gericht op de lokale energievoorziening van woonwijken; commerciële energiehubs, voornamelijk op bedrijventerreinen met combinaties van opwek-, opslag- en laadinfrastructuur; industriële energiehubs in energie-intensieve sectoren waar onder meer restwarmte en waterstof worden ingezet; en agrarische energiehubs, veelal in de glastuinbouw en landbouw, met onder andere warmtekrachtkoppelingen en biovergisting.

De veiligheidsrisico's van energiehubs komen in de eerste plaats voort uit de afzonderlijke componenten waaruit een energiehub is opgebouwd, zoals zonnepanelen, batterijen of waterstofsysteem. Over de veiligheidsrisico's van deze componenten is al kennis beschikbaar. In deze studie wordt een beknopt overzicht gegeven van de mogelijke effecten van deze reeds bekende risico's, zoals brand, explosie of het vrijkomen van toxische stoffen. Omdat energiehubs verschillende energiedragers kunnen combineren, en daarbij ook verschillen in omvang en gebruiksomgeving zijn verschillende (combinaties van) risico's mogelijk. Relevant voor de risico-inschatting van een specifieke energiehub zijn onder meer welke energiedragers aanwezig zijn en in welke hoeveelheid, de ruimtelijke situering van componenten en de aard van de omgeving (zoals een woonwijk of een industriegebied).

Energiemanagementsystemen reguleren de energiestromen binnen de energiehub. Storingen in de aansturing van energimanagementsystemen binnen de energiehub kunnen leiden tot ontregeling van meerdere systemen tegelijk en daarmee systeemoverstijgende storingen veroorzaken. Uit internationale casuïstiek blijkt dat dergelijke digitale verstoringen in energiehubs kunnen leiden tot stroomstoringen. In dit verkennend onderzoek is niet duidelijk geworden in welke mate dit soort verstoringen fysieke veiligheidsrisico's met zich meebrengen.

Inhoud

	Inleiding	5
1	Onderzoeksmethode	7
1.1	Literatuurstudie	7
1.2	Gesprekken met deskundigen	8
1.3	Beschouwing	8
2	Systeembeschrijving energiehubs	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Weringsprincipe	10
2.3	Conversie en opslag	11
2.4	Energiestromen (input en output)	12
2.5	Energiemanagementsystemen	14
2.6	Samenvattend	15
3	Classificaties en praktijkvoorbeelden	16
3.1	Residentieel	16
3.2	Commercieel	17
3.3	Industrieel	17
3.4	Agrarisch	18
4	Veiligheidsrisico's van individuele componenten van energiehubs	19
4.1	Veiligheidsrisico's bij conversie en opslag	19
4.2	Veiligheidsrisico's bij energiestromen (input en output)	20
4.3	Verstoringen in de aansturing van energiehubs	22
5	Beschouwing	24
6	Conclusie	26
	Referenties	28
	Bijlage 1: Afkortingen	33
	Bijlage 2: Gesprekspartners	34

Inleiding

Aanleiding

Conventioneel geproduceerde energie, door verbranding van fossiele brandstoffen, is regelbaar waardoor vraag en aanbod nauwkeurig op elkaar kunnen worden afgestemd. In het kader van de energietransitie verschuift de energieproductie naar hernieuwbare energieopwekking. De hoeveelheid energie die kan worden opgewekt uit bijvoorbeeld zon en wind is weersafhankelijk waardoor het sturen van de productie en het balanceren van het energiesysteem complexer is geworden. Energiehubs spelen door het beter op elkaar afstemmen van energiestromen met behulp van digitale technologie in op deze uitdagingen. Ondanks beperkingen in de beschikbare netcapaciteit maken energiehubs het mogelijk om extra verduurzaming of groei van bedrijven te realiseren, omdat ze aanvullend boven het huidige bestaande elektriciteitsnet kunnen opereren. Om deze redenen krijgen energiehubs steeds meer aandacht en zullen ze naar verwachting een belangrijke rol gaan vervullen in de energietransitie (CE Delft, 2024). Inmiddels zijn er verschillende trajecten gestart die bijdragen aan de ontwikkeling van energiehubs, bijvoorbeeld het 'Landelijk Actieplan Netcongestie' dat 60-70 hubs financieel ondersteunt. In een rapport van Royal HaskoningDHV (2024) is beschreven dat er een kleine 1200 locaties in Nederland kansrijk zijn voor de ontwikkeling van energiehubs.

Energiehubs zijn een betrekkelijk nieuw fenomeen. Wij constateerden dat er nog weinig inzicht bestaat in de veiligheidsrisico's van energiehubs. Dit was voor het lectoraat Energie- en Transportveiligheid aanleiding om een verkennend onderzoek hiernaar te verrichten.

Doelstelling en onderzoeksvragen

Het doel van deze verkenning is om een eerste beeld te verkrijgen van de veiligheidsrisico's van energiehubs.

Om deze doelstelling te kunnen bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Wat is een energiehub?
2. Welke verschillende soorten energiehubs bestaan er in Nederland?
3. Wat zijn de veiligheidsrisico's van energiehubs?

Onderzoeksmethode

Voor het onderzoek is literatuurstudie verricht, zijn externe deskundigen gehoord en is de uitkomst hiervan geïnterpreteerd door interne experts die daarover een beschouwing hebben geschreven. In hoofdstuk 1 worden deze werkwijzen toegelicht.

Terminologie

- > In deze verkenning hanteren wij dat een energiehubs een lokaal, decentraal energiesysteem is waarin meerdere energiestromen worden verzameld, omgezet, opgeslagen en opnieuw verdeeld tussen meerdere partijen of systemen. Energiesystemen die volledig binnen één huishouden of binnen één bedrijf worden toegepast, vallen daarmee niet onder onze definitie van een energiehubs.
- > Rondom het begrip *energiehub* worden in de literatuur en praktijk diverse verwante termen gebruikt, zoals *multi energy hubs*, *smart energy hubs*, *smart grids*, *microgrids*, *virtual power plants* en *multi-carrier energy systems*. Deze concepten beschrijven afzonderlijke onderdelen, functies of perspectieven van hetzelfde idee: het slim en lokaal afstemmen, verdelen en benutten van energie. In dit rapport gebruiken wij consequent de overkoepelende term energiehubs, omdat deze het geheel van componenten en energiestromen omvat en de meest gebruikte term is binnen actuele Nederlandse beleids- en praktijkontwikkelingen.
- > In Bijlage 1 is een overzicht opgenomen van afkortingen die in het rapport worden gebruikt.

1 Onderzoeksmethode

1.1 Literatuurstudie

De verkenning is gestart met een literatuurstudie met het doel de systeemopbouw van energiehubbs en haar verschillende varianten te beschrijven en analyseren. Hiervoor zijn academische literatuur en (online) vakbladen en rapporten geraadpleegd. In gevonden literatuur is via referenties naar verdere relevante bronnen gezocht ('sneeuwbalmethode'). De volgende zoektermen zijn gebruikt met behulp van zoekmachines Google, Google Scholar en Science Direct.

- > energie hub, energiehub, energy hub, energy hubs
- > energie hub veiligheid, energy hub safety
- > energy hub risk, energie hub risico
- > input carriers energy hub
- > output carriers energy hubs
- > energiehubbs in Nederland
- > energiehub gevaar energy hub hazard
- > energy hub incident accident; energiehub ongeval

Bij deze literatuurstudie is daarnaast een GPT-model¹ ingezet om aanvullende literatuur en informatie te verkennen: GPT-model 4o en vanaf september 2025 GPT-model 5.

Voorbeelden van gestarte prompts² zijn:

- > *Kun je wetenschappelijke bronnen toevoegen over inkomende energiestromen in energiehubbs?*
- > *Kun je aan de hand van deze concepttekst nu relevante bronnen en tekstelementen toevoegen?*
- > *Ik heb nu onderstaande conversiesystemen gevonden, zijn dit ook daadwerkelijk de belangrijkste typen, want er zijn ongetwijfeld nog veel meer.*

Met behulp van het GPT-model werden aanvullende wetenschappelijke papers gevonden, alsook gegenereerde tekstelementen op basis daarvan. Deze tekstelementen zijn vervolgens in het wetenschappelijke artikel nader bestudeerd. Tijdens bestudering werden de door het GPT-model aangedragen zinsneden op juistheid gecontroleerd. Tekstelementen die feitelijk niet uit de geciteerde papers geconcludeerd konden worden zijn zodoende door de onderzoekers verwijderd uit de gegenereerde teksten.

Uit de literatuurstudie werd voldoende informatie gevonden om een systeembeschrijving van energiehubbs op te stellen. Over veiligheid van energiehubbs zijn echter geen specifieke (wetenschappelijke) bronnen gevonden over de veiligheidsaspecten van energiehubbs. Wel werden in de literatuur voldoende publicaties gevonden over veiligheidsrisico's van afzonderlijke energiesystemen. Daarnaast werden er wel artikelen gevonden over de

¹ GPT-model: generative pretrained transformer model, een kunstmatige intelligentie-instrument voor (onder andere) genereren van teksten (bron: <https://nl.wikipedia.org/wiki/GPT>)

² Prompt: een opdracht of vraag aan GPT

efficiëntie en optimalisatie van energiestromen binnen energiehub's; echter deze gingen echter niet of zeer beperkt in op fysieke veiligheidsrisico's.

1.2 Gesprekken met deskundigen

Aangezien de literatuur onvoldoende wetenschappelijke publicaties bevatte die de veiligheid van energiehub's behandelen, zijn enkele gesprekken gevoerd met personen die kennis over en praktijkervaring met energiehub's hebben. Hierdoor kregen we een concreter beeld van de ontwikkeling van energiehub's in Nederland en van de mogelijke veiligheidsvraagstukken die daarbij spelen. De geraadpleegde personen zijn vermeld in Bijlage 2. Aanvankelijk werd overwogen om vanuit een aantal praktijkcases inzicht te krijgen in mogelijke overkoepelende veiligheidsvraagstukken, maar dat bleek binnen de looptijd van het onderzoek niet uitvoerbaar; onder meer omdat er onvoldoende beschikbare gesprekspartners gevonden zijn tijdens de looptijd van de verkenning.

1.3 Beschouwing

De onderzoekers hebben de resultaten uit de literatuurstudie en de gesprekken samengebracht om een samenhangend beeld te vormen van relevante risico's en aandachtspunten. Omdat specifieke kennis over veiligheidsaspecten van energiehub's beperkt is, zijn de bevindingen geïnterpreteerd op basis van beschikbare bronnen en expertinschattingen in de vorm van een beschouwing.

2 Systeembeschrijving energiehubs

In dit hoofdstuk wordt een systeembeschrijving van een energiehubs gegeven en worden de drie kerncomponenten van een energiehubs toegelicht alsook de aansturing ervan.

2.1 Inleiding

Energie is het vermogen om arbeid te verrichten of warmte te leveren. Energie kan van vorm veranderen of zich verplaatsen, wat leidt tot energiestromen: de hoeveelheid energie die per tijdseenheid wordt aangeleverd (McMurry et. al, 2016; van den Akker & Mudde, 2014).

Energie komt in veel vormen voor, maar de vier meest relevante vormen voor opwekking en gebruik in de maatschappij zijn (de Jong, 2019; van den Akker & Mudde, 2014):

- > mechanisch
- > thermisch
- > elektrisch
- > chemisch

Andere vormen zijn bijvoorbeeld stralingsenergie uit zonlicht, kernenergie, magnetische energie of potentiële energie, maar dergelijke vormen worden vaak eerst omgezet in (een van) de vier hoofdvormen voordat ze praktisch worden gebruikt (de Jong, 2019; van den Akker & Mudde, 2014).

In de huidige westerse samenleving wordt energie traditioneel centraal opgewekt door verbranding van fossiele brandstoffen, waarbij chemische energie wordt omgezet in thermische en mechanische energie om elektriciteit te produceren. Deze vorm van opwekking is regelbaar, waardoor vraag en aanbod relatief nauwkeurig op elkaar kunnen worden afgestemd. Tegenwoordig verschuift de energieproductie van verbranding van fossiele grondstoffen naar hernieuwbare energieopwekking waarbij minder gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen. De weersafhankelijkheid van zon en wind maakt deze bronnen minder grid-regelbaar, oftewel moeilijker centraal aanstuurbaar, waardoor de mogelijkheden voor productiesturing en systeembalancering afnemen (de Jong, 2019). Kenmerkend voor de energietransitie is daarmee de verschuiving van een centraal naar een meer decentraal energiesysteem.

Naast de beperkte mogelijkheid van regulering van het energiesysteem is een ander knelpunt dat lokale elektriciteitsnetwerken niet berekend zijn op hogere belasting door overmatige opwekking en hogere elektriciteitsvraag, ook wel netcongestie genoemd (van Leeuwen et al., 2025). Energiehubs spelen in op deze uitdagingen door lokale opwekking, opslag en conversie van energie te integreren, energiestromen onderling te koppelen en flexibel te sturen, zodat vraag en aanbod binnen het lokale systeem beter op elkaar worden afgestemd. Het concept 'energy hub (energiehub)' is voor het eerst geïntroduceerd door

ETH³ Zurich in 2007 vanuit het project 'a vision of future energy networks' (van Leeuwen et al., 2025).

Netcongestie

Netcongestie betekent dat het elektriciteitsnet op bepaalde momenten te zwaar wordt belast en vol raakt, waardoor het niet alle stroom kan vervoeren die mensen of bedrijven willen gebruiken of terugleveren. Netcongestie komt nu bijna, met name in midden- en laagspanningsnetten⁴, overal voor in Nederland en blokkeert verdere stappen in de energietransitie. Dit gebeurt wanneer er te veel vraag of juist te veel aanbod van elektriciteit tegelijk is (van Leeuwen et al., 2025; RVO, 2025).

2.2 Werkingsprincipe

Binnen een energiehub werken meerdere partijen samen om energie efficiënt en flexibel te benutten, in plaats van dat elke partij individueel energie afneemt en terug levert. Met energiehub wordt geprobeerd meerdere voordelen te bereiken, waaronder (Kennisplatform energiehub, 2025; van Leeuwen et al., 2025; CE Delft, 2024):

- > Verminderen van:
 - Energiekosten
 - CO₂-uitstoot
 - Gebruik van fossiele brandstoffen
 - Netcongestie
 - Onderhoudskosten
- > Verbeteren van:
 - Energie-efficiëntie
 - Flexibiliteit van lokale energiesystemen
 - Innovatie
 - Economische groei

Om deze voordelen te realiseren functioneert een energiehub als een decentraal, 'smart'⁵ energiesysteem waarin verschillende energiestromen samenkomen en lokaal worden beheerd. Dit beheer houdt in dat de stuurbare componenten binnen het energiesysteem worden aangestuurd om de energiestromen te optimaliseren, binnen de fysieke en contractuele grenzen van een veilig energienet. Dit gebeurt door

- > Energiestromen direct door te sturen naar eindgebruikers of het net bij voldoende vraag.
- > Bij meer aanbod dan vraag van een bepaalde energiestroom:
 - Conversie van deze energiestroom naar een andere energievorm waar meer vraag naar is, die vervolgens wordt geleverd aan eindgebruikers of het net.
 - Het tijdelijk opslaan van de energie, zodat deze op een later moment, wanneer de vraag hoger is dan het aanbod, kan worden geleverd aan eindgebruikers of doorgestuurd naar het net. (RVO, 2025b; van Leeuwen et al., 2025; Luo et al., 2023)

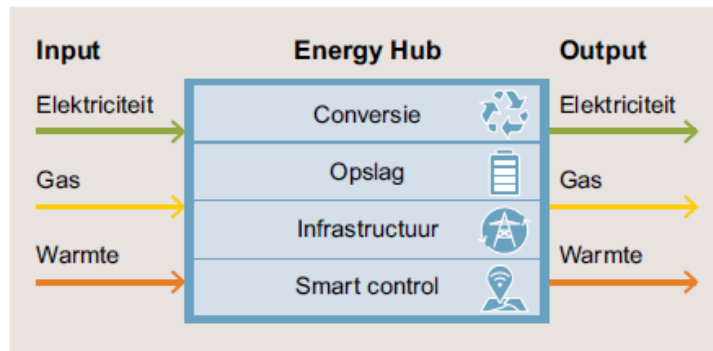
³ Zwitserse Federale Technische Hogeschool Zurich.

⁴ Het midden- en laagspanningsnet vormen de regionale en lokale delen van het elektriciteitsnet die stroom van het hoogspanningsnet verdelen naar bedrijven en uiteindelijk naar huishoudens.

⁵ Aangestuurd en gecoördineerd via digitale technologie.

Een energiehub fungeert zodoende als knooppunt binnen het energiesysteem en bestaat uit drie hoofdelementen, schematisch weergegeven in Figuur 2.1 (Eladl et al., 2023; Topsector Energie, 2021):

- > **Inkomende energiestromen (input):** de aanvoer van energie (zie paragraaf 2.4).
- > **Conversie en opslag:** de omzetting en/of opslag van energie (zie paragraaf 2.3).
- > **Uitgaande energiestromen (output):** de afname van energie (zie paragraaf 2.4).



Figuur 2.1 Schematische weergave energiehub (bron: Topsector Energie, 2021)

Afhankelijk van de energiestromen en de vereiste output variëren energiehub sterk in hun technische configuratie en systeemgrootte (Eladl et al., 2023). Sommige hubs zetten bijvoorbeeld elektriciteit om in warmte via warmtepompen, andere produceren waterstof uit overtollige zonne-energie, of slaan warmte op in thermische buffers voor later gebruik. Hierdoor bestaat er een breed scala aan potentiële toepassingen, variërend van woonwijken tot glastuinbouw, bedrijventerreinen of industrie (waarover meer in hoofdstuk 33) (RoyalhaskoningDHV, 2024). Welke typen energiehub op een locatie in Nederland het meest relevant zijn, hangt af van lokale energievraag, ruimtelijke inpassing en maatschappelijke kosten-batenanalyses.

2.3 Conversie en opslag

Wanneer er voldoende vraag is naar een bepaalde duurzaam opgewekte energiestroom binnen een energiehub, kan deze direct worden gedistribueerd naar afnemers. Bij overmatige hoeveelheden van een energiestroom is tijdelijke opslag, of omzetting naar een andere energiestroom waarvan een ondermaat is noodzakelijk om vraag en aanbod beter op elkaar af te stemmen. Hiervoor maken energiehub gebruik van conversie- en opslagsystemen.

Voorbeelden van conversiesystemen zijn (Mokaramian et al., 2025):

> **Warmtekrachtkoppeling (WKK)**

Bij warmtekrachtkoppeling (in het Engels CHP, Combined Heat And Power) worden tegelijkertijd elektriciteit en warmte opgewekt. Voor WKK's kunnen diverse energiebronnen gebruikt worden, bijvoorbeeld aardgas, biogas, biomassa, waterstof of methanol (Nationaal energiedashboard, z.d.; US Environmental Protection Agency, z.d.). Een warmtekrachtkoppeling maakt een energiehub minder afhankelijk van het elektriciteitsnet.

> **Power-to-Gas (P2G)**

Power-to-Gas is de omzetting van elektrische energie in chemische energie: in feite opslag van (een overschot aan) elektriciteit in een gasvormige stof. Door middel van elektrolyse wordt waterstof geproduceerd uit water. Dit kan vervolgens worden opgeslagen voor een latere toepassing, direct worden gebruikt als brandstof (bijvoorbeeld voor mobiliteit), als grondstof (bijvoorbeeld in de industrie) of met koolstofdioxide worden omgezet tot methaan (methanisering) en dan worden ingevoerd in bestaande gasnetwerken (Tichler et al., 2022; Mansouri 2022; DNV-GL, 2015).

> **Warmtepompen en elektrische boilers**

Met behulp van een warmtepomp of elektrische boiler wordt elektriciteit omgezet in warmte. Dit kan diverse toepassingen hebben: verwarming van gebouwen, input voor warmtenetten, of verhitte voor industriële processen. Een warmtepomp haalt (aangedreven door elektriciteit) warmte uit de buitenlucht, de bodem of het grondwater; de warmte wordt vervolgens overgedragen op het watersysteem van het gebouw (TNO, 2020; Milieucentraal, z.d. b). Een elektrische boiler verhit water door middel van een verwarmingselement, waardoor heet water of stoom wordt geproduceerd. Een ander type, ook wel elektrodeboiler genoemd, verhit water door rechtstreeks elektrische stroom door het water te laten lopen (TNO, 2018; RVO, z.d.).

Voorbeelden van opslagsystemen zijn:

> **Elektrische opslag**

Elektriciteit kan worden opgeslagen in een batterij (of accu). De momenteel meest toegepaste batterij is de lithium-ion (Li-ion) batterij, opgebouwd uit Li-ion-cellen. Deze kan zowel op zeer kleine schaal (denk aan de batterij in een mobiele telefoon) als op grote schaal (zoals een buurtbatterij of energieopslagsysteem (EOS) in een energiehubs) toegepast worden (NIPV, 2023a, 2024).

> **Thermische opslag**

Wanneer water is opgewarmd en wordt opgeslagen in een goed geïsoleerde tank, blijft de warmte enige tijd behouden waarna deze op een later moment gebruikt kan worden. Op 20 tot 300 meter diepte in de aardbodem behoudt water zijn temperatuur. In deze situaties wordt gesproken van een warmtebuffer (de Jong, 2019).

> **Gasopslag**

Een voorbeeld van opslag van energie in de vorm van een gas, is opslag van waterstof onder druk, bijvoorbeeld voor later gebruik in brandstofcellen of injectie in het gasnet.

2.4 Energiestromen (input en output)

De input van een energiehubs bestaat uit de energievormen die worden geleverd aan een energiehubs en de output van een energiehubs bestaat uit energievormen die op het juiste moment en in de gewenste vorm worden geleverd aan eindgebruikers of het net. Warmte kan bijvoorbeeld worden ingezet in een lokaal warmtenet, elektriciteit kan direct worden gebruikt door huishoudens en bedrijven, en moleculen zoals waterstof of biogas kunnen dienen als brandstof of energiedrager voor later gebruik.

De output wordt dus gegenereerd uit energiestromen die de energiehubs ingaan, afkomstig van verschillende lokale of regionale bronnen. Het type energiestromen die energiehubs in-

en uitgaan is afhankelijk van de benodigde output en lokale beschikbaarheid van energie(bronnen). Dit kan per situatie sterk variëren.

Voorbeelden van mogelijke inkomende energiestromen zijn:

> **Restwarmte**

In een warmtenet wordt warmte in de vorm van heet water via een leidingstelsel getransporteerd van de warmtebron naar de gebruiker, waar de warmte wordt afgegeven; vervolgens wordt het afgekoelde water weer terug naar de bron getransporteerd via een parallel leidingstelsel. Er zijn diverse warmtebronnen mogelijk, bijvoorbeeld restwarmte uit industriële processen of afvalverbranding, aardwarmte, warmte uit oppervlaktewater of warmte opgewekt door middel van (elektrische) boilers (PBL, 2017; Spoelstra et al., 2023)

> **Waterstof**

Waterstof kan toegepast worden als warmtebron: voor verwarming in industriële processen of voor de verwarming van woningen en andere gebouwen, als vervanger van aardgas. Dit laatste gebeurt in Nederland alleen nog op experimentele schaal (NIPV, 2023a; D.Bolsman, persoonlijke communicatie, 4 september 2025). Waterstof kan ook gebruikt worden voor de productie van elektriciteit in een brandstofcel. Dit gebeurt bijvoorbeeld in voertuigen die door waterstof worden aangedreven. Waterstof kan in een energiehub functioneren als flexibel inzetbare energiedrager en buffertechnologie (D.Bolsman, persoonlijke communicatie, 4 september 2025; Spoelstra et al., 2023).

> **Zonne-energie**

In de zonnecellen van een zonnepaneel wordt energie uit zonlicht omgezet in elektrische gelijkstroom. De gelijkstroom afkomstig van de zonnepanelen wordt door een omvormer omgezet in voor het stroomnet bruikbare wisselstroom. Zonnepanelen worden op diverse locaties toegepast: op daken en aan gevels van allerhande gebouwen, op de grond of verhoogd op stellages in het vrije veld of op water (zonneparken), op vrachtwagens et cetera. Zonneparken hebben vaak een eigen aansluiting op het hoogspanningsnet en bevatten daarvoor een of meerdere transformatoren (VRU, 2025; Brandweer Nederland, 2020, 2025).

> **Windenergie**

Windenergie kan met behulp van windturbines omgezet worden in elektriciteit. Een windturbine is in het algemeen opgebouwd uit een hoge mast met daarop een 'gondel' waaraan de rotorbladen (wieken) zijn bevestigd. In de gondel bevindt zich een generator die de mechanische energie van de draaiende rotorbladen omzet in elektrische energie (NIPV, 2025; Buldit BV, 2025; Windpark De Drentse Monden en Oostermoer, z.d.).

> **Biomassa**

Biomassa is de verzamelnaam voor organisch materiaal, afkomstig van plantaardige of dierlijke grondstoffen (bijvoorbeeld hout, resten van landbouwgewassen, mest, resten van de voedselindustrie).⁶ Uit biomassa kan op verschillende manieren energie opgewekt worden:

- *Verbranding*. Biomassa kan rechtstreeks verbrand worden om warmte te produceren, met de geproduceerde warmte elektriciteit op te wekken, of in een

⁶ Fossiele brandstoffen, zoals aardolie, aardgas en steenkool, zijn ook uit plantaardige of dierlijke grondstoffen gevormd maar worden niet tot biomassa gerekend.

warmtekrachtkoppelingsinstallatie (WKK) zowel warmte als elektriciteit op te wekken (RIVM, 2010a).

- *Vergassing*. Bij *thermische vergassing* wordt droge biomassa (zoals hout of stro) bij hoge temperatuur (> 600 °C) en lage zuurstofconcentratie onvolledig verbrand. Het hierbij geproduceerde gasmengsel wordt 'synthesegas' of 'syngas' genoemd. Bij *superkritische watervergassing* wordt uit natte biomassa (zoals mest of rioolslib) bij hoge temperatuur (> 375 °C), hoge druk (> 221 bar) en lage zuurstofconcentratie syngas geproduceerd. Syngas moet worden gezuiverd en 'opgewerkt' tot dezelfde samenstelling als aardgas, voor het kan worden toegevoegd aan het aardgasnet. Technieken voor vergassing zijn nog in ontwikkeling (Gasunie, z.d.; RIVM, 2010a; RVO, 2025a).
- *Vergisting*. Natte biomassa (zoals mest, slib, groente-, fruit- en tuinafval) kan onder zuurstofarme omstandigheden door micro-organismen (bacteriën, schimmels) worden omgezet in biogas. Dit gebeurt in een vergistingsinstallatie. Biogas kan tijdelijk worden opgeslagen, kan worden verbrand om elektriciteit op te wekken, of kan (na zuiveren en opwerken) aan het aardgasnet worden toegevoegd (Kool et al., 2005; RIVM, 2010a, 2021; RVO, 2020, 2025a).
- *Productie van biobrandstoffen*. Uit biomassa kunnen transportbrandstoffen geproduceerd worden, zoals bio-ethanol, bio-olie en biodiesel (RIVM, 2010a; Milieucentraal, z.d. a).

> **Aardgas**

Aardgas is een fossiele brandstof, die net als aardolie meerdere miljoenen jaren geleden uit organisch materiaal is ontstaan. Aardgas is een mengsel van verschillende stoffen, met als belangrijkste bestanddeel methaan en daarnaast andere lichte koolwaterstoffen en stoffen zoals koolstofdioxide, stikstof, zuurstof en waterdamp. Gronings aardgas bestaat voor ruim 80% uit methaan (Gasunie, 1980). De samenstelling van aardgas verschilt per aardgasveld waar het aardgas gewonnen wordt. Aardgas wordt gebruikt door huishoudens, bedrijven, industrie en energiecentrales, als brandstof voor koken, verwarmen, productie van elektriciteit, als grondstof in diverse chemische productieprocessen, als brandstof voor voertuigen et cetera (EIA, 2024; Ons aardgas.nl, z.d.; TUDelft, 2022; Gasunie, 1980).

2.5 Energiemanagementsystemen

Energiemanagementsystemen (EMS) hebben als doel:

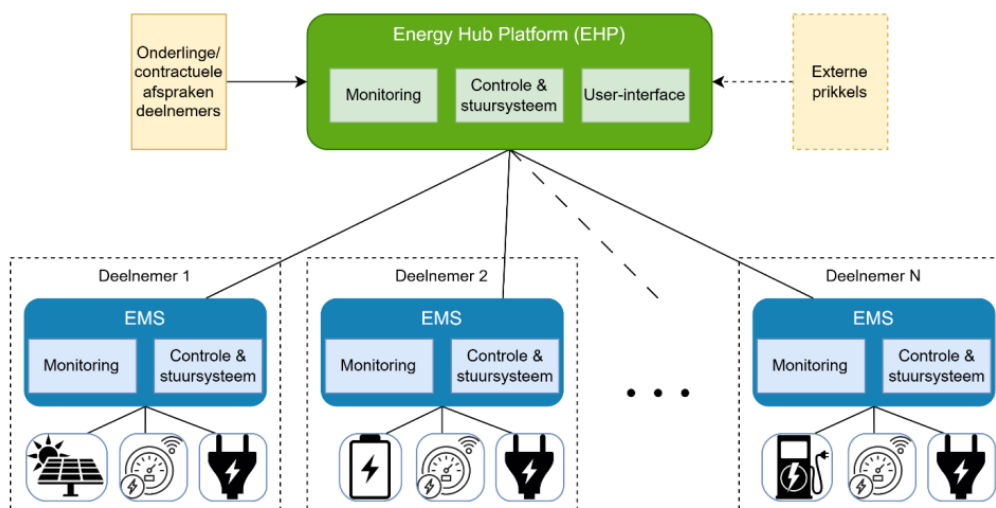
- > energie verdelen
- > gebruik monitoren
- > voorkomen dat grenswaarden worden overschreden.

'Voor en achter de meter'

In het energiesysteem vormt de energiemeter een grens. Voor de meter liggen de 'componenten' (installatie of apparaat dat energie meet, verbruikt, opwekt, opslaat of omzet in een ander vorm van energie) van de netbeheerder zoals transformatoren en verdeelstations, of de collectieve componenten van een energiehub zoals een batterij of zonnepanelenpark. Achter de meter bevinden zich de assets van de klant, bijvoorbeeld zonnepanelen, laadpalen, warmtepompen en interne installaties, die energie verbruiken of opwekken binnen het eigen domein.

Een energiemanagementsysteem (EMS) monitort en stuurt energieverbruik en de componenten achter de meter bij individuele deelnemers binnen een energiehub. De EMS'en van alle individuele deelnemers sturen data door naar het energiehub-platform (EHP), een overkoepelend virtueel systeem dat draait in een cloud en op basis van de ontvangen data energiestromen analyseert en het setpoint⁷ bepaalt die naar de individuele EMS'en worden gestuurd en worden toegepast (van Doodewaard et al., 2025).

De combinatie van de individuele EMS'en en het EHP wordt het collectief energiemanagementsysteem genoemd (CEMS) en verzorgt het energiemanagement voor de gehele energiehub, zoals weergegeven in Figuur 2.2 (van Doodewaard et al., 2025).



Figuur 2.2 Overzicht EMS en EHP (van Doodewaard et al., 2025).

2.6 Samenvattend

Een energiehub heeft als doel het energiesysteem binnen een bepaald gebied efficiënter en duurzamer te maken. Om het gehele Nederlandse energiesysteem duurzamer te maken zijn meerdere energiehub's nodig. Dan kan vraag en aanbod van verschillende energiestromen beter op elkaar afgestemd worden. Met behulp van digitale technologie wordt het energieverbruik inzichtelijk gemaakt, zodat energiestromen data-gestuurd kunnen worden beheerd: bij een overschot kan deze energievorm worden omgezet naar een andere energievorm en tijdelijk worden opgeslagen voor later gebruik of direct worden geleverd wanneer er voldoende vraag is.

⁷ Gewenste waarde van een bepaalde grootheid binnen een regelsysteem.

3 Classificaties en praktijkvoorbeelden

In een rapport van Royal HaskoningDHV (2024) is beschreven dat er in heel Nederland een kleine 1200 locaties kansrijk zijn voor de ontwikkeling van een (toekomstige) energiehubs. Energiehubs kunnen sterk variëren in vorm, schaal en functie, afhankelijk van het energiesysteem en de lokale behoeften (Eladl et al., 2023). Wij constateren dat de term 'energiehub' in diverse situaties wordt gebruikt. Zo wordt er al gesproken van een energiehubs wanneer twee bedrijven via een kabel elektrische energie delen, ook wel 'cable pooling' wordt genoemd. Het op deze manier delen van energie is mogelijk geworden door een wijziging in de Energiewet. Eerder was dit niet toegestaan, omdat een van de partijen in dat geval als energieleverancier zou optreden (E. Koers, persoonlijke communicatie, 21 augustus 2025).

Deze werkwijze wordt eveneens toegepast op bouwplaatsen, waar machines met DC⁸ kunnen worden opgeladen. Wanneer er in de nabijheid een organisatie is die hiervoor faciliteiten heeft, kan er een kabel worden gelegd naar de bouwplaats. In dergelijke situaties is vaak geen energiemanagementsysteem benodigd, maar volstaat een tweede meter die middels een apart contract afrekent. Ook hier wordt gesproken van een energiehubs, weliswaar in zijn simpelste vorm (E. Koers, persoonlijke communicatie, 21 augustus 2025).

In dit rapport wordt de classificatie aangehouden zoals voorgesteld door Eladl et al. (2023), waarin energiehubs worden onderverdeeld in vier hoofdtypen, op basis van hun primaire toepassing:

- > residentieel
- > commercieel
- > industrieel
- > agrarisch

3.1 Residentieel

Residentiële energiehubs richten zich op de lokale energievoorziening in woonwijken, dorpen en stedelijke buurten. Deze hubs combineren vaak zonnepanelen, collectieve warmtenetten, batterijsystemen en soms warmtepompen en elektrische voertuigen.

Een voorbeeld hiervan is 'Schoonschip'. Schoonschip is een woonwijk in Amsterdam waar 46 huishoudens gezamenlijk een slim en duurzaam energiesysteem beheren (Schoonschip, z.d.). Elke woning beschikt over een batterij en een boilervat, waarin lokaal opgewekte energie uit zonnepanelen en aquathermie wordt opgeslagen en efficiënt wordt verbruikt om vraag en aanbod van energie in balans te houden. Sinds 2024 worden alle batterijen,

⁸ Gelijkstroom

warmtepompen en PV-omvormers centraal aangestuurd via een virtuele energiecentrale, die het lokale energiegebruik optimaliseert, handelt op energiemarkten en actief congestiemanagement toepast. De wijk heeft een eigen elektriciteitsnet en, dankzij een ontheffing van de Elektriciteitswet, kunnen bewoners energie onderling verhandelen. Bewoners houden zelf de regie over de aansturing van hun apparaten en hebben gezamenlijk regelstrategieën ontwikkeld, gericht op betaalbaarheid, duurzaamheid en sociale impact. (Schoonschip, z.d.).

3.2 Commercieel

Commerciële energiehubbs bevinden zich vooral op bedrijventerreinen, kantoorlocaties en logistieke knooppunten. Ze combineren bijvoorbeeld grootschalige zonneparken of zonnepanelen op daken, batterijopslag, elektrische laadinfrastructuur en waterstofproductie of -opslag. Binnen deze categorie vallen ook mobiliteitshubs, die gericht zijn op de integratie van laadpleinen voor elektrische voertuigen, openbaar vervoer, of zwaar transport en tankfaciliteiten voor waterstof.

In Nederland vormen bedrijventerreinen momenteel de belangrijkste locaties voor commerciële hubs. Zij spelen een sleutelrol bij het oplossen van netcongestie en het verduurzamen van logistiek, kantoren en productiebedrijven. Daarbij nemen ondernemers steeds vaker het initiatief, omdat het wachten op netverzwaring hun duurzame uitbreidingsplannen te veel vertraagt (Solar Magazine z.d., Pannenberg z.d., Rabobank z.d.).

Op bedrijventerrein Innofase in Duiven wisselen verschillende bedrijven onderling energie uit: een afvalenergiecentrale levert stroom aan andere bedrijven op het terrein, afvalwater wordt door het waterschap verwerkt tot biogas dat terugvloeit naar de oorspronkelijke bedrijven, en pulp van papieren labels wordt door een afvalverwerker omgezet in warmte en elektriciteit (Het Ondernemers Belang, 2023; Innofase, z.d.). Een ander voorbeeld van een energiehub bevindt zich in Nederweert. Op bedrijvenpark Pannenberg II besloten circa twintig bedrijven gezamenlijk een energiehub op te zetten (Solar Magazine z.d., Pannenberg z.d., Rabobank z.d.). De bedrijven wisselen onderling energie uit. Hierbij wordt gebruikgemaakt van een energiehandelsplatform en een energiemanagementsysteem dat iedere tien seconden een meting uitvoert om van ieder bedrijf te achterhalen wat het verbruik en teruglevering zijn. Overcapaciteit wordt direct gedeeld of opgeslagen in een batterij, waardoor meer bedrijven op het bedrijventerrein ondanks netcongestie kunnen uitbreiden. In Zutphen wordt op bedrijventerrein De Mars gewerkt aan een vergelijkbare aanpak (Provincie Gelderland z.d., Gemeente Zutphen, z.d.). Hier wordt naar aanleiding van een potentiële studie uit 2022 gezocht naar mogelijke oplossingen voor de daar sinds 2018 gesignaleerde netcongestie. Er zijn plannen in ontwikkeling voor het opwekken van zonne- en windenergie en de bouw van een waterstoffabriek.

3.3 Industrieel

Industriële energiehubbs bevinden zich vooral in energie-intensieve sectoren zoals de chemie, staalindustrie, voedingsmiddelenproductie en bulkopslag. Ze richten zich op het koppelen van grootschalige elektriciteitsinvoer aan restwarmtebenutting, waterstofproductie

en grootschalige opslag in batterijen of waterstof. Potentiële locaties voor industriële energiehubbs zijn bijvoorbeeld chemiepark Chemelot en de haven van Rotterdam.

3.4 Agrarisch

Agrarische energiehubbs zijn te vinden in de glastuinbouw, akkerbouw en veeteelt en richten zich onder meer op biovergisting en de inzet van warmtekrachtkoppeling. Ook in de landbouwsector neemt de noodzaak toe om energiestromen collectief te organiseren en efficiënter te benutten. De provincie Noord-Holland stimuleert het inmiddels al om energiehubbs in de glastuinbouw te realiseren, waarbij restwarmte van of voor kassen kan worden ingezet. Verder wordt gekeken naar een flexibele WKK-sturing en alternatieve CO₂-voorziening voor de kassen, bijvoorbeeld bij het glastuingebied De Kievit (Provincie Noord-Holland, z.d.; De Kievit z.d.).

4 Veiligheidsrisico's van individuele componenten van energiehubs

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de veiligheidsrisico's die de verschillende componenten binnen een energiehubs met zich meebrengen. Allereerst worden de risico's besproken die samenhangen met conversie- en opslagsystemen, gevolgd door de risico's van inkomende en uitgaande energiestromen, en ten slotte de risico's op verstoringen in de digitale aansturing van een energiehubs. Het overzicht is indicatief en afhankelijk van de specifieke configuratie: alleen de componenten die daadwerkelijk in een energiehubs aanwezig zijn, zijn relevant. De opgesomde componenten in deze lijst dekken de kern van wat in energiehubs wordt toegepast. Afhankelijk van de lokale situatie kunnen andere systemen worden geïntegreerd, die mogelijk andere specifieke veiligheidsrisico's kennen.

4.1 Veiligheidsrisico's bij conversie en opslag

4.1.1 Conversiesystemen

Warmtekrachtkoppeling (WKK)

Veiligheidsrisico's bij opwekken van elektriciteit:

- > Brand als gevolg van ongecontroleerde uitstroom van rookgassen uit de installatie, of ontbranding door een externe of interne ontstekingsbron (NIPV, 2023a)
- > Vrijkomen van rookgassen als deze niet goed worden gefilterd (NIPV, 2023a).
- > Overige risico's (afhankelijk van de energiebron) zoals lekkage van brandstof en explosiegevaar (Santon, 1997).

Veiligheidsrisico's bij opwekken van warmte:

- > Explosie van de warmwaterketel of stoomketel, bijvoorbeeld door overdruk (NIPV, 2023a; Cooling Post, 2024).
- > Lekkage en ongecontroleerde uitstroom van heet water of stoom uit leidingen, onder hoge druk (NIPV, 2023a).

Power-to-Gas (P2G)

Veiligheidsrisico's zijn brand- en explosiegevaar en lekkage van gassen. Deze komen met name voort uit de:

- > Condities bij de elektrolyse (hoge druk) en methanisering (hoge temperatuur).
- > Aanwezigheid van brandbare gassen (waterstof en methaan).
- > Aanwezigheid van verstikkende gassen (koolstofdioxide en koolmonoxide).
- > Aanwezigheid van hoge spanning (DNV-GL, 2015).

Warmtepompen en elektrische boilers

Veiligheidsrisico's van een warmtepomp zijn:

- > Explosie (Cooling Post, 2024).
- > Lekkage van het koudemiddel (Aguilera et al., 2022; RVO 2022).

Veiligheidsrisico van een elektrische boiler is:

- > Explosie (bijvoorbeeld door fouten in ontwerp of materiaal, bij onderhoud of gebruik, achterstallig onderhoud, of door brand) (Boiler World Update, z.d.).

4.1.2 Opslagsystemen

Elektrische opslag.

Primair veiligheidsrisico van batterijsystemen is:

- > Het ontstaan van een thermal runaway in de batterij, bijvoorbeeld door beschadiging, brand, veroudering of kortsluiting, waarbij brandbare en toxische gassen vrijkomen. Dit kan leiden tot een batterijbrand, een dampwolkexplosie en het vrijkomen van een toxische wolk. Zie ook de NIPV-explainer video [thermal runaway](#).⁹

Thermische opslag.

Veiligheidsrisico van thermische opslag is:

- > De ongecontroleerde uitstroom van heet water of stoom onder hoge druk, als gevolg van een lekkage of leidingbreuk. Oorzaken daarvan kunnen fouten bij graaf- of onderhoudswerkzaamheden zijn, corrosie, of natuurlijke oorzaken zoals aardbevingen (Royal HaskoningDHV, 2020).

Gasopslag.

Veiligheidsrisico's van gasopslag zijn:

- > Het vrijkomen van gas door lekkage en/of, in het geval van waterstof, door diffusie.
- > Afhankelijk van het soort gas: explosie van bij lekkage vrijgekomen gas.
- > Afhankelijk van het soort gas: brand door ontsteking van bij lekkage vrijgekomen gas.

4.2 Veiligheidsrisico's bij energiestromen (input en output)

Restwarmte

Veiligheidsrisico's zijn dezelfde als bij thermische opslag, en verder:

- > Ongecontroleerde uitstroom van heet water of stoom onder hoge druk, als gevolg van een lekkage of leidingbreuk (Royal HaskoningDHV, 2020).

Waterstof

Veiligheidsrisico's van waterstof zijn:

- > Vrijkomen van waterstof door lekkage en/of diffusie door materialen, omdat waterstof een zeer klein molecuul is.
- > Aantasting van stalen leidingen (verbrossing).
- > Ontbranding: waterstof heeft een lage ontstekingsenergie (0,019 mJ bij 30 volumeprocent).

⁹ Thermal runaway: een complexe combinatie van chemische reacties en/of kortsluitingen in een batterijcel waarbij hitte gevormd wordt, waardoor dit proces zichzelf in stand houdt en onbeheersbaar uitbreidt naar de overige batterijcellen (Barowy et al., 2021; Christensen et al., 2021).

- > Explosie: waterstof heeft een breed ontvlambaarheidsbereik (4 – 75 vol.%).¹⁰
- > Er kan ongemerkt een gevaarlijke situatie ontstaan omdat waterstof geurloos is, met een onzichtbare vlam brandt en een relatief lage stralingswarmte heeft.
- > Ophoging van waterstof tegen het plafond, omdat het lichter is dan lucht (IFV, 2020; NIPV, 2023a, 2024b).

Zonne-energie (PV-systemen).

Veiligheidsrisico's van een PV-systeem zijn:

- > Brand in een of meer componenten van het PV-systeem (zoals de zonnepanelen, connectoren, combinerbox, omvormer, bekabeling, transformator). Er zijn diverse oorzaken van brand denkbaar: fouten in de en/of ondeskundige installatie waardoor kortsluiting en/of een vlamboog optreedt, condensatievorming waarbij vonkoverslag plaatsvindt, beschadiging, 'hotspots' in zonnepanelen waardoor oververhitting optreedt, et cetera (Chow et al., 2016; Deng et al., 2017; Dhimish et al., 2024; IFV, 2021; NIPV, 2023b, 2024a; RIVM, 2022; Tang et al., 2021; Vaverková et al., 2022, VRU, 2025; Wang & Xuan, 2021; Waqar Akram et al., 2022; Yang et al., 2015).
- > Vrijkomen van giftige gassen bij brand van de transformatorolie (NIPV, 2024a).
- > Losraken en vallen van zonnepanelen bij storm of harde wind (VRU, 2025).
- > Elektrische schok of elektrocutie (zonnepanelen blijven stroom genereren zolang er licht op valt) (VRU, 2025; NIPV, 2025).
- > Verspreiding (depositie) van resten van zonnepanelen tot kilometers ver in de omgeving bij grootschalige gebouwbranden. Zonnecelscherven kunnen vanwege de scherpe randen mogelijk verwondingen veroorzaken bij mens en dier (IFV, 2021b; Van Garderen, 2021; RIVM, 2022).
- > Aantasting van de kathodische bescherming van gastransportleidingen door corrosie, met lekkage als mogelijk gevolg, door onjuiste installatie van zonneparken en veronachtzamen van de betreffende richtlijnen op basis van het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Gasunie, 2022).

Windenergie.

Veiligheidsrisico's van windenergie zijn:

- > Afbreken en vallen of wegslingeren van onderdelen van de windturbine (zoals een rotorblad of de gondel), mastbreuk of omvallen van de gehele windturbine, als gevolg van extreme weersomstandigheden of overbelasting. Deze onderdelen kunnen mensen, dieren, gebouwen, (vitale) infrastructuur et cetera raken (NIPV, 2025).
- > IJsvorming op de windturbine, afhankelijk van de weersomstandigheden. Het ijs kan losraken, vallen en vervolgens mensen of dieren verwonden en/of schade toebrengen aan gebouwen en (vitale) infrastructuur (RVO, 2018).
- > Brand in een of meerdere onderdelen van de windturbine, als gevolg van blikseminslag, falen van elektrische installatieonderdelen, oververhitting van mechanische remmen of andere onderdelen van de rotor, fouten bij werkzaamheden et cetera (CFPA, 2022).

Biomassa.

Veiligheidsrisico's bij energieproductie uit biomassa zijn:

- > Brand als gevolg van broei bij de opslag van biomassa (ANV, 2019).
- > Bij verbranding van biomassa (NIPV, 2023a):

¹⁰De ontstekingsenergie van een waterstofmengsel is het laagst bij de stoichiometrische concentratie (~ 30 vol. %), namelijk 0,019 mJ. De minimale ontstekingsenergie wordt groter naarmate de waterstofconcentratie dichter bij de LFL of de UFL komt te liggen. Bij 4 vol. % waterstof (LFL) is de minimale ontstekingsenergie een factor 500 hoger (10 mJ) dan bij de stoichiometrische concentratie. Bij 75 vol.% waterstof (UFL) is de minimale ontstekingsenergie nog veel groter (IFV, 2020)

- vrijkomen van rookgassen zoals koolmonoxide, polyaromatische koolwaterstoffen (PAK), stikstofoxiden (NOx) en fijnstof vrijkomen (RIVM, 2010a).
- ontbranding van rookgassen
- explosie van de warmwaterketel (door overdruk)
- corrosie van (onderdelen van) de installatie wanneer zoutzuur (HCL) vrijkomt (met name bij verbranding van gras, stro en graan) (RIVM, 2010a; ECP, 2013).
- > Bij vergassing van biomassa (NIPV, 2023a):
 - vorming van teer in de installatie
 - vrijkomen van gas, teerdampen, afvalwater en/of toxische vloeistoffen (gebruikt bij onderhoud)
 - aanwezigheid van ammoniak, fenolen, benzeen, tolueen en PAK in afvalwater wanneer dat onvoldoende gezuiverd is (Rauch, 2006).
 - voortijdig ontbranden van biomassa, bijvoorbeeld door een elektrostatische ontlading of een (externe) ontstekingsbron.
- > Bij vergisting van biomassa (NIPV, 2023a):
 - vorming van stikstofoxiden bij de opslag van biomassa
 - ongewenste uitstroom van de inhoud van de vergistingsinstallatie als gevolg van een storing
 - brand-, explosie-, bedwelmings- en vergiftigingsgevaar ten gevolge van het vrijkomen van biogas, van pathogenen (bacteriën, virussen en parasieten) en/of van stoffen als waterstofsulfide, ammoniak en kooldioxide (RIVM, 2014).
 - gasvorming en daardoor opbouw van druk bij transport van digestaat (het restproduct van de biovergisting) dat nog biologisch actief is (NCM, z.d.)
 - risico's van biogas (NIPV, 2023a; RIVM, 2014; Middelkoop, 2012):
 - explosie en/of brand, omdat biogas licht ontvlambaar is (methaan).
 - verstikking door de aanwezigheid van kooldioxide.
 - vergiftiging door de aanwezigheid van waterstofsulfide.
 - aantasting van leidingmaterialen (KIWA, 2016).

Aardgas.

Veiligheidsrisico's van aardgas zijn:

- > Ongecontroleerd vrijkomen van aardgas door lekkage in een transport- of distributieleiding (bijvoorbeeld door beschadiging bij graafwerkzaamheden of door verzwakking door corrosie)
- > Brand door ontsteking bij lekkage van aardgas
- > Explosie bij lekkage van aardgas (IFV, 2018; KIWA, 2022).

4.3 Verstoringen in de aansturing van energiehubs

Zoals besproken in paragraaf 2.3 vindt de aansturing van energiehubs plaats via energiemanagementsystemen die de energiestromen binnen de energiehubs reguleren. Als onderdeel van de aansturing kunnen verschillende veiligheidsmaatregelen in een energiehubs aanwezig zijn die bedoeld zijn om systeemuitval te voorkomen. Dit zijn zowel fysieke maatregelen zoals sensoren, als digitale maatregelen tegen cyberincidenten of softwarefouten (Doodewaard, 2025).

Doordat verschillende energiesystemen binnen een energiehubs met elkaar zijn gekoppeld, kan een storing in één systeem de werking van andere systemen beïnvloeden. Dit kan ertoe

leiden dat de gehele energiehub ontregeld raakt en lokaal of regionaal stroomuitval veroorzaakt (Liu et al., 2023). Deze zogeheten systeemoverschrijdende storingen kunnen ontstaan door het uitvallen of isoleren van een energiebron (Source Isolation Failure). De oorzaak hiervoor kan een tekort zijn in de aanvoer van energie tussen systemen (Supply Shortage Failure) of door een storing in de koppeling tussen twee energiesystemen (Linkage Failure), zoals bij gecombineerde installaties of verbindende leidingen (Li et al., 2022). Li et al (2022) geven niet duidelijk aan of er directe fysieke risico's verbonden zijn aan dit type verstoringen, maar zeker is wel dat er maatschappelijke gevolgen kunnen ontstaan door bredere stroomuitval. Internationale incidenten, zoals in Taiwan (2017), Engeland (2019) en Texas (2021), laten zien dat systeemoverstijgende storingen effecten kunnen hebben op de energievoorziening en de omgeving waarin een energiehub opereert (Liu et al., 2023).

5 Beschouwing

Uit de voorgaande hoofdstukken is gebleken dat een energiehubs kan bestaan uit verschillende componenten: van zonnepanelen, windturbines en warmtepompen tot batterijen, waterstofinstallaties, biovergisters en warmtekrachtkoppelingen. Het gemeenschappelijke kenmerk van energiehubs is dat energiehubs meer vormen van energie in één systeem samenbrengen en deze energiestromen lokaal op elkaar afstemmen. In de praktijk kunnen zodoende verschillende energiedragers uit de energietransitie onderdeel zijn van een energiehubs. Hierdoor ontstaan verschillende mogelijke (combinaties van) risico's, waarvan de aard en ernst sterk afhankelijk zijn van de specifieke configuratie.

Een aandachtspunt bij de risico-inschatting van energiehubs is de fysieke nabijheid van de verschillende componenten. Wanneer individuele componenten dicht op elkaar worden geplaatst, kan een incident bij de ene component escaleren naar de andere (domino-effect), bijvoorbeeld door hittestraling bij brand of door een drukgolf bij een explosie. Daarom is het zinvol om bij ontwerp en plaatsing rekening te houden met de aard en omvang van effecten van individuele componenten, bij de bepaling van de onderlinge afstand, eventuele afscherming en onderlinge situering van componenten. Ook de omgeving speelt bij de risico-inschatting een rol: in residentiële gebieden kan het voorkomen dat componenten dicht bij bewoners en hun woon- en verblijfsruimten staan, terwijl van burgers niet vanzelfsprekend kan worden uitgegaan dat zij kennis hebben van de bijbehorende veiligheidsrisico's. Dit in tegenstelling tot energiehubs in meer bedrijfsmatige omgevingen, zoals gebruikers in een industriële omgeving die hiervoor doorgaans zijn opgeleid. Bij commerciële toepassingen, zoals mobiliteitshubs, is bovendien sprake van wisselende en diverse gebruikers, waardoor de aanwezige risicokennis niet vanzelfsprekend aanwezig is.

Omdat energiehubs uit uiteenlopende componenten bestaan, kan in principe niet worden uitgegaan van één generieke risico-inschatting of één set veiligheidsmaatregelen. Sommige energiehubs richten zich uitsluitend op elektrische uitwisseling zoals cable pooling, terwijl andere energiehubs meerdere energiedragers combineren, waaronder elektriciteit, warmte, waterstof, biogas of reststromen uit industriële processen. Energiehubs kunnen zodoende vrijwel alle elementen van de energietransitie bevatten. Dit betekent dat per energiehubs bekeken zou moeten worden welke energiedragers aanwezig zijn, hoe deze fysiek zijn opgesteld, welke interacties als gevolg van incidenten tussen systemen mogelijk zijn en in welke omgeving zij staan. De veiligheid van een energiehubs wordt in eerste instantie bepaald door de veiligheid van afzonderlijke componenten, maar ook door de onderlinge situering van deze componenten, evenals de omgeving waarin zij zijn geplaatst.

Naast de fysieke aspecten speelt ook de digitale aansturing een rol. Energiehubs functioneren via energiemanagementsystemen die de vraag, het aanbod en de opslag van energiestromen continu reguleren. Bekend is dat er mogelijk diverse veiligheidsmaatregelen zijn geïmplementeerd rondom deze aansturing. Het is aannemelijk dat wanneer meerdere veiligheidsmaatregelen tegelijk ontregeld raken, de energiehubs niet meer binnen de operationele grenzen functioneert. Een kennishiaat betreft de vraag in hoeverre het falen van energiemanagementsystemen direct doorwerkt in fysieke veiligheidsrisico's, zoals brand

of explosies binnen energiehubs; hierover is in de beschikbare gevonden literatuur geen informatie aangetroffen.

6 Conclusie

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksvragen beantwoord.

1. Wat is een energiehubs?

Een energiehubs is een decentraal energiesysteem waarin verschillende energiestromen samenkomen en lokaal worden beheerd. Het systeem bestaat uit drie kerncomponenten: *inkomende energiestromen (input)*, zoals elektriciteit uit zon en wind, restwarmte of waterstof; *conversie- en opslagsystemen*, zoals batterijen, warmtepompen of warmtekrachtkoppelingen, die energie tijdelijk opslaan of omzetten naar een andere vorm; en *uitgaande energiestromen (output)*, die op het juiste moment en in de juiste vorm aan gebruikers of het net worden geleverd. Met behulp van digitale energiemanagementsystemen worden vraag en aanbod van energiestromen continu op elkaar afgestemd.

2. Welke verschillende soorten energiehubs bestaan er in Nederland?

Energiehubs verschillen sterk in vorm, schaal en functie, afhankelijk van het energiesysteem en de lokale behoeften. De term wordt in de praktijk breed toegepast: soms verwijst een energiehubs naar een eenvoudig samenwerkingsverband tussen twee bedrijven die elektriciteit delen (cable pooling), terwijl andere hubs mogelijk bestaan uit complexe systemen waarin meerdere energiedragers, conversietechnieken en opslagvormen geïntegreerd zijn.

Energiehubs kunnen onderverdeeld worden in residentiële, commerciële, industriële en agrarische energiehubs. Residentiële energiehubs richten zich op woonwijken en combineren bijvoorbeeld zonnepanelen, warmtenetten, batterijen en warmtepompen. Commerciële energiehubs bevinden zich vooral op bedrijventerreinen en logistieke locaties, waar energie-opwekking, batterijopslag, laadpleinen en soms waterstofproductie worden geïntegreerd om netcongestie te verminderen. Industriële energiehubs komen voor in energie-intensieve sectoren zoals chemie, staal en bulkopslag, waar bijvoorbeeld grootschalige elektriciteitsinvoer en waterstofsysteem worden gekoppeld. Agrarische energiehubs bevinden zich in de glastuinbouw en landbouw en maken gebruik van bijvoorbeeld warmtekrachtkoppelingen, biovergisting en restwarmtebenutting.

3. Wat zijn de veiligheidsrisico's van energiehubs?

De veiligheidsrisico's van energiehubs komen in de eerste plaats voort uit de afzonderlijke componenten waaruit een specifieke energiehubs is opgebouwd, zoals batterijen, waterstofsysteem of zonnepanelen. Elk van deze systemen kent eigen veiligheidsrisico's, waaronder bijvoorbeeld brand, explosie en het vrijkomen van toxische stoffen. Voor een groot aantal componenten zijn de belangrijkste risico's beknopt beschreven in hoofdstuk 4.

Daarnaast is voor de veiligheidsrisico's relevant dat energiehubs verschillende energiedragers combineren en dat energiehubs sterk verschillen in schaal en gebruiksomgeving. Hierdoor zijn immers verschillende (combinaties van) veiligheidsrisico's

mogelijk. De veiligheidsrisico's van een specifieke energiehubs hangen af van welke energiedragers aanwezig zijn en in welke hoeveelheid, hoe zij ruimtelijk ten opzichte van elkaar zijn geplaatst en in welke omgeving de energiehubs zich bevindt. Door fysieke nabijheid kan een incident in één component bijvoorbeeld escaleren naar andere installaties, bijvoorbeeld door hitte-aanstraling bij brand. Ook kan het risicobewustzijn per gebruiksomgeving verschillen: in industriële omgevingen is technische kennis doorgaans aanwezig, terwijl dit in residentiële context niet vanzelfsprekend is.

De aansturing via energiemanagementsystemen kan worden verstoord door sensordefecten, softwarefouten of cyberincidenten. Zulke verstoringen kunnen ertoe leiden dat meerdere componenten tegelijkertijd ontregeld raken en systeemoverschrijdende stroomstoringen ontstaan dat kan leiden tot lokale stroomuitval. Het is echter onbekend in hoeverre digitale uitval direct kan leiden tot fysieke incidenten binnen energiehubs; hierover is in de beschikbare literatuur geen informatie gevonden, wat een kennishiaat vormt.

Referenties

- Aguilera, J.J., Meesenburg, W., Ommen, T., Markussen, W.B., Poulsen, J.L., Zühlsdorf, B., & Elmegaard, B. (2022) A review of common faults in large-scale heat pumps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 168, 112826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112826>.
- Anastasiadis, A., Lekidis, A., & Pierros, I. (2024). Energy Cost Optimization for Incorporating Energy Hubs into a. *Energies*, 1(May). <https://doi.org/10.3390/en17122827>
- ANV. (2019). *Verkenning risico's van de energietransitie voor de nationale veiligheid*. Analistennetwerk Nationale Veiligheid.
- Atlas Natuurlijk Kapitaal. (z.d.). *Biomassa voor energie*. Geraadpleegd op 28 juli 2025, van <https://www.atlasnatuurlijkkapitaal.nl/natuurlijk-kapitaal/biomassa-voor-energie#:~:text=Biomassa%20is%20organisch%20materiaal%20afkomstig,de%20transitie%20naar%20duurzame%20energie>.
- Barowy, A., Klieger, A., Regan, J., & Mckinnon, M. (2021). *UL 9540A Installation Level Tests with Outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups*.
- Boiler World Update. (z.d.). *Failure analysis and boiler accidents*. Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://boilerworldupdate.com/failure-analysis-and-boiler-accidents/>.
- Brandweer Nederland. (2020). *Handreiking risicobeheersing. Advies veilige PV-systemen*.
- Brandweer Nederland. (2025). *Handreiking incidentbestrijding zonnepanelen*.
- Buldit BV. (2025). *Windturbine: werking & onderdelen*. Geraadpleegd op 28 juli 2025, van <https://www.wind-energie.be/windturbine>.
- CE Delft. (2024). Wat is de toegevoegde waarde van energiehubs? https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2025/01/CE_Delft_230257_Wat_is_de_maatschappelijke_waarde_van_energiehubs_Def_2-1.pdf.
- CFPA. (2022). *Wind turbines fire protection guideline*. CFPA-E Guideline No 22:2022 F.
- Christensen, P. A., Milojevic, Z., Wise, M. S., Ahmeid, M., Attidekou, P. S., Mrozik, W., Dickmann, N. A., Restuccia, F., Lambert, S. M., & Das, P. K. (2021). Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules. *Applied Thermal Engineering*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116623>
- Chow, C. L., Han, S. S., & Ni, X. M. (2016). A study on fire behaviour of combustible components of two commonly used photovoltaic panels. *Fire and Materials*, 41(1), 65–83. <https://doi.org/10.1002/fam.2366>.
- Cooling Post. (2024). *Update: Fatal heat pump explosion*. Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://www.coolingpost.com/world-news/update-fatal-heat-pump-explosion/>
- Deng, S., Zhang, Z., Ju, C., Dong, J., Xia, Z., Yan, X., Xu, T., & Xing, G. (2017). Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia*, 130, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399>.
- De Kievit. (z.d.). Energiehub: de Kievit. <https://dekievitbv.nl/energiehub/>
- Dhimish, M., Theristis, M., & d'Alessandro, V. (2024). Photovoltaic hotspots: A mitigation technique and its thermal cycle. *Optik*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171627>.
- DNV-GL. (2015). *Power-to-Gas project in Rozenburg, The Netherlands*. Rapport nr. GCS.15.R24613, Rev. 0.

- van Doodewaard et al. (2025). *Handreiking voor de uitvraag van een collectief energiemanagementsysteem (CEMS)*. Kennisplatform Energiehubs.
- ECP. (2013). *ECP Technologiebeschrijving: Verbranding*. Energie Conversie Parken.
- EIA. (2024). *Natural gas explained*. U.S. Energy Information Administration. Geraadpleegd op 20 augustus 2025 van <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>.
- Eladl, A. A., El-Afifi, M. I., El-Saadawi, M. M., & Sedhom, B. E. (2023). A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. *Alexandria Engineering Journal*, 68, 315–342. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.021>.
- Essent. (z.d.). *Boiler informatie: zo werkt het*. Geraadpleegd op 31 juli 2025, van <https://www.essent.nl/kennisbank/verwarming/hoe-werkt-een-verwarmingsinstallatie/boiler-informatie>.
- Garderen, E. van (2021). *Oorzaken van scherp-in bij runderen*. *Herkauwer*, 18–19.
- Gasunie. (1980). *Basisgegevens aardgassen*. N.V. Nederlandse Gasunie.
- Gasunie Transport Services. (2022). *Uitgangspunten ter voorkoming van beïnvloeding van gasleidingen door nabijgelegen zonneparken (01/12/2022 versie 5)*.
- Gasunie. (z.d.). *Superkritische watervergassing*. Geraadpleegd op 29 juli 2025, van <https://www.gasunie.nl/projecten/superkritische-watervergassing>.
- Gemeente Zutphen. (z.d.). *Smart energy hub De Mars*. Geraadpleegd 23 september 2025, van <https://zutphen.nl/energie/mijn-onderneming-verduurzamen/seh-de-mars>
- Het Ondernemers Belang. (2023, 21 november). *Met smart energy hubs bouwen aan evenwichtig energiesysteem*. Het Ondernemers Belang. <https://www.ondernemersbelang.nl/nieuws/met-smart-energy-hubs-bouwen-aan-evenwichtig-energiesysteem>.
- IFV. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*.
- IFV. (2021). *Depositie bij branden met zonnepanelen*.
- InnoFase. (z.d.). *Over InnoFase*. Geraadpleegd 23 september 2025, van <https://www.innofase.com/nl/over-innofase/>.
- de Jong, M. (2019). *Inleiding duurzaamheid*. Amsterdam: Boom.
- Wat is een energiehub?* (2025, oktober 27). Opgehaald van Kennisplatform energiehubs : <https://energiehubs.nl/kennisbank/wat-is-een-energiehub>
- KIWA. (2016). *Voorstel voor richtlijn voor het transport van ruw biogas*.
- Kool, A., de Boer, H. C., van Dooren, H. J. C., Timmerman, M., van Dun, B., & Tijmenssen, M. (2005). *Kennisbundeling covergisting*. CLM rapport 621-2005. <https://edepot.wur.nl/30638>.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B.-E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific reports*, 7(1), 10018.
- van Leeuwen et al. (2025). *Review en definitie van Smart Energy hubs*. EIGEN / Saxion hogeschool.
- Li et al. (2022) Probabilistic energy flow calculation for regional integrated energy system considering cross-system failures, *Applied Energy*, 308, 118326.
- Liu, Z., Li, H., Hou, K., Xu, X., Jia, H., Zhu, L., & Mu, Y. (2023). Risk assessment and alleviation of regional integrated energy system considering cross-system failures. *Applied Energy*, 350(June), 121714. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121714>
- Luo, Y., Li, Z., Li, S., & Jiang, F. (2023). Risk Assessment for Energy Stations Based on Real-Time Equipment Failure Rates and Security Boundaries. *Sustainability*, 15(18), 13741. <https://doi.org/10.3390/su151813741>.
- Maghsoodi, S., Talavat, V., & Galvani, S. (2023). Probabilistic scheduling of a comprehensive energy hub integrated with renewable energy sources considering the

- correlation between uncertain variables. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 36(May), 101222. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101222>.
- Mansouri, S. A., Nematbakhs, E., Ahmarineja, A., Jordehi, A. R., Javadi, M. S., & Matin, S. A. A. (2022). A multi-objective dynamic framework for design of energy hub by considering energy storage system, power-to-gas technology and integrated demand response program. *Journal of Energy Storage*, 50, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104206>.
- McMurry, J., Fay, R., & Robinson, J. (2016). *Chemistry*.
- Milieucentraal. (z.d. a). *Biomassa*. Geraadpleegd op 28 juli 2025, van <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/biomassa/>.
- Milieucentraal. (z.d. b). *Warmtepomp: duurzaam elektrisch verwarmen*. Geraadpleegd op 31 juli 2025, van <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/duurzaam-verwarmen-en-koelen/warmtepomp-duurzaam-elektrisch-verwarmen/#hoe-werkt-een-warmtepomp>.
- Middelkoop, J. (2012). *Gasgevaaren van biogasinstallaties*. Masterscriptie, TU Delft.
- Mokaramian, E., Shayeghi, H., Younesi, A., Shafie-khah, M., & Siano, P. (2025). Energy hubs components and operation: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115395. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2025.115395>.
- Nationaal energiedashboard. (z.d.). *Warmtekrachtkoppeling*. Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://ned.nl/nl/dataportaal/energie-productie/elektriciteit/warmtekrachtkoppeling-wkk>.
- NCM. (z.d.). *Regelgeving opslag van digestaat na monovergisting op boerderijschaal*. Geraadpleegd op 30 juli 2025, van <https://www.mestverwaarding.nl/kenniscentrum/3918/regelgeving-opslag-van-digestaat-na-monovergisting-op-boerderijschaal>.
- NIPV. (2021). *Depositie bij branden met zonnepanelen*.
- NIPV. (2023a). *Informatieblad energietransitie*.
- NIPV. (2023b). *Scenarioboek: Ondergrondse brand DC-bekabeling Zonnepark – Vlamboog*.
- NIPV. (2024a). *Zonneparken en natuurbranden*.
- NIPV. (2024b). *Toolbox waterstof*. Geraadpleegd op 30 juli 2025, van <https://nipv.nl/onderzoek/waterstof/#toolbox-waterstof>.
- NIPV. (2024c). *Literatuuronderzoek naar de brandeffecten van Lithium-ion batterijbranden*.
- NIPV. (2025). *Kennisbundel windturbines*.
- Ons aardgas.nl. (z.d.). *Gaswinning in Nederland: van afbouw aardgas Groningen tot energietransitie* geraadpleegd op 20 augustus 2025, van <https://www.onsaardgas.nl/gaswinning/>.
- Pannenberg. (z.d.). *Over Pannenberg II*. Geraadpleegd 23 september 2025, van <https://www.pannenberg.nl/>.
- PBL. (2017). Toekomstbeeld Klimaatneutrale Warmtenetten in Nederland. 80. <http://www.pbl.nl/publicaties/toekomstbeeld-klimaatneutrale-warmtenetten-in-nederland>.
- Provincie Gelderland. (2023, 13 juni). *Energie opwekken en verdelen door een smart energy hub*. Provincie Gelderland. <https://www.gelderland.nl/nieuws/energie-opwekken-en-verdelen-door-een-smart-energy-hub>.
- Provincie Noord Holland (z.d.) *Energiehubs in de glastuinbouw, met inzet van flexibele WKK; realisatie van een warmtenet in De Kwakel*. https://geoapps.noord-holland.nl/kaartenportaal/apps/experiencebuilder/experience/?block_id=layout_383_block_2&id=42869dfa351349cc93f29d008f0b5a85&page=Energiehubs-in-glastuinbouwgebieden&views=-2030--%2CAgriport.

- Rabobank. (z.d.). *Energy hubs*. Geraadpleegd 23 september 2025, van <https://www.rabobank.nl/bedrijven/groei/duurzaamheid/bedrijfsvoering-verduurzamen/energy-hubs>.
- Rauch, R. (2006). Formation, treatment and avoiding of waste water. In S. Fürnsinn, R. Bühler & H. Hofbauer (Red.), *Proceedings of the international workshop 'Health Safety and Environment of biomass gassification'* (pp.60-67). IEA Bioenergy, Task 33 / Thermal Gassification of biomass.
- Riemersma, B., Spoelstra, M., Brans, H., & van Harn, T. (2025). Veiligheidsaspecten van SMEOS : schone mobiele energieopweksystemen. NIPV. [20250708-NIPV-Veiligheidsaspecten-SMEOS-schone-mobiele-energieopweksystemen.pdf](#).
- RIVM. (2010a). *Bio-energiecentrales. Inventariserend onderzoek naar milieuaspecten bij diverse energieopwekkingstechnieken met behulp van biomassa*. RIVM rapport 609021104/2010.
- RIVM. (2010b). *Veiligheid grootschalige productie van biogas. Verkennend onderzoek risico's externe veiligheid*. RIVM rapport 620201001/2010.
- RIVM. (2014). *Feitenrelaas rond de aspecten 'Gezondheid en Veiligheid' van biovergisting*. RIVM Briefrapport 2014-0162.
- RIVM. (2022). *Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen*.
- Royal HaskoningDHV. (2020) *Onderzoek naar de effecten op en risico's naar mensen bij het vrijkomen van stoom en heet water uit een warmtetransportnet*.
- RoyalhaskoningDHV. (2024). De Families van Energy Hubs in Nederland. www.royalhaskoningdhv.com.
- RVO. (2025, augustus 2025). *Wat is netcongestie*. Opgehaald van Rijksdienst voor ondernemend Nederland: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/netcongestie/wat-is-netcongestie#wat-is-netcongestie%3F>
- RVO. (2018) *IJsvorming op windturbines*. Geraadpleegd op 28 juli 2025, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/externe-veiligheid/ijsvorming#wat-zijn-de-risico's%3F>.
- RVO. (2020). *Digestaat als meststof gebruiken*. Geraadpleegd op 21 augustus 2025, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/mest/bewerken/digestaat>.
- RVO. (2022). Best Practice Industriële Warmtepompen. Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-12/Elektrificatie%20in%20de%20industrie%20-%20Best%20practice%20Warmtepompen.pdf>.
- RVO. (2025a). *Grondstoffen en technieken voor groen gas*. Geraadpleegd op 29 juli 2025, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bio-energie/grondstoffen-technieken-groen-gas#>.
- RVO. (2025b). *Wat is netcongestie?* Geraadpleegd op 30 september 2025, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/netcongestie/wat-is-netcongestie>.
- RVO. (z.d.). *RVO Kennisdossier E-Boilers Power-2-Heat*. RVO factsheet. Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/energie-besparen-de-industrie/e-boilers>.
- RVO. (2025c) *Hoe ver zijn we met energiehubbs in Nederland?* Geraadpleegd op 2 oktober 2025 <https://www.rvo.nl/onderwerpen/energiehubbs/hoe-ver-zijn-energiehubbs-nederland>.
- US Environmental Protection Agency. (z.d.). *What Is CHP?* Geraadpleegd op 4 augustus 2025, van <https://www.epa.gov/chp/what-chp#:~:text=CHP%20is%20a%20technology%20that,separate%20heat%20and%20grid%20power>.
- Van den Akker, H., & Mudde, R. (2014). *Fysische transportverschijnselen*.

- Vaverková, M. D., Winkler, J., Uldrijan, D., Ogrodnik, P., Vespalcová, T., Aleksiejuk-Gawron, J., Adamcová, D., & Koda, E. (2022). Fire hazard associated with different types of photovoltaic power plants: Effect of vegetation management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112491>.
- VRU. (2025). *Kennisdocument zonnepanelen*. Veiligheidsregio Utrecht.
- Windpark De Drentse Monden en Oostermoer. (z.d.). *De bouw van een windturbine*. Geraadpleegd op 28 juli 2025, van <https://drentsemondenuostermoer.nl/de-bouw-van-een-windturbine/>.
- Santon, R.G. (1997). *Explosion hazards at CHP and CCGT plants*. In *ICHEME Symposium Series* no. 141 (pp.51-65).
- Schoonschip. (z.d.). *Schoonschip Amsterdam*. Geraadpleegd 23 september 2025, van <https://schoonschipamsterdam.org/>.
- Spoelstra, M., Brans, H., Hessels, T., Riemersma, B., & Vos, J. (2023). Informatieblad energietransitie. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/12/20231214-NIPV-Informatieblad-energietransitie.pdf>.
- Tichler, R., Bauer, S., & Böhm, H. (2022). *Power-to-Gas*. In T.M. Letcher (Red.), *Storing Energy (second edition)* (pp. 595-612). Elsevier.
- TNO. (2018). *Electric industrial boiler*. TNO technology factsheet.
- TNO. (2020). *Heat pump - air to water*. TNO technology factsheet.
- Topsector Energie. (2021). Energy Hubs. https://topsectorenergie.nl/documents/822/2021-TSE_SI_Energy_Hubs_6UKeAXr.pdf.
- TU Delft. (2022). *Introductie in Energie- en Industriesystemen*. Webdictaat bij het vak TB141E van de opleiding Technische Bestuurskunde TU Delft. <https://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB141E/>.
- Yang, H. Y., Zhou, X. D., Yang, L. Z., & Zhang, T. L. (2015). Experimental studies on the flammability and fire hazards of photovoltaic modules. *Materials*, 8(7), 4210–4225. <https://doi.org/10.3390/ma8074210>.
- Zheng, Y., Xue, X., Xi, S., & Xin, W. (2024). Balancing Possibilist-probabilistic risk assessment for smart energy hubs: Enabling secure peer-to-peer energy sharing with CCUS technology and cyber-security. *Energy*, 304, 132102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132102>.

Bijlage 1: Afkortingen

CEMS	Collectief energiemanagementsysteem
CHP	Combined heat and power (warmtekrachtkoppeling)
EHP	Energiehub platform
EMS	Energiemanagementsysteem
EOS	Energieopslagsysteem
LF	Linkage failure
NIPV	Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
P2G	Power-to-gas
PV	photo voltaic
RVO	Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland
SIF	Source isolation failure
SSF	Source shortage failure
WKK	Warmtekrachtkoppeling(sinstallatie)

Bijlage 2: Gesprekspartners

Naam	Organisatie	Datum Gesprek
Edwin Koers	Unica	21 augustus 2025
David Bolsman	Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland (RVO)	4 september 2025