

# Mkba energiehubs

Maatschappelijke waarde van twaalf  
archetypes voor 2.500 energiehubs  
in Nederland

Achtergrondrapport

# Mkba energiehubs

Maatschappelijke waarde van twaalf archetypes  
voor 2.500 energiehubs in Nederland

Dit rapport is geschreven door:  
Martijn Blom, Michiel Bongaerts, Lucas van Cappellen,  
Florian Hesselink en Ward van Santen

Delft, CE Delft, November 2025

Publicatienummer: 2025.240439.177a

Opdrachtgever: Rijkdienst voor Ondernemend  
Nederland en Topsector Energie Systeemintegratie

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn  
verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de  
projectleider Martijn Blom (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

## **CE Delft** – Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

# Inhoud

|          |                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                                 | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Methodologie</b>                              | <b>7</b>  |
|          | 2.1 Ruimtelijke analyse en uitwerking casussen   | 7         |
|          | 2.2 Energetische doorrekening                    | 12        |
|          | 2.3 Maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba)  | 14        |
|          | 2.4 Algemene aannames                            | 20        |
|          | 2.5 Vergelijking andere studies                  | 25        |
| <b>3</b> | <b>Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie</b> | <b>27</b> |
|          | 3.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus   | 27        |
|          | 3.2 Resultaten ruimtelijke analyse               | 28        |
|          | 3.3 Energetische uitwerking – casus              | 29        |
|          | 3.4 Mkba-resultaten – casus                      | 31        |
|          | 3.5 Extrapolatie mkba-resultaten                 | 35        |
| <b>4</b> | <b>Gemengd bedrijventerrein – ZLT-warmtenet</b>  | <b>37</b> |
|          | 4.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus   | 37        |
|          | 4.2 Resultaten ruimtelijke analyse               | 38        |
|          | 4.3 Energetische uitwerking – casus              | 38        |
|          | 4.4 Mkba-resultaten – casus                      | 41        |
|          | 4.5 Extrapolatie mkba-resultaten                 | 44        |
| <b>5</b> | <b>Logistiek bedrijventerrein</b>                | <b>46</b> |
|          | 5.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus   | 46        |
|          | 5.2 Resultaten ruimtelijke analyse               | 47        |
|          | 5.3 Energetische uitwerking – casus              | 48        |
|          | 5.4 Mkba-resultaten – casus                      | 50        |
|          | 5.5 Extrapolatie mkba-resultaten                 | 54        |
| <b>6</b> | <b>Glastuinbouwcluster</b>                       | <b>56</b> |
|          | 6.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus   | 56        |
|          | 6.2 Resultaten ruimtelijke analyse               | 57        |
|          | 6.3 Energetische uitwerking – casus              | 58        |
|          | 6.4 Mkba-resultaten – casus                      | 61        |
|          | 6.5 Extrapolatie mkba-resultaten                 | 64        |

|           |                                                                        |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b>  | <b>RWZI en bestaande buurt</b>                                         | <b>66</b>  |
| 7.1       | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 66         |
| 7.2       | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 68         |
| 7.3       | Energetische uitwerking – casus                                        | 69         |
| 7.4       | Mkba-resultaten – casus                                                | 72         |
| 7.5       | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 76         |
| <b>8</b>  | <b>Industrieel bedrijventerrein – elektrificatie</b>                   | <b>77</b>  |
| 8.1       | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 77         |
| 8.2       | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 78         |
| 8.3       | Energetische uitwerking – casus                                        | 80         |
| 8.4       | Mkba-resultaten – casus                                                | 81         |
| 8.5       | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 85         |
| <b>9</b>  | <b>Industrieel bedrijventerrein met lokale H<sub>2</sub>-productie</b> | <b>86</b>  |
| 9.1       | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 86         |
| 9.2       | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 87         |
| 9.3       | Energetische uitwerking – casus                                        | 88         |
| 9.4       | Mkba-resultaten – casus                                                | 91         |
| 9.5       | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 94         |
| <b>10</b> | <b>All-electric bestaande buurt</b>                                    | <b>95</b>  |
| 10.1      | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 95         |
| 10.2      | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 96         |
| 10.3      | Energetische uitwerking – casus                                        | 97         |
| 10.4      | Mkba-resultaten – casus                                                | 98         |
| 10.5      | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 102        |
| <b>11</b> | <b>ZLT-warmtenet bestaande buurt</b>                                   | <b>103</b> |
| 11.1      | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 103        |
| 11.2      | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 104        |
| 11.3      | Energetische uitwerking – casus                                        | 105        |
| 11.4      | Mkba-resultaten – casus                                                | 107        |
| 11.5      | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 110        |
| <b>12</b> | <b>Nieuwbouwwijk</b>                                                   | <b>112</b> |
| 12.1      | Belangrijkste kenmerken archetype en casus                             | 112        |
| 12.2      | Resultaten ruimtelijke analyse                                         | 113        |
| 12.3      | Energetische uitwerking – casus                                        | 114        |
| 12.4      | Mkba-resultaten – casus                                                | 116        |
| 12.5      | Extrapolatie mkba-resultaten                                           | 119        |

|           |                                                          |            |
|-----------|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>13</b> | <b>MT-restwarmtenet bestaande buurt</b>                  | <b>121</b> |
|           | 13.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus          | 121        |
|           | 13.2 Resultaten ruimtelijke analyse                      | 122        |
|           | 13.3 Energetische uitwerking – casus                     | 123        |
|           | 13.4 Mkba-resultaten – casus                             | 124        |
|           | 13.5 Extrapolatie mkba-resultaten                        | 128        |
| <b>14</b> | <b>Bedrijventerrein duurzame elektriciteitsproductie</b> | <b>129</b> |
|           | 14.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus          | 129        |
|           | 14.2 Resultaten ruimtelijke analyse                      | 130        |
|           | 14.3 Energetische uitwerking – casus                     | 131        |
|           | 14.4 Mkba-resultaten – casus                             | 133        |
|           | 14.5 Extrapolatie mkba-resultaten                        | 136        |
| <b>15</b> | <b>Resultaten per regio</b>                              | <b>137</b> |
|           | <b>Literatuurlijst</b>                                   | <b>139</b> |
| <b>A</b>  | <b>Kengetallen</b>                                       | <b>140</b> |

# 1 Inleiding

Dit is het **achtergrondrapport** met de belangrijkste bevindingen van deze studie over de maatschappelijke waarde van energiehubs. Het rapport omvat:

- In **Hoofdstuk 2** een toelichting op methodologie en aannames.
- In **Hoofdstuk 3** tot en met Hoofdstuk 14 de resultaten voor de twaalf archetypes.
- **Hoofdstuk 15** geeft inzicht in de resultaten per regio, met illustratieve voorbeelden.
- In **Bijlage A** zijn de relevante kengetallen opgenomen, als input voor de energetische- en mkba-doorrekening.

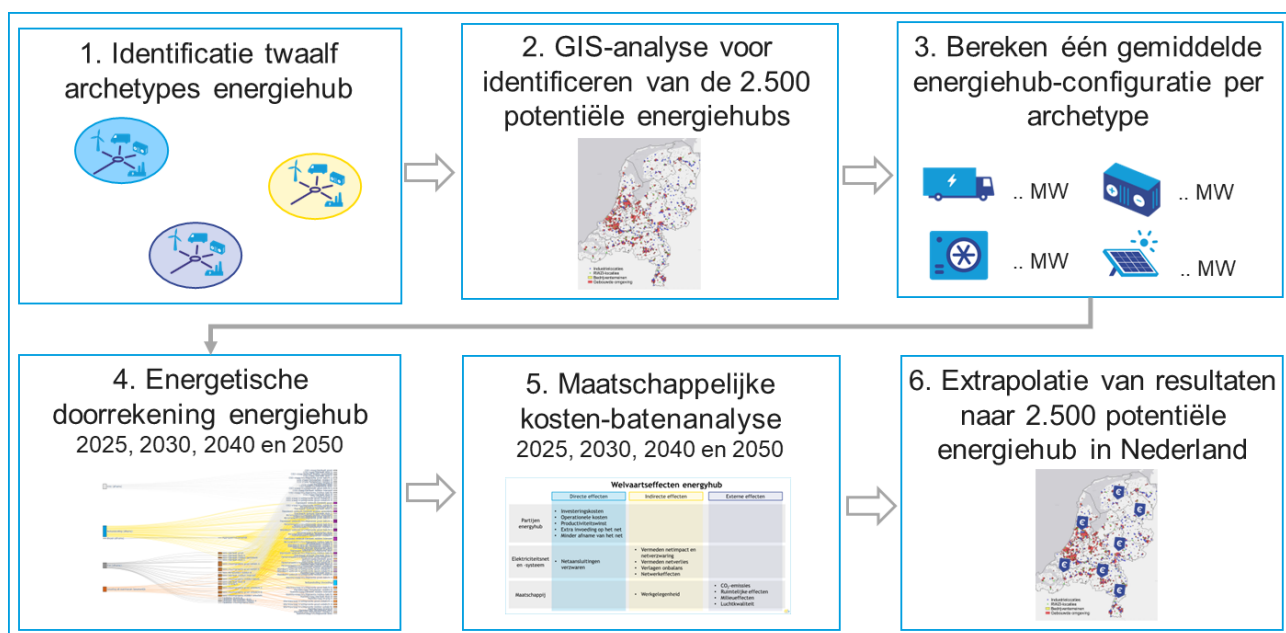
Het **kernrapport** omvat een beschrijving van de geïdentificeerde twaalf archetypes energiehubs, de resultaten over de maatschappelijke waarde en de conclusies en aanbevelingen.

Deze studie is een vervolg op de studie van Haskoning naar families van energiehubs (Royal HaskoningDHV, 2024), met een verdieping op familieleden, maatschappelijke waarde en potentie in Nederland.

## 2 Methodologie

In Figuur 1 is de aanpak van de studie opgenomen. Het archetype zijn in kaart gebracht en vervolgens is een ruimtelijke analyse op basis op GIS-data uitgevoerd om de potentiële locaties van energiehubs in heel Nederland te bepalen. Gebaseerd op de geïdentificeerde potentiële energiehubs is bepaald hoe de gemiddelde energiehubs eruit ziet; oftewel het aantal bedrijven, de huidige en toekomstige energievraag en verwachte elektriciteitsprofielen. Daarna heeft een energetische doorrekening plaatsgevonden, waarbij de uurlijkse energiestromen zijn doorgerekend voor 2025, 2030, 2040 en 2050. Hierop volgde een maatschappelijke kosten-batenanalyse voor de archetypes en vervolgens zijn die resultaten geëxtrapoleerd voor alle potentiële energiehubs in heel Nederland.

Figuur 1 – Aanpak studie opgedeeld in zes stappen



### 2.1 Ruimtelijke analyse en uitwerking casussen

#### 2.1.1 Databronnen en methode ruimtelijke analyse casussen

De aansluitingen en eigenschappen die samen een casus definiëren zijn zo veel mogelijk gebaseerd op werkelijke, geografische data. Met uitzondering van de nieuwbouwwijk-casus hebben we voor elk van de casussen datasets over bestaande bedrijventerreinen, industriebedrijven, woonwijken, RWZI's en kassen verzameld en

gekoppeld. In de volgende tabel staat aangegeven welke gebiedsresolutie er is gekozen voor elk van de individuele casussen.

| Casus                                                            | Resolutie casusdefinitie                                                                               |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektrificatie gemengd mkb-bedrijventerrein                      | IBIS-bedrijventerreinen                                                                                |
| ZLT-warmtenet op gemengd mkb-bedrijventerrein                    | IBIS-bedrijventerreinen                                                                                |
| Elektrificatie van logistiek bedrijventerrein                    | IBIS-bedrijventerreinen                                                                                |
| Duurzame elektriciteitsproductie op gemengd mkb-bedrijventerrein | IBIS-bedrijventerreinen                                                                                |
| Elektrificatie industrieel bedrijventerrein                      | Adres-specifieke industrielocaties, gekoppeld aan nabije bedrijventerreinen en/of gebouwde omgeving    |
| Multi-commodity verduurzaming industrieel bedrijventerrein       | Adres-specifieke industrielocaties, gekoppeld aan nabije bedrijventerreinen en/of gebouwde omgeving    |
| Geothermie-warmtenet glastuinbouwcluster                         | Glastuinbouwconcentratiegebieden                                                                       |
| MT-restwarmtelevering in woonwijk bestaande bouw                 | CBS-buurtten                                                                                           |
| All-electric in woonwijk bestaande bouw                          | CBS-buurtten                                                                                           |
| ZLT-warmtenet in woonwijk bestaande bouw                         | CBS-buurtten                                                                                           |
| Realisatie nieuwbouwoonwijk                                      | N.v.t., op basis van grootschalige nieuwbouwlocaties NOVEX (aantal locaties en aantal weq per locatie) |
| RWZI-energiehubs                                                 | Adres-specifieke RWZI-locaties, gekoppeld aan nabije bedrijventerreinen en/of gebouwde omgeving        |

Op elk resolutieniveau zijn specifieke filterstappen en analyses uitgevoerd om een databasis te vormen voor het invullen van modelinput en later extrapoleren van resultaten.

### IBIS-bedrijventerreinen

Het Integraal Bedrijventerreinen Informatie Systeem (IBIS) is een database die door overheden wordt gebruikt voor het beheer van bedrijventerreinen. CE Delft heeft in eerder onderzoek een methode ontwikkeld om de bedrijvigheid op de specifieke terreinen verder te classificeren. Deze classificatie gebruiken we o.a. om industriële terreinen uit te filteren voor de analyse die op gemengde mkb-terreinen gedaan wordt.

Aan de IBIS-bedrijventerreindata hebben we de volgende datasets en gegevens gekoppeld:

- TNO's verreikte BAG (pandenbestand). Per pand hebben we onder andere energieverbruiken, gebruiksfuncties, bouwgroottes en dakoppervlak (ter indicatie potentieel zon-pv) geaggregeerd naar de IBIS-terreinen.
- Elaad outlook voor elektrische voertuigen. Deze is beschikbaar op CBS-niveau. In GIS is deze dataset vertaald naar de IBIS-contouren.
- SDE++ gerealiseerde zonprojecten zijn op basis van liggingsgegevens gekoppeld aan IBIS-contouren. Hieruit volgt een ingeschat huidig vermogen zon-pv.



- Windturbinelocaties met bijbehorende vermogens en producties zijn met nabijheidsregel < 100 m gekoppeld aan elk IBIS-contour.

### **CBS-buurtten**

Het CBS-buurtensysteem is Nederland-dekkend en wordt vanwege de beschikbaarheid van buurt specifieke data vaak gebruikt als analyseresolutie. CBS-buurtten zijn gebruikt voor de nabijheidsanalyse (voor industrie of RWZI) indien de omgevingsadressendichtheid meer is dan 1.000 per km<sup>2</sup>. Daarnaast zijn CBS-buurtten gebruikt voor definitie van de bestaande gebouwde omgeving. Verschillende warmtetechnieken zijn echter beter geschikt voor bepaalde typen buurten dan anderen. Zo zijn warmtepompen relatief goedkope oplossingen in goed geïsoleerde buurten, waar warmtenetten voordelig zijn in buurten met hoge dichtheid. De casussen definiëren we op resultaten uit de Startanalyse aardgasvrije buurten 2025 van het PBL. Daarbij is voor elke buurt de warmteoplossing met de laagste nationale kosten berekend. We hebben per casus een mediane doorsnede genomen van buurten, waarbij de Startanalyse een hoge kostenafstand tot de volgende goedkoopste oplossing geeft. Hiermee beogen we een robuuste samenstelling van buurten die passend zijn bij het type warmteoplossing te definiëren.

Naast gebruik van de Startanalyse 2025 voor bepaling van de gebouwkenmerken per verwarmingssysteem zijn energieverbruikskenngetallen genomen uit het Vesta MAIS-model, elektrische voertuigprojecties uit Elaad Outlooks en Nederland-gemiddelde zon-pv-installaties van CBS.

### **Adres-specifieke industrielocaties & RWZI-locaties**

Voor industriebedrijven hebben we op basis van MIDDEN-databases en aan Cluster 6 verbonden bedrijfslocaties een dataset samengesteld van industriebedrijven die niet gelegen zijn op een van de vijf grote clusters. De dataset bestaat op hoofdlijnen uit bedrijfsnaam, adres, branche en coördinaten. Het energieverbruik van de individuele industriebedrijven is niet algemeen bekend. Voor MIDDEN-bedrijven hebben we een inschatting gedaan van het gasverbruik, op basis van de bekende CO<sub>2</sub>-emissies. Voor overige bedrijven hebben we op basis van algemene kengetallen een zeer grove inschatting gedaan per branche.

Voor RWZI-locaties hebben we een dataset ontvangen van de Unie van Waterschappen. Circa 300 RWZI's met daarin hun energieverbruik en productie- in 2023. Deze hebben we gekoppeld aan de RWZI-coördinaten die beschikbaar zijn in de Warmteatlas van RVO.

### **Glastuinbouwconcentratiegebieden**

Voor glastuinbouwclusters hebben we volledig gebruik gemaakt van methode en dataset opgesteld in [project](#).

## 2.1.2 Uitgewerkte eigenschappen per casus

Hier beschrijven we de wijze waarop verschillende energiegebruikers (woningen, bedrijven) en eventueel collectieve installaties worden gedefinieerd per casus.

De functionele eenheid waar we kenmerken aan toevoegen is een 'aansluiting'. Een casus bestaat per definitie uit meerdere aansluitingen. In Tabel 1 staan de mogelijke inputs per aansluiting:

Tabel 1 – Overzicht instelbare eigenschappen aansluitingen

| Eigenschap                                | Voorbeeld of toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unieke naam                               | 'Belicht glastuinbouwbedrijf sierteelt'                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Type                                      | Woning, bedrijf, collectief                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Beschrijving aansluiting                  | Goed geïsoleerde appartementen, klein kantoor, elektrolyser                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Weegfactor (#)                            | 1, 100. In casussen waarbij meer dan ~50 aansluitingen nodig zijn (bijvoorbeeld woonwijken) aggregeren we vergelijkbare aansluitingen. Een weegfactor van 100 op een rijwoning betekent dat er 100 rijwoningen worden toegepast. Energieprofielen die we toepassen voor aansluitingen met een weegfactor groter dan 1 houden rekening met de gelijktijdigheid van de energievraag.                                                                                                 |
| Oppervlakte (m <sup>2</sup> bvo)          | Gebruikt om onder andere energieverbruik mee te schalen. Waar utiliteiten met weegfactor worden toegepast, gebruiken we weq (1 weq = 130 m <sup>2</sup> ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Elektriciteitsprofiel                     | Bijvoorbeeld 'logistiek' of 'datacenter'. Aansluiting specifiek elektriciteitsprofiel op uurbasis. De profielen zijn typisch voor het gebruik van apparaten (licht, ICT, witgoed, etc.) en eventuele industriële processen. Eventueel verbruik voor o.a. warmte of laden van voertuigen wordt apart berekend.<br><br>De profielen komen onder andere uit de open dataset van Liander, het Energy Transition Model, en profielen die CE Delft in eerdere projecten heeft toegepast. |
| Elektriciteitsvraag (kWh/m <sup>2</sup> ) | Elektriciteitsverbruik-kengetal.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Elektriciteitsgroeifactor (x)             | Verwachte ontwikkeling van het huidige energieverbruik richting de toekomst. Wordt enkel voor specifieke aansluitingen in specifieke casussen toegepast, in de meeste gevallen houden we deze gelijk. De factor wordt toegepast op het elektriciteitsprofiel. We doen geen verdere transformaties op dit profiel.                                                                                                                                                                  |
| Trucks (#)                                | Aantal elektrische voertuigen wat in 2050 elektrisch moet laden bij de aansluiting.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Bestelauto's (#)                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Auto's (#)                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Warmteprofiel                             | Bijvoorbeeld 'onderwijs' of 'goed geïsoleerde rijwoningen'. Aansluiting-specifiek warmteprofiel op uurbasis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Warmtevraag (kWh/m <sup>2</sup> )         | Warmtevraag-kengetal. Op basis van warmtetechniek-specifieke kengetallen bepalen we het energieverbruik.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Warmtetechniek (huidig)                   | Warmtetechniek voor invulling van de warmtevraag van de aansluiting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Warmtetechniek (referentie)               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

| Eigenschap                          | Voorbeeld of toelichting                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Warmtetechniek (energiehub)         |                                                                                                                                                                                         |
| Brontemperatuurprofiel (huidig)     | Bijvoorbeeld 'buitenlucht jaar 2019', 'wko'. Temperatuurprofiel voor wanneer de warmtetechniek een warmtepomp is, waarbij de brontemperatuur relevant is voor het berekenen van de COP. |
| Brontemperatuurprofiel (referentie) |                                                                                                                                                                                         |
| Brontemperatuurprofiel (energiehub) |                                                                                                                                                                                         |
| Warmtebuffervermogen (kW)           | Warmtebuffer waar de warmtetechniek gebruik van kan maken, op basis van specifieke inzetregels van de verwarmingstechniek.                                                              |
| Warmtebuffercapaciteit (kWh)        |                                                                                                                                                                                         |
| Zon-pv huidig (kW)                  | Geïnstalleerd zon-pv vermogen                                                                                                                                                           |
| Zon-pv potentie (kW)                | Potentieel zon-pv vermogen.                                                                                                                                                             |
| Wind (kW)                           | Windturbinevermogen                                                                                                                                                                     |
| Elektrolysevermogen (kW)            | Elektrolysevermogen                                                                                                                                                                     |

Een voorbeeld van een paar van deze vastgestelde eigenschappen staat in Figuur 2, waarin de casus logistiek bedrijventerrein met 28 aansluitingen wordt gemodelleerd.

Figuur 2 – Voorbeeld modelinput casus logistiek bedrijventerrein

| Unieke naam          | Type       | Beschrijving aansluiting           | Grootte | weegfactor_ref | m2 bvo | profiel_elektriciteit | elektriciteit_kwh_m2 | profiel_warmte | warmtevraag_kWh_m2 |
|----------------------|------------|------------------------------------|---------|----------------|--------|-----------------------|----------------------|----------------|--------------------|
| Industrieel midden A | Bedrijf    | Machinebouwbedrijf                 | Midden  | 1              | 1.496  | C28                   | 83                   | C28            | 300                |
| Industrieel midden B | Bedrijf    | Metaalbewerkingbedrijf             | Midden  | 1              | 1.496  | C256                  | 83                   | C256           | 325                |
| Industrieel klein A  | Bedrijf    | Verpakkingsmiddelenbedrijf         | Klein   | 1              | 299    | INDUSTRIE             | 83                   | C222           | 300                |
| Industrieel klein B  | Bedrijf    | Minerale productenproductiebedrijf | Klein   | 1              | 299    | C23                   | 83                   | C23            | 250                |
| Industrieel klein C  | Bedrijf    | Minerale productenproductiebedrijf | Klein   | 1              | 299    | C23                   | 83                   | C23            | 250                |
| Industrieel klein D  | Bedrijf    | Machinebouwbedrijf                 | Klein   | 1              | 299    | C28                   | 83                   | C28            | 150                |
| Industrieel klein E  | Bedrijf    | Machinebouwbedrijf                 | Klein   | 1              | 299    | C28                   | 83                   | C28            | 150                |
| Logistiek groot A    | Bedrijf    | Vervoersbedrijf                    | Groot   | 1              | 13.463 | LOGISTIEK             | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek groot B    | Bedrijf    | Opslag en vervoerdienstverlening   | Groot   | 1              | 13.463 | H52                   | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek midden A   | Bedrijf    | Koelhuis                           | Midden  | 1              | 1.496  | H52102                | 160                  | H49            | 98                 |
| Logistiek midden B   | Bedrijf    | Distributiecentrum                 | Midden  | 1              | 1.496  | H52109                | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek midden C   | Bedrijf    | Vervoersbedrijf                    | Midden  | 1              | 1.496  | LOGISTIEK             | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek klein A    | Bedrijf    | Vervoersbedrijf                    | Klein   | 1              | 299    | LOGISTIEK             | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek klein B    | Bedrijf    | Opslagbedrijf                      | Klein   | 1              | 299    | H521                  | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek klein C    | Bedrijf    | Opslagbedrijf                      | Klein   | 1              | 299    | H5210                 | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek klein D    | Bedrijf    | Koelhuis                           | Klein   | 1              | 299    | H52102                | 160                  | H49            | 98                 |
| Logistiek klein E    | Bedrijf    | Distributiecentrum                 | Klein   | 1              | 299    | H52109                | 82                   | H49            | 98                 |
| Logistiek klein F    | Bedrijf    | Vervoersbedrijf                    | Klein   | 1              | 299    | LOGISTIEK             | 82                   | STANDAARD      | 98                 |
| Logistiek klein G    | Bedrijf    | Opslagbedrijf                      | Klein   | 1              | 299    | H521                  | 82                   | STANDAARD      | 98                 |
| Logistiek klein H    | Bedrijf    | Opslagbedrijf                      | Klein   | 1              | 299    | H5210                 | 82                   | STANDAARD      | 98                 |
| Logistiek klein I    | Bedrijf    | Koelhuis                           | Klein   | 1              | 299    | H52102                | 160                  | STANDAARD      | 98                 |
| Logistiek klein J    | Bedrijf    | Distributiecentrum                 | Klein   | 1              | 299    | H52109                | 82                   | STANDAARD      | 98                 |
| Logistiek klein K    | Bedrijf    | Vervoersbedrijf                    | Klein   | 1              | 299    | LOGISTIEK             | 82                   | STANDAARD      | 98                 |
| Diensten midden A    | Bedrijf    | Autohandel                         | Midden  | 1              | 1.496  | G45                   | 65                   | STANDAARD      | 74                 |
| Diensten klein A     | Bedrijf    | Rechtskundige dienstverlening      | Klein   | 1              | 299    | M692                  | 65                   | M70            | 74                 |
| Diensten klein B     | Bedrijf    | Administratiekantoor               | Klein   | 1              | 299    | M69209                | 65                   | M70            | 74                 |
| Diensten klein C     | Bedrijf    | Adviesbureau                       | Klein   | 1              | 299    | M702                  | 65                   | STANDAARD      | 74                 |
| Diensten klein D     | Bedrijf    | Ingenieursbureau                   | Klein   | 1              | 299    | M71                   | 65                   | STANDAARD      | 74                 |
| Energiehub           | Collectief | Gezamenlijke assets                |         | 0              |        |                       |                      |                |                    |

## 2.2 Energetische doorrekening

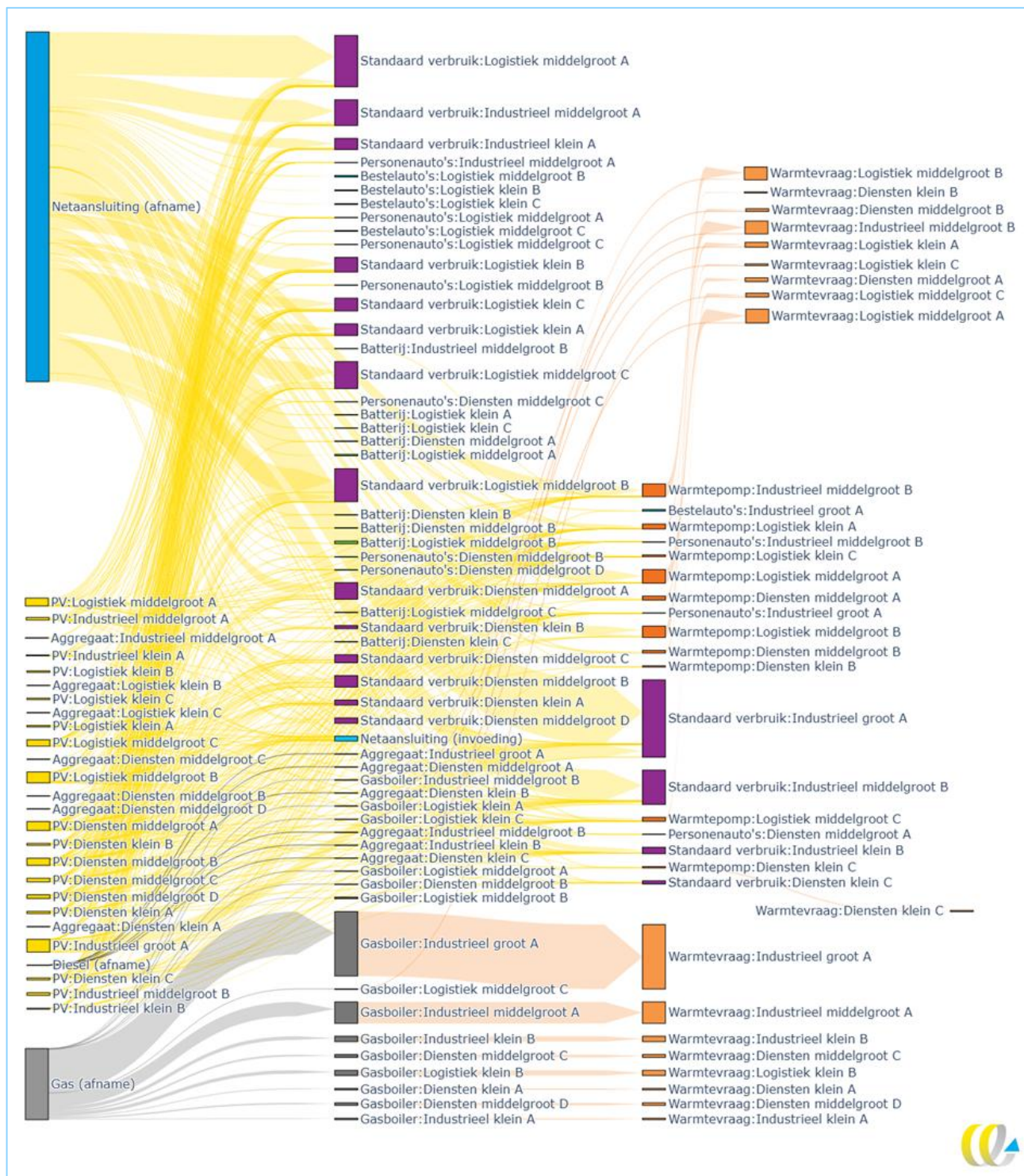
Iedere casus heeft een referentiescenario en een energiehubsscenario die energetisch van elkaar verschillen. We nemen aan dat congestie opgelost is in 2035; we rekenen de situatie door voor 2030 en 2040 omdat daar relevante informatie voor beschikbaar is. Voor alle tussenliggende jaren worden de resultaten geïnterpoleerd. Voor beide scenario's zijn zes energetische doorrekeningen gedaan voor de volgende situaties (zie ook Figuur 4):

1. 2025: vóór netverzwaring.
2. 2030: vóór netverzwaring.
3. 2040: vóór netverzwaring.
4. 2030: na netverzwaring.
5. 2040: na netverzwaring.
6. 2050: na netverzwaring.

Energetische doorrekeningen zijn gedaan met ons [CEnergie](#)-model. Dit model kan worden beschouwd als een flexibel energiemanagementsysteem dat diverse energetische situaties kan doorrekenen. Doordat CEnergie op uurbasis een optimalisering aanbrengt van de verschillende energiestromen kan het aanbod en vraag van energie slim op elkaar worden afgestemd. Dankzij deze eigenschappen is het model uiterst geschikt voor het modelleren van energiehubs, maar tevens inzetbaar voor situaties waarin geen sprake is van een energiehubs. Daarnaast is CEnergie ontwikkeld om flexibele energievraag te modelleren; denk aan de laadvraag van elektrische voertuigen en batterijen. Door bijvoorbeeld energievraag in de tijd naar voren te halen, of juist energievraag uit te stellen, kunnen bedrijven of energiehubs als geheel onder het (gezamenlijke) contractvermogen blijven.

In deze studie zijn per casus de situaties als geheel gemodelleerd, waardoor alle energiestromen van energiebron naar energievragers in kaart kan worden gebracht (zie Figuur 3).

Figuur 3 – Een voorbeeld van een volledige Sankey-diagram van een energetische doorrekening van een gemengd bedrijventerrein met CEnergie



Noot: De gele stromen representeren elektriciteit, de oranje stromen representeren warmte, en de grijze stromen representeren gas. De eenheden van verschillende stromen zijn niet altijd gelijk.



## 2.3 Maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba)

Voor de beoordeling van de welvaartseffecten sluiten we aan bij het instrument maatschappelijke kosten-batenanalyse (mkba). Een kenmerk van een mkba is dat naast financiële kosten en baten (voor gebruiker of producent) ook maatschappelijke kosten en baten (voor de gehele samenleving) worden meegenomen. Een mkba maakt de effecten zoveel mogelijk meetbaar in geld, zodat alle effecten vergelijkbaar worden gemaakt onder één noemer. Gezien de omvang van het project en de hoeveelheid archetypes waarvoor de maatschappelijke waarde bepaald moet worden, zullen we per archetype geen complete mkba uitvoeren, maar zal de analyse het karakter hebben van een 'mkba' (of 'quickscan').

Een mkba (of welvaartsanalyse) maakt onderscheid tussen de volgende effecten<sup>1</sup>:

- **Directe effecten:** de voor- en nadelen van het projectalternatief (een energiehubs) ten opzichte van de referentie voor de exploitant, dat wil zeggen de bedrijven in de energiehubs. Het gaat hierbij met name om investeringskosten, exploitatiekosten en opbrengsten voor de bedrijven.
- **Indirecte effecten:** de effecten die voortvloeien uit de directe effecten van het projectalternatief en de referentie. In deze studie gaat het bijvoorbeeld om effecten op het elektriciteitsnet- en systeem (lokale netverzwaring, diepe netverzwaring, vermeden netverlies).
- **Externe effecten:** dit betreffen de effecten (maatschappelijke kosten en baten) die onbedoeld zijn door de gebruiker en nog niet zijn geïnternaliseerd in de directe kosten. Deze zijn vaak moeilijk in geld uit te drukken omdat markten, en dus prijzen, ontbreken. Hieronder vallen effecten op CO<sub>2</sub>-emissies en luchtkwaliteit, maar ook het effect van samenwerking en cohesie binnen energiehubs.

---

<sup>1</sup> Belastingen, subsidies en winstmarges zijn geen onderdeel van een mkba, omdat dit een overdracht tussen de overheid en bedrijven/particulieren betreft. Ook netkosten – die gesocialiseerd worden – vallen niet onder een mkba.

Tabel 2– Scope welvaartseffecten energiehubs

|                       | Directe effecten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Indirecte effecten                                                                                                        | Externe effecten                                                                                                        |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Deelnemende bedrijven | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investerings- en operationele kosten assets</li> <li>• Organisatiekosten hub</li> <li>• Lagere energiekosten of hogere opbrengsten hernieuwbare productie (CO<sub>2</sub>, zuurstof en groene waterstof)</li> <li>• Productiviteitswinst bedrijven (uitbreiding bedrijven)</li> <li>• Woongenot (uitbreiding woningbouw)</li> </ul> |                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Samenwerking, lokaal zeggenschap en cohesie</li> </ul>                         |
| Elektriciteitssysteem | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten van verzwaren netaansluiting</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Besparing investeringen netverzwaring</li> <li>• Effect op netverlies</li> </ul> |                                                                                                                         |
| Maatschappij          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkgelegenheid</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-emissies (direct en keten)</li> <li>• Luchtkwaliteit</li> </ul> |

## Waardering welvaartseffecten

Een korte beschrijving van de waarderingsmethode van de welvaartseffecten hebben we opgenomen in Tabel 3.

Tabel 3 – Overzicht belangrijkste maatschappelijke waarden energiehubs

| Effect                               | KPI                                           | Waarderingsmethode                                |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Partijen energiehubs</b>          |                                               |                                                   |
| Afname van het elektriciteitsnet     | Directe kostenbesparing.                      | Kale marktprijzen.                                |
| Invoeding op het elektriciteitsnet   |                                               |                                                   |
| Inzet van dieselaggregaten           |                                               |                                                   |
| Productie groene waterstof           | Opbrengsten.                                  | Kale marktprijzen.                                |
| Ongefaciliteerde elektriciteitsvraag | Productiviteitswinst bedrijven <sup>2</sup> . | BBP per kWh elektriciteitsverbruik <sup>3</sup> . |
| Woningbouw                           | Woongenot.                                    | Residuele grondwaarde                             |
| Versterking samenwerking en cohesie  | -                                             | Kwalitatief.                                      |
| <b>Elektriciteitsnet- en systeem</b> |                                               |                                                   |

<sup>2</sup> Alleen in de gevoeligheidsanalyse verschilt dit effect tussen de energiehubs en de referentie. In de standaard (referentie)analyse hebben aangenomen dat alle elektriciteitsvraag wordt ingevuld doordat bedrijven in de referentie mitigerende maatregelen nemen (individuele batterijen en aggregaten) om in hun volledige elektriciteitsvraag te kunnen voorzien.

<sup>3</sup> In Bijlage A.9 hebben we een tabel opgenomen met de gebruikte kengetallen.

| Effect                                                      | KPI                                                                                       | Waarderingsmethode                                                             |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Voorkomen netverzwaring door vermindering van piekbelasting | Uitgespaarde netverzwaring (€/kW), uitgesplitst naar LS, MS, HS indien mogelijk/relevant. | Kengetallen netbeheerder.                                                      |
| Effect op netverlies                                        | Netverlies per kWh afname.                                                                | Kengetallen netbeheerder.                                                      |
| <b>Maatschappij</b>                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Afname van het elektriciteitsnet                            | CO <sub>2</sub> -emissies.                                                                | Efficiënte CO <sub>2</sub> -prijzen WLO-scenario's.                            |
| Invoeding op het elektriciteitsnet                          |                                                                                           |                                                                                |
| Productie van groene waterstof                              |                                                                                           |                                                                                |
| Benutting restwarmte                                        |                                                                                           |                                                                                |
| Aardgasverbruik                                             |                                                                                           |                                                                                |
| Inzet van dieselaggregaten                                  | CO <sub>2</sub> -, NO <sub>x</sub> - en PM <sub>10</sub> -emissies.                       | Efficiënte CO <sub>2</sub> -prijzen WLO-scenario's.<br>Handboek Milieuprijzen. |
| Ketenemissies assets <sup>4</sup>                           | CO <sub>2</sub> -emissies (keten).                                                        | Efficiënte CO <sub>2</sub> -prijzen WLO-scenario's.                            |

## Looptijd analyse

De looptijd van de mkba's betreft de periode 2025-2050, waarbij we 'doorsnedes' maken op de zichtjaren 2025, 2030, 2040 en 2050. De looptijd van de analyse hebben we bepaald op basis van de economische levensduren van assets waarin energiehubbs investeren en rekening houdend met het feit dat de onzekerheid rondom aannames over energieprijzen en kosten alleen maar toeneemt naarmate de looptijd langer wordt. In het geval dat componenten in de energiehub een kortere economische levensduur hebben dan 25 jaar, nemen we herinvesteringskosten mee in de analyse.

## Discontovoet en prijspeil

Alle kosten en baten die gedurende de looptijd van de analyse plaatsvinden, worden weergegeven in de netto contante waarde van het basisjaar (2025). Dit gebeurt aan de hand van een discontovoet van 2,25%, conform de aanbevelingen van de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën, 2020). De kosten en baten worden uitgedrukt in het prijspeil van 2024.

## Energiehub- en referentiescenario's

De analyse in deze studie bestaat uit een vergelijking tussen een energiehub- en een referentiescenario. De verschillen tussen de twee scenario's bepalen de welvaartseffecten

<sup>4</sup> De CO<sub>2</sub>(-eq.)-uitstoot voor de maakfase van assets zoals batterijen, aggregaten etc., wordt verdeeld over de economische levensduur van de asset. Deze lasten worden per jaar dat de asset in gebruik wordt genomen toegekend als last. Als de asset eerder wordt verkocht dan de economische levensduur wordt de resterende CO<sub>2</sub>-uitstoot van de maakfase niet toegekend aan de eigenaar, en is geen onderdeel van de mkba.



en uiteindelijk de maatschappelijke waarde van een energiehubs. In deze studie worden de verschillen in welvaartseffecten bepaald door verschillende situaties door te rekenen (zie ook Figuur 4):

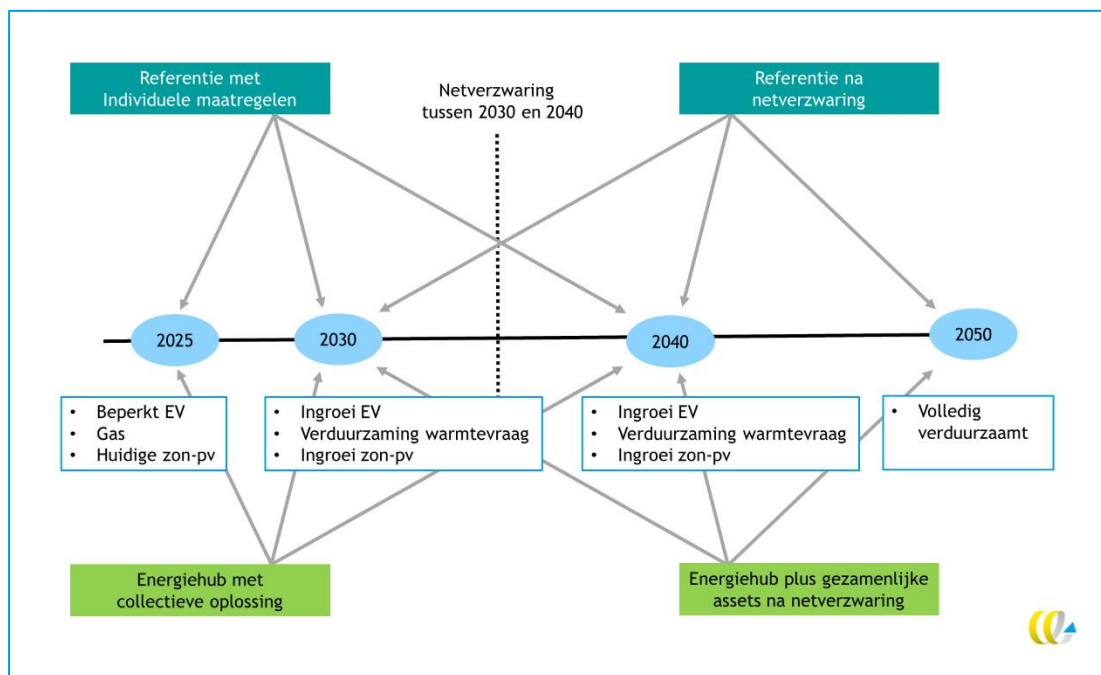
Tabel 4 – Aannames over scenario's per zichtjaar

| Jaren        |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 en 2030 | -          | Partijen doen investeringen om altijd in hun elektriciteitsvraag te kunnen voorzien. Dit betekent dat we kijken naar welke investeringen in 2030 nodig zijn en deze aannemen voor 2025 en 2030.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|              | Referentie | <p>Er is netcongestie waardoor een groter firm transportvermogen niet mogelijk is. In de referentie worden individuele maatregelen genomen om in de gewenste energievraag te voorzien. Dit zijn batterijen en aggregaten, maar geen ATR<sup>5</sup>.</p> <p>Partijen in de referentie passen slimme energiesturing toe om binnen hun contractvermogen te blijven.</p>                                                                                                                           |
|              | Energiehub | <p>De energiehub is netcongestie gedreven en heeft als doel om binnen een getransporteerd transportvermogen (GTV) te blijven<sup>6</sup>. Elektrificatie in 2025 en 2030 moet vervolgens plaatsvinden binnen het GTV. Daarvoor worden waar nodig extra maatregelen genomen zoals de aanschaf van een gezamenlijke batterij en/of - aggregaat.</p> <p>De energiehub past slimme energiesturing toe om binnen hun gezamenlijke contractvermogen te blijven.</p>                                   |
| 2040 en 2050 | Referentie | <p>Na netverzwaring is er voor alle partijen geen congestie meer, waardoor alle transportvermogens verhoogd kunnen worden.</p> <p>Partijen in de referentie passen slimme energiesturing toe om binnen hun contractvermogen te blijven, maar batterijen en aggregaten zijn niet meer nodig.</p>                                                                                                                                                                                                 |
|              | Energiehub | <p>We nemen aan dat de investeringen in de energiehub blijven bestaan, en dat partijen daarmee proberen hun netbelasting te reduceren. Na netverzwaring zal de energiehub een groter GTV contracteren. Toch zal in de meeste gevallen de energiehub de aggregaat en batterij nog (deels) moeten gebruiken om op alle moment van het jaar de energievraag in te vullen.</p> <p>De energiehub past slimme energiesturing toe om binnen hun (nieuwe) gezamenlijke contractvermogen te blijven.</p> |

<sup>5</sup> ATR is een transportrecht waarbij de beschikbaarheid van transportcapaciteit niet te allen tijde wordt gegarandeerd. De capaciteit op het elektriciteitsnet kan beter worden benut, omdat de transportcapaciteit op veel plekken in het elektriciteitsnet weliswaar volledig is gecontracteerd, maar afnemers zelden gebruik maken van de volledige door hen gecontracteerde transportcapaciteit.

<sup>6</sup> Het collectieve gecontracteerd transportvermogen (GTV) wordt vastgesteld op de gemeten absolute piek in 2025 voor huidig gebruik. Elektrificatie in 2025 en 2030 moet vervolgens plaatsvinden binnen dat GTV.

Figuur 4 – Vormgeving van modellering en scenario's van referentie en energiehubs



## Milieuprijzen CO<sub>2</sub>

Voor het bepalen van de CO<sub>2</sub>-effecten in mkba's schrijft de Algemene Leidraad mkba voor de efficiënte CO<sub>2</sub>-milieuprijzen uit de WLO te gebruiken (CPB & PBL, 2025). De efficiënte CO<sub>2</sub>-prijzen zijn gebaseerd op de zogeheten preventiekostenbenadering<sup>7</sup>. Tabel 5 geeft een overzicht van de prijzen per ton voor 2025-2050, uitgedrukt in prijspeil 2024 en inclusief btw<sup>8</sup>.

Tabel 5 – CO<sub>2</sub>-prijzen op basis van het gemiddelde van WLO-scenario's Laag Snel en Hoog Vertraagd  
bron: (CPB & PBL, 2025)

|                                                    | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| CO <sub>2</sub> -prijs (€ <sub>2024</sub> per ton) | 291  | 324  | 363  | 405  | 453  | 506  |

<sup>7</sup> Conceptueel geven preventiekosten voor elk jaar de waardering (schaduw prijzen) weer van de doelstelling om broeikasgassen kostenefficiënt terug te dringen conform het betreffende WLO-scenario. Anders gezegd geven de efficiënte CO<sub>2</sub>-prijzen de prijs weer van de broeikasgasreductiedoelstellingen.

<sup>8</sup> Aangezien de milieuprijzen voor andere stoffen (meestal) gebaseerd zijn op betalingsbereidheid, en de betalingsbereidheid inclusief btw wordt gemeten, wordt voor de CO<sub>2</sub>-waardering in de mkba-richtlijnen aangeraden te rekenen met een gemiddeld btw-tarief van 18,2%. Dit hebben we toegepast in de gehanteerde CO<sub>2</sub>-prijzen in dit onderzoek.

## Overige milieuprijzen

Naast CO<sub>2</sub>-emissies hebben we ook de emissies van NO<sub>x</sub> (stikstofoxiden) en PM<sub>10</sub> (fijnstof), die in onze analyse vooral ontstaan bij diesilverbruik, beoordeeld. Deze luchtvervuilende stoffen brengen schade toe aan mens en natuur. De beoordeling van deze schadekosten hebben gedaan aan de hand van de milieuprijzen uit het Handboek Milieuprijzen van CE Delft (CE Delft, 2023).

Tabel 6 – Milieuprijzen van NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> (bron: Handboek Milieuprijzen)

| Stof                                            | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 |
|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| NO <sub>x</sub> -prijs (€ <sub>2024</sub> /kg)  | 35,3 | 35,3 | 35,3 | 35,3 | 35,3 |
| PM <sub>10</sub> -prijs (€ <sub>2024</sub> /kg) | 81,8 | 81,8 | 81,8 | 81,8 | 81,8 |

## Gevoeligheidsanalyses mkba

Er zijn in totaal vijf gevoeligheidsanalyses uitgevoerd:

1. Netcongestie opgelost in 2030. In de basisanalyse is congestie opgelost in 2035, maar in sommige gebieden is het probleem wellicht eerder opgelost.
2. Netcongestie opgelost in 2040. In de basisanalyse is congestie opgelost in 2035, maar in sommige gebieden is het probleem wellicht later opgelost of kan in het algemeen netverzwaring vertraagd worden.
3. **Geen mitigerende maatregelen:** Daar waar we er in onze basisanalyse vanuit zijn gegaan dat bedrijven, zolang er netcongestie is, individuele batterijen en aggregaten aanschaffen om in hun ongefaciliteerde elektriciteitsvraag te voorzien, gaan we er in deze gevoeligheidsanalyse vanuit dat ze dat niet doen. De gedachte hierachter is dat bedrijven in de energiehubs dan sneller kunnen verduurzamen of groeien dan bedrijven in de referentie (beperking). Dat bedrijven in de referentie niet tegen harde grenzen aan lopen, kan gezien worden als een conservatieve inschatting van mogelijke baten.
4. **Sterkere groei:** Daar waar we in onze basisanalyse zijn uitgegaan van een beperkte groei van de elektriciteitsvraag, nemen we in deze gevoeligheidsanalyse aan dat er een sterke groei van de elektriciteitsvraag is. De gedachte hierachter is dat wanneer de ongefaciliteerde elektriciteitsvraag groter is, de energiehubs meer toegevoegde waarde zou kunnen hebben. De groei is per bedrijf toegepast door het jaarverbruik binnen het huidige profiel te vermenigvuldigen met een bedrijfsgrootte afhankelijke factor (10%, 20% of 50%), zodat op casusniveau de totale basisvraag circa 20% toeneemt.
5. **Geen mitigerende maatregelen en sterkere groei:** Deze gevoeligheidsanalyse combineert de uitgangspunten van de gevoeligheidsanalyses drie en vier.

Als partijen geen mitigerende maatregelen kunnen of willen nemen, ontstaat ongefaciliteerde elektriciteitsvraag. Dit betekent dat bedrijven niet in alle elektriciteitsvraag voorzien kunnen worden, en daarmee dus minder productie kunnen draaien. Dit leidt tot minder maatschappelijke toegevoegde waarde van deze bedrijven (ook wel productiviteitswinst) en hiervoor zijn inschatting per SBI-categorie beschikbaar. Deze aannames zijn opgenomen in Bijlage A.9. De resultaten voor gevoeligheidsanalyses één en twee zijn opgenomen per casus in dit achtergrondrapport. De resultaten voor gevoeligheidsanalyses drie tot vijf zijn opgenomen in het kernrapport.

## 2.4 Algemene aannames

### 2.4.1 Algemene uitgangspunten

#### **Investerings en jaarlijkse afschrijfkosten assets:**

- We gaan uit van een periode van 25 jaar. De zichtjaren voor de mkba betreffen 2025 t/m 2050.
- In plaats van een vlakke jaarlijkse afschrijfkosten zoals bij annuïteit, nemen we een lineair aflopende afschrijfkosten aan. Dit reflecteert de afname van waarde van de asset over tijd, waardoor dus in de eerdere jaren relatief meer wordt afgeschreven dan in latere jaren (zie Bijlage A.2.3).
- Herinvesteringen in asset worden 'automatisch' gedaan nadat de asset is afgeschreven, en deze asset nog steeds gebruikt wordt.
- We nemen een maatschappelijke discontovoet aan van 2,25%.
- Toekomstige prijsontwikkelingen voor assets worden niet meegenomen en er wordt uitgegaan van de huidige prijzen. Hoewel er leereffecten en prijsdalingen voor de assets te verwachten zijn, zijn veel van deze assets ook sterk afhankelijk van kritieke grondstoffen, waarvan de prijzen tussen 2035 en 2045 (periode van herinvesteren) mogelijk sterk kunnen stijgen.

#### **Organisatie & governance energiehubs:**

- Voor het opzetten en van de energiehubs zijn er investeringen nodig voor regeltechniek, software, en organisatie. Daarnaast zijn er doorlopende kosten voor softwarelicenties, onderhoud en beheer. We gaan voor deze zaken per hub uit van vaste operationele kosten van 60.000 euro, en variabele operationele kosten afhankelijk van het aantal en type deelnemers in de hub (zie Bijlage A.7).

#### **Energetische berekening:**

- Per casus worden twaalf energetische doorrekeningen gedaan. Hierbij worden een referentiesituatie zonder energiehubs en een situatie met energiehubs met elkaar vergeleken. Dit doen we voor een situatie waarin de congestie is opgelost en er voldoende netcapaciteit kan worden aangeboden om individuele capaciteitsvraag in te vullen, en een situatie waarin er wel een capaciteitstekort is.

De jaren waar dit voor gedifferentieerd kan worden zijn 2025, 2030, 2040, 2050. Resultaten voor tussenliggende jaren worden geïnterpoleerd.

#### **Tempo en invulling elektrificatie**

- Het tempo en manier van elektrificatie verschilt per casus. We nemen aan dat die gelijk zijn in de referentie én in de energiehubs.
- De batterij en aggregaten voorzien alleen in die elektriciteitsvraag, als het niet door transportvermogen ingevuld kan worden. Zie hieronder voor verdere uitwerking.

## **2.4.2 Contractvermogen**

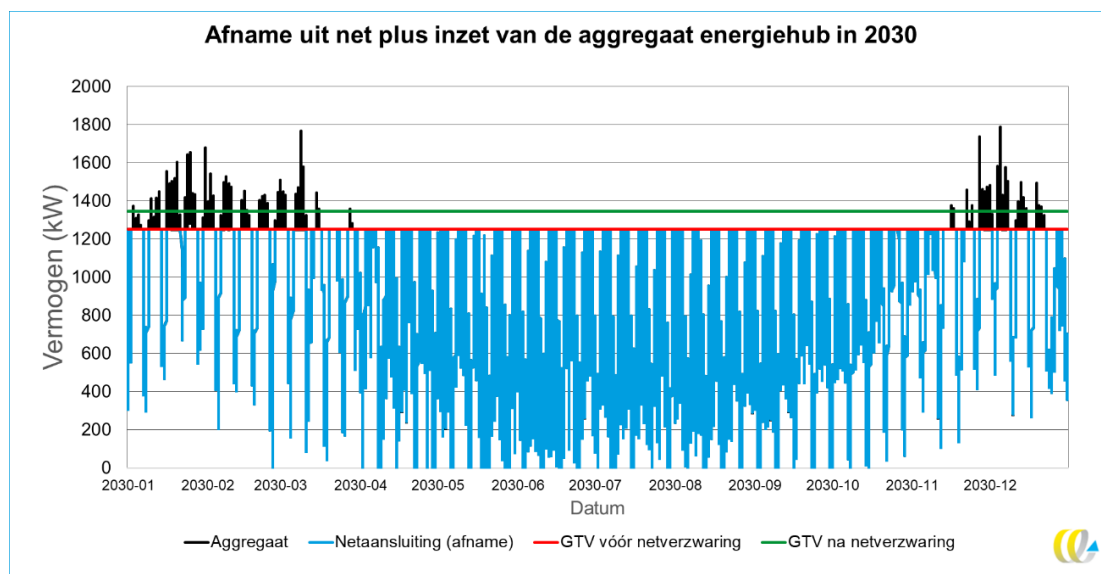
#### **Contractvermogen voor oplossen netcongestie**

- Het gecontracteerde vermogen voor afname en invoeding van een individueel bedrijf wordt gebaseerd op de huidige afname- en invoedingspiek in het jaar. Daarbij nemen we aan dat het contractvermogen gelijk is aan de huidige piek. Standaard elektriciteitsverbruik (en gasvraag) wordt gebaseerd op Klant & Ontwerp (KO)- en SBI-profielen van Liander.
  - Het kan zijn dat het hanteren van de huidige piek er toe leidt dat er alsnog congestie ontstaat, bijvoorbeeld doordat bedrijven op andere momenten extra stroom gaan afnemen. Dit betekent in de praktijk dat netbeheerders geen groepscontract zullen afgeven, en de energiehubs dus geen doorgang kan vinden.
- Het gecontracteerde vermogen voor afname en invoeding van de energiehubs wordt gebaseerd op de huidige gezamenlijke afname- en invoedingspiek.

#### **Contractvermogen na oplossen netcongestie**

- In de referentie nemen individuele bedrijven een hoger firm contractvermogen, met enige slimme energiesturing.
- In de energiehubs stemmen partijen hun energieverbruik en -productie af, wat invloed heeft op de benodigde netverzwaring. Voor 2030 en 2040 is dit bepaald door de netbelasting en inzet van het aggregaat vóór verzwaring te analyseren. Het benodigde gezamenlijke transportvermogen wordt vervolgens vastgesteld op basis van het 95e percentiel van dit vermogensprofiel (zie Figuur 5). Het uitgangspunt is dat na netverzwaring het aggregaat fors minder ingezet hoeft te worden, maar nog deels gebruikt zal worden. Zie Bijlage A.1.8 voor meer details over de aanpak.

Figuur 5 – Voorbeeld van het vermogensprofiel van de afname uit het net, plus de inzet van de gezamenlijke aggregaat in de energiehub in 2030 vóór netverzwaring. Het 95<sup>ste</sup> percentiel van dit gezamenlijke vermogensprofiel bepaalt het GTV voor 2030 ná netverzwaring.



#### Assets na netcongestie:

- We nemen aan dat na de netverzwaring de gezamenlijke assets in de energiehub behouden blijven. De gerealiseerde netverzwaring heeft wel een effect op de inzet en herinvesteringen van deze assets (na het afschrijftermijn) doordat er meer afname mogelijk is en waardoor de inzet van het gezamenlijk aggregaat afneemt. Daarnaast zal een in de meeste gevallen een (nieuwe) kleinere batterij volstaan.

## 2.4.3 Technieken

De aannames voor het ontwerp van de technieken wordt hier per techniek behandeld.

#### Aggregaten en batterijen:

- In de referentiesituatie investeren bedrijven individueel in een aggregaat en batterij (indien mogelijk en nodig). De dimensionering van de batterij is gebaseerd op de gemiddelde dagelijkse restcapaciteit op het net.
- De energiehub investeert gezamenlijk in een batterij en aggregaat. De dimensionering van de batterij is gebaseerd op de gemiddelde dagelijkse (gezamenlijke) restcapaciteit op het net.
- De batterij én het aggregaat worden ook ingezet voor elektriciteitslevering, ook voor geëlektrificeerde onderdelen (zoals elektrische voertuigen).
- In 2025 nemen we aan dat er net voldoende netcapaciteit is om in alle elektriciteitsvraag te voorzien; waardoor batterijen en aggregaten pas worden aangeschaft als de elektriciteitsvraag toeneemt.

**Elektrische voertuigen:**

- De ingroeipaden voor personenauto's, bestelbussen en vrachtwagens zijn gebaseerd op prognoses van Elaad (middenscenario).
- In 2050 is 100% van het huidige wagenpark geëlektrificeerd.
- Dit ingroeipad is hetzelfde voor zowel de referentie als energiehub.
- Een aggregaat kan de elektrische voertuigen voorzien van elektriciteit, indien afname uit het net en batterij onvoldoende is.
- Laadvraag wordt verdeeld over de laadbeurt, waardoor het laadvermogen geminimaliseerd wordt. Er vindt geen prijssturing plaats.
- Laadvraag wordt eerst voorzien uit lokale hernieuwbare opwek, dan het net, dan een batterij, en als laatste het aggregaat.

**Hybride warmtepomp en gasketel:**

- Voor het jaar 2025 wordt aangenomen dat alle bedrijven/woningen een gasketel gebruiken om in hun warmtevraag te voorzien.
- Een vast ingroeipad wordt aangenomen voor de adoptie van hybride warmtepompen gebaseerd op KEV 2024 ontwikkelingsprognoses van PBL.
- De ingroei verloopt hetzelfde voor zowel de referentie als de energiehub.

**Zon-pv:**

- We nemen een vast ingroeipad aan voor de adoptie van zon-pv gebaseerd op KEV 2024 ontwikkelingsprognoses van PBL.
- De ingroei verloopt hetzelfde voor zowel de referentie als de energiehub.

**Windturbines:**

- Windturbines worden niet in een referentie meegenomen in deze studie. Het productieprofiel van windturbines is vaak een gunstige aanvulling op zon-pv, echter kunnen nieuwe windturbines vanuit ruimtelijk beleid op de meeste locaties waarschijnlijk niet geplaatst worden.

**MT-warmtenet:**

- Restwarmte die aan het warmtenet wordt geleverd, wordt gebaseerd op uurlijkse gasvraagprofielen (SBI) uit de industrie.
- De restwarmte wordt gebruikt om te voorzien in de warmtevraag van de energiehub. Tekorten worden aangevuld met een industriële gasketel. Overschotten van de restwarmte worden gezien als warmteverlies.
- Voor het realiseren van het MT-warmtenet wordt geïnvesteerd in transport- en distributie-infrastructuur en afleversets bij de gebruikers.
- Er vindt in de modellering geen warmtebuffering of opwaardering van de restwarmte plaats.



**ZLT-warmtenet:**

- Restwarmte die aan het systeem wordt geleverd, wordt opgeslagen en gewonnen uit een wko-systeem, gevoed door restwarmte van lokale utiliteitsbouw. We gaan er vanuit dat dit systeem in balans is zonder aanvullend regeneratiemechanisme.
- Deze restwarmte wordt via een all-electric water-waterwarmtepomp gebruikt voor de warmtevraag van de bedrijven/woningen.
- Voor het realiseren van het ZLT-warmtenet wordt geïnvesteerd in distributie-infrastructuur en warmtepompen bij de gebruikers.

**Elektrolyzers:**

- Elektrolysevermogen wordt bepaald per casus. In principe is er in de referentie lokaal geen waterstofproductie, maar externe levering.
- Het vermogen van de elektrolyser wordt geschaald gebaseerd op: 1) waterstofvraag van industrie en 2) zuurstofvraag bij RWZI.
- De inzet van de elektrolyser wordt bepaald aan de hand van een *purchase-power-agreement* (PPA) met wind-op-zee<sup>9</sup>. Daarbij kan de elektrolyser flexibel ingezet worden om invoedingscongestie te voorkomen.

## 2.4.4 Aannames productiviteitswinst en woningwaarde

De productiviteitswinst en woningwaarde ontstaat als een energiehub extra elektriciteitsvraag mogelijk maakt, ten opzichte van de referentie.

**Productiviteitswinst:**

- Een van de beoogde effecten van een energiehub is dat het ervoor kan zorgen dat bedrijven meer elektriciteit kunnen gebruiken dan zonder energiehub mogelijk zou zijn. Dit kan leiden tot een productiviteitswinst voor (bedrijven in) de energiehub, doordat bestaande bedrijven hun productieproces kunnen uitbreiden of nieuwe bedrijven zich hier kunnen vestigen. Een manier om de maatschappelijke waarde van deze productiviteitswinst te monetariseren is door te kijken naar de gemiddelde economische toegevoegde (het bruto binnenlands product of BBP) per eenheid elektriciteitsverbruik (MWh) per sector.<sup>10</sup> Het bruto welvaartseffect<sup>11</sup> kan vervolgens bepaald worden door dit te vermenigvuldigen met het extra elektriciteitsverbruik dat mogelijk wordt gemaakt door de energiehub.

---

<sup>9</sup> <https://ce.nl/publicaties/elektrolyzers-nettarieven-en-het-elektriciteitssysteem/https://ce.nl/publicaties/elektrolyzers-nettarieven-en-het-elektriciteitssysteem/>

<sup>10</sup> <https://www.ecorys.com/app/uploads/2019/02/Maatschappelijke-kostprijs-van-netcongestie-2024.pdf>

<sup>11</sup> Merk op dat de bruto productiviteitswinst is gebaseerd op de gemiddelde toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik van de sector en dus niet een-op-een kan worden overgenomen als welvaartswinst in onze analyse. Niet voor elk bedrijf zal de mogelijkheid om extra elektriciteit te verbruiken leiden (direct) tot een toename van de productie. Niet voor elk type bedrijf is de beschikbaarheid van elektriciteit in deze mate beperkend voor de productiviteit: voor (elektrische) productieprocessen is dit bijvoorbeeld heel anders dan panden met een kantoorfunctie. Daarnaast kan een productietoename binnen de energiehub ervoor zorgen dat elders in het land minder zal worden geproduceerd of zou deze additionele productie mogelijk ook door andere bedrijven verzorgd kunnen worden. De netto productiviteitswinst zal dus in veel gevallen lager uitvallen.

- In de referentie nemen we aan dat bedrijven bij netcongestie zonder energiehubs zelf individuele maatregelen treffen. Daarom zal er in die gevallen geen verschil in productiviteitswinst optreden tussen de referentie en de energiehubs. In een gevoeligheidsanalyse zullen we daarom illustreren wat de mogelijke productiviteitswinst voor de bedrijven kan zijn door het realiseren van een energiehubs. Dit doen we door in een gevoeligheidsanalyse er vanuit te gaan dat in de referentie partijen geen individuele maatregelen nemen (zoals batterijen en aggregaten).

## 2.5 Vergelijking andere studies

### 2.5.1 Haskoning – De Families van Energy Hubs in Nederland

Haskoning heeft eerder een studie uitgevoerd naar families van energiehubs, met daarin ook een analyse van potentiële locaties, vermeden netimpact en CO<sub>2</sub>-reductie. In een eerdere studie van Haskoning (Royal HaskoningDHV, 2024) naar familieleden van energiehubs zijn vier families geïdentificeerd: Bedrijventerreinen, mobiliteit, Cluster 6 industrie en gebouwde omgeving. In deze studie zijn mobiliteit-energiehubs niet als *familie* meegenomen zoals in de studie van Haskoning, maar wel als *relevante cases* binnen de familie bedrijventerreinen (Type 1, 2 en 3). Mobiliteit is vaak een integraal onderdeel, en de locaties met alleen mobiliteit kennen weinig partijen en dus relatief weinig energiehubeffecten. Een grotere vergelijking is opgenomen in het achtergrondrapport.

We identificeren ten opzichte van de Haskoning-indeling nog één extra familie, namelijk duurzame opwek. Dit zijn bedrijventerreinen (locaties) die worden gedomineerd door lokale duurzame opwek, waarbij de invoedingspiek significant groter is dan de afnamepiek, of combinaties van verschillende vormen van duurzame opwek met flexibiliteit.

Haskoning identificeerde in totaal 1.183 energiehubs, ten opzichte van 2.477 energiehubs in onze studie. De data-analyse van energiehubs is in de eerste fase afgestemd met Haskoning, waaruit bleek dat ook zij nieuwe inzichten hadden over de aanpak. Een belangrijk verschil is dat er meer casussen zijn in de gebouwde omgeving. Haskoning heeft de 500 buurten geselecteerd met de hoogste multiplier score, terwijl CE Delft in deze studie criteria heeft vastgesteld en de wijken heeft geselecteerd die aan de eisen voldoen. Daarnaast zijn er in de CE Delft studie extra bedrijventerreinen opgenomen aangezien er ook naar meer dan alleen gemengde bedrijventerreinen gekeken is, zoals RWZI en logistiek terreinen.

Kijkend naar de overige verschillen tussen beide studies, is het van belang om een verschil in methodologische aannames vast te stellen. Globaal is te zeggen dat Haskoning met kengetallen een inschatting heeft gemaakt voor 2030, en CE Delft een verkenning heeft uit gevoerd met doorrekening voor periode 2025 tot 2050. In meer detail:

- Haskoning maakt geen vergelijking met een referentiesituatie, maar gaat ervan uit dat er geen verduurzaming plaatsvindt in de referentie. In de energiehubs vindt verduurzaming wel plaats, en wordt dit gefaciliteerd via een worst-case scenario waarin de energiehubs voorzien wordt door batterijen en aggregaten.
- De vermeden netimpact wordt berekend aan de hand van de elektrificatie die plaatsvindt in de energiehubs tot 2030, en dus in de aannames wel voorzien kan worden. Dit is gebaseerd op kengetallen van de netimpact per sector en gaat er dus vanuit dat elektrificatie plaatsvindt in de energiehubs zonder netimpact, maar dit is niet doorgerekend. CE Delft heeft een uurlijkse elektriciteitsdoorrekening uitgevoerd, tot 2050, en gaat uit van elektrificatie in beide scenario's (referentie en energiehubs).
- De CO<sub>2</sub>-effectberekening van Haskoning is ook meer globaal, uitgaande van dat elektrificatie niet plaats kan vinden zonder energiehubs en daar de emissies voor berekenen. In de studie van CE Delft is een CO<sub>2</sub>-doorrekening uitgevoerd voor alle zichtjaren, en is de totale reductie tot 2050 in de energiehubs bepaald ten opzichte van de referentie.

Deze studie volgt dus in grote lijnen de aanpak van Haskoning, met een verdieping op familieleden, energetische doorrekening en gedetailleerde beoordeling van effecten voor de periode 2025-2050. Er zijn echter nog verschillende verdere verdiepingsslagen mogelijk, met onder andere meer doorrekening per archetype.

## 2.5.2 Ecorys – kosten energiehubs

In de studie van Ecorys over kostprijs van netcongestie is ook een overzicht opgenomen van de kosten van mitigerende maatregelen; individuele oplossingen voor congestie die door bedrijven genomen kunnen worden. In een studie voor TenneT is een handzame tabel opgenomen (Ecorys, 2024a) waaruit de kosten voor energiehubs behoorlijk laag zijn. De bron hiervoor is een eerdere studie van CE Delft en Merosch (Merosch; CE Delft, 2024).

De genoemde kosten in de studie van CE Delft omvatten alleen de opzet van de energiehubs, en dus nog niet kosten voor eventuele technieken die vereist zijn om de energiehubs energetisch te laten functioneren. Dit zijn dus eigenlijk meerkosten voor de organisatie van de energiehubs. In de voorliggende studie zien we dat daarnaast dan nog slimme sturing, batterijen en aggregaten vereist zijn waardoor de totale kosten toenemen. Een vergelijking van puur de organisatorische kosten van een energiehubs met één techniek is dus daarmee geen volledige vergelijking.

# 3 Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie

## 3.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gemengd bedrijventerrein waarbij de verduurzaming voornamelijk wordt gerealiseerd door elektrificatie. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 3.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus betreft een bedrijventerrein die bestaat uit een mix van ondernemingen, variërend van grote industriële spelers in de voedingsmiddelen- en auto-industrie tot middelgrote logistieke bedrijven en kleinere dienstverleners zoals ingenieurs- en marktonderzoeksbureaus. Deze diversiteit leidt tot verschillende energiebehoeften: industriële bedrijven hebben een relatief hoge elektriciteits- en warmtevraag, terwijl de dienstensector en logistieke bedrijven juist een lagere energievraag hebben.

In de huidige situatie voorzien de bedrijven individueel in hun warmte- en elektriciteitsvraag, vaak met conventionele technieken zoals gasketels. Naar de toekomst toe is een transitie voorzien richting warmtepompen en hybride systemen, waarbij de vraag naar elektriciteit toeneemt. De groei van het aantal warmtepompen is hetzelfde voor zowel de referentie als de energiehub.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het groeiende aantal elektrische bestelauto's (n=66), trucks (n=17) en personenauto's (n=143) leidt tot extra elektriciteitsvraag. Het ingroepad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub. Indien elektriciteitsafname uit het net en batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een aggregaat.

Geleidelijk neemt het aantal geïnstalleerde zonnepanelen toe, tot in 2050 het maximale potentieel van het dakoppervlak benut is. Het ingroepad van zon-pv is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub.

Tabel 7 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubsscenario

|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                  | Referentiescenario                                         | Energiehubsscenario                                                        |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050.<br><br>Gasketel als warmtevoorziening.                                                              |                                                            |                                                                            |
| 2030 | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groeï elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv | Individuele aggregaten en batterijen.                      | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                        |
| 2040 | Hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groeï elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv.                                 | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring). | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                        |
| 2050 | Hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groeï elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv.                                 | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.     | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan. |

## 3.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De analyse van gemengde bedrijventerreinen is gebaseerd op de IBIS-bedrijventerreinen-dataset. Deze dataset is aangevuld met informatie over typologie en energieverbruik, CBS-data over woningen en bedrijven, CBS-data over gasaansluitingen, de verrijkte BAG 1.0 van TNO, gegevens over beschikte SDE++-projecten, windturbinelocaties en prognoses van Elaad over elektrisch vervoer.

Bij de selectie zijn de volgende filters toegepast:

- Typologie: uitsluiting van zeehaventerreinen, energie-intensieve procesindustrie en distributieparks.
- Omvang en kwaliteit: woningen niet leidend, meer dan vijf adressen, minimaal 5 hectare, niet verouderd.
- Overlap: bedrijventerreinen die ook geclassificeerd zijn als potentieel logistieke hub zijn verwijderd.

Na toepassing van deze filters blijven 357 bedrijventerreinen over, met uiteenlopende classificaties zoals gemengd mkb, kantoorparken, agribusinessparken en retail- en meubelboulevards.

Het gemiddelde bedrijventerrein wat modelstaat voor de casus telt circa 18 bedrijven, verspreid over 33 gebouwen. De gewogen SBI-codes naar oppervlakte vallen voor ongeveer 50% in hoofdcategorie G (Handel), 15% in C (Industrie), 10% in M (Specialistische zakelijke dienstverlening), 10% in F (Bouwnijverheid) en de resterende 15% verspreid over onder meer H (Vervoer en opslag) en K (Financiële dienstverlening). Volgens de BAG-registratie hebben de gebouwen de volgende functies: 75% industrie, 15% kantoor, 5% winkel en 5% overige functies.

Het gemiddelde elektriciteitsverbruik per bedrijf ligt rond de grens van klein- en grootverbruik (100 MWh/jaar). In de casus is een mix van grote, middelgrote en kleine bedrijven verondersteld, gebaseerd op de verdeling van gebouwoppervlaktes binnen de dataset. SBI-specifieke energievraagprofielen zijn toegekend naar rato van de oppervlakteverdeling per SBI-code. In totaal omvat de casus circa 46.000 m<sup>2</sup> gebruiksoppervlakte. Op bedrijfsdaken ligt naar schatting 400 kWp aan zonnepanelen.

### 3.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van het bedrijventerrein bedraagt circa 9,3 GWh/jaar. Deze vraag blijft constant over de jaren, maar wordt door verduurzaming van de warmtevraag ingevuld door warmtepompen.

De elektriciteitsvraag groeit sterk door elektrificatie van de warmtevoorziening en mobiliteit: van circa 5,1 GWh/jaar in 2025 naar ruim 10,5 GWh/jaar in 2050. In zowel de referentiesituatie als de energiehubs is de elektriciteitsafname uit het net in 2025 en 2030 vergelijkbaar, met respectievelijk 4,1 en 5,0 GWh per jaar. Ook na netverzwaring is de afname uit het net vergelijkbaar voor beide situaties, en bedraagt in 2040 8,0 GWh/jaar en 7,8 GWh/jaar voor de referentie en energiehubs respectievelijk. In 2050 bedraagt deze 9,3 en 9,1 GWh/jaar voor de referentie en energiehubs respectievelijk.

In 2030, vóór netverzwaring, voorzien de batterijen in de referentie circa 75 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit in de energiehubs circa 22 MWh/jaar is. Dit verschil is o.a. een gevolg van de grotere totale batterijcapaciteit in de referentie die 950 kWh bedraagt, terwijl dit 375 kWh is voor de gezamenlijke batterij in de energiehubs. Na netverzwaring blijft de gezamenlijke batterij bestaan in energiehubs, terwijl deze niet meer nodig is in de referentie. In 2050 heeft de energiehubs nog een batterij van 2,85 MWh en 0,85 MW, die op jaarbasis 206 MWh aan energie opslaat en voorziet aan de energiehubs.

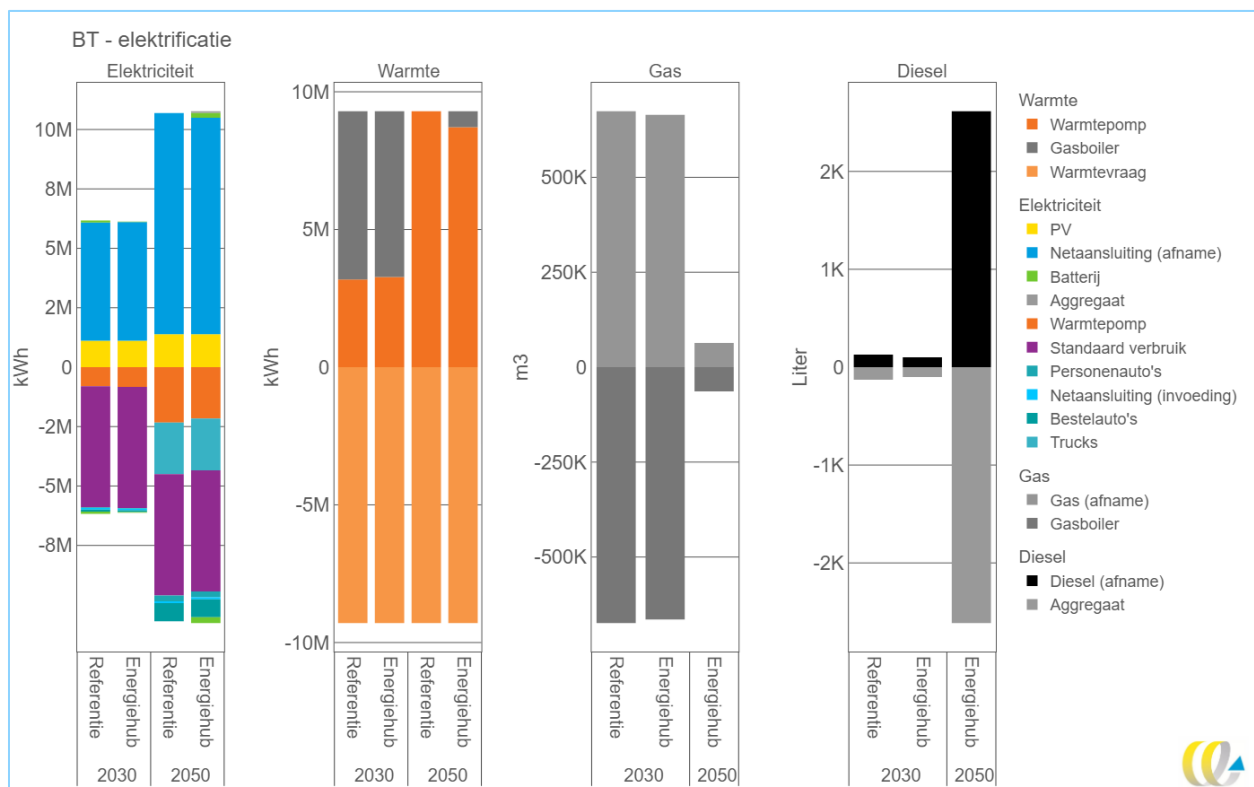
In de referentiesituatie in 2030 (vóór netverzwaring) voorzien de aggregaten circa 3,2 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit in de energiehubs 2,5 MWh/jaar is. Na netverzwaring springt een aggregaat met een vermogen van 0,5 MW nog af en toe bij om de energiehubs

te voorzien op elektriciteit. Dit bedraagt circa 65 MWh op jaarbasis; een klein percentage van de totale elektriciteitsvraag.

In 2025 en 2030, vóór netverzwaring, is de hoeveelheid elektriciteit uit zon-pv die op het net kan worden ingevoegd vergelijkbaar voor zowel de referentie als de energiehub. In 2025 bedraagt dit circa 56 MWh/jaar, en 68 MWh/jaar in 2030. Wanneer netverzwaring wordt uitgesteld tot 2041, blijkt dat de energiehub fors meer elektriciteit kan invoeden dan de referentie: 69 MWh/jaar tegenover 47 MWh/jaar. Dit verschil onderstreept het voordeel van de energiehub in termen van flexibiliteit en optimale benutting van de beschikbare netcapaciteit.

De piekbelasting wordt door de energiehub duidelijk verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens niet verhoogd (kunnen) worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehub voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 2,7 MW in de referentie, tegenover 1,5 MW in de energiehub (-44%).

Figuur 6 – Vraag en aanbod van elektriciteit, warmte, gas en diesel voor referentie en energiehub, voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Tabel 8 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 1,6↓ | 2,4↓ | 2,7↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,5↓ |

## 3.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 9 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus elektrificatie gemengd bedrijventerrein. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 2,1 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn de **organisatiekosten** (de personele inzet voor realisatie van de energiehub) en de directe kosten voor de **assets** (de investeringen in de batterijen en aggregaten, die hoger zijn voor de energiehub). De baten die hier tegenover staan (minder elektriciteitsafname van het en uitgespaarde netinvesteringen door lagere netimpact) wegen hier niet tegenop.

Tabel 9 – Resultaat mkba van elektrificatie gemengd bedrijventerrein; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                  | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                           | -0,7                        | De energiehub investeert in een groter vermogen aan collectieve batterijen en aggregaten dan de bedrijven in de referentie (opgetelde vermogens van individuele batterijen en aggregaten). In de referentie gebruiken de bedrijven de individuele batterijen en aggregaten alleen tussen 2030 (wanneer warmtepompen in gebruik worden genomen) en 2035 (wanneer netverzwaring plaatsvindt). De energiehub maakt ook na netverzwaring nog gebruik van de batterijen en aggregaten. Het verschil in directe kosten is groter voor <b>batterijen</b> (- € 0,5 mln.) dan voor <b>aggregaten</b> (- € 0,2 mln.). |
| Elektriciteit (afname)           | 0,2                         | Door het gebruik van de collectieve batterijen is er in de energiehub minder afname van het elektriciteitsnet nodig dan in de referentie. Met name vanaf 2040 – wanneer het gebruik van warmtepompen en elektrische voertuigen groeit – neemt het verschil toe.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Elektriciteit (invoeding)        | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Fossiele brandstoffen (verbruik) | -0,1                        | In de energiehub wordt na netverzwaring (met name na 2040, wanneer de warmtevraag verder toeneemt) meer <b>aardgas</b> gebruikt dan in de referentie. Dit komt doordat het GTV van de energiehub iets lager ligt dan het totaal aan contractvermogens van de bedrijven in de referentie (zie Paragraaf 2.4.2). Dit leidt er toe dat er voor de energiehub momenten zijn dat het GTV te krap is en de elektriciteitsvraag van de warmtepompen niet voorzien kan worden en wordt opgevangen met gasboilers.                                                                                                   |



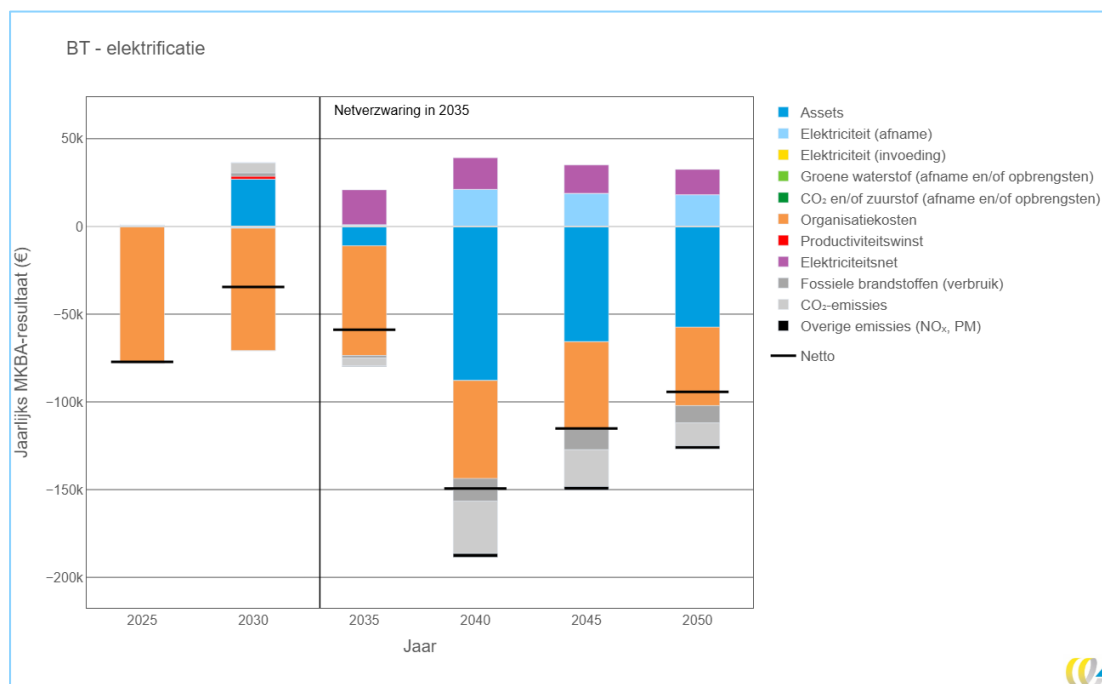
|                                                                    | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Groene waterstof (afname<br>en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname<br>en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Organisatiekosten                                                  | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Productiviteitswinst                                               | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Woningbouw                                                         | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Directe effecten</b>                                            | <b>-2,1</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Elektriciteitsnet                                                  | 0,3                         | Door het gebruik van collectieve batterijen hoeft in de energiehub, ten opzichte van de referentie, minder elektriciteit van het net te worden afgenomen. Hierdoor is de piekbelasting lager vanaf het moment waarop de netcongestie wordt opgelost en de netverzwaring plaatsvindt. In 2040 is de piekbelasting in de referentie 2,4 MW, terwijl dit in de energiehub 1,4 MW is; in 2050 is dit respectievelijk 2,7 en 1,5 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,3 mln.). |
| <b>Indirecte effecten</b>                                          | <b>0,3</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                          | -0,2                        | Als gevolg van het hogere <b>aardgasverbruik</b> in de energiehub zijn ook de hieraan gerelateerde milieukosten hoger (- € 0,1 mln.). Daarnaast zorgen de hogere investeringen van de energiehub in <b>batterijen en aggregaten</b> voor milieukosten gerelateerd aan de emissies in de <b>keten</b> van deze assets (- € 0,1 mln.).                                                                                                                                                                                             |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> ,<br>PM)                         | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Externe effecten</b>                                            | <b>-0,2</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Totaal</b>                                                      | <b>-2,1</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 7, waarin te zien is dat het resultaat over tijd fluctueert maar negatief blijft. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Elektriciteitsafname.** De toename in de directe kosten voor elektriciteitsafname van het net is toe te schrijven aan het feit dat de bedrijven in de referentie na netverzwaring meer elektriciteit afnemen, terwijl dit in de energiehub niet nodig is door het gebruik van collectieve batterijen.
- **Aardgasverbruik.** In de energiehub wordt na netverzwaring (met name na 2040, wanneer de warmtevraag verder toeneemt) meer aardgas gebruikt doordat er in de energiehubsituatie geen netverzwaring heeft plaatsgevonden. Hierdoor zullen er meer momenten zijn waarop gasboilers ingezet moeten worden. Dit leidt tot hogere directe kosten en milieukosten.
- **Investeringskosten assets.** De investeringen in batterijen en aggregaten liggen in de energiehub en de referentie tot 2040 dichtbij elkaar. Vanaf 2040 neemt het

elektriciteitsverbruik in beide situaties toe door de (elektrische) warmtevraag en het aantal elektrische voertuigen toeneemt. In de referentie wordt dit opgevangen door meer elektriciteit van het net af te nemen, terwijl de energiehubs extra vermogen aan collectieve batterijen realiseert. De hieraan gekoppelde extra jaarlijkse afschrijvingskosten komen duidelijk naar voren in het figuur.

Figuur 7 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehubs



Tekstkader 1 – Beschrijving figuur met mkba-resultaten

#### Mkba-resultaat – toelichting figuur

Het figuur met de mkba-resultaten omvat de resultaten voor zes zichtjaren: 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 en 2050. Alle kosten en baten zijn samengevat 11 individuele posten, de zwarte lijn omvat het totaal resultaat voor het specifieke jaar. Het totale mkba-resultaat is een som van alle jaren van 2025 tot 2050, waar er dus zes van zijn weergegeven. Alle waarden boven de nul-as zijn baten; oftewel hier kent de energiehubs een beter resultaat dan de referentie (lagere maatschappelijke kosten of hogere baten). De posten onder de x-as zijn kosten; hier kent de energiehubs een slechter resultaat dan de referentie (hogere maatschappelijke kosten of lagere baten). De zwarte lijn tussen 2030 en 2035 geeft de netverzwaring weer; vanaf 2035 is congestie opgelost. Als we kijken naar zichtjaar 2035 vereist de energiehubs vooral kosten de organisatie (oranje) en extra investeringen in assets (blauw). De baten zijn vermeden netinvesteringen (paars).

## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

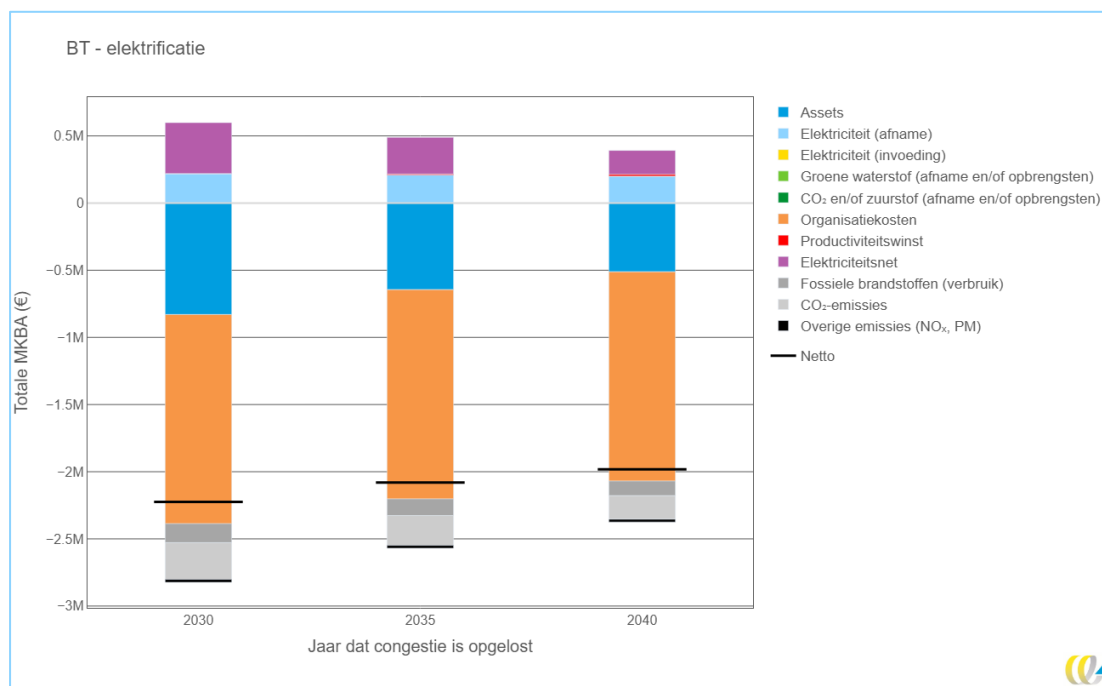
Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehubs ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van energiehubs minder negatief uitvalt. Dit is te zien in Figuur 8, waarin elke balk voor jaar  $x$  waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in de directe kosten van met name batterijen af. Zodra netcongestie oplost en netverzwaring plaatsvindt, zullen bedrijven in de referentie immers geen gebruik meer maken van batterijen omdat hun elektriciteitsvraag vanuit het net voorzien kan worden. Des te later de netcongestie wordt opgelost, des te langer bedrijven in de referentie gebruikmaken van individuele batterijen. De energiehubs investeert in batterijen ongeacht de netcongestiesituatie.
- **Uitgespaarde netinvesteringen.** Naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in netimpact en daarmee de uitgespaarde netinvesteringen in de energiehubsituatie af. De kosten voor netverzwaring tellen dan namelijk vanaf een later moment; de investering wordt later gedaan.

Figuur 8 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035)



Tekstkader 2 – Beschrijving figuur met gevoeligheidsanalyse over jaar dat congestie is opgelost

#### Figuur gevoeligheidsanalyse

Dit figuur geeft opnieuw de maatschappelijke kosten en baten weer, maar nu het totaal over de periode 2025 t/m 2050. De drie weergegeven analyses zijn alle volledige doorrekening met verschillende aannames. In alle doorrekeningen gaan we er vanuit dat congestie opgelost is in 2035. In deze gevoeligheidsanalyse zijn echter twee extra scenario's doorgerekend. De linker kolom omvat de resultaten als in 2030 congestie opgelost is, en dus extra transportvermogen eerder mogelijk is. Rechts is het resultaat opgenomen als congestie door vertraging of de lokale situatie in 2040 pas opgelost is. Een verdere beschrijving hoe het mkba-figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.

## 3.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal vergelijkbare terreinen, het aantal meter gebruiksoppervlak en het huidige energieverbruik. Op basis van deze eigenschappen worden resultaten opgeschaald met respectievelijk een factor 347, 316 en 401. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -2,1 miljoen euro; landelijk opgeschaald -640 tot -830 miljoen euro.

- **Netimpact:** in 2050 wordt in deze casus vermogensvraag van 1.200 kW vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 370 tot 480 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies toe met 0,77 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-toename van 240 tot 310 kton.

Let op dat het potentieel van deze casus gebaseerd wordt op dezelfde terreinen als 'Gemengd bedrijventerrein – ZLT-net' en 'Gemengd bedrijventerrein – duurzame opwek'. Daarmee is het geëxtrapoleerde potentieel niet additioneel.

# 4 Gemengd bedrijventerrein – ZLT-warmtenet

## 4.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gemengd bedrijventerrein waarbij in de energiehub een gezamenlijk zeer laagtemperatuur (ZLT)-warmtenet wordt aangelegd. De casus die voor dit archetype is geanalyseerd is qua samenstelling en energiebehoefte gelijk aan die van de casus *Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie*.

In deze casus blijven bedrijven in de referentiesituatie individueel verantwoordelijk voor hun warmtevoorziening, waarbij in de huidige situatie met gasketels wordt verwarmd. Verduurzaming vindt geleidelijk plaats door de aanschaf van een hybride – of all-electric-warmtepomp.

In de energiehub wordt een gezamenlijk ZLT-warmtenet aangelegd, waardoor de warmtevoorziening collectief wordt verduurzaamd. In deze analyse nemen we aan dat het ZLT-warmtenet in 2030 operationeel is. De warmte uit het warmtenet wordt opgewaardeerd door warmtepompen.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het groeiende aantal elektrische bestelauto's (n=66), trucks (n=17) en personenauto's (n=143) leidt tot extra elektriciteitsvraag. Het ingroeipad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub. Indien elektriciteitsafname uit het net en batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een aggregaat.

Geleidelijk neemt het aantal geïnstalleerde zonnepanelen toe, tot in 2050 het maximale potentieel van het dakoppervlak benut is. Het ingroeipad van zon-pv is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub.

Tabel 10 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubs scenario

|      | Uitgangspunten                                                                                     | Referentiescenario                                                                                                                     | Energiehubscenario                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050.<br><br>Gasketel als warmtevoorziening. |                                                                                                                                        |                                                                                               |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaadprognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                 | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring) | ZLT-warmtenet plus warmtepomp voor alle bedrijven.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat. |
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaadprognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                 | Hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring).                                 | ZL-warmtenet plus warmtepomp voor alle bedrijven.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat.  |
| 2050 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaadprognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                 | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.                                                                                 | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                    |

## 4.2 Resultaten ruimtelijke analyse

In deze casus is uitgegaan van hetzelfde bedrijventerreinen & potentieel als in de casussen gemengd bedrijventerrein – elektrificatie & duurzame opwek. De beschrijving van de ruimtelijke analyse is te vinden in Paragraaf 3.2. We gaan uit van dezelfde potentie als deze casussen, maar corrigeren voor eventuele dubbeltellingen.

De reden dat uitgegaan is van dezelfde dataset van bedrijventerreinen voor de potentiebepaling, is omdat we enerzijds voor de gemengde bedrijventerreinen geen duidelijke techniekvoorkeur kunnen aanwijzen en anderzijds omdat we op deze wijze ook het effect van de techniekkeuze op het mkba-resultaat kunnen vergelijken.

## 4.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag is 9,3 GWh<sub>t</sub>/jaar en is contant voor de periode 2025 tot 2050. In het referentiescenario wordt overgestapt op hybride warmtepompen, wat resulteert in een stijging van de elektriciteitsvraag van 5 GWh in 2025 tot 10,6 GWh in 2050. In de energiehubs groeit de vraag naar elektriciteit door het gebruik van warmtepompen en het

ZLT-warmtenet iets minder sterk, tot 10 GWh per jaar in 2050. Het gebruik van een ZLT-warmtenet leidt tot een lagere elektriciteitsbehoefte.

In 2030, vóór netverzwaring, schaft de energiehubs een grotere gezamenlijk batterij aan dan de totaal opgestelde batterijcapaciteit in de referentie; namelijk 1,6 MWh in de energiehubs en 0,95 MWh in de referentie. Om afnamecongestie in 2040 te verhelpen (vóór netverzwaring) volgt uit de resultaten dat in de referentie er fors meer geïnvesteerd moet worden, waardoor de totale opgestelde batterijcapaciteit groeit naar 3,7 MWh, terwijl dit voor de energiehubs 2,6 MWh is. Na netverzwaring, blijft de gezamenlijke batterij bestaan in de energiehubs terwijl de individuele batterijen in de referentie worden verkocht of verwijderd.

In 2030, vóór netverzwaring, moet in de energiehubs een aggregaat van 0,5 MW ingeschakeld om onder andere de warmtepompen van voldoende elektriciteit te voorzien. In 2030 wordt circa 41 MWh/jaar aan elektriciteit op deze manier opgewekt. In de referentie is dat aanzienlijk minder, circa 3 MWh/jaar, doordat in de referentie de hybride warmtepompen kunnen bijstoken op gas. Indien netverzwaring nog niet heeft plaatsgevonden in 2040, verschuift dit beeld, waar in het aggregaat in de referentie 445 MWh/jaar aan elektriciteit opwekt, terwijl dit maar 96 MWh/jaar bedraagt in de energiehubs. Merk op, dat ondanks de grotere totaal opgestelde batterijcapaciteit in de referentie (3,7 MWh) er toch meer elektriciteitsproductie plaatsvindt in de referentie. Dit is een gevolg van een suboptimale inzet van alle individuele batterijen ten opzichte van een gezamenlijke batterij.

In 2050 zien we dat de energiehubs een significante reductie van de netbelasting kan realiseren, zoals opgenomen in Tabel 11. De elektriciteitsvraag is in totaliteit lager, en wordt extra verlaagd door inzet van batterij en aggregaat. In totaal levert het aggregaat 1% van de elektriciteitsvraag en 2,0% van elektriciteitsvraag wordt geleverd door de batterij (nadat het eerder opgeslagen is). De resulterende vermogensduurkromme geeft een interessant beeld in

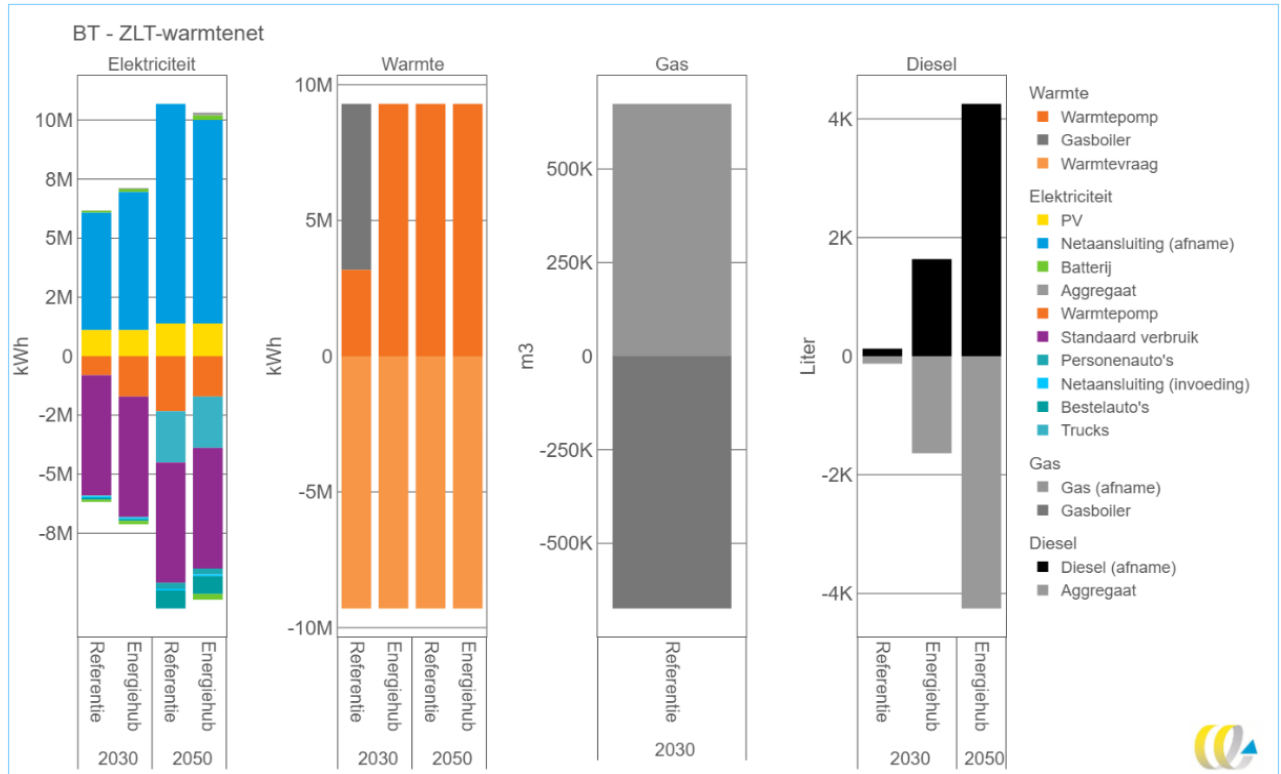
In deze grafiek is de netbelasting weergegeven voor alle uren van het jaar, geordend van hoog naar laag. De energiehubs stuurt sterk op het GTV, in extreme momenten wordt de batterij en aggregaat gebruikt om binnen het GTV te blijven.

Tabel 11 – Piekbelasting op het net in energiehubs en referentie. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk

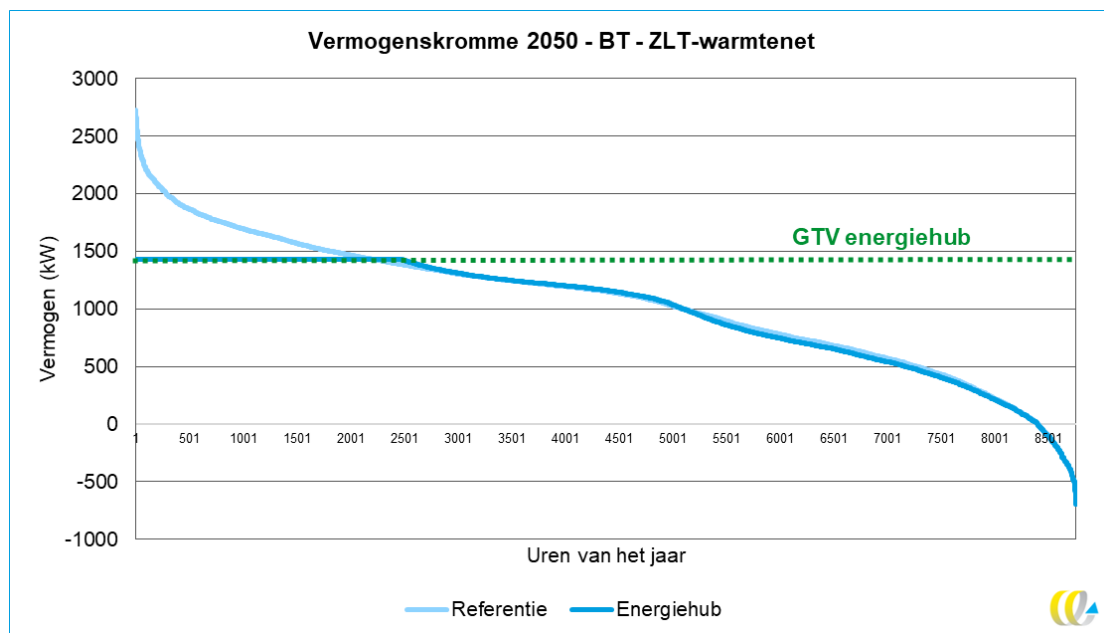
| Piekbelasting (MW)                 | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring  | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring     |      | 1,6↓ | 2,4↓ | 2,7↓ |
| Energiehubs - zonder netverzwaring | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Energiehubs - met netverzwaring    |      | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,4↓ |



Figuur 9 – Vraag en aanbod van elektriciteit, warmte, gas en diesel voor referentie en energiehubs, voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Figuur 10 – Vermogensduurkromme 2050 in referentie situatie en energiehubsscenario, voor casus bedrijventerrein met ZLT-warmtenet



## 4.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 12 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus ZLT-warmtenet gemengd bedrijventerrein. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie min of meer neutraal uitvalt (- € 0,1 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn enerzijds de directe kosten voor de **assets** en de **organisatiekosten** (de personele inzet voor realisatie van de energiehubs) en anderzijds de baten in de vorm van vermeden **aardgasverbruik** (inzet gasboiler) en **CO<sub>2</sub>-emissies** (voornamelijk gerelateerd aan het aardgasverbruik).

Tabel 12 – Resultaat mkba van ZLT-warmtenet gemengd bedrijventerrein; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | -2,6                        | De investeringen in assets liggen in de energiehubs hoger dan in de referentie: er wordt meer geïnvesteerd in <b>warmtepompen</b> <sup>12</sup> (- € 1,3 mln.), <b>batterijen</b> (- € 0,6 mln.), <b>aggregaten</b> (- € 0,5 mln.) en het <b>warmtenet</b> (- € 0,4 mln.). Daartegenover wordt in de referentie meer geïnvesteerd in <b>gasboilers</b> (+ € 0,2 mln.). |
| Elektriciteit (afname)                                          | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | 1,2                         | De energiehubs verbruikt alleen tot 2030 aardgas; vanaf dat moment stappen ze over op het gezamenlijke ZLT-warmtenet, met warmtepompen om de warmte op te waarden. In de referentie maken de bedrijven tot 2040 gebruik van <b>gasboilers</b> (+ € 1,2 mln.). Daarnaast maakt de energiehubs iets meer gebruik van dieselaggregaten.                                   |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Organisatiekosten                                               | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Woningbouw                                                      | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>-3,0</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,3                         | Doordat de energiehubs gebruikt maakt van een warmtenet in plaats van elektrische warmtepompen, is de elektriciteitsvraag al lager. Door de inzet van batterijen en aggregaten hoeft er daarnaast ook minder elektriciteit van het net te worden afgenomen. In 2040 is de piekbelasting in de referentie 2,4 MW, terwijl dit in de energiehubs                         |

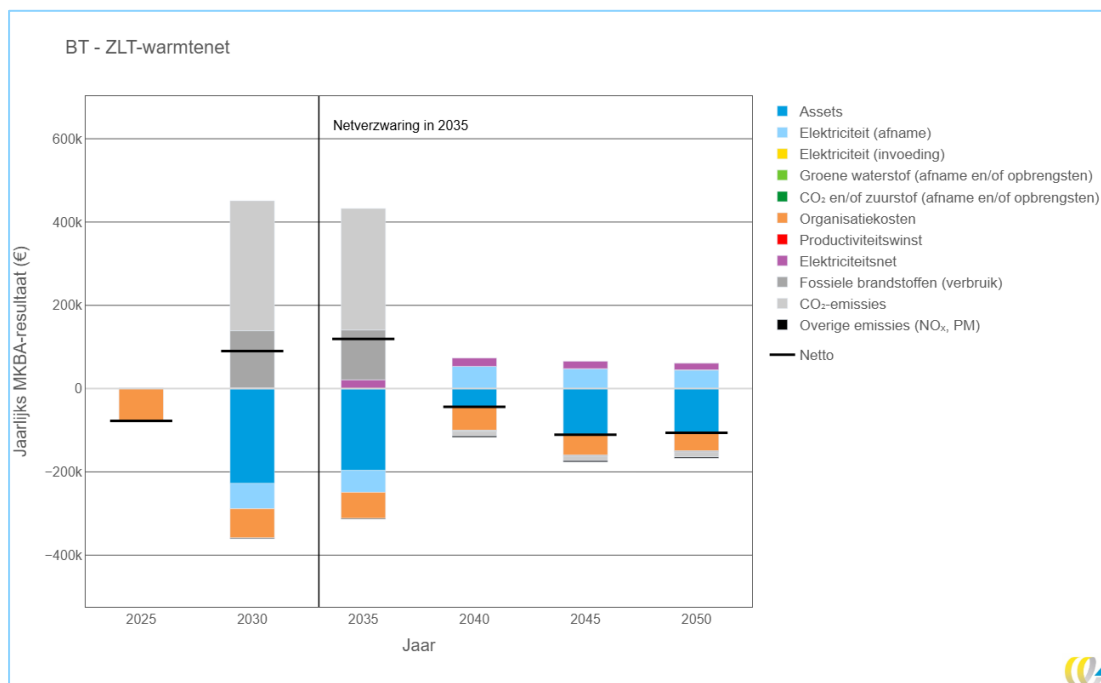
<sup>12</sup> In het geval van de energiehubs zijn deze nodig voor het opwaarderen van de warmte.

|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |                             | 1,3 MW is; in 2050 is dit respectievelijk 2,7 en 1,4 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor <b>netinvesteringen</b> (+ € 0,3 mln.).                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Indirecte effecten</b>               | <b>0,3</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub> -emissies               | 2,7                         | Door het hogere <b>aardgasverbruik</b> in de referentie, ontstaan er voor de energiehub baten in de vorm vermeden milieukosten (+ € 3,0 mln.). Daartegenover worden er in de energiehub meer assets aangeschaft, leidend tot extra emissies in de <b>keten</b> (- € 0,2 mln.). Ook ontstaan er milieukosten voor extra <b>elektriciteitsafname</b> (- € 0,1 mln.) en extra <b>diesilverbruik</b> (- € 0,1 mln.). |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | -0,1                        | Door de inzet van dieselaggregaten ontstaan er (beperkte) milieukosten door de NO <sub>x</sub> - en PM-emissies die bij diesilverbruik vrijkomen.                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>2,6</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Totaal</b>                           | <b>-0,1</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 11, waarin te zien is dat het resultaat over tijd fluctueert. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Aardgasverbruik.** De inzet is vereist vanwege congestie, en leidt daarmee tot meer inzet van fossiele brandstof en gekoppeld CO<sub>2</sub>-emissies.
- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten. In 2030 investeert de energiehub bijvoorbeeld in het warmtenet en vanaf 2035 maken de bedrijven in de referentie bijvoorbeeld geen gebruik meer van batterijen en aggregaten (terwijl de energiehub dit wel blijft doen).

Figuur 11 – Mgba-resultaat per zichtjaar voor de energiehubs. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehubs ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

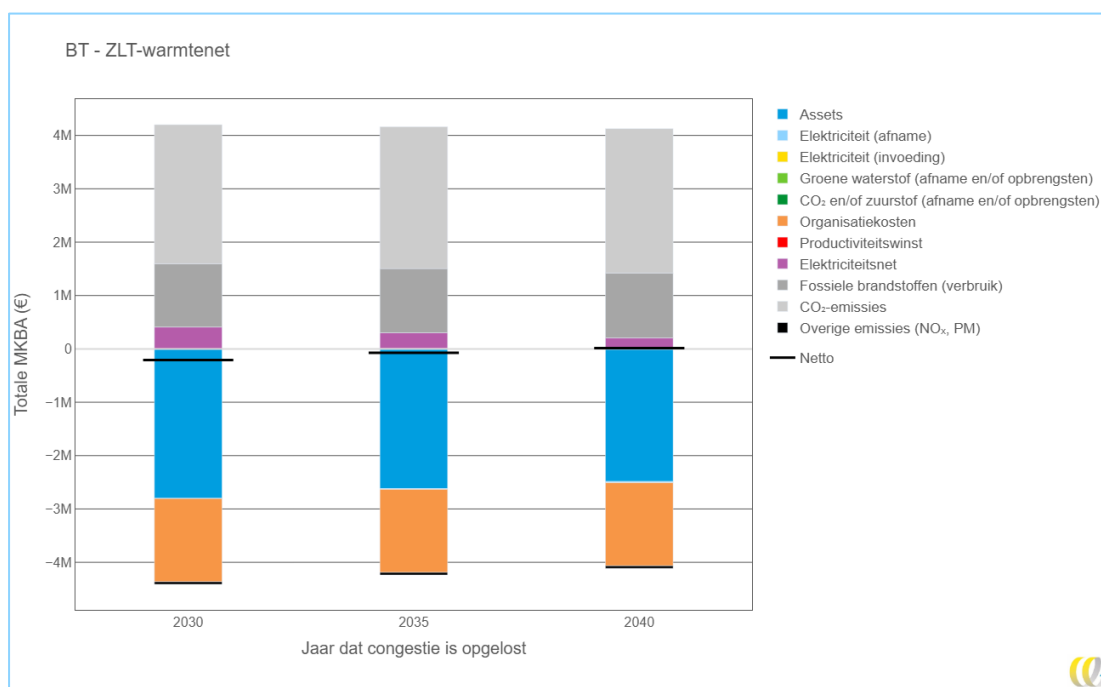
De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehubs minder negatief uitvalt en wanneer netcongestie in 2040 oplost zelfs net positief. De verschillen zijn echter klein. Dit is te zien in Figuur 12, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in de directe kosten van met name batterijen af. Zodra netcongestie oplost en netverzwaring plaatsvindt, zullen bedrijven in de referentie immers geen gebruik meer maken van batterijen omdat hun elektriciteitsvraag vanuit het net voorzien kan worden. Des te later netcongestie oplost, des te langer bedrijven in de referentie dus gebruik blijven maken van individuele batterijen. De energiehubs investeert in batterijen ongeacht de netcongestiesituatie.

- **Uitgespaarde netinvesteringen.** Naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in netimpact af en daarmee ook de uitgespaarde netinvesteringen in de energiehubsituatie. Totdat netverzwaring heeft plaatsgevonden zullen bedrijven in de referentie op piekmomenten immers minder elektriciteit van het net kunnen afnemen (in de energiehub wordt dit opgevangen door collectieve batterijen).

Figuur 12 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 4.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal vergelijkbare terreinen, het aantal meter gebruiksoppervlak en het huidige energieverbruik. Op basis van deze eigenschappen worden resultaten opgeschaald met respectievelijk een factor 347, 316 en 401. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -70.000 euro; landelijk opgeschaald -22 tot -28 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in deze casus een vermogensvraag van 1.290 kW vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 400 tot 520 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 9,2 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 2,8 tot 3,6 Mton van 2025 tot 2050.

Let op dat het potentieel van deze casus gebaseerd wordt op dezelfde terreinen als 'Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie' en 'Gemengd bedrijventerrein – duurzame opwek'. Daarmee is het geëxtrapoleerde potentieel niet additioneel.

# 5 Logistiek bedrijventerrein

## 5.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een logistiek bedrijventerrein waarbij de verduurzaming van zowel de mobiliteit als warmte zoveel mogelijk wordt gerealiseerd door elektrificatie. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 5.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus betreft een bedrijventerrein waarop verschillende ondernemingen gevestigd zijn, met een relatief sterke vertegenwoordiging van bedrijven uit de logistieke sector. Daarnaast zijn er industriële bedrijven: machinebouw, metaalbewerking, verpakkingsmiddelen, minerale producten, en dienstverlenende bedrijven.

Op dit bedrijventerrein zijn een aantal grote logistieke bedrijven met een relatief groot vloeroppervlak en bijbehorende elektriciteits- en warmtevraag. De industriële bedrijven kennen een relatief hoge warmtevraag. De huidige warmtevoorziening is grotendeels gebaseerd op gasketels, met in de toekomst een verschuiving richting (hybride) warmtepompen. Het ingroeipad voor warmtepompen is gelijk tussen de referentie en de energiehub.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het groeiende aantal elektrische bestelauto's (n=32), trucks (n=68) en personenauto's (n=90) leidt tot extra elektriciteitsvraag. Het ingroeipad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub. Indien elektriciteitsafname uit het net en batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een aggregaat.

Geleidelijk neemt het aantal geïnstalleerde zonnepanelen toe, tot in 2050 het maximale potentieel van het dakoppervlak benut is. Het ingroeipad van zon-pv is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub.

Tabel 13 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubs scenario

|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                                                        | Referentiescenario                                                                                                                                        | Energiehubscenario                                                                                                                                            |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Gasketel als warmtevoorziening                                                                                                                                                                        | Congestie. Bedrijven laden binnen individueel transportvermogen, eventueel aangevuld met batterijen en aggregaten.                                        | Congestie, bedrijven verkrijgen voor energiehubs GTV gebaseerd op gemeten maximale huidige piek. Gezamenlijk wordt geïnvesteerd in een batterij en aggregaat. |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose, aanname gemiddelde Nederlandse groei.<br><br>Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv | Congestie. Elektrische voertuigen worden gerealiseerd en bedrijven laden binnen individueel transportvermogen, eventueel aangevuld batterijen aggregaten. | Congestie, geen verhoging van het GTV mogelijk.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                                    |
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose, aanname gemiddelde Nederlandse groei.<br><br>Hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv                                  | De individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring).                                                                                             | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                                                                                           |
| 2050 | Volledige elektrificatie wagenpark.<br><br>Hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv                                                                                             | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.                                                                                                    | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                                                                                    |

## 5.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De analyse van logistieke bedrijventerreinen is gebaseerd op de IBIS-bedrijventerreinen-dataset. Deze dataset is aangevuld met informatie over typologie en energieverbruik, CBS-data over woningen en bedrijven, CBS-data over gasaansluitingen, de verrijkte BAG 1.0 van TNO, gegevens over beschikte SDE++-projecten, windturbinelocaties en prognoses van Elaad over elektrisch vervoer.



Bij de selectie zijn de volgende filters toegepast:

- Typologie: uitsluiting van zeehaventerreinen en energie-intensieve proces-industrie. Meegenomen zijn alle distributieparks & overige bedrijventerreinen waarbij er zowel meer dan tien vrachtwagens en een 'dichtheid' van meer dan vijf vrachtwagens per hectare bedrijventerrein.
- Omvang en kwaliteit: woningen niet leidend, meer dan vijf adressen, niet verouderd.

Na toepassing van deze filters blijven 151 bedrijventerreinen over. Dit zijn hoofdzakelijk distributieparks en mkb/middelgroot gemengd. Het aantal vrachtwagens dat op termijn op het logistieke bedrijventerrein laadt is 68, dit is vier keer zoveel als op het gemengd bedrijventerrein. De gebouwen hebben een gemiddelde gebruiksoppervlakte van 2.500 m<sup>2</sup>.

Op het logistieke bedrijventerrein staan gemiddelde 28 bedrijven in 33 gebouwen. De gewogen SBI-codes en gebouwfuncties in de BAG-registratie zijn vergelijkbaar met het gemengde bedrijventerrein (zie Paragraaf 3.2). Verschillen zitten hem in iets hogere percentages bedrijven in de categorieën G (Handel) en H (Vervoer en Opslag), en iets lagere percentages in de categorieën C (Industrie) en diverse zakelijke dienstverlening (onder andere F & M).

## 5.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van het bedrijventerrein bedraagt circa 4,9 GWh<sub>t</sub>/jaar. Deze vraag blijft constant over de jaren, maar wordt door verduurzaming van de warmtevraag ingevuld door warmtepompen.

De elektriciteitsvraag groeit met name sterk door de elektrificatie van de mobiliteit; van circa 3,6 GWh/jaar in 2025 naar ruim 14,2 GWh/jaar in 2050 (zie Figuur 13). In zowel de referentiesituatie als de energiehubs is de elektriciteitsafname uit het net in 2025 en 2030 vergelijkbaar, met respectievelijk 2,7 (2025) en 4,3 (2030) GWh/jaar. Ook na netverzwaring is de afname uit het net vergelijkbaar voor beide situaties, en bedraagt in 2040 9,2 GWh/jaar en in 2050 circa 13 GWh/jaar.

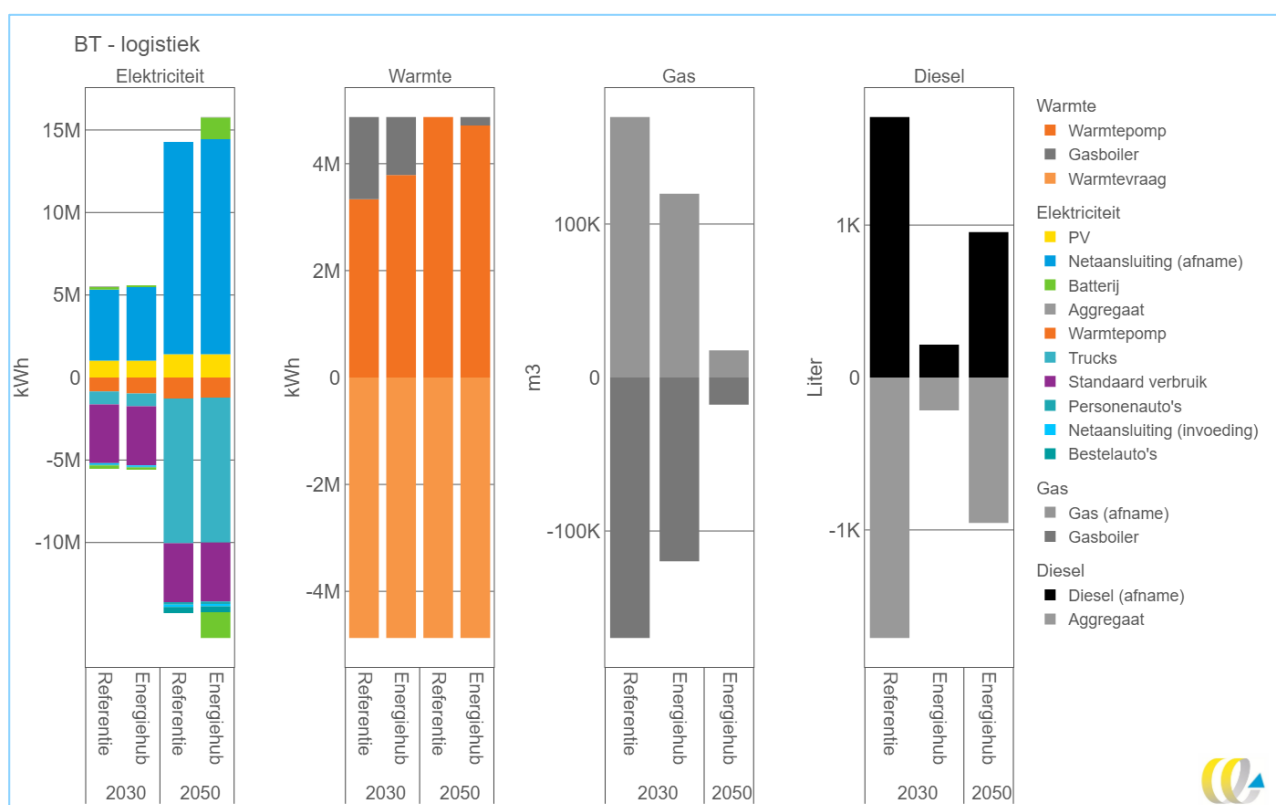
In 2030, vóór netverzwaring, voorzien de batterijen in de referentie circa 133 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit in de energiehubs circa 110 MWh/jaar is. Na netverzwaring blijft de gezamenlijk batterij bestaan in energiehubs, terwijl deze niet meer nodig is in de referentie. In 2050 heeft de energiehubs nog een batterij met een capaciteit van 7,4 MWh en een vermogen van 1,7 MW die op jaarbasis 1,3 GWh aan energie (opslaat en) voorziet aan de energiehubs.

In de referentiesituatie in 2030, vóór netverzwaring, leveren de aggregaten circa 43 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit in de energiehubs 5 MWh/jaar bedraagt. In 2050, na

netverzwaring, springt een aggregaat met een vermogen van 1 MW nog af en toe bij om de energiehubs te voorzien op elektriciteit. Dit bedraagt circa 24 MWh op jaarbasis; een klein percentage van de totale elektriciteitsvraag.

In 2025 en 2030, vóór netverzwaring, is de hoeveelheid elektriciteit uit zon-pv die op het net kan worden ingevoegd vergelijkbaar voor zowel de referentie als de energiehubs. In 2025 bedraagt dit circa 72 MWh/jaar, en 83 MWh/jaar in 2030. Wanneer netverzwaring wordt uitgesteld tot 2040, blijkt dat de energiehubs fors meer elektriciteit kan invoeden dan de referentie: 91 MWh/jaar tegenover 72 MWh/jaar. Dit verschil onderstreept het voordeel van de energiehubs in termen van flexibiliteit en optimale benutting van de beschikbare netcapaciteit.

Figuur 13 – Vraag en aanbod van elektriciteit, warmte, gas en diesel voor referentie en energiehubs, voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



De piekbelasting wordt door de energiehubs duidelijk verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens niet verhoogd (kunnen) worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehubs voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 3,9 MW in de referentie tegenover 2,1 MW (-45%) in de energiehubs.

Tabel 14 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehubs. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 0,8↓ | 0,8↓ | 0,8↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 1,6↓ | 3,0↓ | 3,9↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 0,8↓ | 0,8↓ | 0,8↓ |      |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 0,8↓ | 1,6↓ | 2,1↓ |

## 5.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 15 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus logistiek bedrijventerrein. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 2,6 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn de **organisatiekosten** (de personele inzet voor realisatie van de energiehubs) en de directe kosten voor de **assets** (de investeringen in de batterijen en aggregaten, die hoger zijn voor de energiehubs). De baten die hier tegenover staan (uitgespaarde netinvesteringen door lagere netimpact) wegen hier niet tegenop.

Tabel 15 – Resultaat mkba-logistiek bedrijventerrein; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

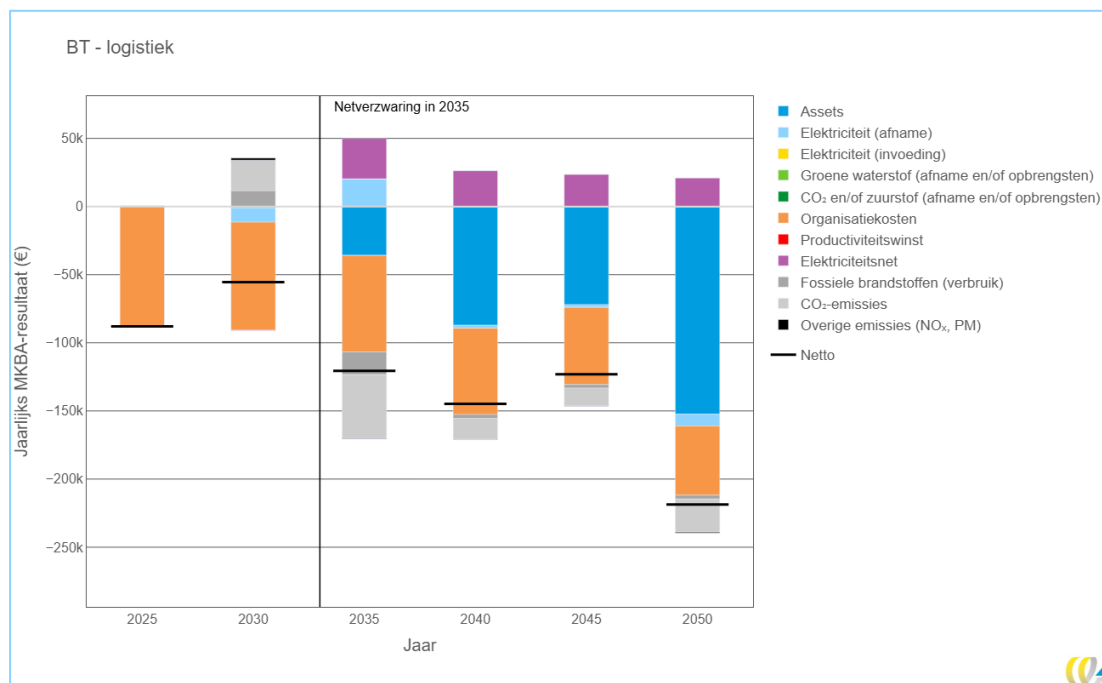
|                        | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                 | -1,0                        | De energiehubs investeert in een groter vermogen aan collectieve batterijen en aggregaten dan de bedrijven in de referentie (opgetelde vermogens van individuele batterijen en aggregaten). In de referentie gebruiken de bedrijven de individuele batterijen en aggregaten alleen tussen 2030 (wanneer warmtepompen in gebruik worden genomen) en 2035 (wanneer netverzwaring plaatsvindt). De energiehubs maakt ook na netverzwaring nog gebruik van de batterijen en aggregaten. Het verschil in directe kosten is groter voor <b>batterijen</b> (- € 0,8 mln.) dan voor <b>aggregaten</b> (- € 0,3 mln.). |
| Elektriciteit (afname) | 0,0                         | In de periode <b>2030-2035</b> ligt de elektriciteitsafname van het net van de energiehubs hoger dan in de referentie; het gezamenlijke GTV van de energiehubs is immers groter dan het totaal aan contractvermogens van de bedrijven in de referentie. In de periode <b>2035-2040</b> is de afname in de referentie hoger, doordat de netverzwaring het mogelijk heeft gemaakt meer elektriciteit af te nemen en de energiehubs meer opvangt met collectieve batterijen. <b>Vanaf 2040</b> ligt de afname van de energiehubs en de referentie dichtbij elkaar.                                               |

|                                                                    | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektriciteit (invoeding)                                          | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Fossiele brandstoffen<br>(verbruik)                                | -0,1                        | In de energiehub wordt na netverzwaring (met name na 2040, wanneer de warmtevraag verder toeneemt) meer aardgas gebruikt dan in de referentie. Dit komt doordat het GTV van de energiehub iets lager ligt dan het totaal aan contractvermogens van de bedrijven in de referentie (zie Paragraaf 2.4.2). Dit leidt er toe dat er voor de energiehub momenten zijn dat het GTV te krap is en de elektriciteitsvraag van de warmtepompen niet voorzien kan worden en wordt opgevangen met gasboilers. |
| Groene waterstof (afname<br>en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname<br>en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Organisatiekosten                                                  | -1,8                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Productiviteitswinst                                               | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Woningbouw                                                         | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Directe effecten</b>                                            | <b>-2,8</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Elektriciteitsnet                                                  | 0,4                         | Door het gebruik van collectieve batterijen is de piekbelasting van de energiehub vanaf het moment dat netcongestie oplost (en netverzwaring plaatsvindt) lager. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 3,0 MW, terwijl dit in de energiehub 1,7 MW is; in <b>2050</b> is dit respectievelijk 3,9 en 2,1 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,4 mln.).                                                                         |
| <b>Indirecte effecten</b>                                          | <b>0,4</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                          | -0,3                        | Als gevolg van het hogere aardgasverbruik in de energiehub zijn ook de hieraan gerelateerd milieukosten hoger (- € 0,1 mln.). Daarnaast zorgen de hogere investeringen van de energiehub in batterijen en aggregaten voor milieukosten gerelateerd aan de emissies in de keten van deze assets (- € 0,2 mln.).                                                                                                                                                                                     |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> ,<br>PM)                         | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Externe effecten</b>                                            | <b>-0,3</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Totaal</b>                                                      | <b>-2,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 14, waarin te zien is dat het resultaat over tijd fluctueert, maar negatief blijft. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Aardgasverbruik.** Tussen 2030 en 2035, wanneer netverzwaring nog niet is gerealiseerd, is het totale aardgasverbruik van de bedrijven in de referentie hoger dan in de energiehubs. Dit leidt tot hogere directe kosten en milieukosten. In de energiehubs wordt echter na netverzwaring (met name na 2040, wanneer de warmtevraag verder toeneemt) meer aardgas gebruikt doordat er in de energiehubsituatie geen netverzwaring heeft plaatsgevonden. Hierdoor zullen er meer momenten zijn waarop gasboilers ingezet moeten worden.
- **Elektriciteitsafname.** Het verschil in de directe kosten van elektriciteitsafname schommelt over tijd. In 2030-2035 ligt de elektriciteitsafname van het net van de energiehubs hoger (het gezamenlijke GTV van de energiehubs is groter dan het totaal aan GTV's van de bedrijven in de referentie). In 2035-2040 is de afname in de referentie hoger (netverzwaring heeft het mogelijk gemaakt meer elektriciteit af te nemen en de energiehubs vangt meer op met collectieve batterijen). Vanaf 2040 ligt de afname van de energiehubs en de referentie dichtbij elkaar.
- **Investeringskosten assets.** De investeringen in batterijen en aggregaten liggen in de energiehubs en de referentie tot 2040 dichtbij elkaar. Vanaf 2040 neemt het elektriciteitsverbruik in beide situaties toe door de (elektrische) warmtevraag en het aantal elektrische voertuigen toeneemt. In de referentie wordt dit opgevangen door meer elektriciteit van het net af te nemen, terwijl de energiehubs extra vermogen aan collectieve batterijen realiseert. De hieraan gekoppelde extra jaarlijkse afschrijvingskosten komen duidelijk naar voren in het figuur.

Figuur 14 – Mgba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van energiehub minder negatief uitvalt. Dit is te zien in Figuur 15, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

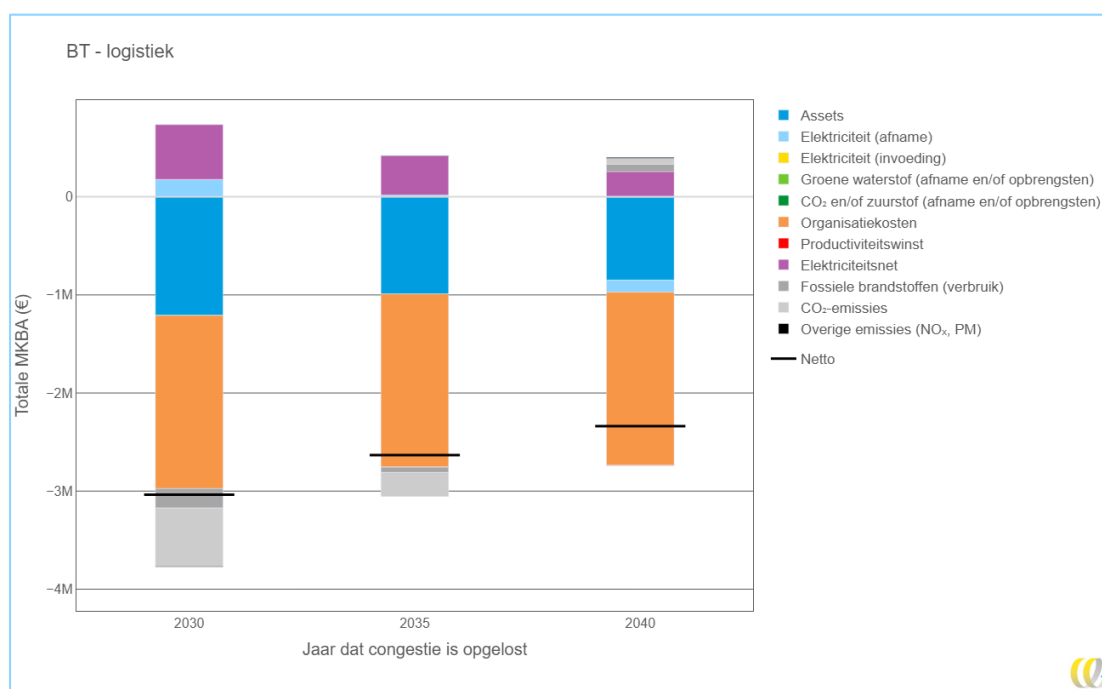
De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Aardgasverbruik.** Als netcongestie eerder oplost, kan ook eerder netverzwaring plaatsvinden en het transportvermogen worden verhoogd. Doordat het gezamenlijke GTV na netverzwaring van de energiehub lager ligt dan het totaal aan individuele transportvermogens in de referentie, zijn er vaker en voor een langere periode momenten waarop de gasboiler moet worden ingezet. Dit heeft invloed op de directe kosten en milieukosten van het aardgasverbruik.
- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in de directe kosten van met name batterijen af. Zodra netcongestie oplost en netverzwaring plaatsvindt, zullen bedrijven in de referentie immers geen gebruik meer maken van

batterijen omdat hun elektriciteitsvraag vanuit het net voorzien kan worden. Des te later de netcongestie wordt opgelost, des te langer blijven bedrijven in de referentie gebruikmaken van individuele batterijen. De energiehub investeert in batterijen ongeacht de netcongestiesituatie.

- **Uitgespaarde netinvesteringen:** naarmate netcongestie later oplost, neemt het verschil in netimpact en daarmee de uitgespaarde netinvesteringen in de energiehubssituatie af. Totdat netverzwaring heeft plaatsgevonden, kunnen bedrijven in de referentie op piekmomenten minder elektriciteit van het net afnemen. In de energiehub wordt dit opgevangen door collectieve batterijen.
- **Elektriciteitsafname:** naarmate netcongestie later oplost, vindt netverzwaring later plaats en kan met name in de referentie gedurende een langere periode minder elektriciteit van het net worden afgenomen.

Figuur 15 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 5.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal terreinen en het aantal trucks. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 151 tot 615. De factor 151 komt overeen met het aantal vergelijkbare gebieden en de waarde 615 met het aantal elektrische voertuigen. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehubbs op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -2,6 miljoen euro; landelijk opgeschaald -400 tot -1.620 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 1.720 kW vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 260 tot 1.060 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies toe met 0,86 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-toename van 120 tot 520 kton.



# 6 Glastuinbouwcluster

## 6.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een glastuinbouwbedrijvencluster waarbij in de energiehub er een gezamenlijk middentemperatuur (MT)-warmtenet wordt aangelegd. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 6.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus bestaat uit een cluster van glastuinbouwbedrijven met een mix van vruchtgroente-, sierteelt- en perkplantenbedrijven. Deze variëren sterk in omvang, van grote belichte kassen tot kleine teeltlocaties, wat leidt tot een breed scala aan elektriciteits- en warmteprofielen. Belichte teelten kennen een hoge elektriciteitsvraag, terwijl onbelichte teelten vooral warmte-intensief zijn.

In de huidige situatie wordt de warmtevraag met name ingevuld door warmtekrachtkoppelingen (wkk) en gasketels, waarvan de inzet de warmtevraag volgt. In deze analyse nemen we geen prijssturing mee. In de referentiesituatie worden richting 2050 meer elektrische warmtepompen aangeschaft, waardoor de inzet van de wkk's en gasketels ook afneemt. In de energiehub wordt daarentegen een collectief MT-warmtenet aangeschaft, die gevoed wordt door geothermische warmte. Hierdoor wordt een deel van de warmtevraag ingevuld vanuit het warmtenet waardoor de inzet van de wkk's en gasketels afneemt. We nemen aan dat richting 2050 een steeds groter deel van het geleverde gas uit groengas zal bestaan (zie Bijlage A.4). Als gevolg van de verminderde inzet van de wkk's en gasketels moeten de glastuinbouwbedrijven echter wel meer externe CO<sub>2</sub>-inkopen.

Tabel 16 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubscenario

|      | Uitgangspunten                                                                                       | Referentiescenario                                                                                                          | Energiehubscenario                                                                                                                                              |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Warmte – en CO <sub>2</sub> -vraag glastuinbouw wordt ingevuld door gebruik van gasboilers en wkk's. |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                 |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.                                             | Steeds meer glastuinbouwbedrijven stappen over op een warmtepomp.<br><br>CO <sub>2</sub> -tekorten worden extern ingekocht. | Er wordt een collectief MT-warmtenet aangelegd. Het merendeel van de warmtevraag wordt hierdoor geleverd. Het resterende deel wordt nog geleverd door de wkk's. |

|      | Uitgangspunten                                           | Referentiescenario                                                                                                        | Energiehubscenario           |
|------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose. |                                                                                                                           | Geen verandering t.o.v. 2030 |
| 2050 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose. | Alle glastuinbouwbedrijven zijn overgestapt op een warmtepomp.<br><br>Alle CO <sub>2</sub> -vraag wordt extern ingekocht. | Geen verandering t.o.v. 2030 |

## 6.2 Resultaten ruimtelijke analyse

Voor de glastuinbouw is in dit onderzoek aangesloten bij de sectoranalyse uit het eerdere rapport '[Ontwikkelingen energie-infrastructuur voor de glastuinbouw](#)' (CE Delft, 2024). Daarin zijn 60 glastuinbouwclusters en 30 solitaire gebieden geïdentificeerd, en is de haalbaarheid en rendabiliteit van verschillende verduurzamingsopties vergeleken. Per cluster is beoordeeld of de lokale ondergrond geschikt is voor geothermie en of er voldoende lokale warmtevraag aanwezig is om ten minste één geothermiedoublet te realiseren. Op basis hiervan is in 17 clusters geothermiepotentie vastgesteld, goed voor 5.940 van de circa 10.150 hectare glastuinbouwareaal in Nederland.

De casusopzet bestaat uit een fictieve doorsnede van het totaalareaal van overwegend verwarmde teelten binnen glastuinbouwclusters. Hiervoor zijn 18 tuinbouwbedrijven samengesteld met in totaal 42<sup>13</sup> hectare kassen. De bedrijven produceren een mix van vruchtgroenten, sierteelt, perkplanten en overige producten, zoals uitgangsmateriaal. Het merendeel maakt gebruik van een wkk als hoofdverwarmingsinstallatie; de overige bedrijven gebruiken een gasketel. Een deel van de bedrijven is belicht. Alle bedrijven hebben een CO<sub>2</sub>-vraag voor bemesting, zij het met sterk wisselende intensiteit.

In tegenstelling tot andere casussen is de variatie in vraagprofielen voor elektriciteit en warmte hier beperkt, omdat slechts een klein aantal glastuinbouwprofielen beschikbaar is. Door deze beperkte heterogeniteit wordt de gelijktijdigheid in de casus waarschijnlijk enigszins onderschat. De flexibiliteit van tuinders in de inzet van hun installaties – dankzij de combinatie van wkk en warmtebuffering – zorgt er echter voor dat dit in de verdere modellering een beperkt effect heeft. De inzet van installaties wordt voornamelijk gestuurd door prijsprikkels, die in het CEnergie-model zijn opgenomen bij de bepaling van de inzet van assets.

<sup>13</sup> Dit aantal ligt aan de onderkant van het aantal hectare wat doorgaans nodig is voor een investering in een geothermiedoublet.

## 6.3 Energetische uitwerking – casus

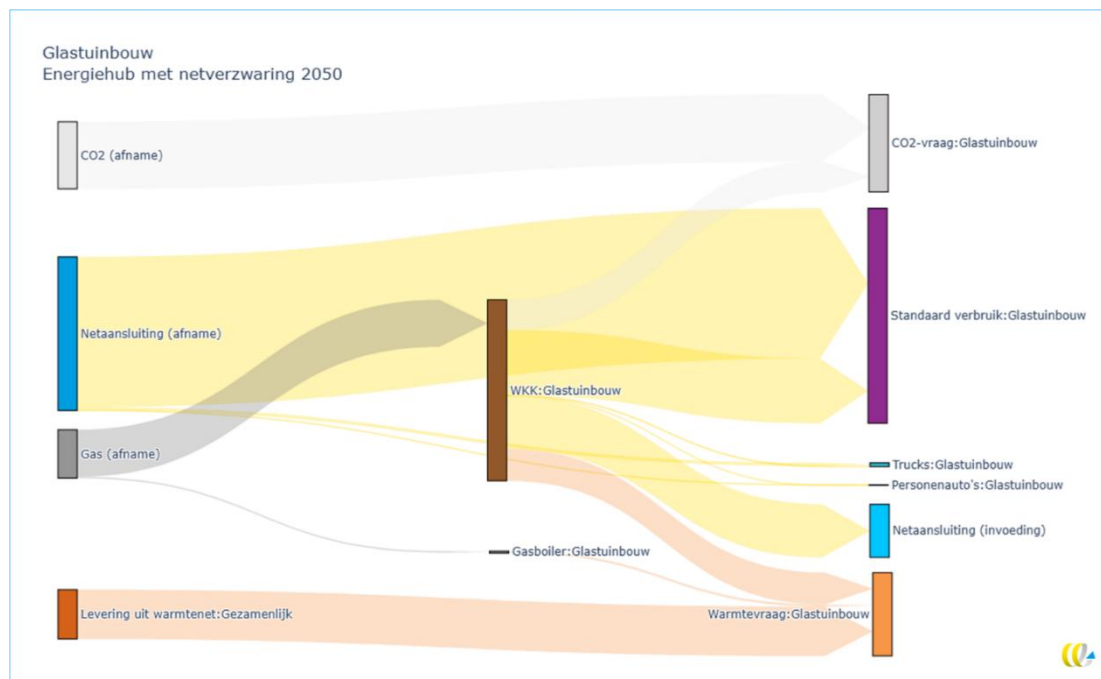
De totale warmtevraag van de glastuinbouwcluster bedraagt circa 79 GWh<sub>t</sub>/jaar. Deze vraag veronderstellen we constant over de jaren, maar wordt in referentie en energiehubs anders ingevuld in de komende jaren (zie Figuur 16).

In de referentie stappen de glastuinbouwbedrijven over op warmtepompen, waardoor de elektriciteitsvraag fors toeneemt; van 51 GWh/jaar in 2025 naar circa 72 GWh/jaar in 2030 t/m 2050. Vóór netverzwaring moet een deel van de warmtevraag nog worden ingevuld door de wkk's; in 2025 is het jaarlijkse gasverbruik circa 17 miljoen m<sup>3</sup>, en in 2030 is dit nog 4,1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

In tegenstelling tot de referentie, wordt in de energiehubs niet de overstap gemaakt naar warmtepompen, waardoor de elektriciteitsvraag nauwelijks toeneemt richting 2050. In plaats daarvan wordt er in 2030 een collectief MT-warmtenet aangelegd, waardoor ongeveer 2/3<sup>de</sup> deel van de warmtevraag wordt voorzien vanuit het warmtenet (zie Figuur 17). De resterende warmtevraag wordt grotendeels voorzien door wkk's, en een kleiner deel door gasboilers. Circa 1/3<sup>de</sup> deel van de totale CO<sub>2</sub>-vraag wordt door de wkk's geleverd.

In de huidige situatie voorzien glastuinbouwbedrijven in hun behoefte aan warmte, CO<sub>2</sub> en elektriciteit door inzet van wkk's. Hierdoor wordt de netbelasting momenteel voornamelijk bepaald door de invoeding vanuit deze wkk's, met een totaal vermogen van 44,4 MW. Omdat in de energiehubs de wkk's onderdeel blijven van het de warmtevoorziening, blijft richting 2050 deze invoedingspiek gelijk, ondanks dat de wkk's minder vaak ingezet worden. In de referentie worden de wkk's uitgefaseerd, en wordt de netbelasting gedomineerd door elektriciteitsafname, welke in 2050 34,2 MW bedraagt. Hieruit volgt dat netverzwaring in beide scenario's niet nodig is, doordat het net in de huidige situatie al is uitgelegd op de invoedingspiek.

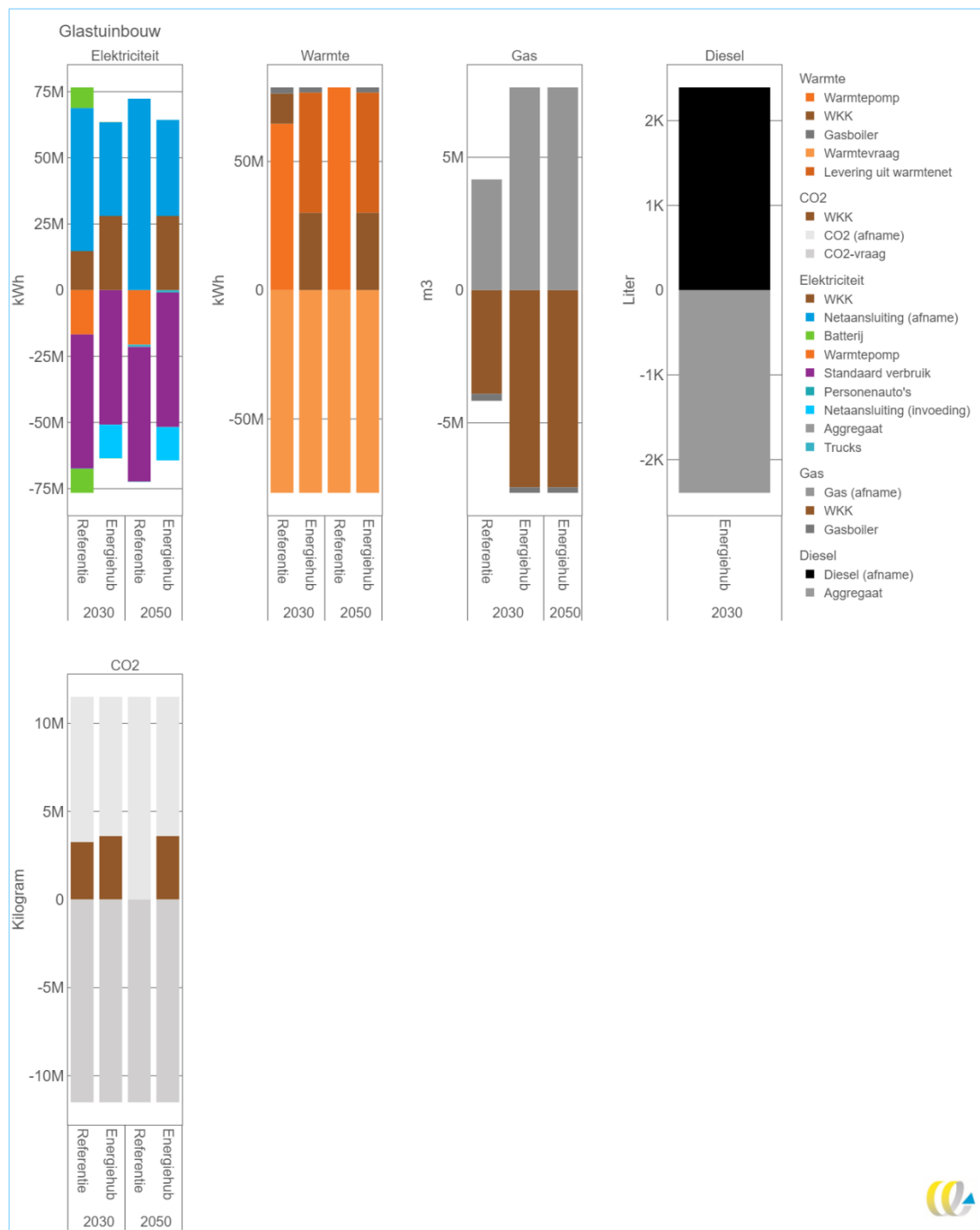
Figuur 16 – Stroomdiagram van elektriciteit, warmte, brandstoffen en gassen voor de energiehub in 2050. Dit is een samengevatte variant van de werkelijke doorrekening.



Tabel 17 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025  | 2030  | 2040  | 2050  |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 44,4↑ | 19,4↑ | 14,0↑ |       |
| Referentie - met netverzwaring    |       | 34,2↓ | 34,2↓ | 34,2↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 44,4↑ | 44,4↑ | 44,4↑ |       |
| Energiehub - met netverzwaring    |       | 44,4↑ | 44,4↑ | 44,4↑ |

Figuur 17 – Vraag en aanbod van elektriciteit, warmte, gas, diesel en CO<sub>2</sub> voor referentie en energiehub, voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



## 6.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 18 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus glastuinbouwcluster. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie positief uitvalt (+ € 25,7 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn enerzijds de baten in de vorm van uitgespaarde directe kosten voor **elektriciteitsafname** van het net (door het gebruik van elektrische warmtepompen in de referentie) en de **assets** (met name door uitgespaarde investeringen in warmtepompen). Anderzijds spelen ook de directe kosten van **aardgasverbruik** (in de energiehub wordt meer en langer gebruik gemaakt van wkk's) en externe kosten van **CO<sub>2</sub>-emissies** (gerelateerd aan het aardgasverbruik, maar ook aan de afname van CO<sub>2</sub>) een belangrijke rol.

Tabel 18 – Resultaat mkba-glastuinbouwcluster; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | 21,9                        | De energiehub investeert in de <b>geothermie-installatie</b> (- € 34,0 mln.) en de infrastructuur voor het <b>warmtenet</b> (- € 3,0 mln.) en maakt daarnaast ten opzichte van de referentie voor een langere periode gebruik van <b>wkk's</b> (- € 25,6 mln.). Daartegenover staan uitgespaarde investeringen in <b>warmtepompen</b> (+ € 80,9 mln.) en uitgespaarde investeringen in een groter vermogen aan <b>batterijen</b> (+ € 4,2 mln.).                                                                                                              |
| Elektriciteit (afname)                                          | 48,5                        | Over de gehele periode nemen de bedrijven in de referentie bijna twee keer zoveel elektriciteit van het net af (ruim 1.100 GWh t.o.v. ruim 600 GWh). De directe kosten hiervoor liggen in de referentie bijna 2,5 keer zo hoog (€ 84,0 mln. t.o.v. € 35,5 mln.). Vanaf 2030 gaan bedrijven in de referentie meer elektriciteit verbruiken door de inzet van elektrische warmtepompen, wat verder toeneemt na 2035 (wanneer netverzwaring heeft plaatsgevonden) en richting 2050 (wanneer alle bedrijven in de referentie zijn overgestapt op een warmtepomp). |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | -22,7                       | Het aardgasverbruik over de gehele periode ligt in de energiehub hoger dan in de referentie, voornamelijk omdat de energiehub voor een langere periode gebruik maakt van <b>wkk's</b> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | 4,5                         | Doordat de energiehub ten opzichte van de bedrijven in de referentie voor een langere periode gebruik maakt van wkk's, levert dit een baat op in de vorm van uitgespaarde directe kosten voor de <b>externe inkoop van CO<sub>2</sub></b> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Organisatiekosten                                               | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

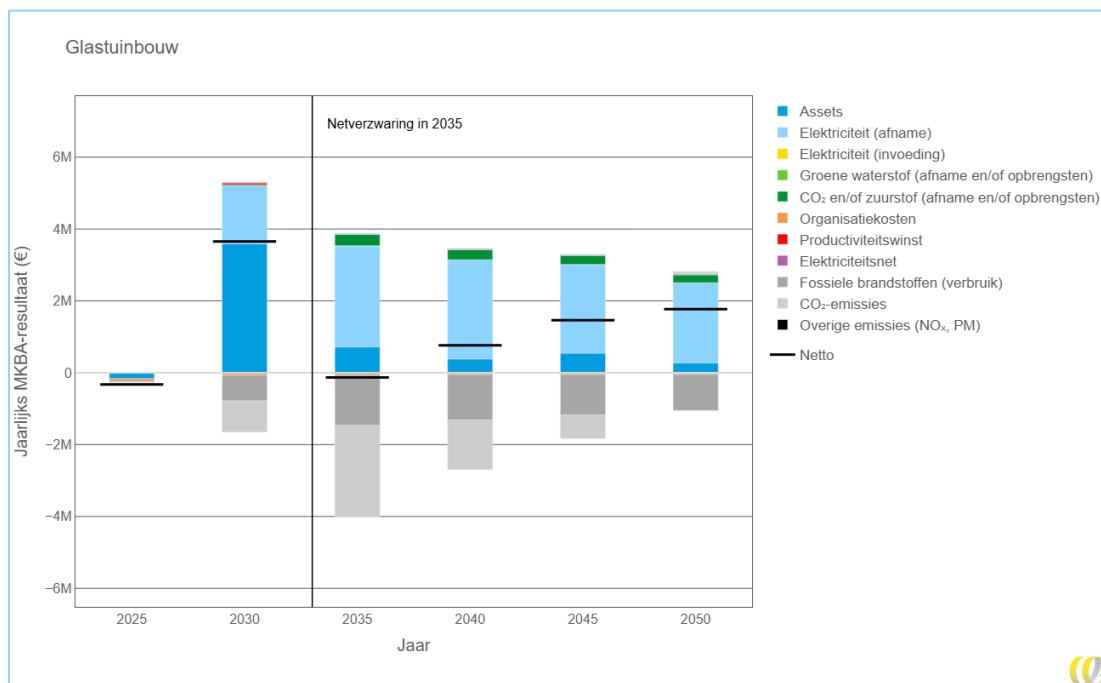
|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Productiviteitswinst                    | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Woningbouw                              |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Directe effecten</b>                 | <b>50,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Elektriciteitsnet                       | -1,9                        | In de energiehub blijft de netimpact gelijk tussen 2025 en 2050; in de referentiesituatie neemt de netimpact af in diezelfde periode. In de energiehub bepaalt de invoeding vanuit de wkk's de piekbelasting (de invoeding ligt hoger dan de afname van het net). In de referentie neemt de invoeding op het net over tijd af (wkk's worden minder gebruikt), maar neemt de afname van het net toe door het gebruik van elektrische warmtepompen (maar deze piek ligt onder de oorspronkelijke piek van invoeding). Zie Tabel 17 voor meer details. Relatief gezien ligt de <b>netimpact</b> van de energiehub dus hoger (- € 2,4 mln.).<br>Daartegenover staat echter dat door de hogere totale elektriciteitsafname van het net er baten ontstaan door vermeden <b>netverliezen</b> (+ € 0,5 mln.). |
| <b>Indirecte effecten</b>               | <b>-1,9</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| CO <sub>2</sub> -emissies               | -23,0                       | Door het hogere aardgasverbruik in de energiehub, vallen de daaraan gerelateerde milieukosten van CO <sub>2</sub> -uitstoot hoger uit (- € 34,7 mln.). Daartegenover wordt een deel van de CO <sub>2</sub> -uitstoot van de wkk's binnen de kassen gebruikt. Aangezien de energiehub voor een langere periode wkk's gebruikt en de kassen CO <sub>2</sub> nodig blijven hebben, levert de energiehub milieubaten op (+ € 7,3 mln.). Bovendien leveren de assets in de energiehub ten opzichte van de referentie minder emissies in de keten op (+ € 3,2 mln.) en zorgt ook de lagere elektriciteitsafname van het net voor een baat (+ € 1,1 mln.).                                                                                                                                                   |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>-23,0</b>                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Totaal</b>                           | <b>25,7</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 18, waarin te zien is dat het resultaat over tijd fluctueert. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Aardgas en CO<sub>2</sub>-verbruik.** Na netverzwaring in 2035 neemt het aardgasverbruik in de referentie af omdat de bedrijven vanaf dat moment meer gebruik kunnen maken van elektrische warmtepompen. Doordat de energiehub wel gebruik blijft maken van wkk's (om in te springen voor het warmtenet) stijgen de milieukosten; deze nemen over tijd af door de toenemende bijmenging van groengas. Anderzijds geldt ook voor de extra afgenomen CO<sub>2</sub> in de referentie dat de milieukosten over tijd afnemen door de inmenging van groengas.

- **Elektriciteitsafname.** Na netverzwaring neemt het elektriciteitsverbruik in de referentie substantieel toe doordat de elektrische warmtepompen meer ingezet kunnen worden. Dit leidt tot extra baten (in de vorm van vermeden kosten) voor energiehubs.
- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten. In 2030 investeert de energiehubs bijvoorbeeld in het warmtenet en de bedrijven in de referentie in warmtepompen. Vanaf 2035 maken de bedrijven in de referentie daarnaast geen gebruik meer van batterijen en aggregaten, terwijl de energiehubs dit wel blijft doen.

Figuur 18 –Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehubs. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehubs ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

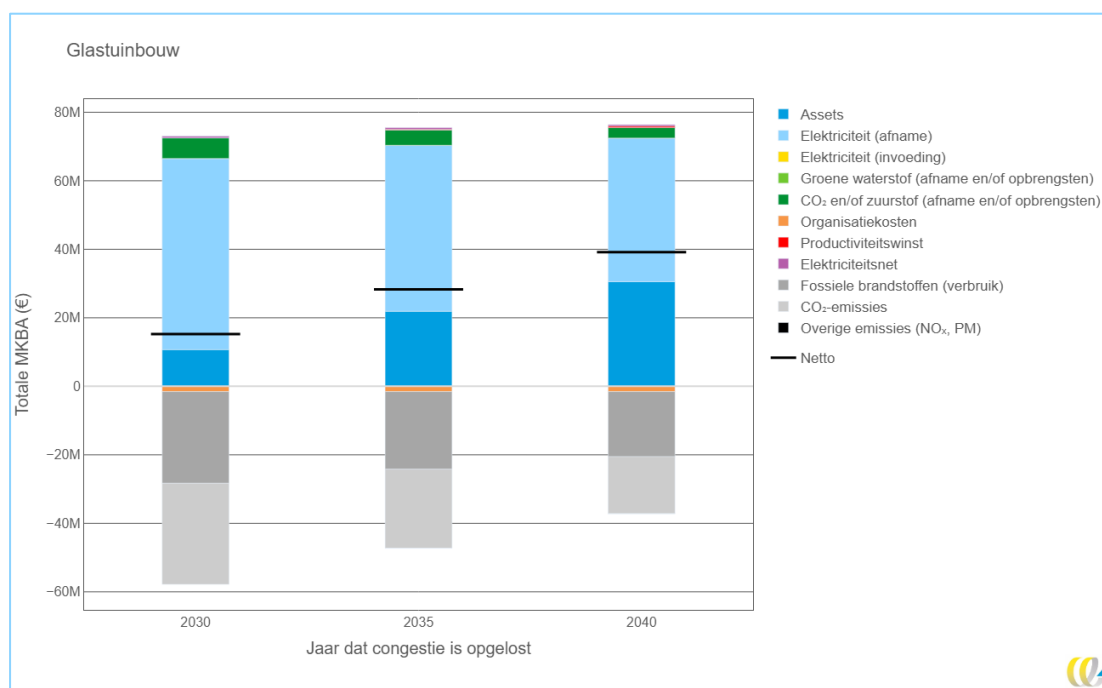
De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehubs positiever uitvalt. Dit is te zien in Figuur 19, waarin elke balk voor jaar  $x$  waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).



De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Assets:** Naarmate netcongestie later oplost, maken de bedrijven in de referentie langer gebruik van wkk's en individuele batterijen (leidend tot hogere directe kosten en dus baten voor de energiehub), maar korter van elektrische warmtepompen (leidend tot lagere baten). Netto nemen de baten van uitgespaarde investeringen toe voor de energiehub naarmate netcongestie later oplost.
- **Aardgasverbruik:** Naarmate netcongestie later oplost, blijven de bedrijven in de referentie langer gebruikmaken van wkk's, wat leidt tot relatief lagere directe kosten en milieukosten voor de energiehub.
- **Elektriciteitsafname:** Doordat de bedrijven in de referentie elektrische warmtepompen minder kunnen inzetten wanneer netcongestie later oplost, nemen de baten (in de vorm van uitgespaarde elektriciteitsbaten) af voor de energiehub.

Figuur 19 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 6.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal bedrijven en het aantal hectare. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 69 tot 157. De factor 69 komt overeen met het huidige elektriciteitsverbruik en factor 157 met het huidige gasverbruik. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus 28 miljoen euro; landelijk opgeschaald 2,2 tot 4,4 miljard euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 24 MW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 1,9 tot 3,8 GW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies toe met 104 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-toename van 7,2 tot 16,5 Mton.

# 7 RWZI en bestaande buurt

## 7.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gebied met een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) en nabijgelegen gebouwde omgeving, waarbij in de energiehub er een gezamenlijk MT-warmtenet wordt aangelegd. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 7.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

Voor deze casus gaan we uit van de RWZI in Zwolle, waarvoor data is aangeleverd over de huidige en toekomstige energie-, biogas- en zuurstofvraag door WBO Delta. De RWZI-locaties met de meeste energiehubpotentie zijn locaties waar biogas geproduceerd kan worden en zuurstof vereist is, waardoor combinatie met elektrolyse mogelijk is. De Unie van Waterschappen heeft 65 RWZI-locaties in Nederland aangeleverd met bijbehorende informatie die aan die voorwaarden voldoen.

In de energiehub wordt vanaf 2030 een elektrolyser aangeschaft bij de RWZI-locatie, waarvan de geproduceerde zuurstof direct wordt gekoppeld aan de zuurstofvraag. Omdat er geen lokale vraag is naar waterstof, wordt deze verkocht. Elektrolyse vindt plaats op basis van een *power-purchase-agreement* (PPA) met wind-op-zee, en in lijn met EU-verordening. In de referentie is er geen elektrolyser en wordt alle zuurstof extern ingekocht.

In de energiehub wordt ook een warmtenet aangelegd, waardoor de restwarmte uit de elektrolyse een deel van de warmtevraag van de nabijgelegen bedrijven of woningen kan voorzien. In de referentie worden de gebouwen met warmtepomp van warmte voorzien.

Daarnaast vindt er ook biogasproductie plaats op de RWZI-locatie; het biogas kan gebruikt worden in de wkk. In de referentie is dit voor eigen elektriciteitsverbruik, maar in de energiehub kan dit ook voor het balanceren van lokale vraag en aanbod ingezet worden.

Figuur 20 – Overzichtsfoto van RWZI Zwolle



Tabel 19 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubs scenario

|      | Uitgangspunten                                                                                    | Referentie scenario                                                                                                 | Energiehubscenario                                                                                                                                                                        |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | 34 miljoen Nm <sup>3</sup> groengas productie en wkk aanwezig. Gasketel voor verwarming woningen. |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                           |
| 2030 | Elektriciteitsverbruik RWZI 145% t.o.v. 2025.                                                     | Individuele batterijen en aggregaten voor bedrijven als oplossing congestie.<br><br>Hybride warmtepomp in woonwijk. | Gezamenlijke aggregaat en batterij.<br><br>Aanschaf van elektrolyser.<br><br>MT-warmtenet in woonwijk met restwarmte elektrolyser, aangevuld met aquathermie op het influent van de RWZI. |
| 2040 | Elektriciteitsverbruik RWZI 240% t.o.v. 2025.                                                     | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring).                                                          | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                                                                                                                       |
| 2050 | Elektriciteitsverbruik RWZI 330% t.o.v. 2025.                                                     | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.                                                              | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                                                                                                                |

## 7.2 Resultaten ruimtelijke analyse

In 2023 waren er 66 RWZI-locaties in Nederland met biogasproductie en -toepassing. We hebben onderzocht hoeveel van deze RWZI's binnen een redelijke afstand van gebouwde omgeving en bedrijventerreinen liggen. Daarbij is gekeken naar de afstand tot de gebouwde omgeving (CBS-definitie: matig stedelijke tot zeer sterk stedelijke buurten) en tot bedrijventerreinen (IBIS).

Tabel 20 – Afstand van RWZI's tot gebouwde omgeving en bedrijventerreinen

| Afstand | Aantal RWZI's binnen afstand met gebouwde omgeving | % van totaal | Aantal RWZI's binnen afstand met bedrijventerreinen | % van totaal |
|---------|----------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------|--------------|
| < 100 m | 20                                                 | 30%          | 29                                                  | 44%          |
| < 500 m | 32                                                 | 48%          | 37                                                  | 56%          |
| < 1 km  | 39                                                 | 59%          | 51                                                  | 77%          |
| < 2 km  | 53                                                 | 80%          | 57                                                  | 86%          |

Voor de koppeling van een warmtebron aan een afzetgebied geldt dat een korte afstand de voorkeur heeft: hoe minder transport nodig is, hoe eenvoudiger en goedkoper de infrastructuur. Bij grotere afstanden wordt het tracé vaak complexer door obstakels en nemen de kosten toe door de extra leidinglengte. Toch komen transportafstanden van enkele kilometers in de praktijk regelmatig voor.

In een potentiëstudie van [Syntraal \(2024\)](#) is voor grotere RWZI's uitgegaan van een zoekgebied van minimaal 2 tot 5 km. Uitgaande van een afstand van 2 km schatten we dat bij circa 55 RWZI's met biogasproductie restwarmtelevering aan de gebouwde omgeving voorstelbaar is. RWZI Zwolle, die in deze casus als referentie dient, produceert en consumeert ongeveer 2,5% van het biogas (2,5 van 105 Nm<sup>3</sup>) en 0,7% van de elektriciteit (4,6 van 692 GWh). Deze eigenschappen zijn gebruikt voor de extrapolatie van het mkba-resultaat.

De woonwijk in de casus is samengesteld op basis van buurten die in de [Actualisatie Startanalyse aardgasvrije buurten 2025 van PBL](#) zijn aangemerkt als robuust geschikt voor een MT-warmtenet (strategie S2). Als criterium is een kostenverschil van minimaal € 250 per weq per jaar gehanteerd ten opzichte van de volgende goedkoopste strategie. Verder is gefilterd op buurten met minimaal 100 weq; industrie- en bedrijventerreinen en niet-stedelijke buurten zijn verwijderd. Dit resulteerde in 711 buurten met samen 787.000 weq. Aangrenzende buurten zijn vervolgens samengevoegd, waarbij de mediane buurt uitkomt op circa 4.750 woningen en 750 weq aan utiliteit.

### Uitgangspunten casussamenstelling

De uitgangspunten van de RWZI-hub zijn als volgt:

- **RWZI:** de aannames zijn aangeleverd door WBO Delta en de Unie van Waterschappen. Uitgegaan is van de RWZI Zwolle, die wordt beschouwd als representatief voor het type RWZI dat in potentie een energiehub kan vormen. De aannames van het archetype zijn gebaseerd op deze fysieke casus en komen daarom overeen met de waarden in Tabel 19.
- **Woonwijk:** een gemiddelde woonwijk, in lijn met de casus gebouwde omgeving (Hoofdstuk 13), met MT-restwarmtelevering. De samenstelling is:
  - **Woningen:** 4.750, waarvan bijna 2.000 meergezinswoningen. De overige woningen zijn een mix van rijwoningen, hoekwoningen en enkele vrijstaande woningen. Het isolatieniveau is gemengd, overwegend matig tot redelijk geïsoleerd.
  - **Utiliteit:** 750 weq<sup>14</sup>, bestaande uit algemene voorzieningen zoals kantoren, winkels, onderwijs, zorg, logies en bijeenkomstfuncties.

## 7.3 Energetische uitwerking – casus

Van 2025 tot 2050 is de totale warmtevraag constant, en bedraagt circa 53 GWh<sub>t</sub>/jaar. De elektriciteitsvraag groeit van 36,5 GWh/jaar in 2025 naar circa 90 GWh/jaar in 2050, wat voornamelijk een gevolg is van de sterke toename in elektriciteitsverbruik van de RWZI. In de energiehub wordt het grootste deel van de warmte geleverd door het warmtenet, terwijl in de referentie wordt dit gedaan door individuele (hybride) warmtepompen; hierdoor neemt de elektriciteitsvraag sterker toe in de referentie.

De elektrolyser kent een vermogen van 2.130 kW, en heeft zo'n 5.200 vollasturen in 2050. Na netverzwaring, is de elektriciteitsvraag van de elektrolyser 7 GWh/jaar in 2040 en 11 GWh/jaar in 2050. Deze toename is met name een gevolg van de hogere gezamenlijke contractvermogens die de energiehub in deze jaren kan afsluiten, waardoor de elektrolyser minder vaak beperkt hoeft te worden. Toch is de vraag maar een relatief klein deel is van de totale elektriciteitsvraag door de grote basisvraag van de RWZI.

Daarnaast wordt een deel van de restwarmte uit de elektrolyser gebruikt voor het voeden van het warmtenet. De geproduceerde zuurstof wordt direct gebruikt door de RWZI waardoor er minder externe zuurstof ingekocht hoeft te worden.

Voor congestie is opgelost wordt een aggregaat gerealiseerd om in de elektriciteitsvraag te voorzien. In 2030 bedraagt het totaal benodigde vermogen van de aggregaten in de referentie circa 1,1 MW, terwijl voor de energiehub dit 1,6 MW is. De aggregaten in de referentie leveren circa 2,5 keer meer elektriciteit dan in situatie met energiehub, namelijk

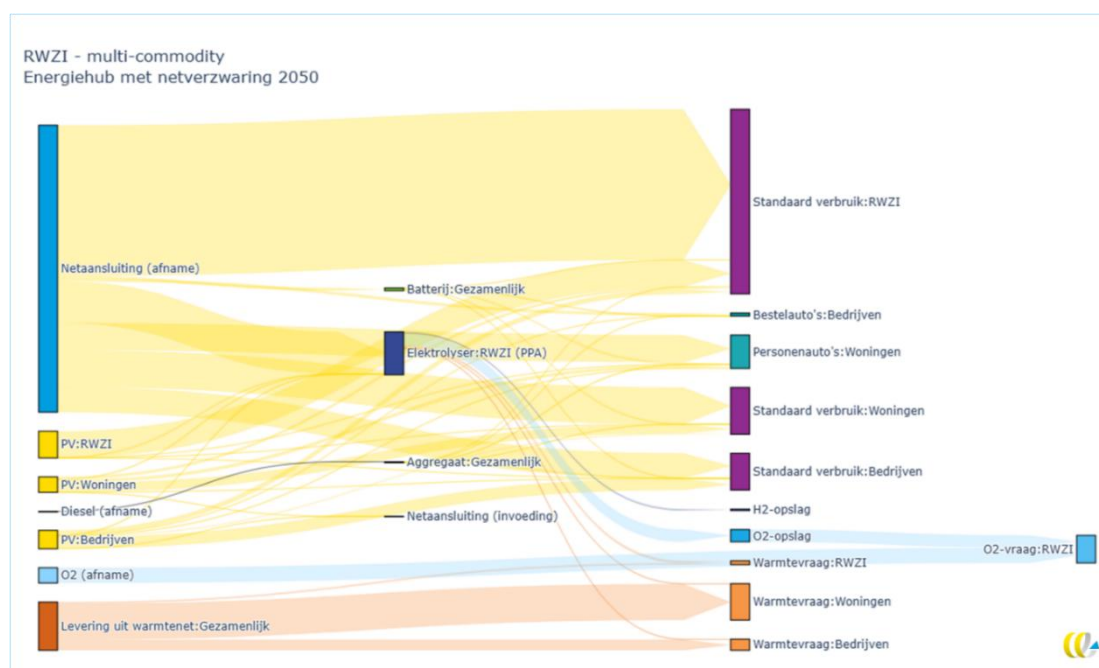
---

<sup>14</sup> Bij 130 m<sup>2</sup>/weq.

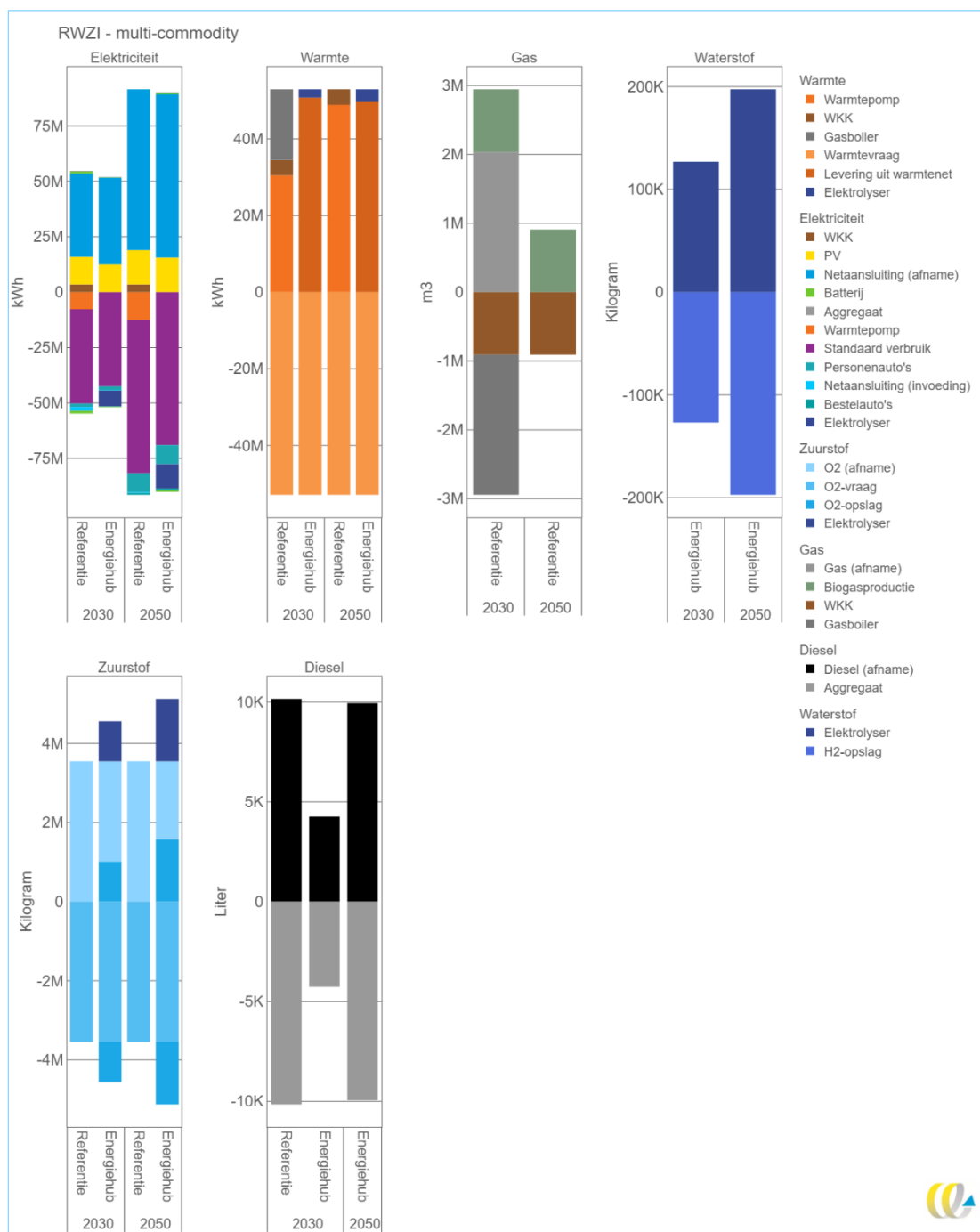
250 MWh/jaar en 105 MWh/jaar respectievelijk. In 2030 is de inzet dus nog beperkt, maar door de verwachte doorgroei richting 2040 neemt de inzet van het aggregaat sterk toe indien netverzwaring nog niet heeft plaatsgevonden; namelijk 8,8 GWh/jaar in de referentie en 6,4 GWh/jaar in de energiehub. Na netverzwaring, zijn er in de referentie geen aggregaten meer nodig, en voorziet in 2050 in de energiehub het aggregaat nog slecht 250 MWh/jaar aan elektriciteit.

Voor netverzwaring wordt er zowel in de referentie als in de energiehub geïnvesteerd in batterijen. In 2030 is in de referentie de totaal opgestelde batterijcapaciteit 7,3 MWh, en in de energiehub 2,2 MWh. De lagere batterijcapaciteit in de energiehub is ook een gevolg van de lagere elektriciteitsvraag doordat de warmtevraag wordt voorzien door het warmtenet, terwijl in de referentie de warmtevraag wordt ingevuld door warmtepompen.

Figuur 21 – Stroomdiagram van elektriciteit, warmte, brandstoffen en gassen voor de energiehub in 2050. Dit is een samengevatte variant van de werkelijke doorrekening.



Figuur 22 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en gassen voor referentie en energiehubs, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050





Voor de verschillende zichtjaren is de absolute netimpact bepaald, wat voor deze casus in elke situatie de afnamepiek is. In het eindbeeld, waarvoor de netbeheerder zal verzwaren, is er voor de hele casus (woonwijk en bedrijventerrein) zo'n 17 MW vereist in de referentie. Een verdriedubbeling van de berekende netimpact in 2025, namelijk 5,9 MW. Met de energiehubconfiguratie kan dit gereduceerd worden tot 10 MW, oftewel een reductie van 43%.

Tabel 21 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030  | 2040  | 2050  |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 5,9↓ | 6,9↓  | 6,9↓  |       |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 12,5↓ | 14,5↓ | 17,0↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 5,9↓ | 5,9↓  | 5,9↓  |       |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 5,9↓  | 8,5↓  | 10,0↓ |

## 7.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 22 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus van de RZWI energiehub. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie positief uitvalt (+ € 31,6 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn de vermeden **CO<sub>2</sub>-emissies** (zowel directe emissies als de emissies die ontstaan in de keten), de **baten van de elektrolyser** (opbrengsten groene waterstof en uitgespaarde kosten zuurstof) en het feit dat de **elektriciteitsafname** van het net in de energiehub op gunstigere momenten plaatsvindt.

Tabel 22 – Resultaat mkba-archetype 5 (RWZI energiehub); effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|        | Energiehub vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets | -3,2                     | In de energiehub zijn er hoge directe kosten voor de aanleg en onderhoud van het warmtenet (- € 68 mln.). Daar staan echter uitgespaarde investeringen in elektrische warmtepompen (+ € 66 mln.) en gasboilers (+ € 8 mln.) tegenover die in de referentie worden aangeschaft en gebruikt. In de energiehub wordt tevens geïnvesteerd in een elektrolyser (- € 9 mln.), wat ervoor zorgt dat het totaal aan directe kosten voor assets negatief uitvalt voor de energiehub. <sup>15</sup> |

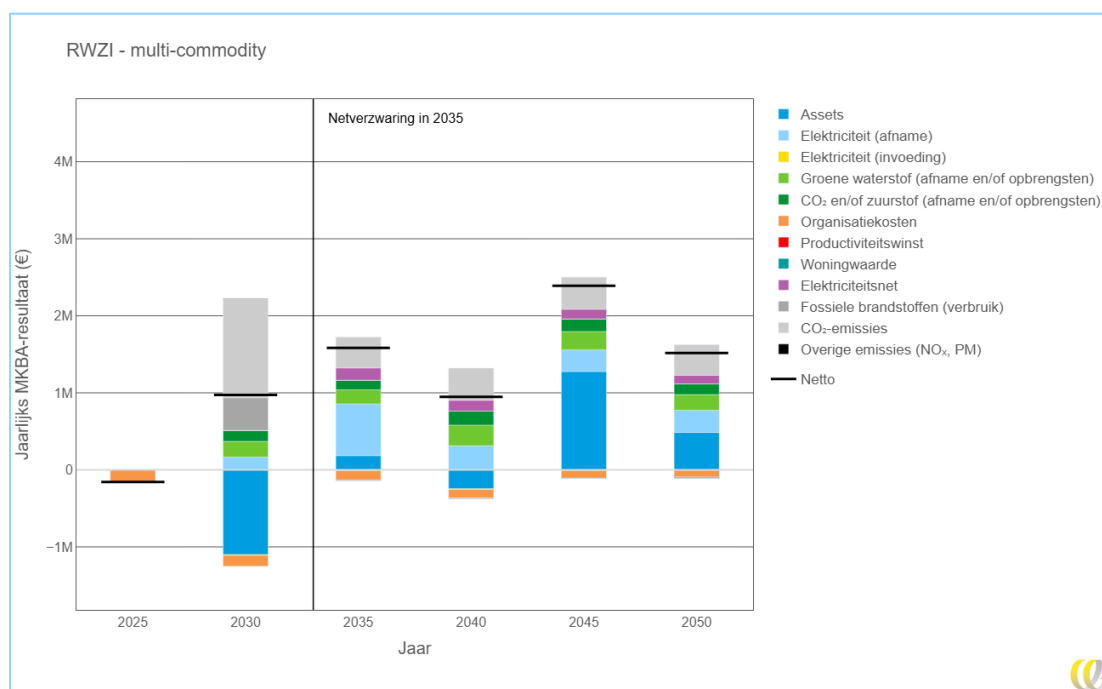
<sup>15</sup> Naast deze directe kosten, zijn er ook investeringen in aggregaten, batterijen, zon-pv en een wkk. De verschillen in directe kosten tussen de energiehub en referentie zijn relatief klein (maximaal € 1 mln.).

|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektriciteit (afname)                                          | 7,1                         | In de energiehub ontstaan ten opzichte van de referentie baten door uitgespaarde kosten voor elektriciteitsafname van het net. Hoewel de <i>hoeveelheid</i> elektriciteit die wordt afgenomen in de energiehub wel hoger is dan in de referentie (met name door de elektrolyser), zijn – met het oog op fluctuerende uurprijzen – de <i>momenten</i> waarop de elektriciteit wordt afgenomen over het algemeen gunstiger dan in de referentie. |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -0,2                        | In de referentie wordt in de periode 2025-2050 meer zon-pv ingevoerd op het elektriciteitsnet (ruim 12 GWh), wat ten opzichte van de energiehub zorgt voor beperkte extra opbrengsten doordat de invoeding typisch plaatsvindt op momenten met veel zon en dus lage prijzen.                                                                                                                                                                   |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | 2,0                         | In de energiehub ontstaan baten door de inzet van de gasboiler in de referentie op momenten dat niet genoeg elektriciteit beschikbaar is om de elektrische warmtepomp in te zetten.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | 4,5                         | De elektrolyser in de energiehub zorgt voor opbrengsten uit de verkoop van groene waterstof.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | 3,1                         | De energiehub bespaart kosten voor de afname van zuurstof, doordat de zuurstof die in de elektrolyser wordt geproduceerd kan worden afgenomen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Organisatiekosten                                               | -3,1                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Woningbouw                                                      | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>16,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Elektriciteitsnet                                               | 2,1                         | In de energiehub ontstaan baten doordat de lagere netimpact ten opzichte van de referentie leidt tot uitgespaarde kosten van netinvesteringen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>2,1</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | 12,9                        | Er ontstaan baten voor de energiehub door vermeden milieukosten van directe emissies van het aardgasverbruik van de gasboiler in de referentie (+ € 5 mln.) en een netto positief effect van emissies in de keten van de assets (+ € 8 mln.). De ketenemissies van de elektrische warmtepomp (+ € 7 mln.) en gasboiler (+ € 4 mln.) zijn hoger dan die voor het warmtenet en de elektrolyser in de energiehub (- € 2,7 mln.).                  |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM)                         | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Externe effecten</b>                                         | <b>12,9</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Totaal</b>                                                   | <b>31,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 23. Vanaf 2030 kennen alle zichtjaren een positief resultaat. De grootste verschuivingen zien we in:

- **CO<sub>2</sub>-emissies.** Voordat netcongestie is opgelost en netverzwaring plaatsvindt, wordt de gasboiler substantieel gebruikt, wat leidt tot milieukosten in de referentie. Na netverzwaring kan de elektrische warmtepomp vaker worden ingezet en vervallen de milieukosten.
- **Elektriciteitsafname.** Doordat de elektrische warmtepomp in de referentie meer wordt ingezet, nemen ook de directe kosten voor elektriciteitsafname van het net toe.
- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten. In 2030 investeert de energiehub bijvoorbeeld in het warmtenet (wat een grotere investering is dan die in elektrische warmtepompen in hetzelfde jaar). In 2045 wordt in de energiehub geherinvesteerd in de warmtepompen.

Figuur 23 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van energiehubs lager uitvalt. Dit is te zien in Figuur 24, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

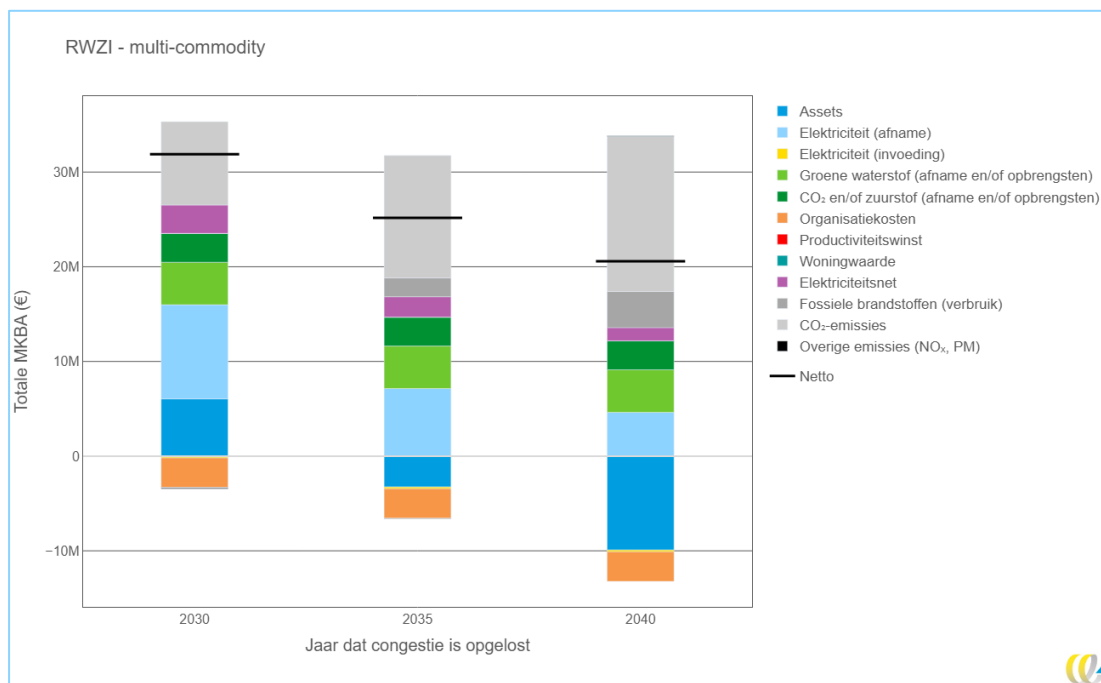
De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Aardgasverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, blijven gasboilers langer en vaker ingezet worden. Met name in de referentie – waar gasboilers worden ingeschakeld in aanvulling op de elektrische warmtepompen – leidt dit tot substantieel extra aardgasverbruik en daaraan gerelateerde CO<sub>2</sub>-emissies. Dit zijn de belangrijkste redenen voor de verschuivingen in de donker- en lichtgrijze balken in Figuur 24.
- **Aanschaf elektrische warmtepomp.** Naarmate netcongestie later oplost, kunnen bedrijven pas later een grotere aansluiting krijgen en investeren bedrijven in de referentie daardoor later in een elektrische warmtepomp met een hoger vermogen.<sup>16</sup> De grotere investeringen die hier in de referentie mee gemoeid gaan, zorgen voor extra baten voor de energiehubs (waarin niet wordt geïnvesteerd in warmtepompen) die hoger zijn wanneer netcongestie eerder oplost. Wanneer netcongestie in 2030 oplost, resulteren de directe kosten voor assets in een netto baat voor de energiehubs van + € 6 miljoen; wanneer netcongestie in 2040 oplost, resulteert dit in netto kosten van - € 10 miljoen voor de energiehubs.
- **Elektriciteitsafname van het net.** Naarmate netcongestie eerder oplost, neemt de energiehubs relatief gezien steeds meer elektriciteit af van het net doordat de elektrolyser steeds meer kan worden aangezet. Dit weegt zwaarder dan de extra elektriciteit die in de referentie van het net wordt afgenomen voor de inzet van de elektrische warmtepomp.

---

<sup>16</sup> Merk op dat het moment en het vermogen voor de investeringen in elektrische warmtepompen is gebaseerd op een aangenomen adoptiegraad en het vermogen dat zij aan kunnen sluiten. We hebben geen businesscases berekend.

Figuur 24 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 7.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoléerd op basis van het energieverbruik van de RWZI in de casus en de schatting dat er in Nederland circa 55 RWZI's zijn met vergelijkbare potentie om met biogas, een elektrolyser en restwarmtelevering een energiehub te vormen. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 42 (biogasverbruik) tot 149 (elektriciteitsverbruik). Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus 25,1 miljoen euro; landelijk opgeschaald 1.400 tot 3.800 miljoen euro.
- **Warmtelevering:** theoretische potentie van 210.000 tot 640.000 weq. Door toevoeging van restwarmte uit elektrolyse bovenop aquathermie ligt dit hoger, maar blijft dit in lijn met eerdere schattingen van aquathermiepotentie bij RWZI's.
- **Elektrolysevermogen:** theoretische potentie van 110 tot 320 MW.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 7,0 MW vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 350 tot 1.050 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 44 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 2,2 tot 6,7 Mton.

# 8 Industrieel bedrijventerrein – elektrificatie

## 8.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een industrieel bedrijventerrein waarbij de verduurzaming van zowel de mobiliteit als (industriële) warmteprocessen zoveel mogelijk wordt gerealiseerd door elektrificatie. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 8.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus bestaat uit een bedrijventerrein die wordt gekenmerkt door een sterke aanwezigheid van industrie, met één dominante grootverbruiker. In deze casus is gekozen voor een grote zuivelfabriek. Deze fabriek heeft een hoge elektriciteits- en warmtevraag, waardoor het een bepalende factor is in de totale energievraag van het terrein. Daarnaast zijn er diverse andere industriële bedrijven (auto-industrie, meubelfabriek, grafische industrie, overige industrie), logistieke partijen (detailhandel, groothandel, opslag, autohandel) en een reeks dienstverlenende bedrijven.

In de huidige situatie wordt de warmtevoorziening grotendeels ingevuld door gasketels, terwijl in de referentiesituatie richting 2030–2050 (hybride) warmtepompen worden ingezet. Voor de grote zuivelfabriek wordt zowel in de referentie als in de energiehubs geïnvesteed in een bodemwarmtepomp vanaf het jaar 2040.

In de huidige situatie zijn al zonnepanelen aanwezig, maar er is nog aanzienlijk potentieel voor extra zon-pv, die richting 2050 steeds meer wordt benut. Ook de elektrificatie van mobiliteit draagt bij aan een stijgende elektriciteitsvraag: richting 2050 komen er steeds meer elektrische bestelauto's, personenauto's en enkele trucks bij.

Tabel 23 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubs scenario

|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                   | Referentiescenario                                         | Energiehubs scenario                                                                       |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050.<br><br>Gasketel voor warmte.                                                                         |                                                            |                                                                                            |
| 2030 | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring). | Congestie, geen verhoging van het GTV mogelijk.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat. |
| 2040 | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring). | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                        |
| 2050 | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.     | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                 |

## 8.2 Resultaten ruimtelijke analyse

### Ruimtelijke analyses industriebedrijven

Voor dit onderzoek kijken we expliciet naar industrie buiten de vijf industrieclusters. Informatie over de industrie is op twee manieren ruimtelijk verzameld. Allereerst is gebruik gemaakt van de IBIS-bedrijventerreinendataset, waarbij terreinen die zijn gekwalificeerd als *'Elektriciteit intensieve industrie'* en/of *'Procesindustrie met hoge warmtevraag'* zijn meegenomen. Hieruit volgen 283 industriële bedrijventerreinen. Verder hebben we de MIDDEN-database<sup>17</sup> van PBL/TNO gecombineerd met de bedrijven in de publicaties van de [provinciale CES6](#) analyses. In deze publicaties staan namen van aangesloten

<sup>17</sup> <https://www.pbl.nl/en/middenweb/the-database>

bedrijven en bedrijfslocaties. We hebben een 'PCES6-database' gemaakt door deze gegevens te koppelen aan adressen met coördinaten en industriebranches. Merk op dat er geen PCES-publicaties zijn voor Utrecht, Zeeland en Flevoland, waardoor industrie in deze provincies ontbreekt in onze dataset. In Utrecht en Flevoland is relatief weinig industrie gevestigd, de industrie in Zeeland is voor een groot deel onderdeel van CES Zeeland/West-Brabant.

In de MIDDEN-database zitten 251 installaties, waarvan 122 CES6. In onze PCES6 database zitten nog eens 290 bedrijven. Een groot deel hiervan overlapt met de MIDDEN CES6-locaties. De gecombineerde dataset resulteert in 321 industriële bedrijven. In Tabel 24 de onderverdeling naar type bedrijf.

Tabel 24 – Aantallen industriebedrijven naar type in gecombineerde dataset

| Industrietype                          | Aantal |
|----------------------------------------|--------|
| Afval- en recyclingsector              | 16     |
| Levensmiddelenindustrie                | 117    |
| Chemische industrie                    | 28     |
| Energieproductie                       | 8      |
| Metallurgische industrie               | 6      |
| Papier- en kartonindustrie             | 25     |
| Niet-metaalhoudende minerale industrie | 20     |
| Rubber- en kunstindustrie              | 15     |
| Glasindustrie                          | 7      |
| Keramische industrie                   | 38     |
| Olie- en gasexploratiebedrijven        | 2      |
| Metaal- en elektrotechnische industrie | 15     |
| ICT-sector                             | 6      |
| Textielindustrie                       | 5      |
| Onbekend                               | 13     |

### CES6-industrie met elektrificatiehub-potentieel

Voor de elektrificatiecasus is naar een subset van bedrijven gekeken waarbij elektrificatie van de warmtevraag door middel van warmtepompen en/of e-boilers waarschijnlijk haalbaar is. Wij hebben hiervoor op basis van de [Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050](#) van PBL de subset van bedrijven levensmiddelindustrie en papier- en kartonindustrie aangenomen. Voor de 142 resulterende bedrijven is een afstandsanalyse uitgevoerd tussen het bedrijf en nabijgelegen bedrijventerreinen. Hieruit volgt dat 105 van de bedrijven gelegen zijn op of nabij bedrijventerreinen met andere bedrijvigheid.

### Uitgangspunten casussamenstelling

De warmtevraag van het industriebedrijf in deze casus is leidend en komt neer op 5 miljoen Nm<sup>3</sup> per jaar. De eigenschappen zijn gebaseerd op de casus papierfabriek uit de



studie [Tijdsafhankelijke nettarieven grootverbruikers \(2025\)](#). De samenstelling van het nabijgelegen bedrijventerrein is verder gebaseerd op kenmerken in de IBIS-dataset van industriële terreinen. Hieruit volgt een terrein met 19 bedrijven actief in onder andere overige, minder energie-intensieve industrie, logistiek en dienstverlening.

## 8.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van het bedrijventerrein bedraagt circa 59,5 GWh<sub>t</sub>/jaar. Deze vraag blijft constant over de jaren, maar wordt door verduurzaming van de warmtevraag ingevuld door (hybride) warmtepompen.

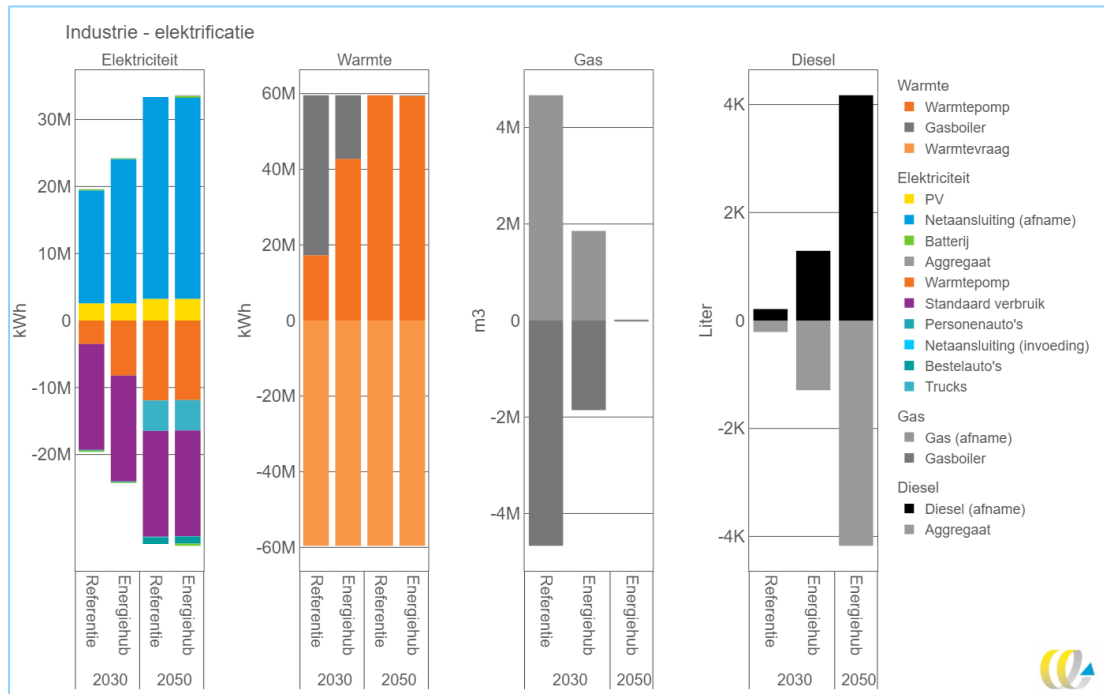
De elektriciteitsvraag groeit sterk door zowel de elektrificatie van de mobiliteit als de warmtevoorziening: van circa 15,8 GWh/jaar in 2025 naar ruim 33 GWh/jaar in 2050. In zowel de referentiesituatie als de energiehubs is de elektriciteitsafname uit het net in 2025 circa 13,5 GWh/jaar. In 2030, tijdens netcongestie, is de energiehubs door middel van het gezamenlijk transportvermogen in staat om meer elektriciteit uit het net af te nemen dan in de referentie, namelijk 21,5 GWh/jaar, terwijl dit voor de referentie 16,8 GWh/jaar bedraagt (zie Figuur 25).

In de referentiesituatie investeren bedrijven afzonderlijk in batterijen, wat resulteert in een totale batterijcapaciteit van 6,9 MWh op het terrein in 2030, vóór netverzwaring. In de energiehubs is de totale batterijcapaciteit daarentegen aanzienlijk kleiner, namelijk circa 0,5 MWh. Ondanks de grotere capaciteit in de referentie, leveren de batterijen gezamenlijk slechts 140 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit in de energiehubs 100 MWh/jaar is. Opvallend is dat de batterij in de energiehubs beter wordt benut dan in de referentie. In de referentie sturen meerdere individuele batterijen autonoom, waarbij elk bedrijf rekening moet houden met het eigen transportvermogen; in de energiehubs wordt de batterij collectief ingezet en optimaal aangestuurd.

In de referentiesituatie in 2030 (vóór netverzwaring) voorzien de aggregaten circa 5 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit 32 MWh/jaar is in de energiehubs. Het benodigde vermogen in beide situaties is 60 kW. In 2050, na netverzwaring, springt een aggregaat met een vermogen van 1,3 MW nog af en toe bij om de energiehubs te voorzien op elektriciteit. Dit bedraagt circa 104 MWh op jaarbasis; een klein percentage van de totale elektriciteitsvraag.

De piekbelasting wordt door de energiehubs duidelijk verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens niet verhoogd (kunnen) worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehubs voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 6,5 MW in de referentie tegenover 4,7 MW (-28%) in de energiehubs.

Figuur 25 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en gassen voor referentie en energiehuis, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Tabel 25 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehuis. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                 | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring  | 2,9↓ | 3,0↓ | 3,1↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring     |      | 4,7↓ | 5,7↓ | 6,5↓ |
| Energiehuis - zonder netverzwaring | 2,9↓ | 2,9↓ | 2,9↓ |      |
| Energiehuis - met netverzwaring    |      | 2,9↓ | 4,1↓ | 4,7↓ |

## 8.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 26 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus elektrificatie industrieel bedrijventerrein. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie positief uitvalt (+ € 3,5 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn enerzijds baten in de vorm van vermeden **CO<sub>2</sub>-emissies** (voornamelijk gerelateerd aan het aardgasverbruik) en **aardgasverbruik** (inzet gasboilers) en anderzijds de **organisatiekosten** (de personele inzet voor realisatie van de energiehuis) en de directe kosten voor de **assets**.

Tabel 26 – Resultaat mkba van elektrificatie industrieel bedrijventerrein; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

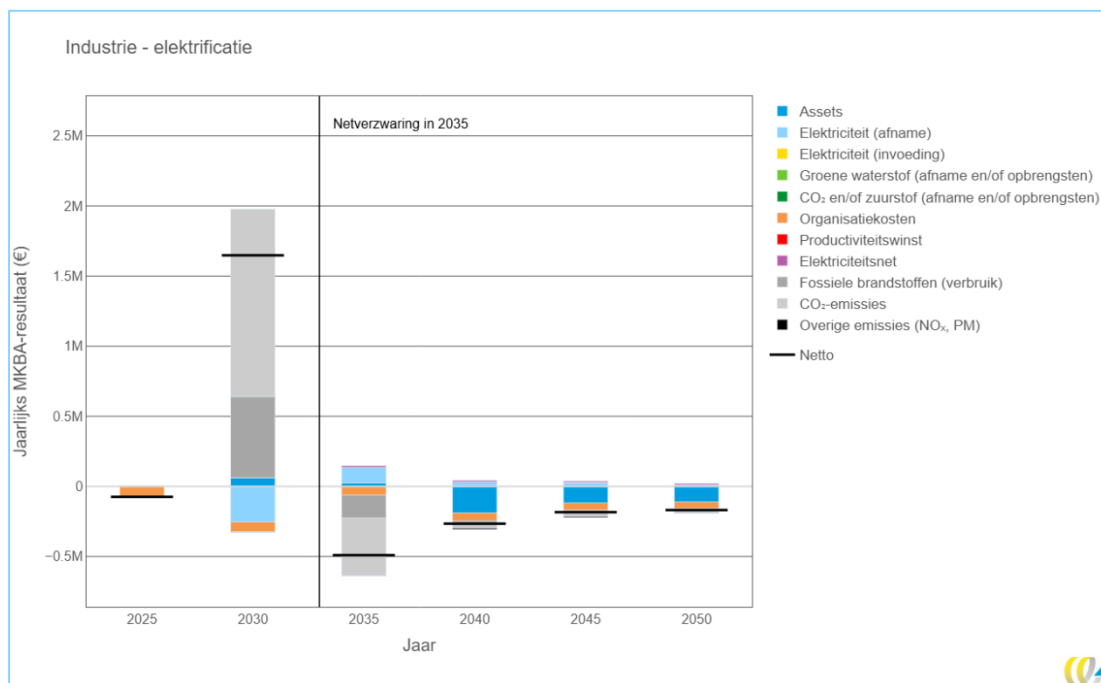
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | -1,1                        | De investeringen in assets liggen in de energiehub hoger dan in de referentie: de energiehub investeert in een iets groter vermogen aan <b>warmtepompen</b> (- € 0,4 mln.) en maakt langer gebruik van <b>aggregaten</b> (- € 0,4 mln.) en <b>batterijen</b> (- € 0,3 mln.).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Elektriciteit (afname)                                          | -0,4                        | De energiehub neemt over de gehele periode meer elektriciteit van het net af dan bedrijven in de referentie (433 GWh t.o.v. 421 GWh), wat leidt tot hogere directe kosten. De hogere elektriciteitsafname van het net is vooral toe te schrijven aan de periode tot 2035; na netverzwaring nemen de bedrijven in de referentie samen meer elektriciteit af dan in de energiehubsituatie.                                                                                                                                                                                                                                         |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | 1,9                         | Over de gehele periode verbruiken de bedrijven in de referentie meer aardgas dan de energiehub. Met name in de periode <b>2030-2035</b> (vóór netverzwaring) worden in de referentie gasboilers aanzienlijk meer ingezet. De energiehub is door middel van het gezamenlijk transportvermogen in staat om meer elektriciteit uit het net af te nemen; hierdoor is ook meer elektriciteit beschikbaar voor de warmtepompen en hoeft er minder gas bijgestookt te worden t.o.v. de referentie. <b>Vanaf 2035</b> (na netverzwaring) is het gezamenlijke GTV iets lager en maakt de energiehub dus iets meer gebruik van gasboilers. |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Organisatiekosten                                               | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Woningbouw                                                      |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>-1,2</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,2                         | Door de inzet van gezamenlijke batterijen en aggregaten is de netimpact van de energiehub lager dan de referentie. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 5,7 MW, terwijl dit in de energiehub 4,1 MW is; in <b>2050</b> is dit respectievelijk 6,5 en 4,7 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,2 mln.).                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>0,2</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | 4,6                         | Door het hogere aardgasverbruik in de referentie, ontstaan er voor de energiehub baten in de vorm vermeden milieukosten (+ € 5,1 mln.). Daartegenover worden er in de energiehub meer assets aangeschaft, leidend tot extra ketenemissies (- € 0,2 mln.). Ook                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |                             | ontstaan er milieukosten voor extra elektriciteitsafname (- € 0,3 mln.) en extra diesilverbruik (- € 0,1 mln.).                                   |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | -0,1                        | Door de inzet van dieselaggregaten ontstaan er (beperkte) milieukosten door de NO <sub>x</sub> - en PM-emissies die bij diesilverbruik vrijkomen. |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>4,5</b>                  |                                                                                                                                                   |
| <b>Totaal</b>                           | <b>3,5</b>                  |                                                                                                                                                   |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 26. Hierin is te zien dat het resultaat voordat netcongestie oplost en netverzwaring plaatsvindt positief is en daarna negatief wordt. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Aardgasverbruik.** In de periode 2025-2030 is het aardgasverbruik in de energiehub en de referentie min of meer gelijk. Tussen 2030 en 2035, wanneer het gezamenlijke GTV van de energiehub groter is dan het totaal aan GTV's van de bedrijven in de referentie, kan de energiehub vaker de elektrische warmtepomp gebruiken, terwijl de bedrijven in de referentie gasboilers aanzienlijk meer moeten inzetten. Vanaf 2035, wanneer netverzwaring heeft plaatsgevonden, hoeven gasboilers in de referentie niet meer ingezet te worden, terwijl dit in de energiehub op bepaalde momenten nog wel nodig is.
- **Elektriciteitsafname.** In de periode 2025-2030 is de elektriciteitsafname van het net in de energiehub en de referentie min of meer gelijk. Tussen 2030 en 2035 neemt de energiehub meer elektriciteit af van het net voor gebruik van elektrische warmtepompen. Vanaf 2035 nemen de bedrijven in de referentie meer elektriciteit af van het net, terwijl de energiehub dit kan vermijden door inzet van de gezamenlijke batterijen.
- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten. Tot 2035 strepen de afschrijvingen in warmtepompen, batterijen en aggregaten min of meer tegen elkaar weg. Na netverzwaring in 2035 gelden er vooral nog afschrijvingen van batterijen en aggregaten voor de energiehub.

Figuur 26 – Mgba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

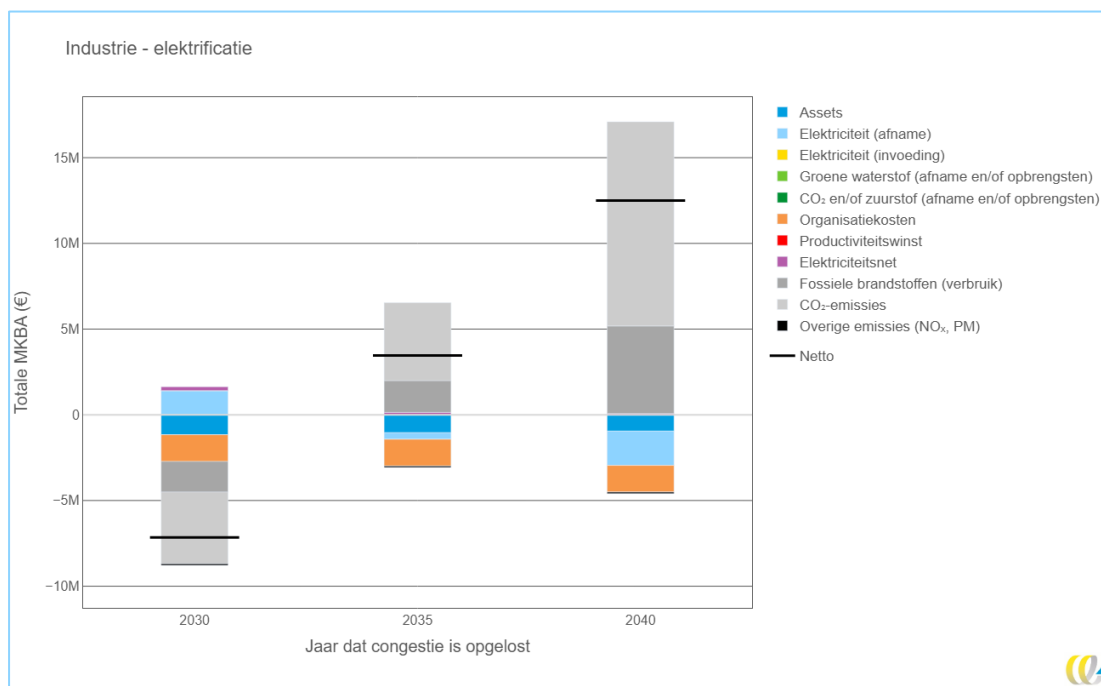
De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub toeneemt. Wanneer netcongestie in 2030 oplost, zal het maatschappelijke saldo negatief zijn. Dit is te zien in Figuur 27, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Aardgasverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, blijven gasboilers langer en vaker ingezet worden. Met name in de referentie – waar gasboilers worden ingeschakeld in aanvulling op de elektrische warmtepompen – leidt dit tot substantieel extra aardgasverbruik en daaraan gerelateerde CO<sub>2</sub>-emissies. Dit zijn de belangrijkste redenen voor de verschuivingen in de donker- en lichtgrijze balken in Figuur 27.

- **Elektriciteitsafname van het net.** Naarmate netcongestie eerder oplost, nemen de bedrijven in de referentie meer elektriciteit af van het net doordat de elektrische warmtepompen meer kunnen worden ingezet.

Figuur 27 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 8.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het huidige gasverbruik en het aantal CES-industriebedrijven die niet solitair zijn waarvoor elektrificatie van de gasvraag een reële verduurzamingsroute is. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 43 tot 105. De lage factor is gebaseerd op het nationale gasverbruik van de casus en de hoge factor gebaseerd op het aantal vergelijkbare gebieden. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehubs op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus 3,5 miljoen euro; landelijk opgeschaald 150 tot 370 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 1.800 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 80 tot 190 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de levensduur neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 16 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 670 tot 2.000 kton.

# 9 Industrieel bedrijventerrein met lokale H<sub>2</sub>-productie

## 9.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een industrieel bedrijventerrein waarbij een deel van de verduurzaming van de mobiliteit en warmtevraag wordt gerealiseerd door gebruik te maken van waterstof. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 9.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus betreft een bedrijventerrein waarop een grote fabriek aanwezig is, die een aanzienlijke invloed heeft op de totale elektriciteits- en warmtevraag van het terrein. In deze casus is gekozen voor een baksteenfabriek als voorbeeld. Daarnaast zijn er andere industriële bedrijven (auto-industrie, meubelfabriek, grafische industrie), logistieke ondernemingen (autohandel, groothandel, detailhandel, opslag) en diverse dienstverlenende partijen.

In de energiehubs wordt vanaf 2030 een elektrolyser van 19,3 MW aangeschaft, waarmee lokaal (groene) waterstof kan worden geproduceerd. Elektrolyse vindt plaats op basis van een *power-purchase-agreement* (PPA) met wind-op-zee, en in lijn met EU-verordening. In de energiehubs wordt de restwarmte uit de elektrolyser gebruikt om het warmtenet te voeden. De geproduceerde zuurstof kan verkocht worden wat leidt tot extra baten.

De huidige warmtevoorziening bestaat uit gasketels. In de referentiesituatie wordt dit stapsgewijs vervangen door hybride warmtepompen, terwijl in de energiehubs een MT-warmtenet wordt aangelegd, dat wordt gevoed door geothermische warmte. De baksteenfabriek wordt in 2030 voorzien van een waterstofketel om de hoge warmtevraag te verduurzamen. In de energiehubs kan de groene waterstof die lokaal wordt geproduceerd onder andere gebruikt worden om de waterstofketel van waterstof te voorzien, terwijl in de referentie alle waterstof extern ingekocht moet worden.

Voor zes bedrijven vindt verduurzaming van het wagenpark plaats door de aanschaf van waterstofvoertuigen in plaats van elektrische voertuigen. Dit ingroeipad is hetzelfde voor zowel de referentie als de energiehubs. Waterstoftekorten worden extern aangeleverd via

waterstofinfrastructuur. Voor de overige bedrijven vindt verduurzaming van het wagenpark plaats door de aanschaf van elektrische voertuigen.

Tabel 27 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubsscenario

|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                                                                                       | Referentiescenario                                                                                       | Energiehubsscenario                                                                                                                                                          |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050.<br><br>Gasketel voor warmte.                                                                                                                                             |                                                                                                          |                                                                                                                                                                              |
| 2030 | Verduurzaming vindt plaats door de aanschaf van (deels) waterstofvoertuigen en een waterstofboiler voor de baksteenfabriek.<br><br>Groeï elektrische – en waterstofvoertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv. | Alle waterstof wordt extern ingekocht.<br><br>Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring). | Gezamenlijke aggregaat en batterij.<br><br>Aanschaf van elektrolyser.<br><br>MT-warmtenet met restwarmte uit elektrolyser. Resterende waterstofvraag wordt extern ingekocht. |
| 2040 | Groeï elektrische – en waterstofvoertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv.                                                                                                                                    | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring).                                               | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                                                                                                          |
| 2050 | Groeï elektrische – en waterstofvoertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroeï van zon-pv.                                                                                                                                    | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.                                                   | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                                                                                                   |

## 9.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De ruimtelijke analyse voor industrie op waterstof is in de basis op dezelfde wijze opgezet als die van elektrificatie. Voor beschrijving van de verzamelde datasets verwijzen we naar de beschrijving ‘Ruimtelijke analyses industriebedrijven’ in Paragraaf 2.1.

### CES6-industrie met waterstofhub-potentieel

Voor de waterstofcasus is naar een subset van bedrijven gekeken waarbij zeer hoge procestemperaturen nodig zijn. Wij hebben hiervoor op basis van de [Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050](#) van PBL de subset van bedrijven glasindustrie en keramische industrie aangenomen. Voor de 45 resulterende bedrijven is een afstandsanalyse uitgevoerd tussen het bedrijf en nabijgelegen bedrijventerreinen. Relatief veel van deze bedrijven zijn solitair, zoals baksteenfabrieken naast rivieren, waardoor er slechts 19 van de 45 bedrijven overblijven nabij bedrijventerreinen met andere bedrijvigheid. Solitaire



industrie betekent dat er geen nabijgelegen bedrijven zijn, waardoor samenwerking in energiehub niet mogelijk is.

#### **Uitgangspunten casussamenstelling**

De warmtevraag van het industriebedrijf in deze casus is leidend en komt neer op 7 miljoen Nm<sup>3</sup> per jaar. Deze, en andere bedrijfseigenschappen, baseren we op de [Factsheet CO<sub>2</sub>-vrije baksteenfabriek](#) van de KNB. De samenstelling en van het nabijgelegen bedrijventerrein is verder gebaseerd op kenmerken in de IBISdataset van industriële terreinen. Hieruit volgt een terrein met 19 bedrijven actief in onder andere overige, minder energie-intensieve industrie, logistiek en dienstverlening.

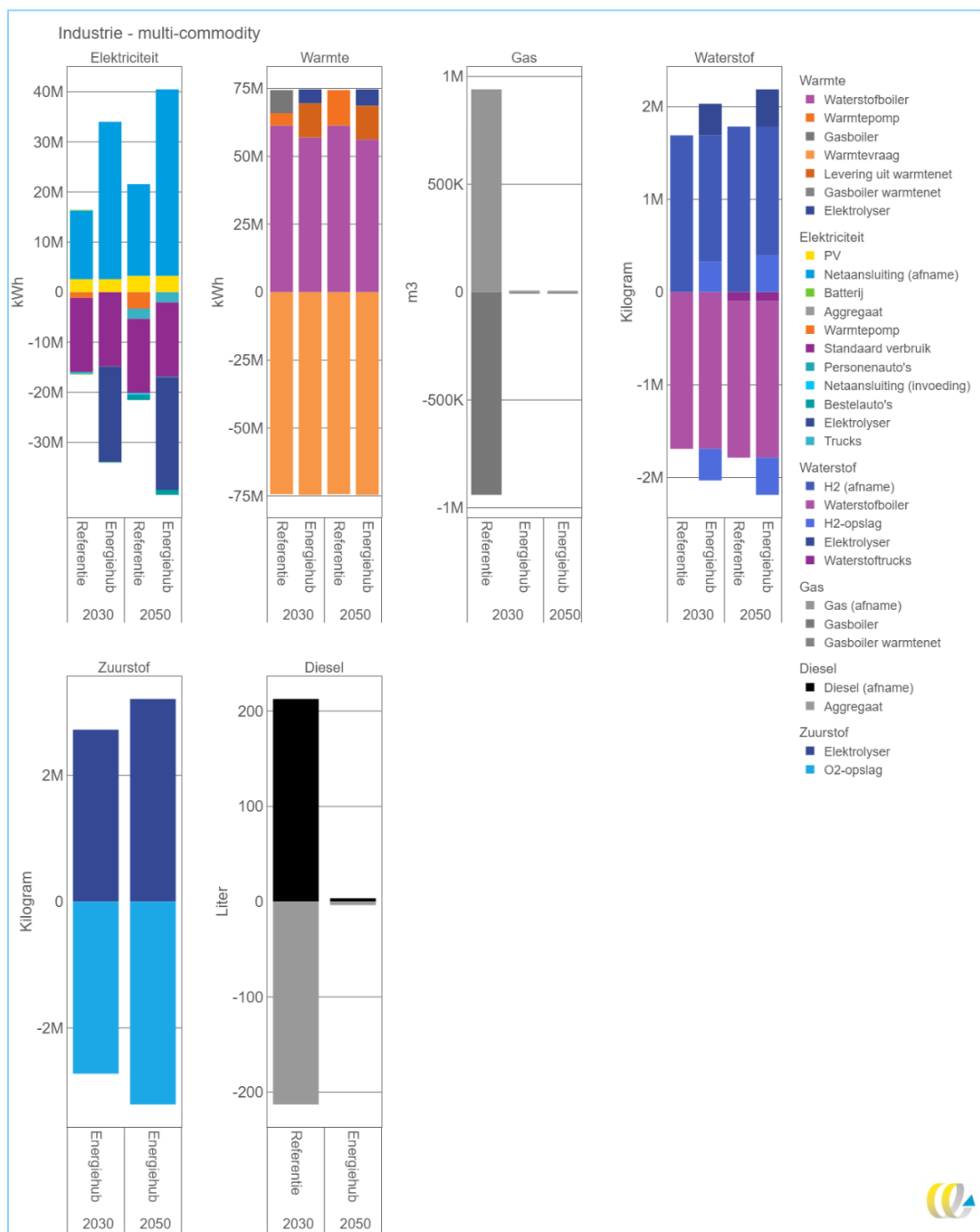
## 9.3 Energetische uitwerking – casus

Van 2025 tot 2050 is de totale warmtevraag constant, en bedraagt circa 74,5 GWh<sub>t</sub>/jaar. Vanaf 2030 stapt in zowel de referentie als de energiehub de baksteenfabriek over op een waterstofboiler in plaats van een gasboiler, terwijl de energiehub tegelijk ook investeert in een elektrolyser van 19,3 MW. Het grootste deel van de warmtevraag is afkomstig van de baksteenfabriek, waardoor vanaf 2030 ook het grootste deel van de warmte in deze casus wordt voorzien door de waterstofboiler. De resterende warmtevraag wordt in de referentie richting 2050 ingevuld door warmtepompen, terwijl deze in de energie deze wordt voorzien door het warmtenet en restwarmte uit de elektrolyser (die het warmtenet voedt).

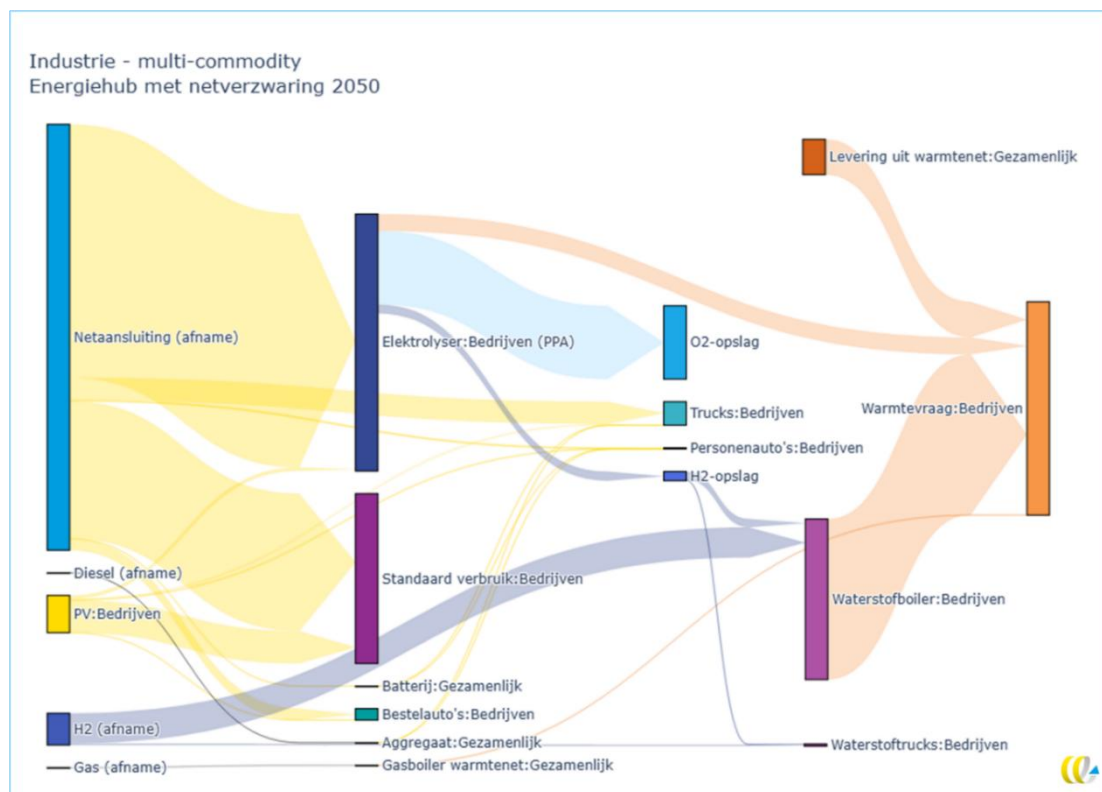
In de referentie neemt de elektriciteitsvraag richting 2050 toe van circa 15 GWh/jaar naar 21 GWh/jaar in 2050. De toename is met name een gevolg van de overgang naar warmtepompen en de elektrificatie van de voertuigen. In 2025, vóór netverzwaring, wordt circa 12,5 GWh/jaar geleverd uit het net, en circa 18 GWh/jaar in 2050. Doordat de energiehub een gezamenlijke elektrolyser aanschafft, neemt de elektriciteitsvraag fors toe; van circa 15 GWh/jaar in 2025, naar 34 GWh/jaar in 2030, en naar 38-40 GWh/jaar in de periode 2040-2050. Hierdoor stijgt ook de afname van het net van 12,5 GWh/jaar in 2025, naar 31 GWh/jaar in 2030, en naar 37 GWh/jaar in 2050.

Binnen de energiehub wordt een elektrolyser ingezet voor de lokale productie van waterstof. In 2025 is de productie circa 340 ton waterstof per jaar, oplopend tot ongeveer 400 ton per jaar in 2050. De totale jaarlijkse vraag van de waterstofboiler is 1.700 ton. Dit betekent dat met de inzet van de elektrolyser 20-24% van de benodigde waterstof voor de boiler lokaal geproduceerd en geleverd kan worden. Het resterende deel wordt extern ingekocht.

Figuur 28 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en gassen voor referentie en energiehubs, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050.



Figuur 29 – Stroomdiagram van elektriciteit, warmte, brandstoffen en gassen voor de energiehub in 2050. Dit is een samengevatte variant van de werkelijke doorrekening.



Voor de verschillende zichtjaren is de absolute netimpact bepaald, wat voor deze casus in elke situatie de afnamepiek is. In het eindbeeld, waarvoor de netbeheerder zal verzekeren, is in de referentie zo'n 5,7 MW vereist, terwijl dit 4,4 MW is voor de energiehub; een reductie van 24%. Deze reductie is opvallend omdat de energiehub als geheel wel veel meer elektriciteits afneemt van het net. Hoewel de totale elektriciteitsafname van het net door de energiehub fors toeneemt, blijft de piekbelasting onder controle dankzij een slimme coördinatie van de verschillende assets binnen het energiesysteem. Hierdoor kan de energiehub als collectief opereren binnen het gezamenlijke transportvermogen, zonder dat dit leidt tot een toename van de piekbelasting.

Tabel 28 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 4,3↓ | 4,5↓ | 4,5↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 4,8↓ | 5,6↓ | 5,7↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 4,3↓ |      | 4,3↓ |      |
| Energiehub - met netverzwaring    |      |      | 4,3↓ | 4,4↓ |

## 9.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 29 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus industrieel bedrijven-terrein met lokale H<sub>2</sub>-productie. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 3,5 miljoen).

De belangrijkste drivers voor dit resultaat zijn de directe kosten voor de **assets** (de investering van de energiehubs in een gezamenlijke elektrolyser voor de productie van groene waterstof) en **elektriciteitsafname van het net** (de elektrolyser zorgt voor een forse toename in de elektriciteitsafname). De **baten vanuit de elektrolyser** (vermeden kosten, waterstofafname, verkoop zuurstof, vermeden CO<sub>2</sub>-emissies) staan hier tegenover, maar doen de directe kosten van de elektrolyser niet volledig teniet.

Tabel 29 – Resultaat mkba-archetype 5 (RWZI energiehubs); effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | -20,5                       | In de energiehubs zijn er hoge directe kosten voor de bouw en exploitatie van het de elektrolyser (- € 24 mln.). Daar staan voornamelijk uitgespaarde investeringen in elektrische warmtepompen tegenover (+ € 3,5 mln.) die in de referentie worden aangeschaft en gebruikt. <sup>18</sup> |
| Elektriciteit (afname)                                          | -14,5                       | In de energiehubs wordt aanzienlijk meer elektriciteit van het net afgenomen door de aanschaf van de gezamenlijke elektrolyser: 37 GWh/jaar in 2050 t.o.v. 18 GWh/jaar in de referentie. Dit leidt extra directe kosten voor elektriciteitsafname in de energiehubs.                        |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -0,1                        | In de referentie wordt, ten opzichte van de energiehubs, in de periode 2025-2050 ongeveer 3 GWh extra zon-pv op het elektriciteitsnet ingevoed, wat tot een beperkte baat leidt.                                                                                                            |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | 1,7                         | In de energiehubs ontstaan baten door de inzet van de gasboiler in de referentie op momenten dat niet genoeg elektriciteit beschikbaar is om de elektrische warmtepomp in te zetten.                                                                                                        |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | 10,0                        | De elektrolyser in de energiehubs zorgt voor baten (+ € 9,7 mln.) doordat afname van waterstof wordt vermeden (in de referentie moet alle waterstof extern ingekocht worden). Een klein deel van de geproduceerde waterstof wordt extern verkocht (+ € 0,3 mln.).                           |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | 6,8                         | De zuurstof die in de gezamenlijke elektrolyser van de energiehubs wordt geproduceerd, wordt extern verkocht.                                                                                                                                                                               |
| Organisatiekosten                                               | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

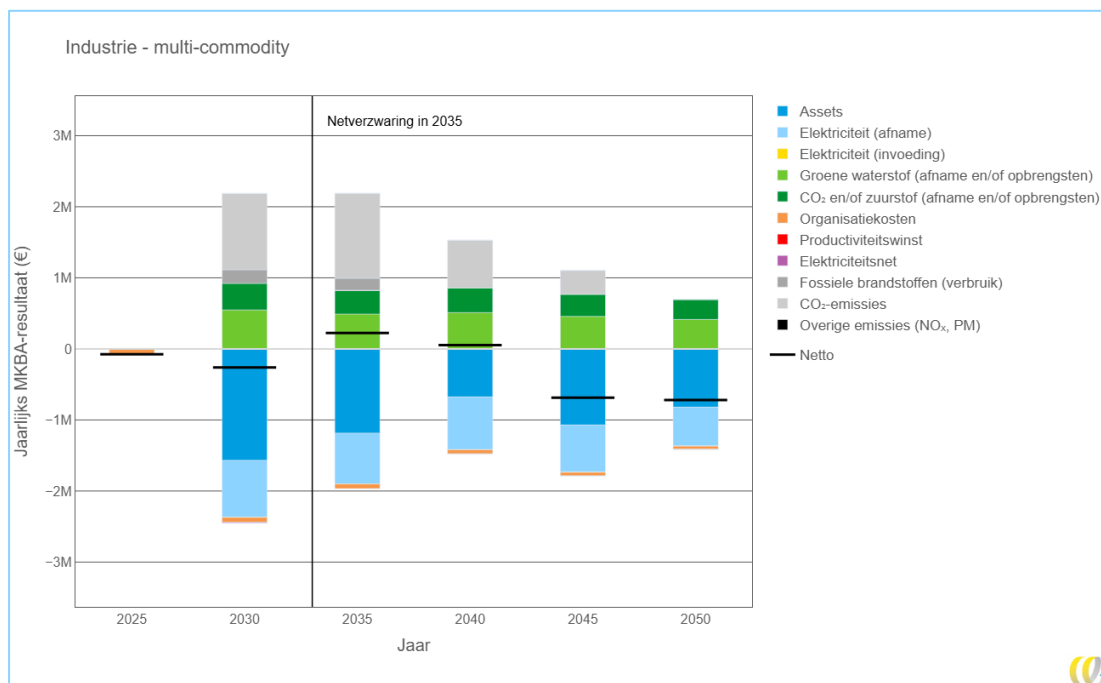
<sup>18</sup> Naast deze directe kosten, zijn er ook investeringen in batterijen, gasboilers en de infrastructuur voor het warmtenet; de verschillen in directe kosten tussen de energiehubs en referentie zijn relatief klein (maximaal € 0,5 mln.).

|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Woningbouw                              | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Directe effecten</b>                 | <b>-18,1</b>                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Elektriciteitsnet                       | 0,0                         | De piekbelasting in de energiehub is in vergelijking met de referentie iets lager, wat tot beperkte baten leidt door uitgespaarde kosten van netinvesteringen (+ € 0,1 mln.). Daartegenover staat echter dat door de hogere totale elektriciteitsafname van het net er indirecte kosten ontstaan door netverliezen (- € 0,1 mln.).                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Indirecte effecten</b>               | <b>0,0</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| CO <sub>2</sub> -emissies               | 14,6                        | De voornaamste baten voor de energiehub ontstaan in de vorm van vermeden milieukosten doordat de productie van groene waterstof de inzet van grijze waterstof voorkomt (+ € 12 mln.). Daarnaast zijn er ook baten door de directe emissies van het aardgasverbruik van de gasboiler in de referentie (+ € 4 mln.). Doordat er in de energiehub meer elektriciteit wordt afgenomen van het net, ontstaan er – in een elektriciteitssysteem dat tot 2035 nog niet volledig CO <sub>2</sub> -vrij is – milieukosten (- € 1 mln.). De ketenemissies van de verschillende assets heffen elkaar grotendeels op. |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>14,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Totaal</b>                           | <b>-3,5</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 30, waarin te zien is dat het resultaat fluctueert over tijd. De grootste verschuivingen zien we in:

- **CO<sub>2</sub>-emissies.** Doordat er na verloop van tijd steeds meer groene waterstof beschikbaar komt, wordt er steeds minder grijze waterstof gebruikt. Hierdoor wordt de CO<sub>2</sub>-baat van het zelf produceren van groene waterstof in de energiehub steeds kleiner, totdat deze in 2050 helemaal vervalt (de waterstofvoorziening is dan volledig CO<sub>2</sub>-neutraal). Daarnaast vervallen de milieukosten die in de referentie ontstaan door de inzet van de gasboiler na 2035, omdat de netverzwaring het mogelijk maakt de elektrische warmtepomp volledig in te zetten.
- **Investeringskosten assets.** In 2030 wordt in de energiehub en referentie geïnvesteerd in de assets; de energiehub doet grotere investeringen (met name de gezamenlijke elektrolyser). Tussen 2030 en 2040 zien we dat de jaarlijkse afschrijvingskosten afnemen, wat is te verklaren door het aflopende afschrijvings-schema en de verdiscontering van toekomstige kosten. In 2045 zien we de jaarlijkse afschrijvingskosten toenemen, omdat er wordt geherinvesteerd in de elektrolyser.

Figuur 30 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



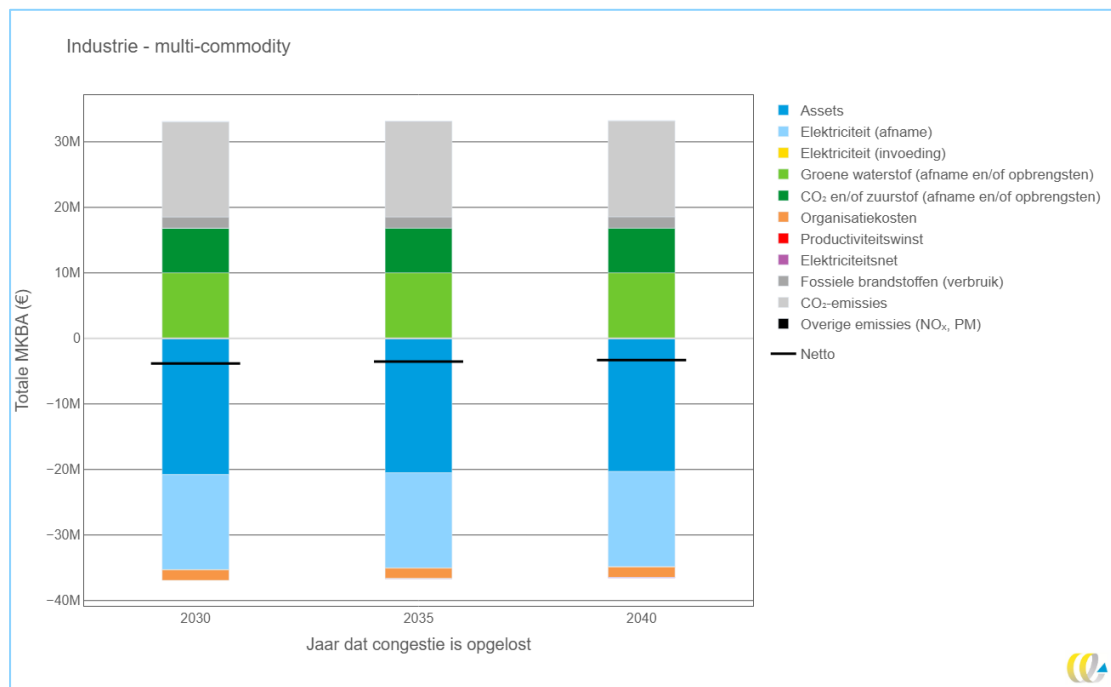
## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub min of meer hetzelfde uitvalt. De verschillen zijn echter klein. Dit is te zien in Figuur 31, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

Het grootste verschil zit in de directe kosten van de assets (specifiek de batterijen, die langer gebruikt worden door bedrijven in de referentie naarmate netcongestie later oplost), maar het verschil tussen 2030 en 2040 is slechts € 0,5 miljoen. Wat betreft de milieu-kosten van CO<sub>2</sub>-emissies zijn er wat kleine verschuivingen, maar die heffen elkaar min of meer op.

Figuur 31 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035)



## 9.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het huidige gasverbruik en het aantal CES-industriebedrijven die niet solitair zijn waarvoor overstappen op waterstof een reële verduurzamingsroute is. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 19 tot 33. De factoren zijn gebaseerd op het aantal vergelijkbare gebieden in Nederland (laag) en het nationale elektriciteitsverbruik van deze casus (hoog). Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehubbs op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -3,5 miljoen euro; landelijk opgeschaald -65 tot -115 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 1.780 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 35 tot 60 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de periode 2025 tot 2050 neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 50 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 960 tot 1.660 kton.

# 10 All-electric bestaande buurt

## 10.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gebied met bestaande woonwijk waarbij de verduurzaming voornamelijk wordt gerealiseerd door elektrificatie. Op basis van een ruimte analyse (zie Paragraaf 10.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus bestaat uit een gemengde woonwijk waarin zowel woningen als bedrijven met maatschappelijke en commerciële functies aanwezig zijn. Het grootste deel van het energiegebruik komt van de woningen, die bestaan uit appartementen, rijwoningen, hoekwoningen en vrijstaande woningen. Deze kennen uiteenlopende isolatieniveaus, wat ook resulteert in een uiteenlopende warmtevraag.

In de huidige situatie zijn alle gebouwen nog afhankelijk van gasketels voor hun warmtevoorziening. In het referentiescenario stappen de gebouwen individueel over op hybride warmtepompen, terwijl de energiehubs collectief overstapt naar all-electric-warmtepompen. Bij onvoldoende netcapaciteit wordt in de referentie de resterende warmtevraag aangevuld door de gasketel. In de energiehubs kunnen energietekorten worden opgevangen door de gezamenlijke buurtbatterij en - aggregaat.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het aandeel elektrische bestelauto's en personenauto's geleidelijk toeneemt. Het ingroeipad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehubs. Indien elektriciteitsafname uit het net en (thuis)batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een (buurt)aggregaat.

Tabel 30 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubs scenario

|      | Uitgangspunten                                              | Referentiescenario | Energiehubscenario |
|------|-------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050. |                    |                    |
|      | Gasketel als warmtevoorziening.                             |                    |                    |



|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                          | Referentiescenario                                                       | Energiehubscenario                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 2030 | <p>Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.</p> <p>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.</p> <p>Ingroei van zon-pv.</p> | Energietekorten worden opgevangen door de gasketel.                      | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                        |
| 2040 | <p>Hybride- en all-electric-warmtepomp.</p> <p>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.</p> <p>Ingroei van zon-pv.</p>                                  | Energietekorten worden opgevangen door de gasketel (vóór netverzwaring). | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                        |
| 2050 | <p>Hybride- en all-electric-warmtepomp.</p> <p>Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.</p> <p>Ingroei van zon-pv.</p>                                  | Geen congestie.                                                          | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan. |

## 10.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De woonwijk is samengesteld op basis van buurten die in de [Actualisatie Startanalyse aardgasvrije buurten 2025 van PBL](#) zijn aangemerkt als robuust geschikt voor all-electric-warmtepompen (strategie S1). Voor deze definitiemethode is gekozen omdat dit naar verwachting het toepassingsgebied van all-electric-warmtepompen het best representeert.

Als criterium voor de 'robuuste' optie is een kostenverschil van minimaal € 250 per weq per jaar gehanteerd ten opzichte van de volgende goedkoopste strategie. Daarnaast is gefilterd op buurten met minimaal 100 weq.

Deze selectie resulteerde in 932 buurten met in totaal 743.000 weq. Daarvan zijn 687.000 woningen, en 56.000 weq utiliteit verdeeld over 15.000 aansluitingen.

### Samenstelling van de woonwijk

- Woningen: 550, waarvan 13% meergezinswoningen. De eengezinswoningen bestaan uit 48% rijwoningen, 22% hoekwoningen en 17% vrijstaande woningen. Het isolatieniveau is overwegend redelijk tot goed geïsoleerd. Er is 1,45 auto per woning.
- Utiliteit: 75 weq, bestaande uit algemene voorzieningen zoals kantoren, winkels, onderwijs, zorg, logies en bijeenkomstfuncties.

## 10.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van de gemengde woonwijk bedraagt circa 5,9 GWh<sub>t</sub>/jaar. Deze vraag blijft constant over de jaren en wordt in de referentie verduurzaamd door middel van hybride warmtepompen, en in de energiehub door middel van all-electric-warmtepompen. Om deze reden groeit de elektriciteitsvraag in beide situaties sterk, namelijk van circa 2,5 GWh/jaar in 2025 naar 5,9 GWh/jaar in 2050.

Voordat netverzwaring plaatsvindt, schaft de energiehub een buurtbatterij aan van 275 kWh, welke na netverzwaring gebruikt blijft worden. In 2030, voor netverzwaring, is het benodigde vermogen van de batterij 225 kW. Het benodigde vermogen na netverzwaring in 2050 is vergelijkbaar, namelijk 200 kW.

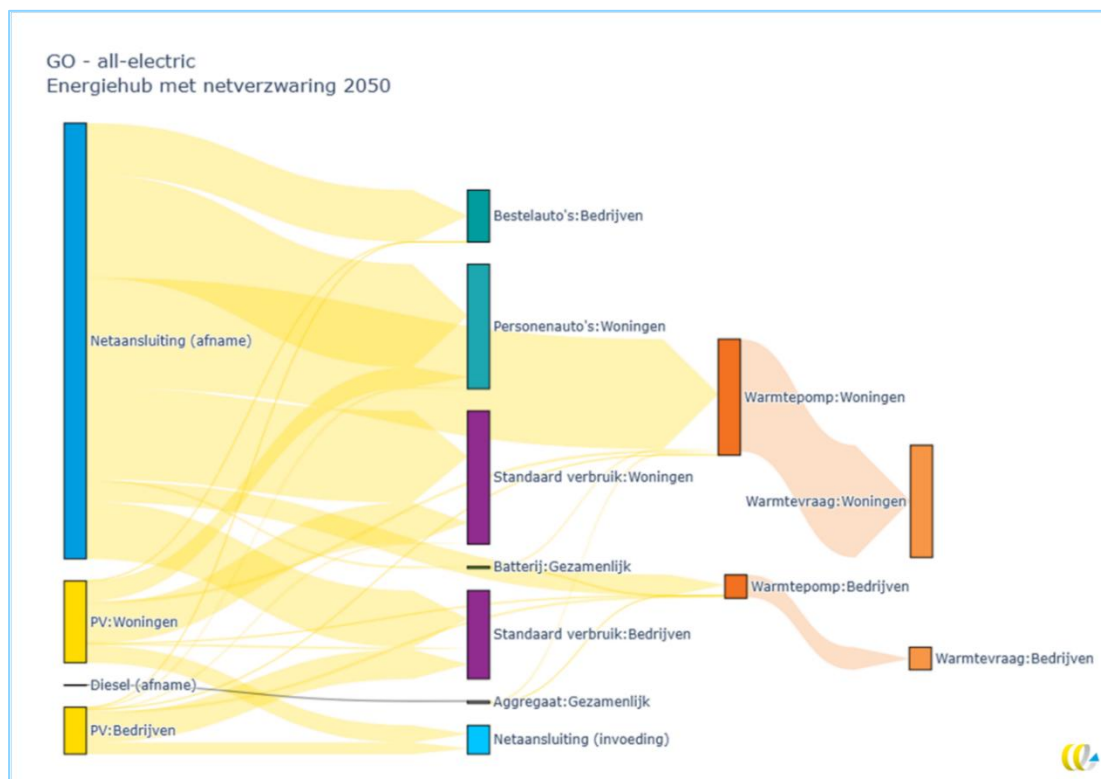
Doordat er in de referentie gebruik wordt gemaakt van hybride warmtepompen, kan in tijden van (afname)congestie de resterend warmtevraag ingevuld worden door de gasketels. Om deze reden is er voldoende elektriciteit beschikbaar voor het basisverbruik en het laden van de elektrische voertuigen.

Dit is niet het geval in de energiehub, waar in de tijden van congestie de buurtbatterij en aggregaat bijspringen om onder andere voldoende elektriciteit te leveren aan de warmtepompen. In 2030, vóór netverzwaring, is daarom een aggregaat van 790 kW nodig om de buurt van voldoende elektriciteit te voorzien. Jaarlijks levert het buurtaggregaat dan 690 MWh/jaar. In 2050, na netverzwaring, vermindert de afhankelijkheid van het buurtaggregaat. Er is nog steeds wel een vermogen van 540 kW nodig, maar het aggregaat voorziet dan nog slechts 26 MWh/jaar.

De ingroei van zon-pv is voor zowel de referentie als de energiehub gelijk. Op jaarbasis wordt er in 2025 circa 1 GWh/jaar aan zonne-energie direct verbruikt en ingevoerd op het net, welke richting 2050 toeneemt naar 1,4 GWh/jaar. Er is geen sprake van invoedingscongestie in deze casus, waardoor de energiehub geen voordelen kent voor duurzame lokale opwek.

In de jaren vóór netverzwaring wordt de maximale netbelasting met name veroorzaakt door invoeding van elektriciteit uit zon-pv. Deze invoedingspieken zijn in beide scenario's ongeveer gelijk in de jaren vóór netverzwaring. In de jaren na netverzwaring wordt de maximale netbelasting gedomineerd door afname door elektrificatie van de warmtevraag en mobiliteit. De energiehub zorgt voor een sterke afname van de netbelasting; in 2050 is de (afname)piek 1,7 MW in de referentie tegenover 1,1 MW (-35%) in de energiehub.

Figuur 32 – Stroomdiagram van elektriciteit, warmte, brandstoffen en gassen voor de energiehub in 2050. Dit is een samengevatte variant van de werkelijke doorrekening.



Tabel 31 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 0,6↑ | 0,6↑ | 0,6↑ |      |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 1,3↓ | 1,5↓ | 1,7↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 0,6↑ | 0,6↑ | 0,6↑ |      |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 0,9↓ | 1,0↓ | 1,1↓ |

## 10.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 32 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus all-electric bestaande buurt. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 1,6 miljoen).

De belangrijkste driver voor dit resultaat zijn de **organisatiekosten** (de personele inzet voor realisatie van de energiehub). De baten die hier tegenover staan, voornamelijk in de

vorm van vermeden **CO<sub>2</sub>-emissies** (voornamelijk gerelateerd aan het aardgasverbruik) en **uitgespaarde netinvesteringen**, wegen hier niet tegenop.

Tabel 32 – Resultaat mkba all-electric bestaande buurt; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

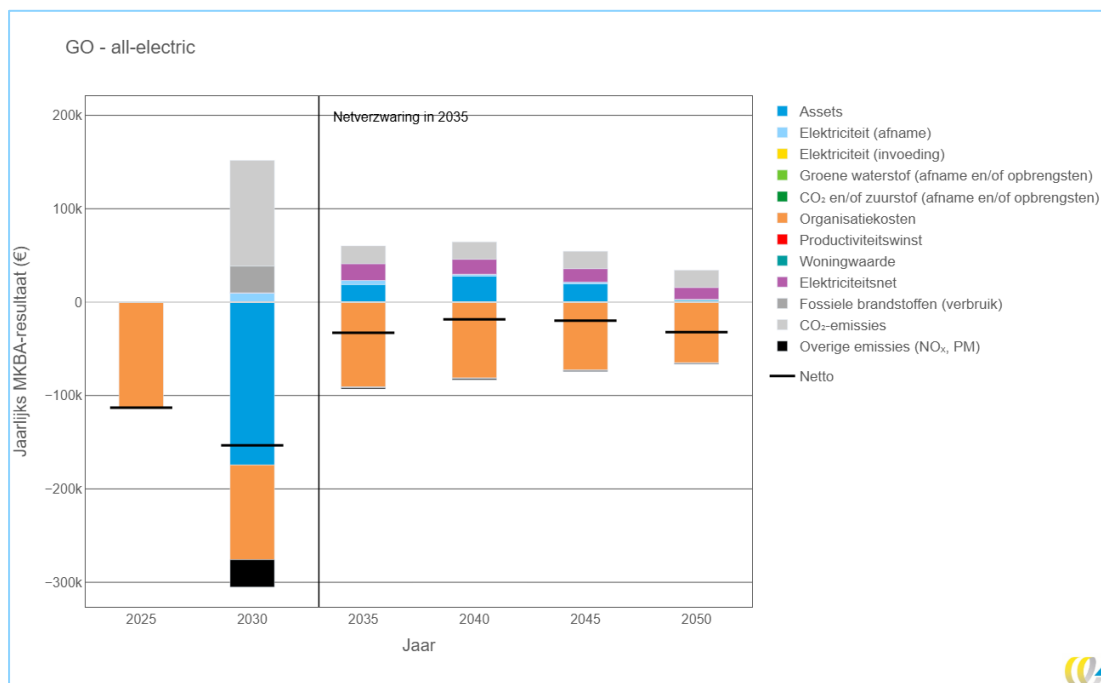
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | -0,5                        | De investeringen in assets liggen in de energiehub hoger dan in de referentie: er wordt meer geïnvesteerd in <b>warmtepompen</b> (- € 0,8 mln.), <b>aggregaten</b> (- € 0,4 mln.) en <b>batterijen</b> (- € 0,1 mln.). Daartegenover wordt in de referentie meer geïnvesteerd in <b>gasboilers</b> (+ € 0,9 mln.).                                                                                                                                         |
| Elektriciteit (afname)                                          | 0,1                         | Door de inzet van de gezamenlijke buurtbatterij ligt de elektriciteitsafname van het net in de energiehub iets lager dan in de referentiesituatie (0,5 GWh over 2025-2050). Het verschil in directe kosten is klein.                                                                                                                                                                                                                                       |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | 0,1                         | In de referentiesituatie wordt meer <b>aardgas</b> verbruikt doordat de buurt overstapt om <b>hybride warmtepompen</b> , terwijl de energiehub gebruik maakt van all-electric-warmtepompen (+ € 0,3 mln.). De energiehub gebruikt daarnaast een buurtaggregaat, waardoor er kosten voor <b>dieselvebruik</b> ontstaan (- € 0,1 mln.).                                                                                                                      |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Organisatiekosten                                               | -2,3                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Woningbouw                                                      | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>-2,5</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,3                         | Door de inzet van collectieve (buurt)batterijen en -aggregaten is de netimpact van de energiehub lager dan de referentie. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 1,5 MW, terwijl dit in de energiehub 1,0 MW is; in <b>2050</b> is dit respectievelijk 1,7 en 1,1 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,3 mln.).                                                                        |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>0,3</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | 0,8                         | Door het hogere <b>aardgasverbruik</b> in de referentie, ontstaan er voor de energiehub baten in de vorm vermeden milieukosten (+ € 0,6 mln.). Ook zijn er vermeden ketenemissies van de <b>gasboilers</b> die in de referentie worden aangeschaft (+ € 0,5 mln.). Daartegenover leidt de aanschaf van een <b>buurtbatterij en -aggregaat</b> tot extra ketenemissies (- € 0,1 mln.) en ontstaan er milieukosten door <b>dieselvebruik</b> (- € 0,2 mln.). |

|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | -0,2                        | Door de inzet van het buurtaggregaat in de energiehub ontstaan er milieukosten door de NO <sub>x</sub> - en PM-emissies die bij dieselverbruik vrijkomen. |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>0,7</b>                  |                                                                                                                                                           |
| <b>Totaal</b>                           | <b>-1,6</b>                 |                                                                                                                                                           |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 33. Hierin is te zien dat het resultaat over de gehele periode negatief is. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Aardgasverbruik.** In de referentie is de buurt in 2030 overgestapt op hybride warmtepompen, maar moet de buurt tot 2035 nog regelmatig gebruikmaken van de gasboiler, omdat extra elektriciteitsafname van het net niet mogelijk is. Na netverzwaring in 2035 is dit niet meer nodig, waardoor de directe kosten voor aardgasverbruik en de daaraan gerelateerde milieukosten wegvallen.
- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten van de verschillende assets. In 2030 schaft de energiehub de buurtbatterij en het buurtaggregaat aan en investeert het in meer vermogen aan warmtepompen, wat in Figuur 33 de piek in 2030 verklaart.
- **Diesilverbruik.** De energiehub schaft in 2030 het buurtaggregaat aan en zet deze tot netverzwaring in 2035 nog regelmatig in, wat leidt tot directe kosten voor diesilverbruik en milieukosten van NO<sub>x</sub>- en PM-emissies die bij diesilverbruik vrijkomen. Na 2035 wordt het dieselaggregaat nog zeer beperkt ingezet.

Figuur 33 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

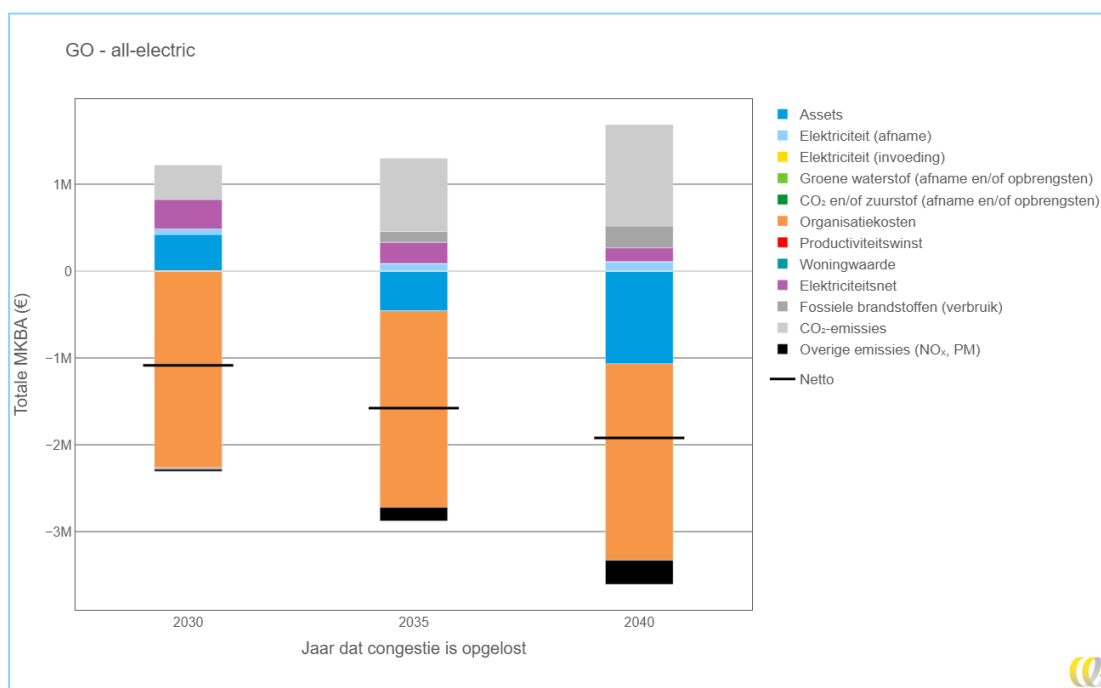
De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub afneemt. Dit is te zien in Figuur 34, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, stapt de buurt in de referentie later over op warmtepompen met een groter vermogen, waardoor de directe kosten in de energiehub hoger zijn.
- **Aardgasverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, blijven gasboilers in de referentie langer en vaker ingezet worden, wat leidt tot extra directe kosten en milieukosten van aardgasverbruik. Dit zijn de belangrijkste redenen voor de verschuivingen in de donker- en lichtgrijze balken in Figuur 34.

- **Diesilverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, is er een langere periode waarin de energiehub het buurtaggregaat inzet en er directe kosten en milieukosten ontstaan van het diesilverbruik.

Figuur 34 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 10.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal weq en het huidige gasverbruik. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 1.189 tot 1.372. De lage factor is gebaseerd op het aantal WEQ en de hoge factor gebaseerd op het huidige energieverbruik. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -3,85 miljoen euro; landelijk opgeschaald -4,6 tot -5,3 miljard euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 540 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 640 tot 740 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de periode 2025 tot 2050 neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 2,9 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 2.700 tot 4.000 kton.

# 11 ZLT-warmtenet bestaande buurt

## 11.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gebied met bestaande woonwijk waarbij in de energiehub er een gezamenlijk ZLT-warmtenet wordt aangelegd. Op basis van een ruimtelijke analyse (zie Paragraaf 11.2) is een gemiddelde casus van dit archetype opgesteld.

De resulterende casus bestaat uit een gemengde woonwijk waarin zowel woningen als bedrijven met maatschappelijke en commerciële functies aanwezig zijn. Het grootste deel van het energiegebruik komt van de woningen, die bestaan uit appartementen, rijwoningen, hoekwoningen en vrijstaande woningen. Deze kennen uiteenlopende isolatieniveaus, wat resulteert in een uiteenlopende warmtevraag.

In de huidige situatie gebruiken de meeste gebouwen gasketels om in hun warmtevraag te voorzien. In de referentiesituatie wordt in 2030 de overstap gemaakt naar hybride warmtepompen, en worden de woningen zeer goed geïsoleerd. In de energiehub wordt een collectief zeer laagtemperatuur (ZLT)-warmtenet aangeschaft. De woningen worden daarbij geïsoleerd, maar het isolatieniveau ligt lager dan in de referentie. Door het hogere isolatieniveau in de referentie is op jaarbasis de warmtevraag 20% lager dan in de situatie met energiehub incl. isolatie, maar zijn tevens de kosten voor isolatie hoger (zie Bijlage A.2.3).

Restwarmte van lokale gebouwen wordt als regeneratie gebruikt voor een wko-systeem waardoor het ZLT-net op constante temperatuur warmte kan leveren in het net. Huishoudens in de energiehub nemen een elektrische warmtepomp om de warmte uit het ZLT-net te benutten. Een buurtaggregaat kan bijspringen als onvoldoende elektriciteit beschikbaar is om de warmtevraag te voorzien.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het aandeel elektrische bestelauto's en personenauto's geleidelijk toeneemt. Het ingroeipad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub. Indien elektriciteitsafname uit het net en (thuis)batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een (buurt)aggregaat.



Tabel 33 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubsscenario

|      | Uitgangspunten                                                                                     | Referentiescenario                                                                                                               | Energiehubscenario                                                         |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Elektriciteitsvraag bedrijfsproces blijft gelijk 2025-2050.<br><br>Gasketel als warmtevoorziening. |                                                                                                                                  |                                                                            |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                | Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Energietekorten worden opgevangen door de gasketel. | ZLT-warmtenet en warmtepompen.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat.  |
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                | Energietekorten worden opgevangen door de gasketel (vóór netverzwaring).                                                         | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                        |
| 2050 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv.                | Geen congestie.                                                                                                                  | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan. |

## 11.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De woonwijk is samengesteld op basis van buurten die in de [Actualisatie Startanalyse aardgasvrije buurten 2025 van PBL](#) zijn aangemerkt als robuust geschikt voor een ZLT-warmtenet (strategie S3, variant e of g). Voor deze definitiemethode is gekozen omdat dit naar verwachting het toepassingsgebied van een ZLT-warmtenet het best representeert.

Als criterium voor de ‘robuuste’ optie wordt een kostenverschil van minimaal € 250 per weq per jaar gehanteerd, ten opzichte van de volgende goedkoopste strategie. Daarnaast is gefilterd op buurten met minimaal 100 weq. Tot slot zijn alleen buurten meegenomen waar meer dan 50% van de aansluitingen in S3 daadwerkelijk op een ZLT-net worden aangesloten. Het Vesta MAIS-model van PBL berekent voor deze varianten per buurt welke clusters van ZLT-netten mogelijk zijn. Gebouwen die niet worden aangesloten, krijgen in dit model standaard een luchtwarmtepomp.

Deze selectie resulteerde in 114 buurten met in totaal 126.000 weq. Daarvan zijn 76.600 woningen, en 49.400 weq utiliteit verdeeld over 12.000 aansluitingen. In vergelijking met de MT-warmtenet- en all-electric-woonwijkcasus is in deze buurten relatief veel utiliteit aanwezig.

### Samenstelling van de woonwijk

- Woningen: 425, waarvan 40% meergezinswoningen. De eengezinswoningen bestaan uit 33% rijwoningen, 17% hoekwoningen en 10% vrijstaande woningen. Het isolatieniveau is gemengd, overwegend redelijk geïsoleerd. Er is 1,2 auto per woning.
- Utiliteit: 360 weq, bestaande uit algemene voorzieningen zoals kantoren, winkels, onderwijs, zorg, logies en bijeenkomstfuncties.

## 11.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van de gemengde woonwijk bedraagt voor isolatie circa 8,7 GWh<sub>t</sub>/jaar. In de referentie worden de woningen vanaf 2030 zeer goed geïsoleerd waardoor de warmtevraag daalt naar circa 6,2 GWh<sub>t</sub>/jaar. In de energiehubs worden de woningen in 2030 met de komst van het ZLT-warmtenet ook geïsoleerd, maar met een lager isolatieniveau dan in de referentie, waardoor de warmtevraag daalt naar circa 7,8 GWh<sub>t</sub>/jaar.

In zowel de referentie als de energiehubs worden er warmtepompen aangeschaft. Hierdoor groeit de elektriciteitsvraag in beide situaties sterk, namelijk van circa 5,2 GWh/jaar in 2025 naar 7,6 GWh/jaar in 2050 voor de referentie, en naar 7,4 GWh/jaar in 2050 voor de energiehubs. De vergelijkbare elektriciteitsvraag tussen de referentie en energiehubs is gevolg van twee factoren; in de referentie worden de woningen beter geïsoleerd waardoor de warmtevraag minder is, maar vraagt de luchtwarmtepomp meer elektriciteit dan in de energiehubs voor het opwaarderen van de (buiten)warmte. Of andersom, het isolatieniveau in de energiehubs ligt lager dan in de referentie waardoor er een hogere warmtevraag is, maar door de aanleg van het ZLT-warmtenet is de elektriciteitsvraag van de warmtepompen lager.

Vóór netverzwaring, wordt in de referentie nog vaker gebruik gemaakt van de gasketel om de resterende warmtevraag in te vullen, terwijl in de energiehubs het buurtaggregaat in tijden van congestie de warmtepompen van extra energie voorzien. In 2030, vóór netverzwaring, is een aggregaat van 550 kW nodig om de buurt van voldoende elektriciteit te voorzien. Jaarlijks levert het buurtaggregaat dan 63 MWh/jaar. In 2050, na netverzwaring, blijft de afhankelijkheid van deze buurtaggregaat bestaan, en voorziet het aggregaat 60 MWh/jaar.

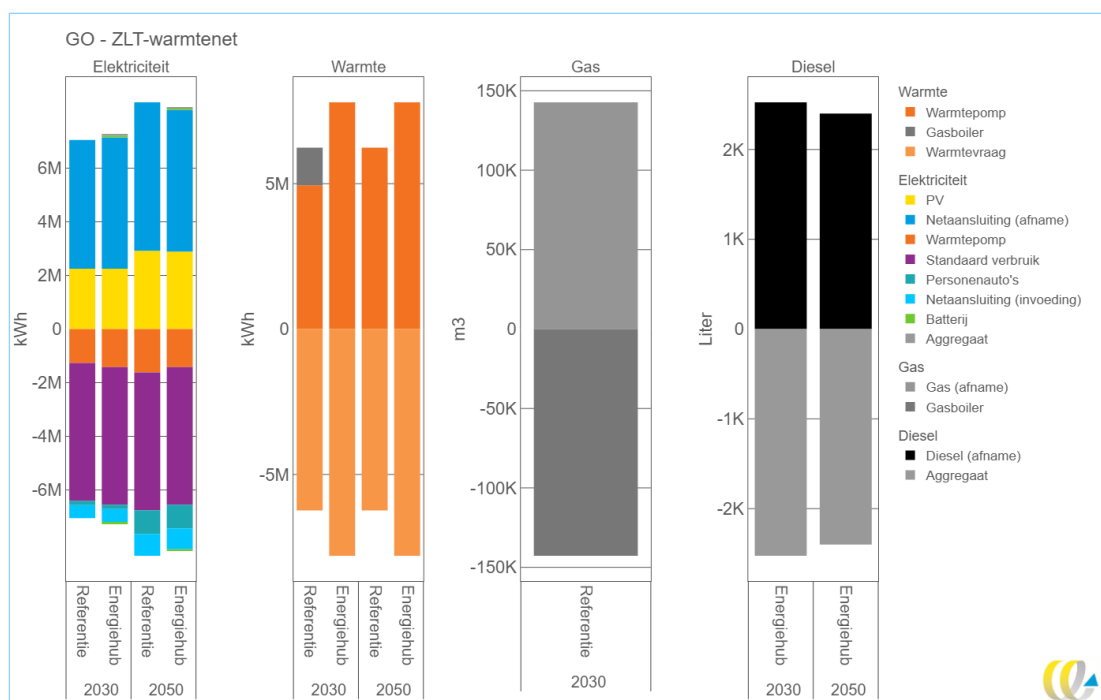
In 2030, vóór netverzwaring, schaft de energiehubs een buurtbatterij aan van 950 kWh; die ongeveer 70 MWh/jaar aan elektriciteit levert, en een maximaal vermogen levert van 410 kW. In 2050, na netverzwaring, blijft de buurtbatterij bestaan en levert circa 53 MWh/jaar, en een maximaal vermogen levert van 375 kW.

De ingroei van zon-pv is voor zowel de referentie als de energiehubs gelijk. Op jaarbasis wordt er in 2025 circa 2 GWh/jaar aan zonne-energie direct verbruikt en ingevoerd op het

net, welke richting 2050 toeneemt naar 2,9 GWh/jaar. In de jaren vóór netverzwaring is er nauwelijks sprake van curtailment: de opgewekte zonne-energie kan grotendeels worden benut of ingevoerd op het net. Na de netverzwaring in 2050 wordt in de energiehubs enige curtailment zichtbaar, doordat het transportvermogen voor invoeding beperkt blijft. Hierdoor wordt ongeveer 31 MWh aan geproduceerde zonne-energie per jaar afgeknepen.

De piekbelasting wordt door de energiehubs fors verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens (van de wijk) niet verhoogd kunnen worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehubs voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 1,8 MW in de referentie tegenover 1,1 MW (-39%) in de energiehubs. Merk daarbij wel op dat zowel de buurtbatterij als –aggregaat blijft bestaan na netverzwaring.

Figuur 35 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en gassen voor referentie en energiehubs, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Tabel 34 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met en zonder energiehubs. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030 | 2040  | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|-------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 1,1↑ | 1,1↓ | 1,1↓  |      |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 1,7↓ | 1,8 ↓ | 1,8↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 1,1↑ | 1,1↑ | 1,1↑  |      |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 1,1↓ | 1,1↓  | 1,1↓ |

## 11.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 35 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus ZLT-warmtenet bestaande buurt. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 8,9 miljoen).

De belangrijkste driver voor dit resultaat zijn de directe kosten van de **assets** (voornamelijk de investering van de energiehubs in een collectief warmtenet). De baten die hier tegenover staan, voornamelijk in de vorm van vermeden **CO<sub>2</sub>-emissies** (van de inzet gasboilers) en minder **elektriciteitsafname van het net**, wegen hier niet tegenop.

Tabel 35 – Resultaat mkba ZLT-warmtenet bestaande buurt; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                  | Energiehub vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                           | -8,3                     | De investeringen in assets liggen in de energiehubs hoger dan in de referentie: er wordt geïnvesteerd in een <b>warmtenet</b> (- € 12,6 mln.) en daarnaast in <b>aggregaten</b> (- € 0,4 mln.) en <b>batterijen</b> (- € 0,4 mln.). Daartegenover wordt in de referentie voor een groter bedrag geïnvesteerd in isolatie (+ € 2,3 mln.), in een groter vermogen aan <b>elektrische warmtepompen</b> (+ € 1,6 mln.) en worden daarnaast ook <b>gasboilers</b> aangeschaft (+ € 1,1 mln.). |
| Elektriciteit (afname)           | 0,3                      | Door het hogere elektriciteitsverbruik van <b>elektrische warmtepompen</b> in de referentie ten opzichte van de warmtepompen die de energiehubs gebruikt voor het opwaarderen van de warmte uit het ZLT-warmtenet, ligt de elektriciteitsafname van het net in de energiehubs lager dan in de referentiesituatie (verschil: 1,5 GWh over 2025-2050).                                                                                                                                     |
| Elektriciteit (invoeding)        | -                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Fossiele brandstoffen (verbruik) | 0,1                      | In de referentiesituatie wordt tussen 2030 en 2035 (wanneer netverzwaring plaatsvindt) nog <b>aardgas</b> verbruikt doordat de buurt in 2030 overstapt om <b>hybride warmtepompen</b> , terwijl de energiehubs vanaf 2030 het collectieve ZLT-warmtenet in gebruik neemt (+ € 0,1 mln.).                                                                                                                                                                                                 |

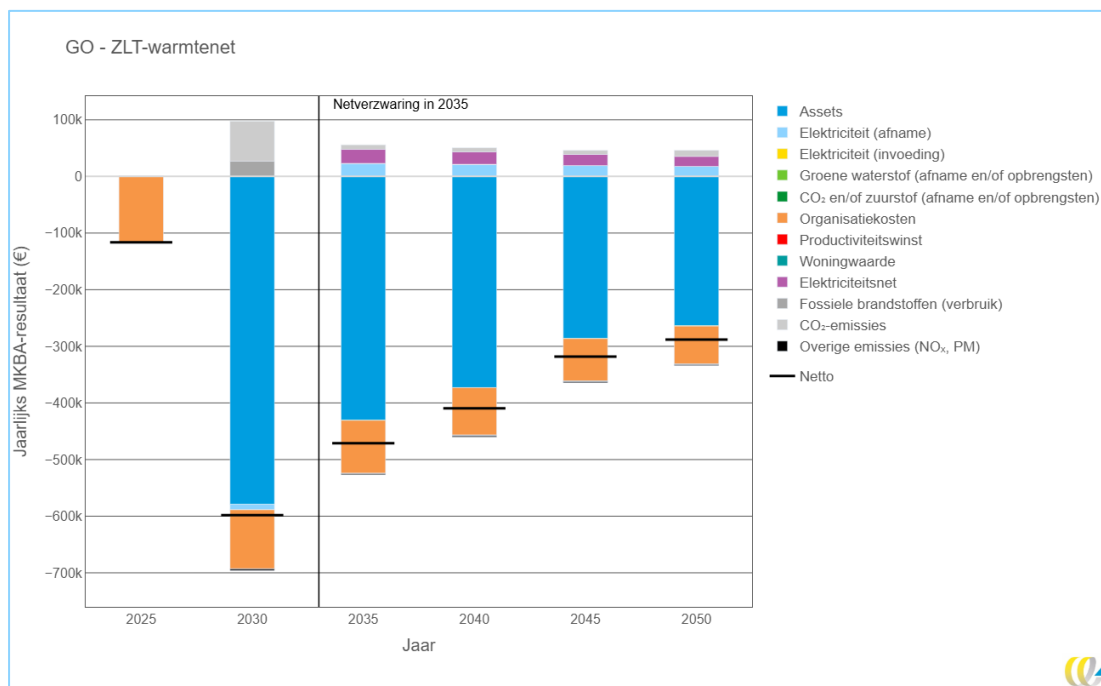
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Organisatiekosten                                               | -2,3                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Woningbouw                                                      | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>-9,7</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,3                         | Door de lagere elektriciteitsvraag van de warmtepompen in de energiehub en de inzet van collectieve (buurt)batterijen en -aggregaten is de netimpact van de energiehub lager dan de referentie. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 1,8 MW, terwijl dit in de energiehub 1,1 MW is; in <b>2050</b> is dit ook respectievelijk 1,8 en 1,1 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,3 mln.). |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>0,3</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | 0,5                         | Door het hogere <b>aardgasverbruik</b> in de referentie, ontstaan er voor de energiehub baten in de vorm vermeden milieukosten (+ € 0,3 mln.). Daarnaast leiden de emissies in de maakfase van de verschillende assets netto tot een baat voor energiehub (+ € 0,2 mln.).                                                                                                                                                                                     |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM)                         | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Externe effecten</b>                                         | <b>0,5</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Totaal</b>                                                   | <b>-9,5</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 36. Hierin is te zien dat het resultaat over de gehele periode negatief is. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten van de verschillende assets. Vanaf 2035 wordt geïnvesteerd in isolatie, waarvoor de kosten hoger liggen in de referentie. De grootste investering is die van de energiehub in het collectieve ZLT-warmtenet in 2030. Alle investeringen worden volgens een aflopend schema afgeschreven, wat het patroon in Figuur 36 verklaart.
- **Aardgasverbruik.** In de referentie is de buurt in 2030 overgestapt op hybride warmtepompen, maar moet de buurt tot 2035 nog regelmatig gebruikmaken van de gasboiler, omdat extra elektriciteitsafname van het net niet mogelijk is. Na netverzwaring in 2035 is dit niet meer nodig, waardoor de directe kosten voor aardgasverbruik en de daaraan gerelateerde milieukosten wegvallen.

- **Elektriciteitsafname.** Het elektriciteitsverbruik, en daarmee ook de afname van het net, neemt vanaf 2035 juist toe in de referentie doordat de elektrische warmtepomp na netverzwaring meer ingezet kan worden.

Figuur 36 – Mgba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

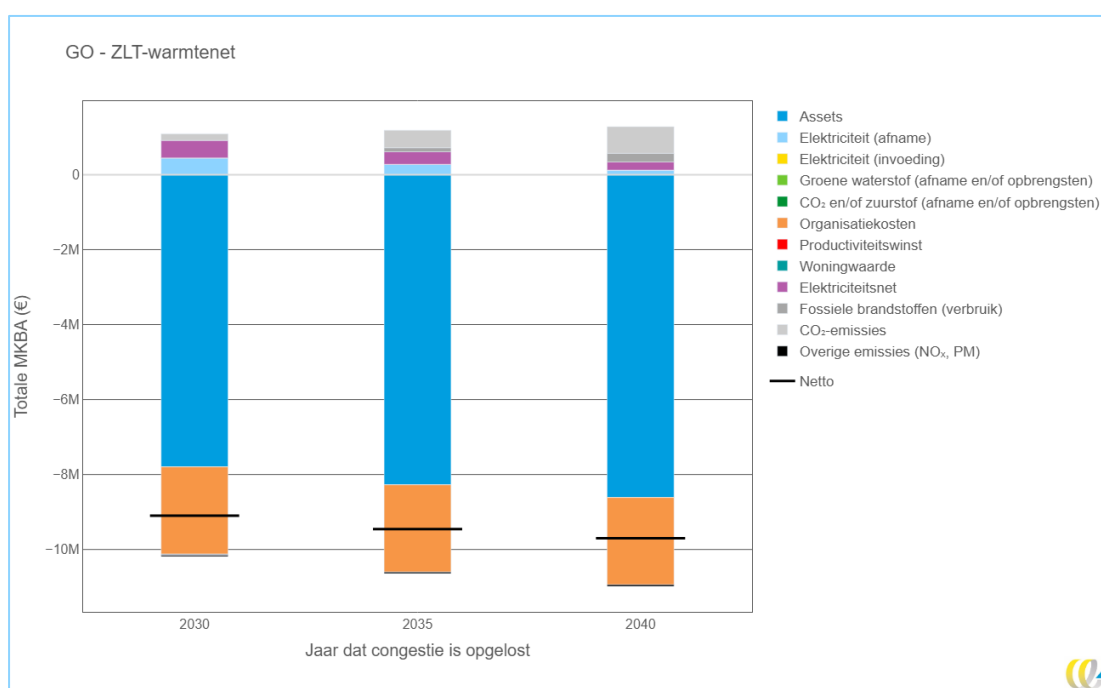
De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub afneemt. Dit is te zien in Figuur 37, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Aardgasverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, blijven gasboilers in de referentie langer en vaker ingezet worden, wat leidt tot extra directe kosten en milieukosten van aardgasverbruik. Dit zijn de belangrijkste redenen voor de verschuivingen in de donker- en lichtgrijze balken in Figuur 37.

- **Elektriciteitsafname.** Dat gasboilers langer ingezet moeten blijven worden naarmate netcongestie later oplost, betekent dus dat er voor een langere periode minder elektriciteit van het net kan worden afgenomen in de referentie. In de energiehubs wordt dit deels opgevangen door het gebruik van de buurtbatterij en het buurtaggregaat.
- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, stapt de buurt in de referentie later over op warmtepompen waardoor de directe kosten in de energiehubs hoger zijn.

Figuur 37 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 11.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal vergelijkbare gebieden en het aantal weq. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 114 tot 161. De lage factor is gebaseerd op het aantal vergelijkbare gebieden en de hoge factor op het huidige energieverbruik. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehubs op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -9 miljoen euro; landelijk opgeschaald -1 tot -1,4 miljard euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 700 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 115 tot 135 MW in 2050.

- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de periode 2025 tot 2050 neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 1,6 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 185 tot 260 kton.



# 12 Nieuwbouwwijk

## 12.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Deze casus beschrijft een grootschalig nieuwbouwproject waarbij de beschikbare netcapaciteit ontoereikend is, maar niet volledig ontbreekt (referentie: Merwede). In deze situatie geldt een beschikbaar vermogen van 0,87 kW per weq, terwijl de benodigde capaciteit afhankelijk is van het aantal voertuigen en de gekozen warmteoplossing. Volgens de [handreiking netbewuste nieuwbouw](#) ligt het gelijktijdig vermogen van een gemiddeld nieuwbouwappartement voor standaardverbruik, warmte en laden tussen 1 tot 1,35 kW (bij 65 m<sup>2</sup>) en van een eengezinswoning tussen 1,25 tot 1,85 kW (bij 120 m<sup>2</sup>). De lagere waardes gelden voor de meest netbewuste bouwconcepten. Hierbij zijn alleen individuele maatregelen getroffen, dus geen collectieve investeringen in opslag, opwek of laadoplossingen. In de casus Merwede wordt wel in deze zaken geïnvesteerd om de vermogensvraag verder omlaag te krijgen..

Om aan de totale energiebehoefte te voldoen binnen de beperkte vermogensruimte, wordt een collectieve batterij en aggregaat geïntegreerd in de energiehubs.

De referentiesituatie gaat uit van een lager aantal te realiseren woningen, zonder collectieve energievoorzieningen. Warmtetechniek, zonnepanelen en het aantal elektrische voertuigen per woning-equivalent blijven daarbij gelijk. Het aantal te bouwen woningen wordt bepaald door het benodigde vermogen per woning te delen door het beschikbare vermogen. Bij een ratio van 1 op 2 (0,9 staat tot 1,8) betekent dit dat slechts 50% van het beoogde aantal woningen gerealiseerd wordt. De maatschappelijke meerwaarde van de extra nieuwbouwwoningen wordt daarom toegerekend aan de energiehubs.

De maatschappelijke waarde is vastgesteld op basis van de residuele grondwaarde van nieuwbouwwoningen (WOZ-waarde minus bouwkosten). Deze residuele grondwaarde opbrengst weerspiegelt het woongenot van bewoners. In de mkba wordt de residuele grondwaarde vervolgens verdeeld over een periode van 50 jaar. Per woningtype, is op basis op het gemiddelde van ieder woningtype (tussenwoning, hoekwoning, twee-onder-een-kapwoning, vrijstaand en appartement) één kengetal bepaald voor de residuele grondwaarde. Voor de verwachte verdeling van nieuwbouwwoningen is uitgegaan van de huidige procentuele woningtypendistributie.

Tabel 36 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubscenario

|      | Uitgangspunten                                            | Referentiescenario                             | Energiehubscenario                                                        |
|------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | All-electric-warmtepompen.<br>Volledige benutting zon-pv. | Geen gezamenlijke elektriciteitsvoorzieningen. | Gezamenlijke aggregaat die af en toe bijspringt op tekorten op te vangen. |
| 2030 | Geen veranderingen.                                       |                                                | Gezamenlijke buurtbatterij en – aggregaat.                                |
| 2040 | Geen veranderingen.                                       |                                                |                                                                           |
| 2050 | Geen veranderingen.                                       |                                                | Geen congestie. Buurtbatterij en -aggregaat zijn niet meer nodig.         |

## 12.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De ruimtelijke analyse baseren we op de bekende NOVEX-woningbouwlocaties. Tot 2040 wil het [ministerie VRO circa 600.000 nieuwbouwwoningen](#) realiseren. In 2022 werden zeventien NOVEX-locaties vastgesteld. Daarnaast zijn er elf grootschalige nieuwbouw-ontwikkelingen buiten NOVEX om. In [2025](#) werden er nog vier NOVEX-locaties toegevoegd met minstens 3.500 woningen per locatie. We hebben de gepubliceerde minimale aantallen woningen verdeeld naar provincie en gepresenteerd in Tabel 37.

Tabel 37 – Aantallen woningen op grootschalige nieuwbouwlocaties

| Provincie     | Realisatie t/m 2030 | Minimaal 2040  |
|---------------|---------------------|----------------|
| Drenthe       | 0                   | 0              |
| Friesland     | 3.000               | 3.000          |
| Flevoland     | 42.400              | 127.500        |
| Gelderland    | 24.200              | 41.500         |
| Groningen     | 8.500               | 13.000         |
| Limburg       | 0                   | 0              |
| Noord-Brabant | 24.200              | 55.500         |
| Noord-Holland | 66.100              | 168.000        |
| Overijssel    | 14.800              | 18.500         |
| Utrecht       | 34.000              | 82.000         |
| Zeeland       | 0                   | 0              |
| Zuid-Holland  | 86.273              | 98.282         |
| <b>Totaal</b> | <b>303.473</b>      | <b>607.282</b> |

De casussamenstelling baseren we op een grootschalige nieuwbouwontwikkeling waarbij CE Delft in een lopend project betrokken is. Er wordt beoogd totaal 3.300 woningen te realiseren op deze locatie, er is geen transportvermogen beschikbaar voor utiliteitsbouw. De helft van deze woningen zijn appartementen, de rest rij- en hoekwoningen. Het beschikbaar transportvermogen is begrensd op 1,4 MW, waardoor de woningen 'netbewust' gebouwd zullen worden. Dat houdt in deze casus onder andere in dat ze een zeer hoge isolatiegraad en zeer efficiënt verwarmingssysteem hebben. Het aantal elektrische auto's waarvoor in de ontwikkeling maximaal ruimte is, is totdat er netverzwaring mogelijk is begrensd op 1.000. Daarnaast wordt er in deze hub geïnvesteerd in collectieve opwek (zon-PV), batterijen en laadcapaciteit. De inschatting in deze casus is dat men zonder het toepassen van deze maatregelen slechts de helft van het aantal woningen kan realiseren.

## 12.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van de woonwijk bedraagt circa 5 GWh<sub>t</sub> /jaar in de referentie, en 10 GWh<sub>t</sub> /jaar in de energiehubs; precies twee keer zoveel omdat in de energiehubs twee keer zoveel woningen worden gerealiseerd. De nieuwbouwwijk wordt gerealiseerd in 2025 en alle woningen worden direct voorzien van all-electric-warmtepompen in zowel de referentie als de energiehubs, waardoor er ná 2025 geen additionele elektriciteitsvraag plaats vindt voor de warmtevoorziening.

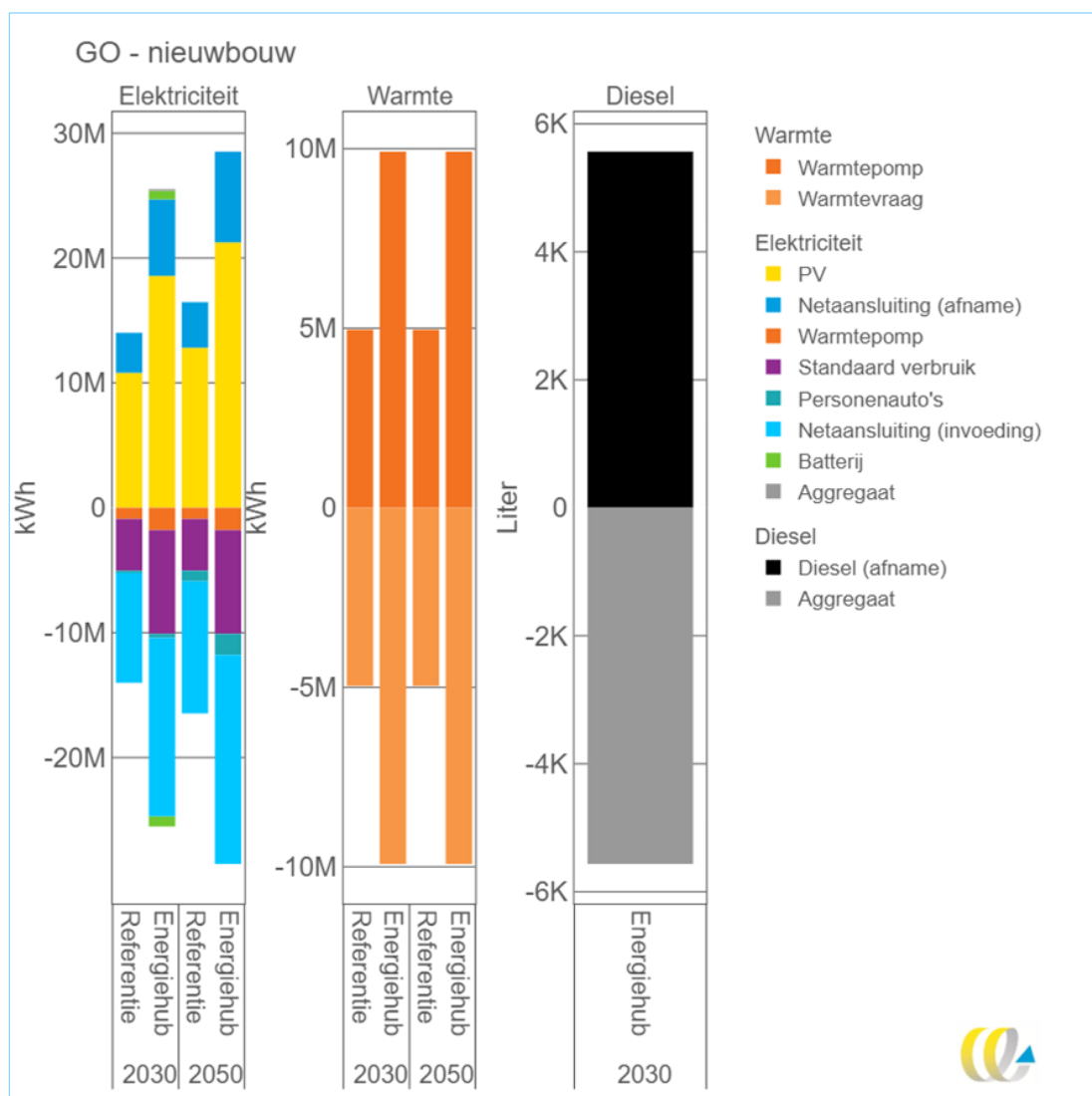
Zowel in het referentiescenario als in het energiehubsscenario is de groei van de elektriciteitsvraag beperkt, en wordt veroorzaakt door de toename in het aantal elektrische voertuigen in de wijk. In de referentie stijgt het verbruik van circa 5 GWh/jaar in 2025 naar 5,9 GWh/jaar in 2050. In de energiehubs neemt de vraag toe van 10,2 GWh/jaar in 2025 naar 11,8 GWh/jaar in 2050.

In 2025 tot 2050 wordt in de referentie alle elektriciteitsvraag voorzien vanuit lokale zon-opwekking en het net. Door de minimale toename van de vraag door de elektrische voertuigen is de huidige netaansluiting van de wijk (1,41 MW) voldoende om deze extra laadvraag te voorzien.

De beperkte wijkaansluiting van 1,41 MW zorgt ervoor dat de energiehubs in 2025 al een buurtaggregaat van 1,41 MW moet aanschaffen om op een aantal uren in het jaar bij te springen. In totaal voorziet deze aggregaat circa 780 MWh/jaar in 2025. Doordat de energiehubs in 2030 een gezamenlijke batterij aanschafft (6,4 MWh en 1,41 MW) wordt de inzet van het buurtaggregaat sterk verminderd. Op jaarbasis voorziet de aggregaat de woonwijk nog van slecht 140 MWh/jaar, terwijl de batterij 680 MWh/jaar (opslaat en) levert aan de wijk. Na netverzwaring is de buurtbatterij niet meer nodig en verdwijnt deze uit de wijk.

Hoewel het aantal woningen in de energiehubs verdubbelt, draagt de energiehubs desondanks positief bij aan het beperken van de piekbelasting op het elektriciteitsnet. Dat is te verklaren doordat de maximale netbelasting veroorzaakt wordt door invoeding en de energiehubs t/m 2050 ook een beperkend gezamenlijk transportcontract heeft voor invoeding. Het gevolg is dat de maximale invoedingspiek in de energiehubs beperkt blijft tot 8 MW, terwijl dit 9,5 MW is voor de referentie (zie Tabel 39) waar deze beperking niet geldt. Door deze beperking kan een aanzienlijk deel van de lokaal opgewekte elektriciteit niet worden ingevoerd of direct worden gebruikt. In 2050 wordt naar verwachting ongeveer 20% van alle lokaal opgewekte elektriciteit gecurtaild. Merk op dat de maximale afnamepiek in 2050 circa twee keer hoger ligt in de energiehubs dan in de referentie (Tabel 38).

Figuur 38 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en diesel voor referentie en energiehubs, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Tabel 38 – Netbelasting door **afname** voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met en zonder energiehubs

| Piekbelasting door afname (MW)    | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 1,41 | 1,41 | 1,41 | -    |
| Referentie - met netverzwaring    | -    | 1,41 | 1,51 | 1,57 |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 1,41 | 1,41 | 1,41 | -    |
| Energiehub - met netverzwaring    | -    | 2,82 | 3,01 | 3,13 |

Tabel 39 – Netbelasting door **invoeding** voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met en zonder energiehubs

| Piekbelasting door invoeding (MW) | 2025  | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|-------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 7,42  | 7,42 | 7,42 | -    |
| Referentie - met netverzwaring    | -     | 7,97 | 8,73 | 9,47 |
| Energiehub - zonder netverzwaring | -7,42 | 7,42 | 7,42 | -    |
| Energiehub - met netverzwaring    | -     | 7,42 | 7,42 | 8,05 |

## 12.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 40 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus nieuwbouwwijk. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie ruim positief uitvalt (+ € 73 miljoen).

De belangrijkste driver voor dit resultaat is de extra **woningbouw** die door de energiehubs gerealiseerd kan worden. Dit weegt ruimschoots op tegen de investeringen in assets en bijvoorbeeld de CO<sub>2</sub>-emissies van de bouw van de woningen.

Tabel 40 – Resultaat mkba nieuwbouwwijk; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                        | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                 | -14,8                       | De investeringen in assets liggen in de energiehubs hoger dan in de referentie: er wordt geïnvesteerd in meer <b>warmtepompen</b> (- € 11,7 mln.) en meer <b>zon-pv</b> (- € 1,7 mln.) en tevens maakt de energiehubs gebruik van een <b>buurtaggregaat</b> (- € 0,7 mln.) en een <b>buurtbatterij</b> (- € 0,7 mln.). |
| Elektriciteit (afname) | -5,2                        | Doordat er in de energiehubs twee keer zoveel woningen worden gerealiseerd als in de referentie, ligt de elektriciteitsafname van het net ook ongeveer twee keer zo hoog.                                                                                                                                              |

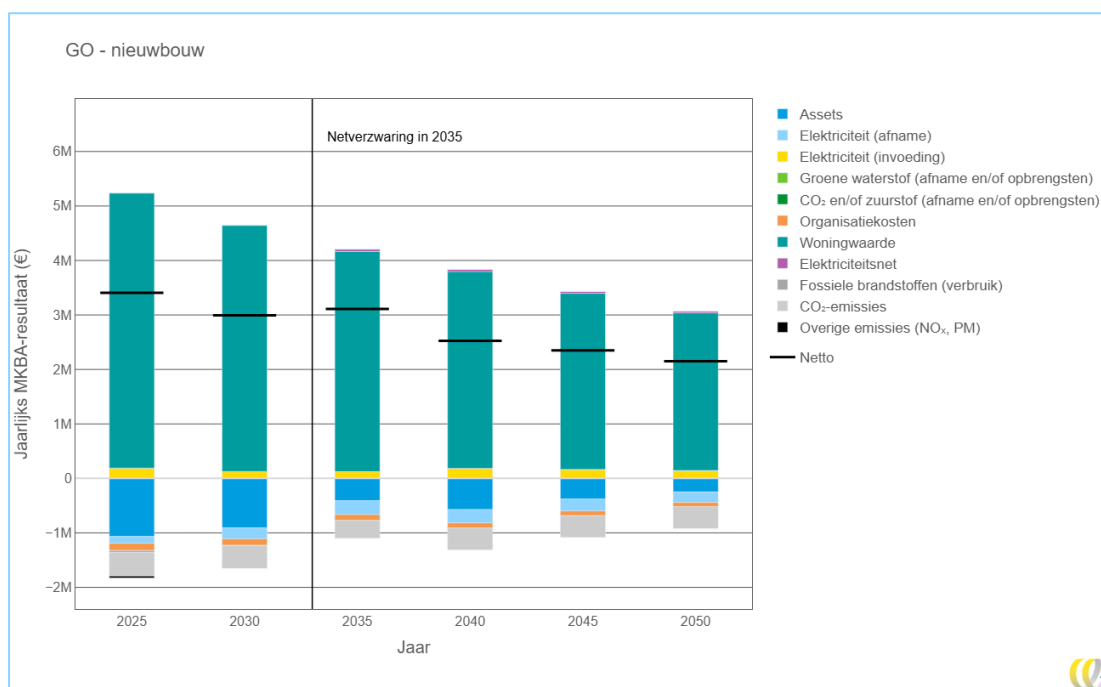
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektriciteit (invoeding)                                       | 3,9                         | Door een samenspel van de extra <b>zon-pv</b> die de energiehub realiseert en het gebruik van de buurtbatterij, vindt er in de energiehubsituatie meer invoeding van elektriciteit op het net plaats.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | -0,2                        | Tot netverzwaring in 2035 maakt de energiehub gebruik van het buurtaggregaat wanneer het onvoldoende elektriciteit van het net kan afnemen. Dit leidt tot directe kosten voor het <b>dieselvebruik</b> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Organisatiekosten                                               | -2,7                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Woningbouw                                                      | 100,7                       | De realisatie van extra woningen leidt tot een forse baat voor de energiehub in de vorm van ervaren woongenot van de bewoners.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>81,8</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,6                         | Door de lagere elektriciteitsvraag van de warmtepompen in de energiehub en de inzet van collectieve (buurt)batterijen en -aggregaten is de netimpact van de energiehub lager dan de referentie. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 8,7 MW, terwijl dit in de energiehub 7,4 MW is; in <b>2050</b> is dit ook respectievelijk 8,7 en 7,4 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,6 mln.).                                                                                                                     |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>0,6</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | -9,3                        | De voornaamste additionele milieukosten in de energiehub ontstaan door de <b>extra woningbouw</b> die wordt gerealiseerd (- € 9,3 mln.). Dit betreffen de emissies die ontstaan voor (materialen die nodig zijn) en tijdens de bouw. Voor de andere <b>assets</b> ontstaan er tevens extra emissies in de maakfase (- € 0,6 mln.). Ook wordt er meer CO <sub>2</sub> uitgestoten door extra <b>elektriciteitsafname</b> (- € 0,7 mln.) en <b>dieselvebruik</b> (- € 0,2 mln.). Daartegenover staan vermeden emissies door additionele <b>invoeding</b> op het net (+ € 1,4 mln.). |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM)                         | -0,2                        | Door de inzet van het buurtaggregaat in de energiehub ontstaan er milieukosten door de NO <sub>x</sub> - en PM-emissies die bij dieselvebruik vrijkomen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Externe effecten</b>                                         | <b>-9,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Totaal</b>                                                   | <b>72,9</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 39. Hierin is te zien dat het resultaat in alle jaren sterk positief is door de maatschappelijke waarde van de extra woonbouw (ervaren woongenot). We hebben het woongenot verdeeld over de levensduur

van een woning (in mkba's 50 jaar), waarvan 25 jaar binnen de looptijd van de analyse valt.

Van de overige welvaartseffecten is de grootste verschuiving te zien in de directe kosten van de assets. Die fluctuaties zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten van de verschillende assets.

Figuur 39 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

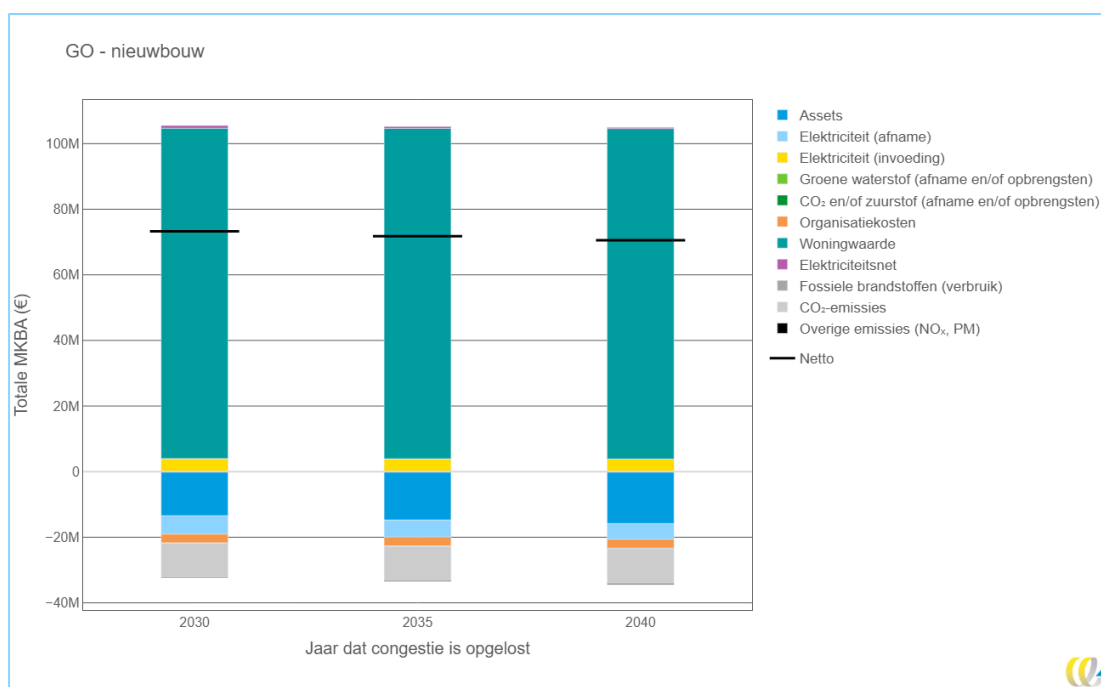
Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub afneemt. In relatieve zin gaat dit echter om kleine verschuivingen: € 74 miljoen wanneer netcongestie in 2030 oplost ten opzichte van € 72 miljoen in 2040. Dit is te zien in Figuur 40, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Assets.** De grootste verschuiving vindt plaats bij de directe kosten van de assets. Naarmate netcongestie later oplost, maakt de energiehubs langer gebruik van batterijen en aggregaten om de ongefaciliteerde elektriciteitsvraag te kunnen opvangen en vallen de directe kosten dus hoger uit (€ 0,3 mln. wanneer netcongestie in 2030 oplost ten opzichte van € 1,8 mln. in 2040).
- **Elektriciteitsafname.** Naarmate netcongestie later oplost, is er een langere periode waarin de energiehubs niet op elk moment elektriciteit van het net kan afnemen (wat wordt opgevangen door het gebruik van de buurtbatterij en het buurtaggregaat). Wanneer netcongestie in 2040 oplost, zijn de directe kosten voor elektriciteitsafname daardoor ongeveer € 1 miljoen lager dan wanneer dit in 2030 zou gebeuren.

Figuur 40 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 12.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal nieuw te bouwen woningen. In de casus zijn dit er 3.300, in alle grootschalige nieuwbouwprojecten zijn dit er minimaal 607.282. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 184 als maximaal potentieel. Deze voorwaarden gelden echter alleen als er wel beperkte netcapaciteit beschikbaar is voor de woonwijk, en er anders geen ruimte is. Daarom schatten we grof in dat het aantal gebieden waarvoor dit geldt tussen de 25 en 50% van



dit potentieel is. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehubs op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus 72 miljoen euro (~21.000 per woning); landelijk opgeschaald komt dit uit op 13,2 miljard euro. Met een realistischer potentieel van 25-50% van de onderzochte gebieden, is de totale waarde dan € 3,3 tot € 6,6 miljard voor nieuwbouwwijken waar energiehubs potentieel een goede oplossing zijn.
- **Netimpact:** In de referentie gaan we uit dat er beperkt vermogen beschikbaar is, in de energiehubs gaan we ervan uit dat met datzelfde vermogen er met collectieve investeringen en afstemming meer woningen bijgebouwd kunnen worden. Er is dus geen *vermeden* netimpact om hier te extrapoleren.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** De netto-uitstoot van de casus is 36 kton, onder andere voor bouw van additionele huizen. Nationaal kan dit leiden tot cumulatief 1,7 to 3,3 Mton extra emissies.

# 13 MT-restwarmtenet bestaande buurt

## 13.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

De casus bestaat uit een gemengde woonwijk waarin zowel woningen als bedrijven met maatschappelijke en commerciële functies aanwezig zijn. Het grootste deel van het energiegebruik komt van de woningen, die bestaan uit appartementen, rijwoningen, hoekwoningen en vrijstaande woningen. Deze kennen uiteenlopende isolatieniveaus, wat resulteert in een uiteenlopende warmtevraag.

In de huidige situatie gebruiken de meeste gebouwen gasketels om in hun warmtevraag te voorzien. In de referentiesituatie wordt in 2030 de overstap gemaakt naar hybride warmtepompen, terwijl in de energiehubs er een collectief MT-warmtenet wordt aangeschaft. Huishoudens gebruiken de warmte uit het MT-warmtenet direct voor verwarming. Bij eventuele tekorten springt een (centrale) gasketel bij die de resterende warmtevraag aanvult.

De uurlijkse restwarmteprofielen voor het warmtenet, baseren we op de uurlijkse gasvraagprofielen van de industrie. We nemen op basis van een eerdere inventarisatie een percentage van 40%<sup>19</sup> van het gasverbruik van de industrie aan als beschikbare restwarmte. De restwarmte wordt niet met warmtepomp opgewaardeerd voor gebruik in warmtenet.

De elektrificatie van vervoer en ingroei van zon-pv volgt de andere casussen.

Uit de ruimtelijke analyse blijkt dat de helft van de industrie en RWZI-casussen op minder dan 500 meter gelegen zijn van woonwijken. Dit willen we als uitgangspunt hanteren voor wanneer warmtelevering nog mogelijk is. Industrie is ook nog relatief vaak gelegen bij bedrijventerreinen, RWZI's relatief minder vaak.

---

<sup>19</sup> [CE Delft studie 'Restwarmte, de stand van zaken. Een verkenning van beleid, kansen en barrières.' 2019](#)

Tabel 41 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubsscenario

|      | Uitgangspunten                                                                      | Referentiescenario                                                                                     | Energiehubsscenario                                                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Gasketel als warmtevoorziening.                                                     |                                                                                                        |                                                                                                             |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Alle gebouwen nemen een hybride warmtepomp.<br><br>Energietekorten worden opgevangen door de gasketel. | Er wordt een MT-warmtenet aangelegd die de warmtevraag voorziet.<br><br>Gezamenlijke batterij en aggregaat. |
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Energietekorten worden opgevangen door de gasketel (vóór netverzwaring).                               | Gezamenlijke batterij en aggregaat.                                                                         |
| 2050 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Geen congestie.                                                                                        | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                                  |

## 13.2 Resultaten ruimtelijke analyse

De woonwijk is samengesteld op basis van buurten die in de [Actualisatie Startanalyse aardgasvrije buurten 2025 van PBL](#) zijn aangemerkt als robuust geschikt voor een MT-warmtenet (strategie S2 met restwarmte). Voor deze definitiemethode is gekozen omdat dit naar verwachting het toepassingsgebied van een MT-warmtenet het best representeert.

Als criterium voor de ‘robuuste’ optie is een kostenverschil van minimaal € 250 per weq per jaar gehanteerd ten opzichte van de volgende goedkoopste strategie. Daarnaast is gefilterd op buurten met minimaal 100 weq; industrie- en bedrijventerreinen en niet-stedelijke buurten zijn uit de dataset verwijderd. Dit resulteerde in 711 buurten met in totaal 787.000 weq. Vervolgens zijn aangrenzende buurten samengevoegd, waarbij de mediane buurt uitkomt op circa 4.750 woningen en 750 weq aan utiliteitsfuncties.

### Samenstelling van de woonwijk

- Woningen: 4.750, waarvan bijna 2.000 meergezinswoningen. De overige woningen zijn een mix van rijwoningen, hoekwoningen en enkele vrijstaande woningen. Het isolatieniveau is gemengd, overwegend matig tot redelijk geïsoleerd. Er is 1,05 auto per woning.
- Utiliteit: 750 weq, bestaande uit algemene voorzieningen zoals kantoren, winkels, onderwijs, zorg, logies en bijeenkomstfuncties.

## 13.3 Energetische uitwerking – casus

De totale warmtevraag van de gemengde woonwijk bedraagt circa 49 GWh<sub>t</sub>/jaar. Deze vraag blijft constant over de jaren, maar wordt in de referentie verduurzaamd door (hybride) warmtepompen, terwijl de energiehubs collectief investeert in een MT-warmtenet en een gezamenlijk gasketel. Om deze reden groeit de elektriciteitsvraag in de referentie sterker dan die van de energiehubs (zie Figuur 41), namelijk van circa 22 GWh/jaar in 2025 naar 43,6 GWh/jaar in 2050, terwijl dit voor de energiehubs 31 GWh/jaar is in 2050.

Doordat de energiehubs in de volgende jaren gebruik maakt van een centrale (bio)gasketel om warmtekorten op te vangen, neemt de vraag naar (bio)gas niet zo sterk af als in de referentie. Waar zowel de referentie als de energiehubs in 2025 circa 5,4 miljoen m<sup>3</sup> gas/jaar verbruikt, is dit in 2050 in de energiehubs nog 1,3 miljoen m<sup>3</sup> gas/jaar, terwijl de referentie volledige gasvrij is.

Door de verminderde elektriciteitsvraag in de energiehubs, wordt er fors minder elektriciteit afgenomen van het net; circa 17,5 GWh/jaar in 2030 (vóór netverzwaring) en 23,4 GWh/jaar in 2050 (na netverzwaring), terwijl dit voor de referentie 25 GWh/jaar en 36 GWh/jaar is respectievelijk.

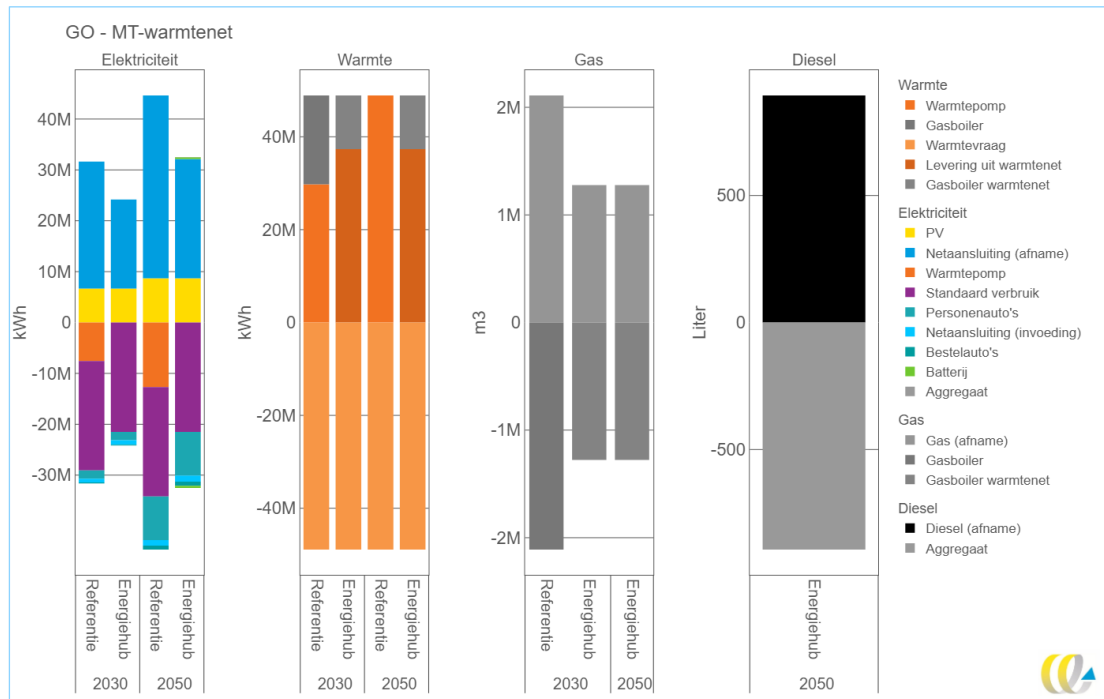
Pas nadat congestie is opgelost investeert de energiehubs in een gezamenlijke batterij van 1,8 MWh/1 MW in 2040 en 3,1 MWh/1,5MW in 2050; welke circa 180 MWh/jaar en 355 MWh/jaar respectievelijk voorzien.

In 2030, voor netverzwaring, is het in de energiehubs niet noodzakelijk om gebruik te maken van een aggregaat als aanvullende voorziening. Naarmate de elektriciteitsvraag in de daaropvolgende jaren stijgt, verandert deze situatie, waar ook na netverzwaring in 2040 het aggregaat met een vermogen van 770 kW af en toe bijspringt. In 2050 bedraagt het benodigde aggregaatvermogen 850 kW. De totale elektriciteitsproductie vanuit het aggregaat blijft echter beperkt, namelijk 13 MWh/jaar in 2040 en 22 MWh/jaar in 2050.

In de energiehubs kan meer elektriciteit uit zon-pv invoeden op het net dan in de referentie. Waar in 2030, vóór netverzwaring, in de referentie circa 760 MWh/jaar wordt ingevoed, bedraagt dit 880 MWh/jaar in de energiehubs. Ook na netverzwaring wordt er meer elektriciteit ingevoed door de energiehubs; circa 1,21 GWh/jaar versus 1,07 GWh/jaar in de referentie.

De piekbelasting wordt door de energiehubs fors verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens (van de wijk) niet verhoogd kunnen worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehubs voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 12,2 MW in de referentie tegenover 4,4 MW (-64%) in de energiehubs.

Figuur 41 – Vraag en aanbod van verschillende energiedragers en gassen voor referentie en energiehub, en voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050



Tabel 42 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehub. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                | 2025 | 2030  | 2040  | 2050  |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|
| Referentie - zonder netverzwaring | 4,2↓ | 4,9↓  | 4,9↓  |       |
| Referentie - met netverzwaring    |      | 10,5↓ | 11,6↓ | 12,2↓ |
| Energiehub - zonder netverzwaring | 4,2↓ | 4,2↓  | 4,2↓  |       |
| Energiehub - met netverzwaring    |      | 3,6↓  | 4,2↓  | 4,4↓  |

## 13.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 43 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus MT-warmtenet bestaande buurt. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie positief uitvalt (+ € 24,3 miljoen).

De belangrijkste driver voor dit resultaat is de **elektriciteitsafname van het net** (door gebruik van het warmtenet vermijdt de energiehub elektriciteitsverbruik door warmtepompen). Ook de vermeden **CO<sub>2</sub>-emissies** (voornamelijk door hoge emissies in de maakfase van hybride warmtepompen), uitgespaarde investeringen in het

**elektriciteitsnet** en lagere directe kosten voor **assets** gelden als substantiële baten voor energiehubs.

Tabel 43 – Resultaat mkba MT-warmtenet bestaande buurt; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

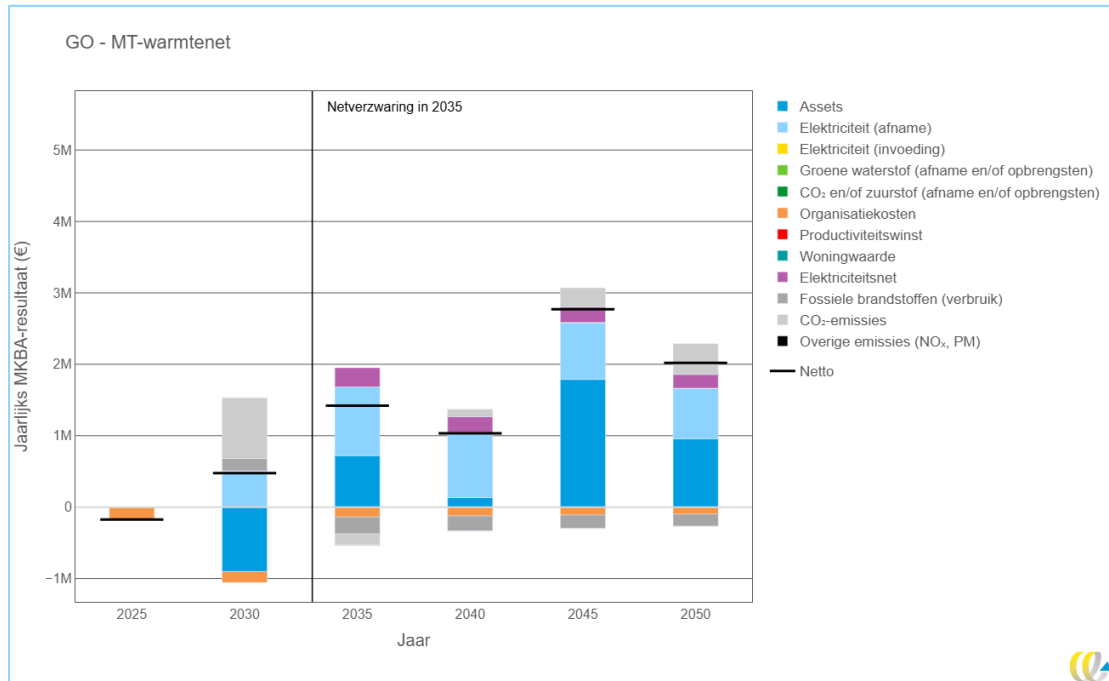
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                                                          | 4,2                         | De investeringen in assets liggen in de energiehubs lager dan in de referentie: er wordt geïnvesteerd in een <b>warmtenet</b> (- € 67,4 mln.) en daarnaast in <b>aggregaten</b> (- € 0,4 mln.) en <b>batterijen</b> (- € 0,4 mln.). Daartegenover wordt in de referentie geïnvesteerd in <b>elektrische warmtepompen</b> (+ € 64,6 mln.) en <b>gasboilers</b> (+ € 7,9 mln.).                                                                                                         |
| Elektriciteit (afname)                                          | 15,8                        | Het elektriciteitsverbruik ligt aanzienlijk hoger in de referentie omdat de buurt daar gebruik maakt van <b>elektrische warmtepompen</b> in plaats van een MT-warmtenet zoals in de energiehubs. Ook de elektriciteitsafname van het net ligt in de energiehubs dus substantieel lager dan in de referentiesituatie (verschil: ongeveer 170 GWh over 2025-2050).                                                                                                                      |
| Elektriciteit (invoeding)                                       | 0,1                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Fossiele brandstoffen (verbruik)                                | -2,4                        | In de referentiesituatie, waar de buurt in 2030 overstapt op hybride warmtepompen, wordt tot 2035 nog <b>aardgas</b> verbruikt. Na 2035, met grotere transportvermogens, worden de gasboilers niet meer ingezet. In de energiehubs worden eventuele tekorten in het warmtenet, dat in 2030 in gebruik wordt genomen, opgevangen met een centrale gasketel. Tussen 2030 en 2050 is dit nog regelmatig, waardoor de directe kosten voor aardgasverbruik in de energiehubs hoger liggen. |
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Organisatiekosten                                               | -3,5                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Woningbouw                                                      | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>14,2</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Elektriciteitsnet                                               | 3,7                         | Door de lagere elektriciteitsvraag in de energiehubs (door gebruik van het MT-warmtenet) is de netimpact van de energiehubs substantieel lager dan in de referentie. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 11,6 MW, terwijl dit in de energiehubs 4,2 MW is; in <b>2050</b> is dit respectievelijk 12,2 en 4,4 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 3,7 mln.).                                                     |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>3,7</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|                                         | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> -emissies               | 6,5                         | Het grootste verschil in CO <sub>2</sub> -uitstoot ontstaat in de maakfase van de assets. Met name voor hybride warmtepompen liggen deze relatief hoog (+ € 10,9 mln.). Voor het warmtenet zijn deze substantieel lager (- € 2,5 mln.). Verder ontstaan er CO <sub>2</sub> -baten door vermeden elektriciteitsafname van het net (+ € 0,5 mln.). Het hogere <b>aardgasverbruik</b> in de energiehub leidt tot extra milieukosten (- € 2,3 mln.). |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM) | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Externe effecten</b>                 | <b>6,5</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Totaal</b>                           | <b>24,3</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 42. Hierin is te zien dat het resultaat over de gehele periode positief is. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten van de verschillende assets. De grootste investering in de energiehub is die in het collectieve MT-warmtenet in 2030; voor de bedrijven in de referentie zijn dat de investeringen in de hybride warmtepompen in 2030 en 2035.
- **CO<sub>2</sub>-emissies.** In de referentie is de buurt in 2030 overgestapt op hybride warmtepompen, maar moet de buurt tot 2035 nog regelmatig gebruikmaken van de gasboiler, omdat extra elektriciteitsafname van het net niet mogelijk is. Na netverzwaring in 2035 is dit niet meer nodig, waardoor de directe kosten voor aardgasverbruik en de daaraan gerelateerde milieukosten wegvallen. Verder spelen ook ketenemissies van de verschillende assets een rol in het fluctuerende patroon.
- **Elektriciteitsafname.** Het elektriciteitsverbruik, en daarmee ook de afname van het net, neemt vanaf 2035 juist toe in de referentie doordat de elektrische warmtepomp na netverzwaring meer ingezet kan worden.

Figuur 42 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehub. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehub ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehub afneemt. Dit is te zien in Figuur 43, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

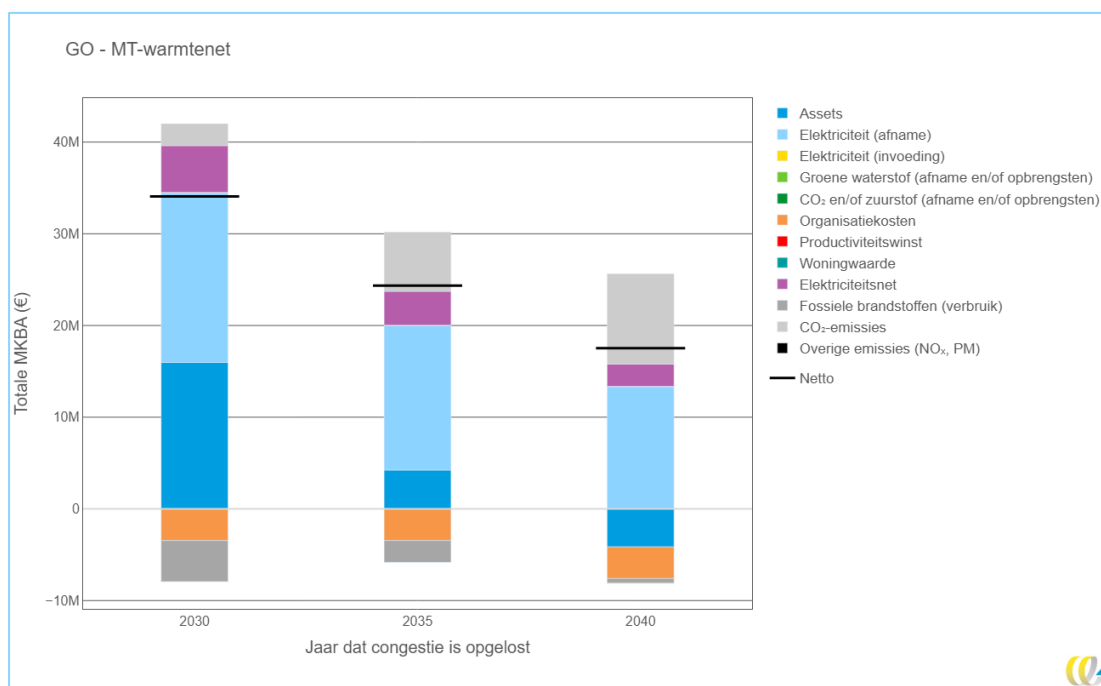
De grootste drivers voor dit resultaat zijn:

- **Aardgasverbruik.** Naarmate netcongestie later oplost, blijven gasboilers in de referentie langer en vaker ingezet worden, wat leidt tot extra directe kosten en milieukosten van aardgasverbruik (en dus baten voor energiehub). De energiehub blijft over de gehele periode gebruikmaken van de centrale gasketel, die inspringt in geval van tekorten in het warmtenet.
- **Elektriciteitsafname.** Naarmate netcongestie later oplost, kan in de referentie voor een langere periode minder elektriciteit van het net worden afgenomen, waardoor de baten van minder elektriciteitsafname lager uitvallen voor de energiehub.



- **Assets.** Naarmate netcongestie later oplost, stapt de buurt in de referentie later over op warmtepompen, waardoor uitgespaarde investeringskosten voor de energiehub lager zijn.

Figuur 43 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 13.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal weq en het huidige gasverbruik. Op basis van deze eigenschappen zijn de resultaten opgeschaald met een factor 143 tot 157. De lage factor is extrapolatie gebaseerd op het aantal vierkante meters gebruiksoppervlakte, de hoge factor gebaseerd op het huidige energieverbruik. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus 24 miljoen euro; landelijk opgeschaald 3.400 tot 3.800 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 7.800 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 1,0 tot 1,2 GW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de periode 2025 tot 2050 neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 22,4 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 2.900 tot 3.500 kton.

# 14 Bedrijventerrein duurzame elektriciteitsproductie

## 14.1 Belangrijkste kenmerken archetype en casus

Dit archetype betreft een gemengd bedrijventerrein waarbij de verduurzaming van zowel de mobiliteit als (industriële) warmteprocessen zoveel mogelijk wordt gerealiseerd door elektrificatie. De casus die voor dit archetype is geanalyseerd is qua samenstelling en energiebehoefte gelijk aan die van de casus *Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie*. In deze casus betreft het echter een terrein met relatief veel potentieel voor energie-opwekking via zon-pv.

In de huidige situatie voorzien bedrijven afzonderlijk in hun warmte- en elektriciteitsvraag, met een grote afhankelijkheid van gasketels en beperkte inzet van duurzame bronnen. Richting 2030–2050 worden (hybride) warmtepompen in stapsgewijs aangeschaft voor zowel de referentie als de energiehub.

In de energiehub wordt in 2025 gezamenlijk geïnvesteerd in een windturbine van 5 MW en een gezamenlijk zonnepark van 5 MW, terwijl deze investeringen niet plaatsvinden in de referentiesituatie.

Daarnaast vindt er elektrificatie van mobiliteit plaats richting 2050, waarbij het groeiende aantal elektrische bestelauto's, trucks en personenauto's leidt tot extra elektriciteitsvraag. Het ingroeipad voor elektrische voertuigen is gelijk tussen de referentiesituatie en de energiehub. Indien elektriciteitsafname uit het net en batterij onvoldoende is, kan de resterende laadvraag van de elektrische voertuigen ook worden voorzien door een aggregaat.

Tabel 44 – Overzicht van uitgangspunten en verschillen tussen het referentie – en energiehubscenario

|      | Uitgangspunten                                                                                                                                                   | Referentiescenario                                                                                 | Energiehubscenario                                                                                                       |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2025 | Gasketel als warmtevoorziening.                                                                                                                                  |                                                                                                    |                                                                                                                          |
| 2030 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Warmtetechniek mix van gasketel, hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv. | Geen additionele investeringen in hernieuwbare opwek.<br><br>Individuele batterijen en aggregaten. | Additionele investering in een windturbine van 5 MW en een zonnepark van 5 MW.<br><br>Gezamenlijk batterij en aggregaat. |
| 2040 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Warmtetechniek mix van hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv.           | Individuele aggregaten en batterijen (vóór netverzwaring) en aggregaten.                           | Gezamenlijk batterij en aggregaat.                                                                                       |
| 2050 | Groei elektrische voertuigen in lijn met Elaad-prognose.<br><br>Warmtetechniek mix van hybride- en all-electric-warmtepomp.<br><br>Ingroei van zon-pv.           | Geen congestie, dus ook geen aggregaten en batterijen.                                             | De gezamenlijke batterij en aggregaat blijft ook na netverzwaring bestaan.                                               |

## 14.2 Resultaten ruimtelijke analyse

In deze casus is uitgegaan van hetzelfde bedrijventerreinen & potentieel als in de casussen gemengd bedrijventerrein – elektrificatie & ZLT-net. De beschrijving van de ruimtelijke analyse is te vinden in Paragraaf 3.2. We gaan uit van dezelfde potentie als deze casussen, maar corrigeren voor eventuele dubbeltellingen.

Voor de casus duurzame elektriciteitsproductie is onderzocht hoeveel zon-pv en windturbines binnen of in de nabijheid van de bedrijventerreinen aanwezig zijn. Op 28 van de 347 terreinen staan windturbines op minder dan 500 meter afstand. In deze analyse is per windturbine slechts een-op-een een relatie gelegd met een bedrijventerrein, waardoor dubbeltellingen kunnen voorkomen. In totaal gaat het om 82 turbines met een gemiddeld vermogen van 2,4 MW. Voor de casus wordt uitgegaan van een kleinere turbine van 1,5 MW (tiphoogte circa 100 meter), wat ongeveer overeenkomt met het huidige jaarverbruik van de bedrijven in de casus. Nieuwe windmolens op land hebben doorgaans

veel grotere vermogens ( $> 5$  MW), maar omdat de productie hiervan de elektriciteitsvraag van de casus ruimschoots zou overstijgen, is dit geen specifiek lokale toepassing.

Voor zon-pv (op basis van gerealiseerde SDE++-projecten in 2025) zijn 452 beschikkingen afgegeven, verdeeld over 148 van de 347 terreinen. Het gemiddelde vermogen per beschikking bedraagt 855 kWp, het mediane vermogen 240 kWp. In de casus is uitgegaan van een bestaand vermogen van circa 250 kW, aangevuld met de aanleg van een vergelijkbare collectieve veldinstallatie.

## 14.3 Energetische uitwerking – casus

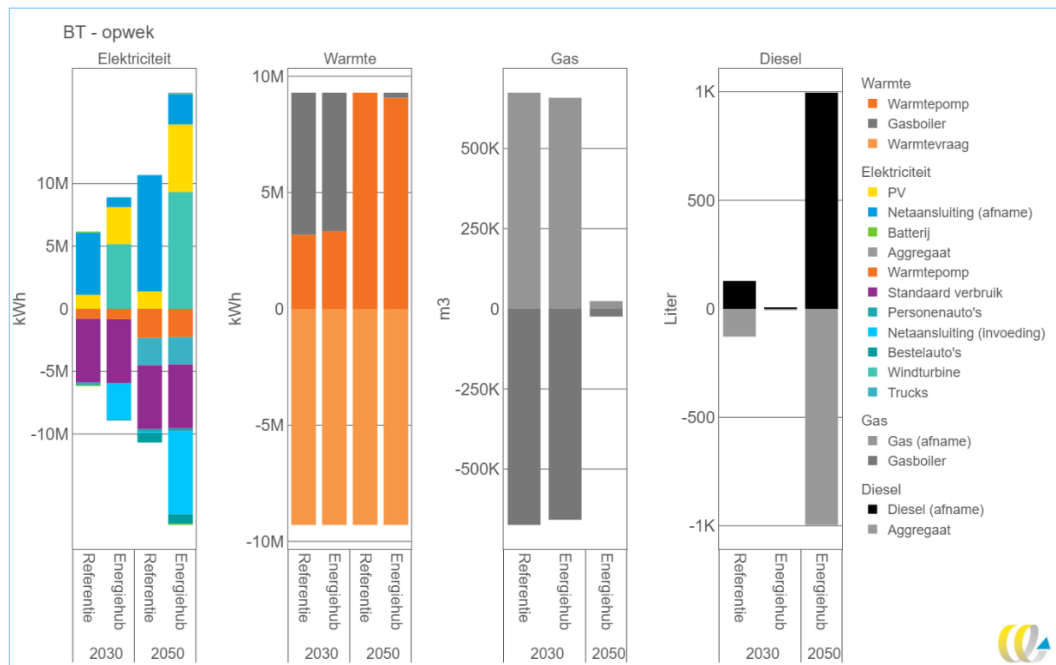
De totale warmtevraag van het bedrijventerrein bedraagt circa 9,3 GWh<sub>t</sub>/jaar en is contant voor de periode 2025 t/m 2050. De elektriciteitsvraag groeit sterk door de warmtevoorziening en mobiliteit: van circa 5,1 GWh/jaar in 2025 naar ruim 10,5 GWh/jaar in 2050. In de energiehubs is de totale vraag vergelijkbaar, maar wordt een groter deel lokaal opgewekt via wind en zon.

De energiehubs vermindert de afname uit het net aanzienlijk. In 2030 gaat het in de referentie zonder netverzwaring om circa 5,0 GWh/jaar, tegenover circa 0,8 GWh/jaar in de energiehubs. In 2050, na netverzwaring, is dit verschil nog groter: 9,3 GWh/jaar (referentie) versus 2,4 GWh/jaar (energiehub). De verminderde afname uit het net is grotendeels een gevolg van de gezamenlijke energieopwekking uit wind en zon-pv in de energiehubs, en het feit dat het transportvermogen van de energiehubs ook na netverzwaring sterker beperkt is (zie Figuur 44).

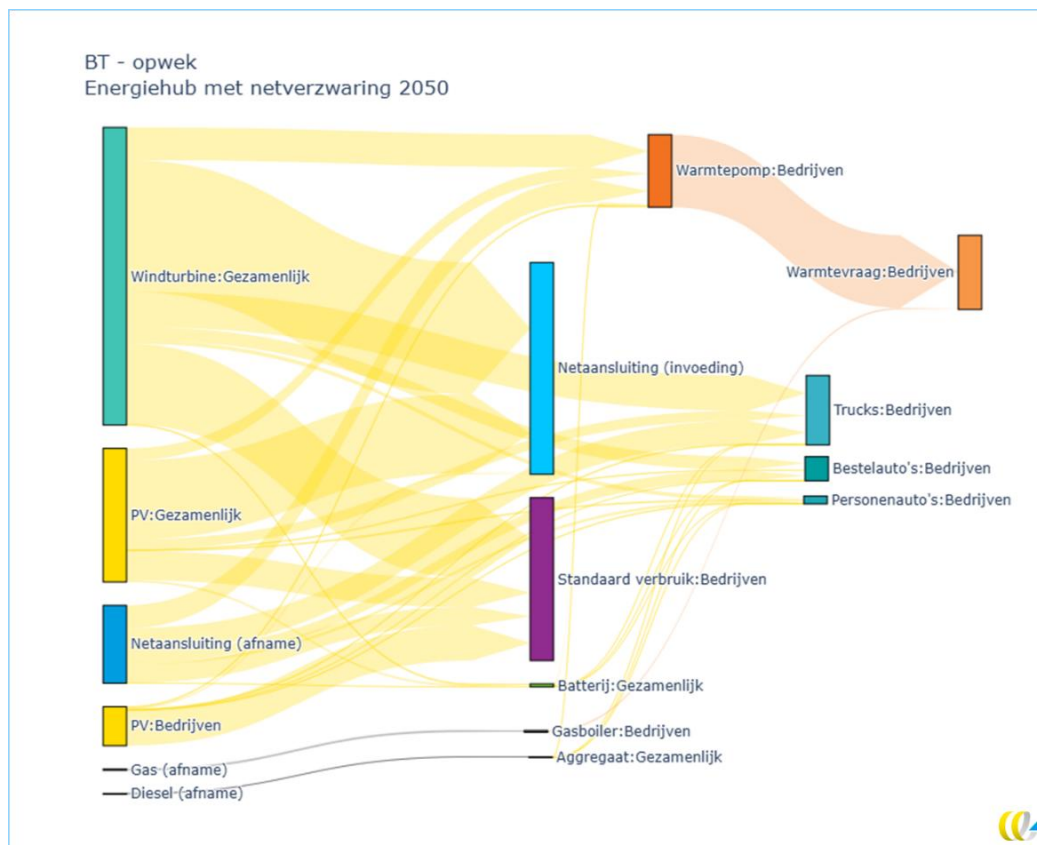
In 2030, vóór netverzwaring, wordt er door de individuele bedrijven gezamenlijk meer geïnvesteerd in batterijen dan in de energiehubs. In de referentie gaat het om een totale batterijcapaciteit van 950 kWh, terwijl dit 150 kWh is in de energiehubs. Dit is ook een gevolg van het hogere lokale opwek van hernieuwbare elektriciteit in de energiehubs, waardoor de hubs uit kan met minder batterijcapaciteit. Na netverzwaring, moet de energiehubs wel additioneel investeren in meer batterijcapaciteit, doordat het GTV minder snel meegroeit dan de elektriciteitsbehoefte, en bedraagt de gezamenlijk batterijcapaciteit 1,85 MWh. Op jaarbasis voorziet in 2040 deze batterij circa 66 MWh, en 78 MWh in 2050. Dit bedraagt circa 0,75% van de jaarlijkse elektriciteitsvraag.

In 2030, vóór netverzwaring, voorzien in referentie de aggregaten circa 3,2 MWh/jaar aan elektriciteit, terwijl dit 0,2 MWh/jaar is in de energiehubs. Na netverzwaring springt een aggregaat met een vermogen van 480 kW (in 2040) en 550 kW (in 2050) nog af en toe bij om de energiehubs te voorzien op elektriciteit. Dit bedraagt 19 MWh/jaar en 25 MWh/jaar, in 2040 en 2050 respectievelijk; en klein percentage van de totale elektriciteitsvraag.

Figuur 44 – Vraag en aanbod van elektriciteit, warmte, gas en diesel voor referentie en energiehub, voor de situatie vóór netverzwaring in 2030, en na netverzwaring 2050.



Figuur 45 – Sankey-diagram van energie- en massastromen voor de energiehub in 2050



De piekbelasting wordt door de energiehubs duidelijk verlaagd. In de jaren voor netverzwaring zijn de pieken in beide scenario's ongeveer gelijk omdat de transportvermogens niet verhoogd (kunnen) worden. In de jaren na netverzwaring, zorgt de energiehubs voor een sterke afname van de piekbelasting op het net; in 2050 is de piek 2,7 MW in de referentie, tegenover 1,3 MW in de energiehubs (-51%).

Tabel 45 – Netbelasting voor verschillende jaren, vóór en na netverzwaring, en met – en zonder energiehubs. De symbolen '↓' en '↑' geven aan dat de maximale netbelasting wordt veroorzaakt door afname en invoeding respectievelijk.

| Piekbelasting (MW)                 | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Referentie - zonder netverzwaring  | 1,3↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Referentie - met netverzwaring     |      | 1,6↓ | 2,4↓ | 2,7↓ |
| Energiehubs - zonder netverzwaring | 1,2↓ | 1,3↓ | 1,3↓ |      |
| Energiehubs - met netverzwaring    |      | 0,6↓ | 1,2↓ | 1,3↓ |

## 14.4 Mkba-resultaten – casus

Tabel 46 geeft een samenvatting weer van de mkba voor de casus bedrijventerrein duurzame elektriciteitsproductie. We zien dat het totale maatschappelijke saldo ten opzichte van de referentie negatief uitvalt (- € 4,3 miljoen).

De belangrijkste driver voor dit resultaat zijn de directe kosten van de **assets** (zon-pv en een windturbine). De baten die hier tegenover staan – minder **elektriciteitsafname van het net**, meer **invoeding op het net** en vermeden CO<sub>2</sub>-emissies – wegen hier niet tegenop.

Tabel 46 – Resultaat mkba-bedrijventerrein duurzame elektriciteitsproductie; effecten ten opzichte van referentie, 2025-2050, bedragen in mln. €<sub>2024</sub>

|                                  | Energiehubs vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assets                           | -14,4                     | De energiehubs investeert in een windturbine (- € 7,9 mln.), meer zon-pv dan de referentie (- € 5,7 mln.) en meer in een batterij (- € 0,5 mln.) en een aggregaat (- € 0,3 mln.).                                                                                                               |
| Elektriciteit (afname)           | 6,7                       | Doordat de energiehubs meer elektriciteit zelf opwekt via de windturbine en extra zon-pv, en door gebruik van een gezamenlijke batterij, neemt de energiehubs substantieel minder elektriciteit af van het net. Dit leidt tot uitgespaarde elektriciteitskosten ten opzichte van de referentie. |
| Elektriciteit (invoeding)        | 4,7                       | Door de extra opwek kan de energiehubs bovendien extra kosten besparen door meer elektriciteit op het net in te voeden.                                                                                                                                                                         |
| Fossiele brandstoffen (verbruik) | 0,0                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

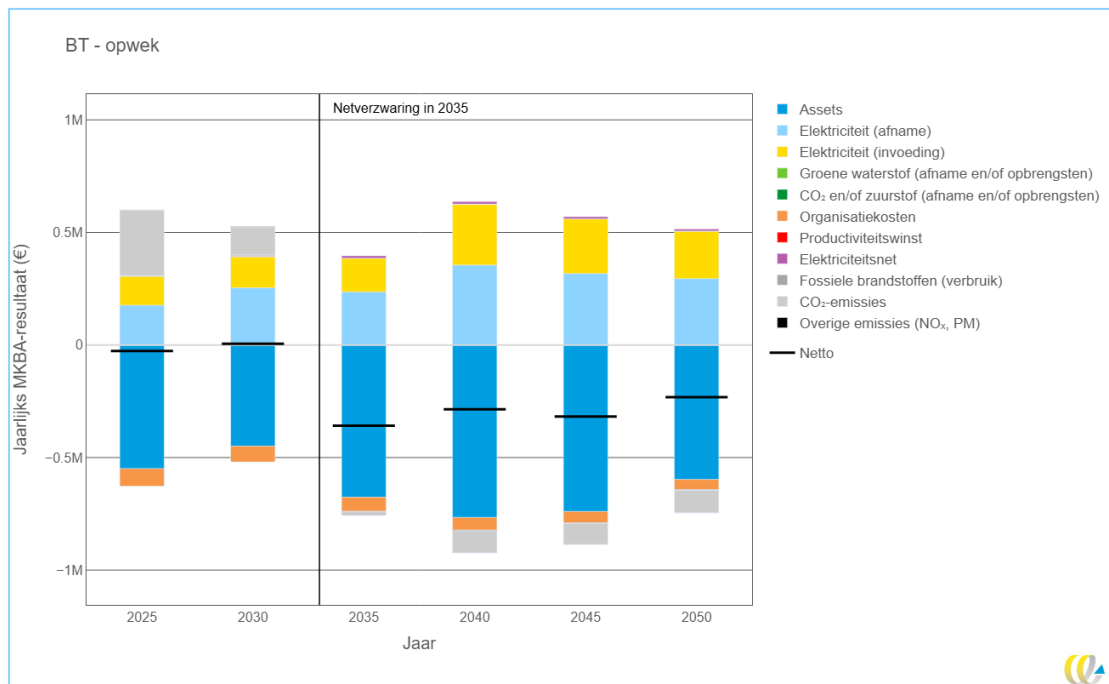
|                                                                 | Energiehub<br>vs referentie | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Groene waterstof (afname en/of opbrengsten)                     | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| CO <sub>2</sub> en/of O <sub>2</sub> (afname en/of opbrengsten) | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Organisatiekosten                                               | -1,6                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Productiviteitswinst                                            | -                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Woningbouw                                                      |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Directe effecten</b>                                         | <b>-4,6</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Elektriciteitsnet                                               | 0,2                         | Door het gebruik van collectieve batterijen is de piekbelasting van de energiehub vanaf het moment dat netcongestie oplost (en netverzwaring plaatsvindt) lager. In <b>2040</b> is de piekbelasting in de referentie 2,4 MW, terwijl dit in de energiehub 1,2 MW is; in <b>2050</b> is dit respectievelijk 2,7 en 1,3 MW. In de energiehubsituatie leidt dit tot uitgespaarde kosten voor netinvesteringen (+ € 0,1 mln.). Door minder elektriciteitsafname van het net worden bovendien netverliezen vermeden (+ € 0,1 mln.). |
| <b>Indirecte effecten</b>                                       | <b>0,2</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| CO <sub>2</sub> -emissies                                       | 0,1                         | Eenzijds zorgt de energiehub voor baten in de vorm van vermeden emissies door invoeding van elektriciteit door <b>zon-pv</b> (+ € 0,2 mln.) en <b>wind</b> (+ € 0,8 mln.) en door minder <b>elektriciteitsafname van het net</b> (+ € 1,0 mln.). Anderzijds ontstaat er <b>ketenemissies</b> , met name voor zon-pv (- € 1,6 mln.) en minder voor batterijen, aggregaten en de windturbine (- € 0,2 mln.)                                                                                                                      |
| Overige emissies (NO <sub>x</sub> , PM)                         | 0,0                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Externe effecten</b>                                         | <b>0,1</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Totaal</b>                                                   | <b>-4,3</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

De mkba-resultaten per zichtjaar hebben we opgenomen in Figuur 46. Hierin is te zien dat het resultaat over de gehele periode negatief is. De grootste verschuivingen zien we in:

- **Assets.** De fluctuaties in de directe kosten voor de assets zijn te verklaren door de verschillende (her)investeringsmomenten van de verschillende assets. De investeringen in zon-pv en de windturbine vinden plaats in 2025 met een herinvesteringsmoment in 2040. De aflopende directe kosten die in de figuur te zien zijn (bijvoorbeeld na 2040) zijn te verklaren door het aflopende afschrijvings-schema en de verdiscontering van toekomstige kosten. De toename in directe kosten in 2035 is te verklaren door het feit dat vanaf 2035 (wanneer netverzwaring plaatsvindt) bedrijven in de referentie geen gebruik meer blijven maken van individuele batterijen en aggregaten, terwijl de energiehub wel gebruik blijft maken van de gezamenlijke batterij en het gezamenlijke aggregaat.

- **CO<sub>2</sub>-emissies.** De verandering in milieukosten van de CO<sub>2</sub>-emissies is voornamelijk te verklaren, doordat de bedrijven in de referentie in de periode tot 2035 nog meer elektriciteit van het net afnemen, terwijl de energiehubs dit vermijdt door inzet van de gezamenlijke batterij.

Figuur 46 – Mkba-resultaat per zichtjaar voor de energiehubs. Een beschrijving hoe het figuur gelezen kan worden is opgenomen in Tekstkader 1.



## Gevoeligheidsanalyse: wanneer lost netcongestie op?

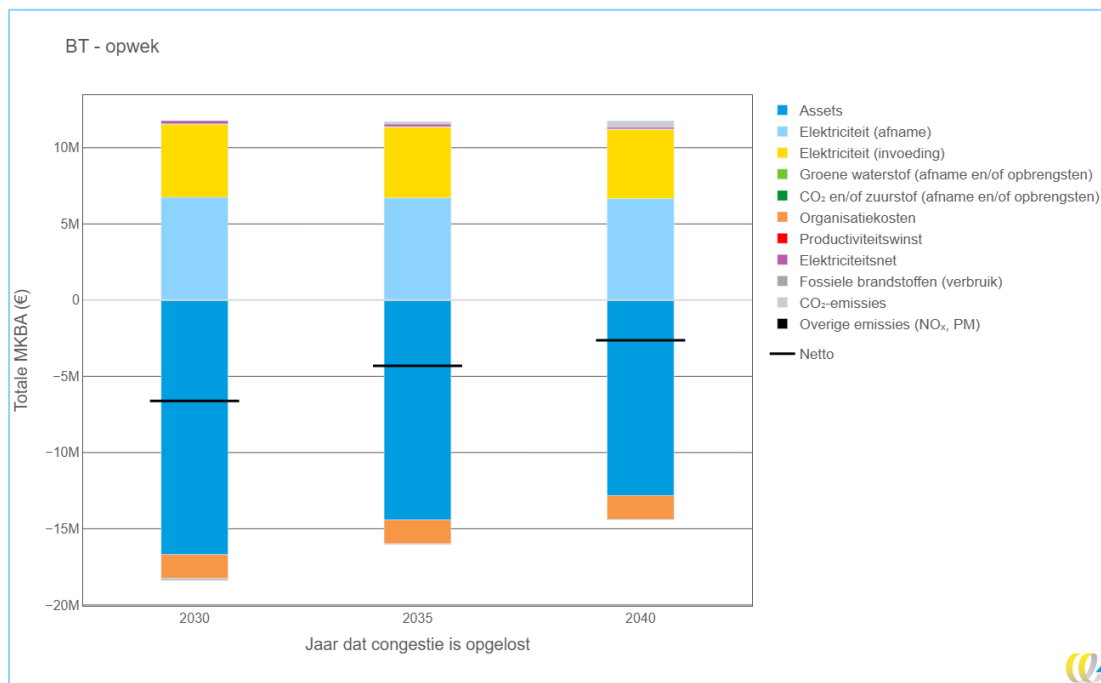
Een belangrijke aanname onderliggend aan het model is het jaar dat netcongestie is opgelost. Wanneer en waar netcongestie wordt opgelost, beïnvloedt dit de toegevoegde waarde van de energiehubs ten opzichte van de referentiesituatie. Er bestaat echter grote onzekerheid over wanneer netcongestie oplost. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin we variëren met het jaar waarin netcongestie oplost.

De analyse laat zien dat naarmate netcongestie later oplost, de maatschappelijke waarde van de energiehubs toeneemt. Dit is te zien in Figuur 47, waarin elke balk voor jaar x waarin netcongestie oplost, laat zien wat het totale maatschappelijke saldo is (het zwarte liggende streepje) en hoe deze is opgebouwd (de gekleurde categorieën).

De grootste driver voor dit resultaat zijn de directe kosten voor de assets. Naarmate netcongestie later valt, vallen de directe kosten voor de energiehubs lager uit. Dit is te verklaren door het feit dat wanneer netcongestie in 2030 nog niet is opgelost, de energiehubs dan in een lager vermogen aan zon-pv en wind investeert.



Figuur 47 – Gevoeligheidsanalyse: jaar dat netcongestie is opgelost (referentie: 2035). Een beschrijving hoe dit figuur gelezen dient te worden is opgenomen in Tekstkader 2.



## 14.5 Extrapolatie mkba-resultaten

Het mkba-resultaat is geëxtrapoleerd op basis van het aantal windmolens gelegen bij andere terreinen en het huidige energieverbruik. Op basis van deze eigenschappen worden resultaten opgeschaald met respectievelijk een factor 82 en 134. De lage factor is gebaseerd op het zon-pv potentieel en de hoge factor gebaseerd op de wind op land potentie. Daarmee kan het potentieel bij een volledige uitrol van energiehub op deze locaties als volgt worden ingeschat:

- **Netto maatschappelijk resultaat:** voor de casus -4,3 miljoen euro; landelijk opgeschaald -350 tot -580 miljoen euro.
- **Netimpact:** in 2050 wordt in de casus 1.380 kW vermogensvraag vermeden. Bij volledige uitrol komt de potentiële besparing op 110 tot 180 MW in 2050.
- **CO<sub>2</sub>-emissies:** Gedurende de periode 2025 tot 2050 neemt de CO<sub>2</sub>-emissies af met 0,5 kton. Op nationaal niveau kan het daarmee leiden tot een cumulatieve CO<sub>2</sub>-reductie van 40 tot 60 kton.

Let op dat het potentieel van deze casus gebaseerd wordt op dezelfde terreinen als 'Gemengd bedrijventerrein – elektrificatie' en 'Gemengd bedrijventerrein – ZLT-net'. Daarmee is het geëxtrapoleerde potentieel niet additioneel.

# 15 Resultaten per regio

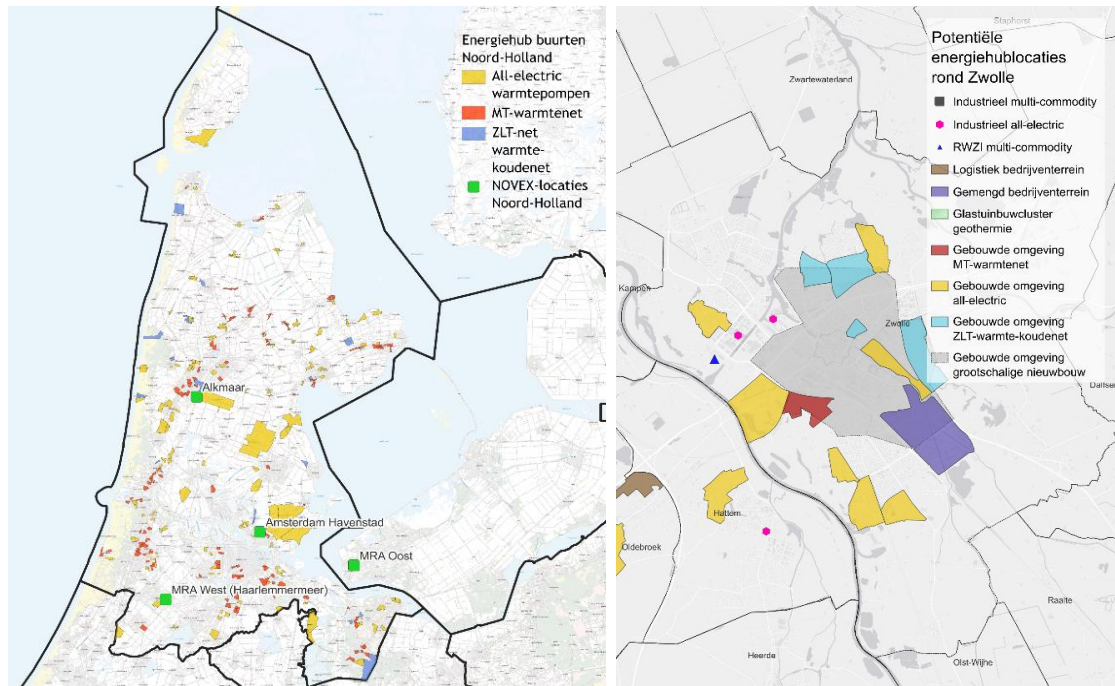
Alle bedrijventerreinen en woonwijken van Nederland zijn onderzocht, om te onderzoeken of er potentieel is voor een energiehub. Dit biedt inzicht in de lokale potentie van energie-hubs en het mogelijk verbinden van verschillende energiehub onderling. De potentiescan kan identificeren waar energiehub maatschappelijk kunnen bijdragen aan duurzaamheid, verlichten van netcongestie en verminderen van beperkingen voor bedrijven en woningbouw.

## **Database met resultaten: voor ondersteuning of ontwikkeling van energiehub**

Een uitgebreide database is beschikbaar met resultaten voor alle wijken en bedrijventerreinen in Nederland, waarvoor bepaald is of er energiehub potentieel is, welke archetype en de kenmerken (inclusief ingeschatte maatschappelijke waarde). Deze database kan ontsloten worden naar de relevante stakeholders, maar zijn hier niet als enorme tabellen opgenomen. Een verdere specificering met nauwkeurige eigenschappen op gebiedsniveau is ook mogelijk, voor ondersteuning of ontwikkeling van energiehub

Enkele voorbeelden van de potentie van energiehub zijn als visualisatie opgenomen in Figuur 48. In provincie Noord-Holland (linker paneel) zijn er vier grootschalige nieuwbouwgebieden met in totaal 100.000 woningen gepland, waar netbewuste nieuwbouw energiehub toegepast kunnen worden. Daarnaast zijn er 266 potentiële hubs geïdentificeerd van meer kleinschalige woningbouwlocaties, voornamelijk all-electric en MT-restwarmtenet casussen. Als we inzoomen in een specifiek gebied, zoals gemeente Zwolle (rechter-paneel), is er ook potentiële synergie te zien tussen verschillende hubs voor bijvoorbeeld een gebiedsgerichte aanpak.

Figuur 48 – Visualisatie van energiehubbs in woonwijken in provincie Noord-Holland (links) en verschillende type energiehubbs in gemeente Zwolle (rechts)



Deze resultaten kunnen ook kwantitatieve inzichten geven over de maatschappelijke waarde per regio, of de potentie van energiehubbs qua aantal energiehubbs en bijvoorbeeld aantal woningen. De resultaten van gebouwde omgeving energiehubbs zijn opgenomen in Tabel 47 voor provincie Noord-Holland.

Tabel 47 – Voorbeeld regionale resultaten van energiehubbs woonwijken in provincie Noord-Holland

| Type energiehub                 | Aantal potentiële energiehubbs | Aantal woningen | Aantal WEQ utiliteit | Totaal WEQ | Percentage woningen provincie |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|------------|-------------------------------|
| 8. All-electric                 | 123                            | 92.000          | 14.000               | 106.000    | 6,8%                          |
| 9. ZLT-net                      | 16                             | 6.000           | 1.000                | 7.000      | 0,4%                          |
| 10. MT-net                      | 127                            | 110.000         | 25.000               | 134.000    | 5,7%                          |
| 11. Nieuwbouwwijk <sup>20</sup> | vier gebieden                  | 100.000         | Onbekend             | 100.000    |                               |

<sup>20</sup> Originele NOVEX-locaties omvatten Amsterdam Havenstad (9.000 woningen), MRA West (Haarlemmermeer, 23.900) en MRA Oost (63.600 woningen), al komen de meeste van deze woningen in Flevoland. Recent is Alkmaar aangemerkt als extra locatie waar minimaal 3.500 woningen gerealiseerd moeten worden.

# Literatuurlijst

- CE Delft. (2023). *Handboek milieuprijzen 2023. Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.*
- CE Delft, & TNO. (2023). *Afnameverplichting groene waterstof.*
- CPB, & PBL. (2025). *Toekomstverkenning wlo - efficiënte co2-prijzen.*
- Ecorys. (2024a). *Maatschappelijke impact van tijdige netuitbreiding door TenneT.*
- Ecorys. (2024b). *Maatschappelijke kostprijs van netcongestie.*
- ElaadNL. (2024). *Interactieve outlook.* <https://platform.elaad.io/interactieve-outlook/>
- Lensink, S., & Schoots, K. (2021). *Eindadvies basisbedragen sde++ 2021.*  
[https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-eindadvies-basisbedragen-sde-plus-plus-2021\\_4032.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-eindadvies-basisbedragen-sde-plus-plus-2021_4032.pdf)
- Merosch; CE Delft. (2024). *Oplossingen voor netcongestie bij bedrijven.*
- Ministerie van Financiën. (2020). *Advies werkgroep discontovoet 2020.*
- PBL. (2024). *Klimaat- en energieverkenning (kev) 2024.*
- Raaphorst, M.G.M., & Van Tuyll van Serooskerken, A.R. (2023). *Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 2023* (27 ed.). Wageningen University & Research.  
<https://shop.wur.nl/kwin/kwin-glastuinbouw-2023-pdf.html>
- Royal HaskoningDHV. (2024). *De families van energy hubs in nederland.*

# A Kengetallen

## A.1 Energetische kengetallen en ingroeipaden

### A.1.1 Standaard verbruik

Voor alle casussen nemen we aan dat het standaard verbruik voor alle jaren constant blijft. Merk op dat verduurzamingsmaatregelen apart meegenomen worden, zoals de overstap van een gasboiler naar een warmtepomp. Een uitzondering op deze aanname geldt voor de casus *RWZI-energiehub met restwarmte levering* waarbij een sterke groei van het standaard verbruik voor de RZWI-locatie wordt verwacht.

Tabel 48 – Groeifactoren van het standaard verbruik voor de RZWI-locatie voor de jaren 2030, 2040 en 2050

| Casus                                   | Bedrijf | Zichtjaar | Groeifactor standaard verbruik t.o.v. huidig |
|-----------------------------------------|---------|-----------|----------------------------------------------|
| RWZI-energiehub met restwarmte levering | RZWI    | 2030      | 1,46                                         |
|                                         |         | 2040      | 2,38                                         |
|                                         |         | 2050      | 3,30                                         |

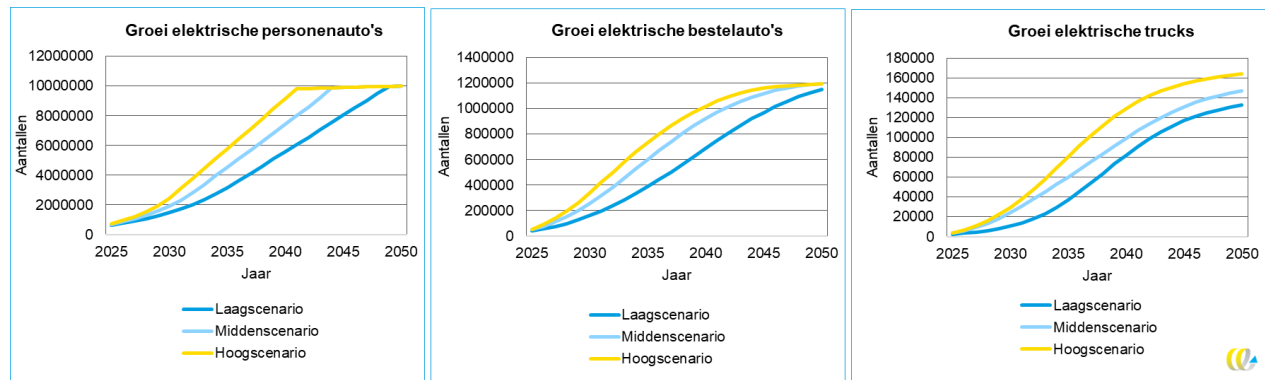
### A.1.2 Elektrificatie voertuigen en laadvraag

We onderscheiden voor de logistieke bedrijven dezelfde drie typen als Elaad:

1. Elektrische personenauto's.
2. Elektrische bestelauto's.
3. Elektrische trucks.

Elaad heeft prognoses voor de groei van alle drie de typen elektrische voertuigen voor de zichtjaren 2025 t/m 2050 (zie Figuur 49) (ElaadNL, 2024). In deze studie hanteren we het middenscenario voor groei. We nemen aan dat alle voertuigen in 2050 geëlektrificeerd zijn, waardoor we de door middel van de prognoses het ingroeipad van elektrische voertuigen als percentage kunnen uitdrukken.

Figuur 49 – Prognoses groei elektrische voertuigen (ElaadNL, 2024)



De aangenomen elektrificatie per zichtjaar is gebaseerd op het aantal voertuigen in het zichtjaar, gedeeld door het totaal aantal voertuigen van het type in 2050. Hieruit volgen de relatieve adoptiegraden in Tabel 49.

Tabel 49 – Adoptiegraad ten opzichte van Elaad middenscenario 2050

| Zichtjaar | Personenauto's | Bestelauto's | Trucks |
|-----------|----------------|--------------|--------|
| 2025      | 6%             | 4%           | 1%     |
| 2030      | 16%            | 21%          | 16%    |
| 2040      | 73%            | 77%          | 67%    |

Per bedrijventerrein worden het potentieel aantal personenauto's, bestelauto's en trucks bepaald door gebruik te maken van Elaad Outlooks in 2050. Deze data is op CBS-buurniveau beschikbaar, en hebben we middels ruimtelijke analyse vertaald naar aantallen per IBIS-bedrijventerrein. Deze voertuigen worden vervolgens grofweg naar verhouding van de grootte van ieder bedrijf (op basis van het aantal vierkante meter) toebedeeld aan ieder individueel bedrijf.

De laadvraag wordt opgedeeld in tijdsblokken, waar dat de dag bestaat uit twee laadblokken; een laadblok overdag en een laadblok 's nachts. Op basis van het kilometrage en het aantal werkdagen per jaar (287 dagen) is de laadvraag voor de verschillende laadblokken bepaald.

Merk op dat er geen prognoses zijn voor de groei van bakwagens. We nemen hetzelfde ingroepad aan als voor trucks/trekker opleggers.

Verdelen van voertuigen gaat op basis van grote van bedrijven en type bedrijven.

Tabel 50 – Gemiddeld verbruik en kilometrage voor vier verschillende elektrische voertuigen

| Type voertuig             | Gemiddeld verbruik (kWh/km) | Gemiddeld kilometrage (km/jaar) | Jaarlijks verbruik (kWh) | Percentage op werk laden |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Personenauto's            | 0,2                         | 18.200                          | 3.640                    | 13%                      |
| Bestelauto's              | 0,3                         | 20.396                          | 6.119                    | 100%                     |
| Truck (trekker opleggers) | 1,66                        | 76.579                          | 127.121                  | 90%                      |

Tabel 51 – Aannames voor laadvraag per tijdsblok en verschillende voertuigen

|                    |                                  | Personenauto's | Bestelauto's | Trekker opleggers | Eenheid |
|--------------------|----------------------------------|----------------|--------------|-------------------|---------|
| Algemeen           | Accupakket                       | 60             | 75           | 500               | kWh     |
|                    | Percentage overdag laden         | 40%            | 40%          | 40%               |         |
|                    | Percentage 's nachts laden       | 0%             | 100%         | 100%              |         |
|                    | Percentage in het weekend werken | 50%            | 50%          | 50%               |         |
| Laadsessie overdag | Starttijd overdag laden          | 9:00           | -            | 11:00             | Uur     |
|                    | Eindtijd overdag laden           | 16:00          | -            | 14:00             | Uur     |
|                    | Laadvraag overdag                | 4,1            | 0            | 250               | kWh     |
|                    | Laadvermogen overdag             | 11             | 150          | 300               | kW      |
| Laadsessie nacht   | Starttijd 's nachts laden        | 20:00          | 18:00        | 18:00             | Uur     |
|                    | Eindtijd 's nachts laden         | 6:00           | 6:00         | 6:00              | Uur     |
|                    | Laadvraag 's nachts              | 200            | 21           | 300               | kWh     |
|                    | Laadvermogen 's nachts           | 20             | 11           | 60                | kW      |

### A.1.3 Zon-pv

We hanteren een ingroeipad voor zon-pv voor de zichtjaren 2025 t/m 2050, waarbij het huidige opgestelde vermogen voor zon-pv wordt bepaald op basis van het gemiddelde dakoppervlak. In deze studie nemen we aan dat het potentieel voor zon-pv 50% van het dakoppervlak bedraagt. Vervolgens is aangenomen dat in 2050 100% van al het potentiële dakoppervlak benut wordt voor zon-pv. Per vierkant meter dakoppervlak hanteren we een opgesteld vermogen van 233  $W_p$  (Tabel 52). De groei per zichtjaar wordt dan bepaald door gebruik te maken van relatieve groei ten opzichte van de bezetting in 2050.

Het is mogelijk dat de ingroei van zon-pv wordt beperkt door het gecontracteerde vermogen van een individueel bedrijf of voor de energiehub als geheel, waardoor een kleiner deel van het potentieel zon-pv wordt benut en worden de investeringen in zon-pv ook beperkt.

Tabel 52 – Opgesteld vermogen zon-pv per vierkante meter dakoppervlak

| Energetische gegevens kantoor en bedrijfshal  | Waarde | Eenheid           | Bron                    |
|-----------------------------------------------|--------|-------------------|-------------------------|
| Opgesteld vermogen zon-pv per vierkante meter | 233    | Wp/m <sup>2</sup> | Zonneplan <sup>21</sup> |

## A.1.4 Adoptie (hybride) warmtepompen

Per casus is gespecificeerd welke verwarmingstechniek, zoals een hybride of all-electric-warmtepomp, in referentie en energiehubs gebruikt gaat worden. Specifiek is er in referentie en hubsituatie en techniek gespecificeerd die nu gebruikt wordt, in 2030 gebruikt wordt (standaard is dit het moment voor de energiehubs om over te stappen op een andere verwarmingstechniek), en een eindsituatie (2040-2050) techniek.

Voor de gebouwde omgevingscasussen draaien de hubs om het collectief overstappen op een specifieke techniek. In de referentie zetten we dit af tegen een adoptie van een individuele, vergelijkbare techniek. Voor het warmtenet zijn dit hybride warmtepompen, voor all-electric is dit ook all-electric (gelijk).

Voor de bedrijventerreincasussen stappen individuele bedrijven in de referentie op wisselende tempo's, 'autonoom', over op hybride of all-electric-warmtepompen. Wanneer de energiehubs draait om een collectieve verwarmingstechniekkeuze (bijv. ZLT-net of de glastuinbouwcasus) nemen we collectieve adoptie in 2030 aan in de hub situatie, of autonome overstap in de referentie. In de casussen waar de verwarming niet centraal staat, zoals logistiek, is adoptie in zowel de referentie als de hub situatie autonoom.

## A.1.5 Windturbines

Er is een ruimtelijke analyse gedaan op basis van de locaties en vermogens van bestaande windmolens op land. Individuele turbines die 100 meter of minder van een bedrijventerrein verwijderd zijn, zijn als attribuut gekoppeld aan het dichtstbijzijnde bedrijventerrein. We nemen aan dat bestaande windturbines onderdeel kunnen worden van energiehubs, maar dat er geen extra investering plaatsvindt in wind in het referentie en energiehubs scenario.

## A.1.6 Aggregaat

In het referentiescenario nemen individuele partijen een aggregaat (en een batterij). Voor het aggregaat nemen we aan dat deze het standaardverbruik en de elektrische voertuigen van energie mag voorzien, en in sommige casussen ook de warmtepomp indien een gasketel afwezig is. In geval dat er onvoldoende elektriciteit beschikbaar is voor de (hybride) warmtepomp wordt de resterende warmtevraag ingevuld door de gasketel.

<sup>21</sup> [Vermogen zonnepanelen berekenen | Zonneplan](#)



Het vermogen van iedere aggregaat volgt uit de modellering, waar het aggregaat alleen bijspringt indien er elektriciteitstekorten optreden. Het benodigde vermogen is daardoor een direct gevolg van de modeluitkomsten.

### A.1.7 Batterijen

In de referentie nemen partijen individueel een batterij, terwijl in de energiehubs er geïnvesteerd wordt in een gezamenlijke batterij. De batterijcapaciteit van de individuele batterij wordt, per zichtjaar, bepaald door te kijken naar de dagelijkse restcapaciteit waarmee een batterij geladen kan worden. Een initiële modellering toont vervolgens of de batterij ook daadwerkelijk ingezet wordt. Indien dit niet het geval is, dan wordt de batterij logischerwijs niet aangeschaft.

De batterijcapaciteit van de gezamenlijke batterij in de energiehubs wordt op een vergelijkbare wijze bepaald, waarbij de dimensionering van de batterij gebaseerd wordt op de dagelijkse restcapaciteit van de energiehubs als geheel.

### A.1.8 Contractvermogens

In de referentie, de situatie zonder energiehubs, heeft ieder bedrijf een individueel contractvermogen met de netbeheerder. Het contractvermogen is gebaseerd op de huidige maximale afname – of invoedingspiek van ieder bedrijf. Tot het moment van netverzwaring blijft dit contractvermogen gelden. In deze studie nemen we aan dat na netverzwaring er geen beperkingen meer zijn voor zowel afname als invoeding.

In de energiehubs, wordt het gezamenlijk contractvermogen gebaseerd op de maximale collectieve afname – of invoedingspiek op het net in de huidige situatie (2025). Tot er netverzwaring plaatsvindt, blijft dit gezamenlijk contractvermogen onveranderd.

Doordat in de energiehubs de verschillende partijen hun energieverbruik – en productie met elkaar afstemmen, zal dit ook een effect hebben op de benodigde (lokale) netverzwaring. Om een betrouwbare inschatting te maken de benodigde netverzwaring, is gekeken naar de netbelasting en de inzet van het aggregaat vóór netverzwaring voor de jaren 2030 en 2040. Hierbij nemen we aan dat de verzwaring van het net dusdanig is, dat het aggregaat nauwelijks nog ingezet wordt na netverzwaring. De gezamenlijke transportvermogen wordt berekend door de uurlijkse netbelasting (vóór netverzwaring) op te tellen bij de uurlijkse inzet van het aggregaat. Het 95<sup>ste</sup> percentiel van het resulterende uurlijkse vermogensprofiel bepaalt dan het gezamenlijk transportvermogen na netverzwaring (voor dat jaar).

De benodigde netverzwaring die uiteindelijk wordt gerealiseerd wordt gebaseerd op de situatie in 2050. Omdat de situatie zonder netverzwaring in 2050 niet wordt doorgerekend, baseren we de benodigde netverzwaring in 2050 op de benodigde netverzwaring in 2040, en rekenen we met een groeifactor ten opzichte van 2040.

## A.2 Kosten kengetallen

### A.2.1 Elektriciteitsprijzen

Uurlijkse elektriciteitsprijzen zijn verkregen uit het energietransitiemodel (ETM) voor het scenario 'Koersvaste Middenweg'. In deze studie hebben we ervoor gekozen om het opgestelde vermogen van de STEG-waterstofcentrales in de scenario's te verhogen met een factor 1,7 om het aantal - en de hoogte van extreem dure uren te reduceren. Alle overige parameters zijn niet gewijzigd.

Tabel 53 – Prijsscenario's uit het energietransitiemodel (ETM) die zijn gehanteerd in deze studie.

| Investeringsplan      | Scenario                  | Jaar | Link naar ETM-scenario                                                                                                |
|-----------------------|---------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Investeringsplan 2026 | Koersvaste Middenweg (KM) | 2025 | <a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172446">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172446</a> |
|                       |                           | 2030 | <a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172447">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172447</a> |
|                       |                           | 2035 | <a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172450">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172450</a> |
|                       |                           | 2040 | <a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172453">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172453</a> |
|                       |                           | 2050 | <a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172458">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1172458</a> |

### A.2.2 Kostprijzen verschillende gassen en brandstoffen

De aangenomen prijzen en bronnen daarvoor zijn opgenomen in Tabel 54.

Tabel 54 – Overzicht van kostprijzen voor verschillende gassen en brandstoffen

| Stof                                            | 2025  | 2030  | 2040  | 2050  | Eenheid           | Bron                                                  |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------------------------------------------|
| Kostprijs aardgas (€/m <sup>3</sup> )           | 0,28  | 0,23  | 0,23  | 0,23  | €/ m <sup>3</sup> | (PBL, 2024)                                           |
| Kostprijs grijze H <sub>2</sub> (€/kg)          | 2,2   | 1,8   | 1,8   | 1,8   | €/ kg             | (CE Delft & TNO, 2023)                                |
| Kostprijs O <sub>2</sub> (€/kg)                 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | €/ kg             | <a href="#">Oxygen price index - businessanalytic</a> |
| Kostprijs CO <sub>2</sub> (€/ton)               | 110   | 110   | 110   | 110   | €/ ton            | (Lensink & Schoots, 2021)                             |
| Kostprijs diesel excl. accijns en btw (€/liter) | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | €/ liter          |                                                       |
| ETS-prijs (€/ton)                               | 83    | 108   | 184   | 360   | €/ ton            |                                                       |

## A.2.3 Investeringskosten

### Kengetallen investeringen per asset

De kosten voor de verschillende technieken zijn opgenomen in Tabel 55.

Tabel 55 – Investeringskosten, operationele kosten en afschrijftermijn per asset

| Asset                  | Parameter                                    | Waarde  | Eenheid | Bron                                                                   |
|------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------------------------------------|
| Batterij               | Investeringskosten                           | Formule | €/kWh   | Zie beschrijving onder kopje 'Aanschafkosten batterijen' na deze tabel |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |
| Windturbine            | Investeringskosten                           | 1.450   | €/kW    |                                                                        |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 3,0%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |
| Aggregaat              | Investeringskosten                           | 400     | €/kW    |                                                                        |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 10      | Jaren   |                                                                        |
| Zon-pv                 | Investeringskosten                           | 1.240   | €/kW    |                                                                        |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 1,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |
| Elektrolyser           | Investeringskosten                           | 2.840   | €/kW    |                                                                        |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |
| Elektrische warmtepomp | Investeringskosten                           | 625     | €/kWt   | O.b.v. Validatiesessies individuele installaties                       |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |
| Gasboiler              | Investeringskosten                           | 43      | €/kWt   | O.b.v. Validatiesessies individuele installaties                       |
|                        | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%    | %/jaar  |                                                                        |
|                        | Afschrijftermijn                             | 15      | Jaren   |                                                                        |

| Asset                      | Parameter                                    | Waarde    | Eenheid          | Bron                                                                    |
|----------------------------|----------------------------------------------|-----------|------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Industriële gasboiler      | Investeringskosten                           | 90        | €/kWt            | O.b.v. Validatiesessies individuele installaties                        |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%      | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 15        | Jaren            |                                                                         |
| Afleverset warmtenet       | Investeringskosten                           | 1.500     | €/stuk           | O.b.v. Validatiesessies individuele installaties en warmtenetten (2025) |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%      | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 25        | Jaren            |                                                                         |
| Infrastructuur warmtenet   | Investeringskosten                           | 1.500.000 | €/km             | O.b.v. Validatiesessies individuele installaties en warmtenetten (2025) |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 1,0%      | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 50        | Jaren            |                                                                         |
| Wkk                        | Investeringskosten                           | 536       | €/kWt            | (Raaphorst & Van Tuyll van Serooskerken, 2023)                          |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%      | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 20        | Jaren            |                                                                         |
| Waterstofboiler            | Investeringskosten                           | 99        | €/kWt            | Aanname: 10% duurder dan een gasboiler                                  |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 2,5%      | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 15        | Jaren            |                                                                         |
| Woningisolatie (zeer goed) | Investeringskosten                           | 100       | €/m <sup>2</sup> |                                                                         |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 0%        | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 30        | Jaren            |                                                                         |
| Woningisolatie (gemiddeld) | Investeringskosten                           | 20        | €/m <sup>2</sup> |                                                                         |
|                            | Operationele kosten op basis van investering | 0%        | %/jaar           |                                                                         |
|                            | Afschrijftermijn                             | 30        | Jaren            |                                                                         |

### Aanschafkosten batterijen

De afgelopen jaren zijn prijzen voor batterijen fors gedaald <sup>22</sup>. Om deze reden heeft CE Delft op basis van 85 online batterijprijzen een analyse uitgevoerd om de kosten voor een batterijsysteem in te schatten. De batterijcapaciteiten in deze dataset variëren van kleine batterijsystemen van 8,3 kWh<sub>c</sub> tot grootte batterijsystemen tot 39,2 MWh<sub>c</sub>. Kosten variëren van € 5.470 (incl. btw) tot € 10.930.000 (incl. btw). Het overgrote deel van de batterijprijzen zijn afkomstig van Europese leveranciers.

De prijs voor een batterijsysteem hebben we bepaald aan de hand van een regressie-analyse met MWh als variabele. Omdat kleinere batterijsysteem per kWh<sub>c</sub> duurder zijn dan grote batterijsystemen (schaalvoordeel) is een simpel lineair model niet geschikt om de batterijprijs te voorspellen. Om deze reden hebben we het verband tussen prijs en capaciteit met een niet-linear regressiemodel gefit wat leidt tot de volgende formule:

$$\text{Batterijprijs} = \frac{(865,72 + (\text{MWh} \times 600)^{0,475} \times 354,18)^{\frac{1}{0,475}}}{600} \times 0,9$$

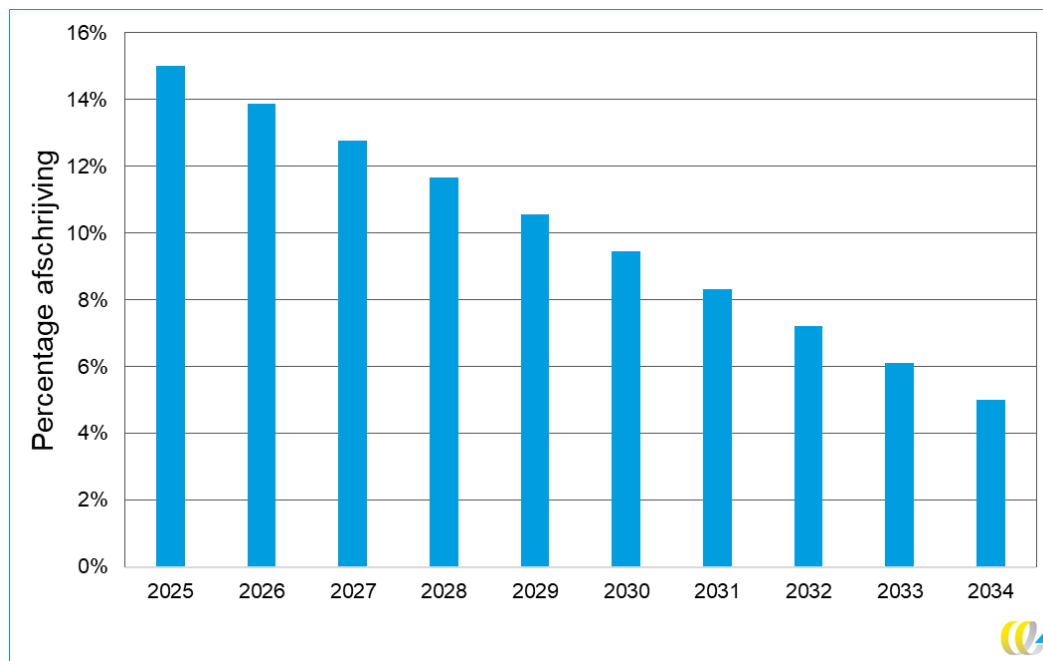
### Jaarlijkse afschrijvingen

In deze studie worden alle assets jaarlijkse afgeschreven. Waar doorgaans vaak gekozen wordt om jaarlijks hetzelfde bedrag af te schrijven (annuïteit), is er in deze studie gekozen om in de eerste levensjaren een groter deel van de asset af te schrijven. Op deze manier wordt waardevermindering van de asset automatisch meegenomen in de mkba.

Figuur 50 laat de percentages van de aanschafprijs per jaar zien die zijn gebruikt voor deze studie.

<sup>22</sup> [Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \\$139/kWh | BloombergNEF \(bnef.com\)](https://www.bnef.com/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/)

Figuur 50 – Voorbeeld van de percentages van de aanschafprijs die worden gebruikt om de jaarlijkse afschrijving mee te bepalen voor een asset met een (economische) levensduur van 10 jaar



Als een bepaalde asset na de (economische) levensduur nog in gebruik is, wordt de asset opnieuw aangeschaft. De restwaarde van de asset bij verkoop wordt niet meegenomen in de mkba omdat de restwaarde al indirect is meegenomen in de methodiek van de jaarlijkse afschrijvingen.

## A.3 Kengetallen investeringen netverzwaring

In Tabel 56 geeft een overzicht van indicatieve kosten voor verschillende onderdelen van de netvlakken. Door de totale kosten (per onderdeel) te delen door het geassocieerde vermogen worden de kosten per kW verkregen.

Tabel 56 – Investeringskosten voor verschillende onderdelen van het net

| Investering per netvlak                        | Vermogen - indicatief (kW) | Investering – indicatief (€) | Investering per kW (€/kW) |
|------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| EHS/HS station                                 | 500.000                    | 130.000.000                  | 260                       |
| HS kabel                                       | 500.000                    | 50.000.000                   | 100                       |
| HS/MS station                                  | 200.000                    | 32.200.000                   | 161                       |
| MS net (MS-T + MS-D)                           | 5.000                      | 3.850.000                    | 770                       |
| MS/LS station                                  |                            |                              | 167                       |
| LS net (verzwaring van 40% van netcomponenten) |                            |                              | 400                       |

In deze studie gebruiken we een maatschappelijk discontovoet van 2,25% en een afschrijftermijn van 45 jaar voor alle onderdelen van het net. Indien netverzwaring plaatsvindt op lagere netvlakken dan dienen ook hogere netvlakken verzwafd te worden. De resulterende jaarlasten voor ieder onderdeel inclusief de jaarlasten voor de geassocieerde hogere netvlakken zijn weergegeven in Tabel 57.

Tabel 57 – Jaarlasten netverzwaring inclusief de jaarlasten voor de geassocieerde hogere netvlakken.

| Station        | Jaarlasten netverzwaring | Eenheid   |
|----------------|--------------------------|-----------|
| EHS/HS-station | 9,2                      | €/kW/jaar |
| HS-kabel       | 3,6                      | €/kW/jaar |
| HS/MS-station  | 7,4                      | €/kW/jaar |
| MS-net         | 21,3                     | €/kW/jaar |
| MS/LS-station  | 27,2                     | €/kW/jaar |
| LS-net         | 41,5                     | €/kW/jaar |

## A.4 Emissies

### Diesel

In deze studie nemen we aan dat de uitstoot van diesel over alle jaren gelijk blijft. Er vindt dus geen bijmengen plaats van biodiesel waardoor de uitstoot

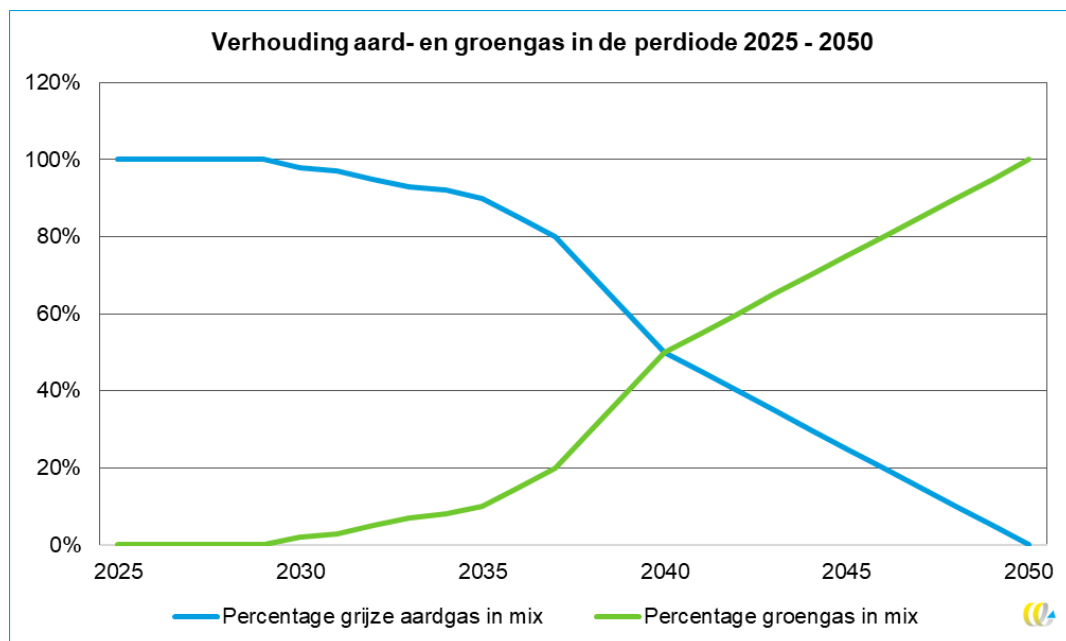
| Kenmerk                           | Waarde | Eenheid                           |
|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|
| CO <sub>2</sub> -uitstoot diesel  | 3,3    | kg CO <sub>2</sub> /liter diesel  |
| NO <sub>x</sub> -uitstoot diesel  | 0,029  | kg NO <sub>x</sub> /liter diesel  |
| PM <sub>10</sub> -uitstoot diesel | 0,0018 | kg PM <sub>10</sub> /liter diesel |
| SO <sub>2</sub> -uitstoot diesel  | 0      | kg SO <sub>2</sub> /liter diesel  |

### Gas

In deze studie nemen we aan dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot van gas geleidelijk afneemt over de jaren door bijmenging van groengas. In Figuur 51 worden de geprojecteerde verhoudingen tussen aardgas en groengas voor verschillende jaren weergegeven.

In de casus Glastuinbouwcluster (Hoofdstuk 6) wordt ook extern CO<sub>2</sub> ingekocht. Daarbij is aangenomen dat richting 2050 een steeds kleiner deel van deze CO<sub>2</sub> afkomstig zal zijn uit fossiele bronnen. Deze afname wordt geacht overeen te komen met het tempo waarin het gebruik van aardgas wordt afgebouwd.

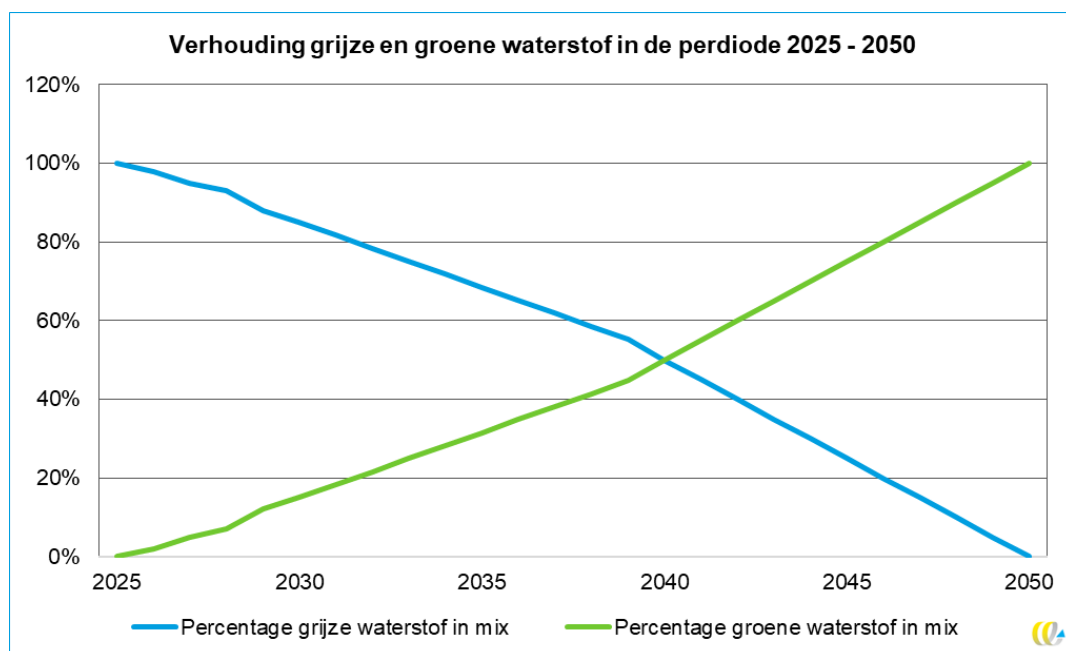
Figuur 51 – Verhouding aard - en groenegas in de periode 2025-2050



## Waterstof

In deze studie nemen we aan dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot van (grijze) waterstof geleidelijk afneemt over de jaren door bijmenging van groene waterstof. In Figuur 52 worden de geprojecteerde verhoudingen tussen grijze en groene waterstof voor verschillende jaren weergegeven.

Figuur 52 – Verhouding grijze - en groene waterstof in de periode 2025-2050





## A.5 Ketenemissies assets

De ketenemissies omvatten de emissies in de maakfase, transport en emissies die betrekking hebben op het einde van het leven, zoals recycling. De resultaten van onze berekeningen van deze ketenemissies zijn opgenomen in Tabel 58.

Tabel 58 – Kengetallen voor ketenemissies per asset

| Asset                                   | Waarde | Eenheid                                               |
|-----------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|
| Batterij                                | 0,08   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kWh                          |
| Windturbine                             | 0,02   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW                           |
| Aggregaat                               | 0,19   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW                           |
| Zon-pv                                  | 1,52   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW                           |
| Elektrolyser                            | 0,17   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW                           |
| Elektrische warmtepomp                  | 0,15   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Elektrische industriële luchtwarmtepomp | 0,07   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Gasboiler                               | 0,05   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Industriële gasboiler                   | 0,02   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Afleveret warmtenet                     | 0,05   | ton CO <sub>2</sub> -eq./stuk                         |
| Infrastructuur warmtenet                | 278    | ton CO <sub>2</sub> -eq./km                           |
| Wkk                                     | 0,27   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Waterstofboiler                         | 0,02   | ton CO <sub>2</sub> -eq./kW <sub>t</sub>              |
| Woning                                  | 0,34   | ton CO <sub>2</sub> -eq./m <sup>2</sup> <sup>23</sup> |

## A.6 Milieuprijzen

Tabel 59 – Milieuprijzen van verschillende stoffen

| Stof                             | Eenheid                | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 |
|----------------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
| CO <sub>2</sub> -prijs incl. btw | € <sub>2024</sub> /ton | 291  | 324  | 363  | 405  | 506  |
| NO <sub>x</sub> -prijs           | € <sub>2024</sub> /kg  | 35,3 | 35,3 | 35,3 | 35,3 | 35,3 |
| PM <sub>10</sub> -prijs          | € <sub>2024</sub> /kg  | 81,8 | 81,8 | 81,8 | 81,8 | 81,8 |

<sup>23</sup> [Zo bouwen we binnen ons CO2-budget - W/E Adviseurs](#)

## A.7 Kosten voor organisatie energiehubs

Het organiseren van een energiehubs brengt extra kosten met zich mee. De uitgangspunten voor de organisatiekosten van de energiehubs zijn gebaseerd op data van Alliander van recente hubs. Hierbij gaan we uit van de lage waarde in de gegeven range, en voor specifieke onderdelen onder de range vanwege verwacht leereffecten:

- € 30.000 per jaar voor bedrijventerreinen aan vaste kosten voor collectieve HEMS-software, licentie en facturatie. De aangegeven range was € 25.000 tot 60.000 per jaar.
- € 1.000 per jaar per bedrijf aan vaste kosten, slimme aansturing en metingen op bedrijfsniveau.
- € 30.000 per bedrijventerrein (0,3 fte) voor operatie en additioneel parkmanagement/beleid. Bij goed georganiseerde bedrijventerreinen kan dit mogelijk lager uitvallen. In deze studie hanteren we een bruto-uurloon van € 50, wat neerkomt op jaarlijkse kosten van circa € 104.000 per fte.
- Voor woonwijken hanteren we een hoger investeringsbedrag, geschat gebaseerd op de noodzakelijke kosten voor bedrijven, van € 100.000 per jaar voor zowel de organisatiekosten als techniekkosten.

De schaal van de energiehubs, zoals het aantal deelnemende bedrijven, beïnvloedt in zekere mate het benodigde aantal fte.

Tabel 60 – Schatting van de jaarlijkse organisatiekosten voor de energiehubs per casus

| Casus                                                             | Waarde  | Eenheid |
|-------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| All-electric bestaande buurt                                      | 113.500 | €/jaar  |
| ZLT-warmtenet bestaande buurt                                     | 116.250 | €/jaar  |
| MT-restwarmtenet bestaande buurt                                  | 172.500 | €/jaar  |
| Bedrijventerrein duurzame elektriciteitsproductie                 | 78.000  | €/jaar  |
| Gemengd bedrijventerrein - elektrificatie                         | 78.000  | €/jaar  |
| Industrieel bedrijventerrein - elektrificatie                     | 78.000  | €/jaar  |
| Logistiek bedrijventerrein                                        | 88.000  | €/jaar  |
| Glastuinbouwcluster                                               | 78.000  | €/jaar  |
| Industrieel bedrijventerrein met lokale H <sub>2</sub> -productie | 79.000  | €/jaar  |
| Nieuwbouwwijk                                                     | 133.000 | €/jaar  |
| RWZI en bestaande bouw                                            | 156.000 | €/jaar  |
| Gemengd bedrijventerrein - ZLT-warmtenet                          | 78.000  | €/jaar  |

## A.8 Woningwaarden

### A.8.1 Woningwaarden verschillende type woningen

Tabel 61 – Gemiddelde woningwaarden -, bouwkosten en residuele grondwaarden voor verschillende type woningen in Nederland

|                                            | Type woning                | Nederland |
|--------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| <b>WOZ-waarde 2025 (€ x 1.000)</b>         | <b>Totaal</b>              | 399       |
|                                            | <b>Tussenwoning</b>        | 376       |
|                                            | <b>Hoekwoning</b>          | 392       |
|                                            | <b>2-onder-1-kapwoning</b> | 425       |
|                                            | <b>Vrijstaande woning</b>  | 581       |
|                                            | <b>Appartement</b>         | 340       |
| <b>Bouwkosten incl. opslag (€ x 1.000)</b> | <b>Tussenwoning</b>        | 234       |
|                                            | <b>Hoekwoning</b>          | 274       |
|                                            | <b>2-onder-1-kapwoning</b> | 287       |
|                                            | <b>Vrijstaande woning</b>  | 492       |
|                                            | <b>Appartement</b>         | 170       |
| <b>Residuele grondwaarde (€ x 1.000)</b>   | <b>Tussenwoning</b>        | 142       |
|                                            | <b>Hoekwoning</b>          | 119       |
|                                            | <b>2-onder-1-kapwoning</b> | 138       |
|                                            | <b>Vrijstaande woning</b>  | 89        |
|                                            | <b>Appartement</b>         | 171       |
| <b>% verdeling</b>                         | <b>Tussenwoning</b>        | 29%       |
|                                            | <b>Hoekwoning</b>          | 13%       |
|                                            | <b>2-onder-1-kapwoning</b> | 9%        |
|                                            | <b>Vrijstaande woning</b>  | 13%       |
|                                            | <b>Appartement</b>         | 37%       |

## A.8.2 Daling woningwaarde door windturbine

Tabel 62 bevat de kengetallen die in deze studie zijn gebruikt om de daling van woningwaarde te bepalen door de plaatsing van een windturbine.

Tabel 62 – Overzicht van kengetallen voor het bepalen van de gemiddelde daling van woningwaarde door plaatsing van windturbine

| Parameter                                            | Waarde      | Bron                                                                                              |
|------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aantal woningen binnen bereik windturbine            | 50          | <a href="https://allecijfers.nl/woonplaats/hapert/">https://allecijfers.nl/woonplaats/hapert/</a> |
| Gemiddelde daling woningwaarde percentage (< 2,5 km) | 5,7%        | <a href="https://windstats.nl/kaart/">https://windstats.nl/kaart/</a>                             |
| Gemiddelde woningwaarde                              | € 405.000   | <a href="https://allecijfers.nl/woonplaats/hapert/">https://allecijfers.nl/woonplaats/hapert/</a> |
| Gemiddelde daling woningwaarde                       | € 1.144.125 |                                                                                                   |

## A.9 Productiviteitswinst

Tabel 63 bevat de kengetallen die we in deze studie hebben gebruikt om de productiviteitswinst te bepalen in de gevoeligheidsanalyses waarbij bedrijven in de referentie geen mitigerende maatregelen nemen tegen ongefaciliteerde elektriciteitsvraag.

Tabel 63 – Kengetallen productiviteitswinst uit een onderzoek van Ecorys (Ecorys, 2024b)

| Omschrijving                  | Kostprijspost 1<br>conventioneel<br>(€/MWh) | Kostprijspost 1<br>toekomstgericht<br>(€/MWh) | Kostprijspost 2<br>(€/MWh) | Bruto<br>toegevoegde<br>waarde (mln.<br>€/jaar) | CO <sub>2</sub> -<br>uitstoot<br>(tCO <sub>2</sub> /jaar) |
|-------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 01 Landbouw                   | 63                                          | 393                                           |                            |                                                 | 3.398.150                                                 |
| 02 Bosbouw                    | 72                                          | 718                                           | 105                        | 169                                             | 65.260                                                    |
| 08 Delfstoffenwinning         | 81                                          | 854                                           | 103                        | 462                                             | 93.460                                                    |
| 10 Voedingsmiddelenindustrie  | 187                                         | 978                                           | 100                        | 12.971                                          | 2.127.890                                                 |
| 11 Drankenindustrie           | 297                                         | 1.636                                         | 100                        | 1.321                                           | 135.360                                                   |
| 12 Tabaksindustrie            | 9.039                                       | 49.931                                        | 100                        | 3.013                                           | 11.280                                                    |
| 13 Textielindustrie           | 130                                         | 466                                           | 100                        | 326                                             | 107.160                                                   |
| 15 Leer- en schoenenindustrie | 1.172                                       | 3.696                                         | 100                        | 326                                             | 11.280                                                    |
| 16 Houtindustrie              | 611                                         | 2.053                                         | 100                        | 1.273                                           | 16.920                                                    |
| 17 Papierindustrie            | 124                                         | 800                                           | 100                        | 2.180                                           | 366.600                                                   |
| 18 Grafische industrie        | 1.798                                       | 2.244                                         | 100                        | 1.180                                           | 28.200                                                    |
| 20 Chemische industrie        | 19                                          | 422                                           | 100                        | 9.795                                           | 3.442.010                                                 |
| 21 Farmaceutische industrie   | 741                                         | 5.282                                         | 100                        | 2.881                                           | 107.160                                                   |

| Omschrijving                                 | Kostprijspost 1<br>conventioneel<br>(€/MWh) | Kostprijspost 1<br>toekomstgericht<br>(€/MWh) | Kostprijspost 2<br>(€/MWh) | Bruto<br>toegevoegde<br>waarde (mln.<br>€/jaar) | CO <sub>2</sub> -<br>uitstoot<br>(tCO <sub>2</sub> /jaar) |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 22 Rubber- en kunststofproduct-<br>industrie | 764                                         | 1.427                                         | 100                        | 3.207                                           | 191.760                                                   |
| 23 Bouwmaterialenindustrie                   | 59                                          | 548                                           | 100                        | 2.347                                           | 1.100.600                                                 |
| 24 Basismetaalindustrie                      | 72                                          | 163                                           | 101                        | 1.749                                           | 668.160                                                   |
| 25 Metaalproductenindustrie                  | 1.225                                       | 3.097                                         | 101                        | 7.489                                           | 312.840                                                   |
| 26 Elektrotechnische industrie               | 6.205                                       | 9.570                                         | 100                        | 4.102                                           | 28.200                                                    |
| 27 Elektrische<br>apparatenindustrie         | 1.217                                       | 5.196                                         | 100                        | 3.449                                           | 124.080                                                   |
| 28 Machine-industrie                         | 7.060                                       | 14.026                                        | 101                        | 14.602                                          | 97.490                                                    |
| 29 Auto- en aanhangwagen-<br>industrie       | 2.081                                       | 4.725                                         | 100                        | 2.684                                           | 62.040                                                    |
| 30 Overige transportmiddelen-<br>industrie   | 1.985                                       | 4.613                                         | 100                        | 1.551                                           | 39.480                                                    |
| 31 Meubelindustrie                           | 1.550                                       | 4.546                                         | 100                        | 1.476                                           | 45.120                                                    |
| 32 Overige industrie                         | 7.706                                       | 21.862                                        | 100                        | 3.853                                           | 22.560                                                    |
| 33 Reparatie en installatie van<br>machines  | 4.369                                       | 11.790                                        | 104                        | 3.641                                           | 41.090                                                    |
| 36 Waterleidingbedrijven                     | 1.392                                       | 1.442                                         | 100                        | 1.045                                           | 5.640                                                     |
| 37 Afvalwaterinzameling en -<br>behandeling  | 559                                         | 1.031                                         | 100                        | 1.108                                           | 11.280                                                    |
| 38 Afvalbehandeling en<br>recycling          | 194                                         | 777                                           | 106                        | 1.108                                           | 132.130                                                   |
| 45 Autohandel en -reparatie                  | 1.314                                       | 5.263                                         | 118                        | 9.538                                           | 390.870                                                   |
| 46 Groothandel en handels-<br>bemiddeling    | 1.604                                       | 7.864                                         | 121                        | 63.722                                          | 1.994.750                                                 |
| 47 Detailhandel (niet in auto's)             | 1.467                                       | 4.816                                         | 115                        | 29.754                                          | 1.133.060                                                 |
| 49 Vervoer over land                         | 74                                          | 678                                           | 124                        | 11.456                                          | 5.462.630                                                 |
| 52 Opslag, dienstverlening voor<br>vervoer   | 1.227                                       | 3.309                                         | 115                        | 12.307                                          | 586.590                                                   |
| 53 Post en koeriers                          | 847                                         | 4.223                                         | 123                        | 2.307                                           | 138.610                                                   |
| 58 Uitgeverijen                              | 8.613                                       | 9.845                                         | 100                        | 2.895                                           | 5.640                                                     |
| 59-60 Film, TV en radio                      | 4.277                                       | 5.040                                         | 113                        | 2.406                                           | 12.890                                                    |
| 61 Telecommunicatie                          | 2.830                                       | 3.295                                         | 115                        | 7.783                                           | 55.640                                                    |
| 62-63 IT- en informatiedienst-<br>verlening  | 14.340                                      | 19.355                                        | 130                        | 26.021                                          | 67.770                                                    |

| Omschrijving                                 | Kostprijspost 1<br>conventioneel<br>(€/MWh) | Kostprijspost 1<br>toekomstgericht<br>(€/MWh) | Kostprijspost 2<br>(€/MWh) | Bruto<br>toegevoegde<br>waarde (mln.<br>€/jaar) | CO <sub>2</sub> -<br>uitstoot<br>(tCO <sub>2</sub> /jaar) |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 64 Bankwezen                                 | 10.360                                      | 30.982                                        | 111                        | 31.572                                          | 168.430                                                   |
| 65 Verzekeraars en<br>pensioenfondsen        | 4.452                                       | 13.315                                        | 113                        | 7.026                                           | 87.060                                                    |
| 66 Overige financiële<br>dienstverlening     | 8.733                                       | 21.976                                        | 106                        | 7.763                                           | 48.340                                                    |
| 69-70 Juridisch en<br>managementadvies       | 5.077                                       | 28.017                                        | 127                        | 38.617                                          | 361.360                                                   |
| 71 Architecten-,<br>ingenieursbureaus e.d.   | 5.312                                       | 21.532                                        | 120                        | 11.083                                          | 110.470                                                   |
| 72 Research                                  | 2.481                                       | 6.738                                         | 106                        | 2.490                                           | 53.980                                                    |
| 73 Reclamewezen en<br>marktonderzoek         | 1.983                                       | 10.319                                        | 120                        | 3.569                                           | 86.250                                                    |
| 74-75 Overige professionele<br>diensten      | 2.433                                       | 10.017                                        | 113                        | 3.650                                           | 77.340                                                    |
| 77 Verhuur van roerende<br>goederen          | 160                                         | 6.463                                         | 151                        | 7.819                                           | 575.060                                                   |
| 78 Uitzendbureaus en arbeids-<br>bemiddeling | 270                                         | 12.539                                        | 152                        | 21.258                                          | 822.260                                                   |
| 79 Reisbureaus, reisorganisatie<br>en -info  | 190                                         | 3.855                                         | 149                        | 1.915                                           | 213.220                                                   |
| 80-82 Overige zakelijke<br>dienstverlening   | 364                                         | 7.861                                         | 149                        | 12.380                                          | 684.870                                                   |
| 86 Gezondheidszorg                           | 3.049                                       | 12.874                                        | 106                        | 34.051                                          | 521.480                                                   |
| 87-88 Verzorging en welzijn                  | 2.071                                       | 8.074                                         | 103                        | 31.516                                          | 716.420                                                   |
| 90-92 Kunst, cultuur en<br>kansspelen        | 889                                         | 3.139                                         | 105                        | 3.248                                           | 184.500                                                   |
| 93 Sport en recreatie                        | 489                                         | 1.558                                         | 104                        | 1.904                                           | 199.810                                                   |
| 94 Ideële, belangen-, hobby-<br>verenigingen | 599                                         | 5.009                                         | 107                        | 4.026                                           | 215.970                                                   |
| 95 Reparatie van consumenten-<br>artikelen   | -                                           | 17.360                                        | 113                        | 572                                             | 12.890                                                    |
| 96 Overige persoonlijke<br>dienstverlening   | 1.019                                       | 5.539                                         | 109                        | 3.185                                           | 133.790                                                   |