

Inleiding en verbinding met de rest van het project

De Hanzehogeschool Groningen heeft in project 9.1 bijgedragen aan activiteit 1. Het doel van activiteit 1 was “Door systeemanalyse van tenminste twee systeemconcepten van decentrale voelbare warmteopslag een concept kiezen voor nadere ontwikkeling”.

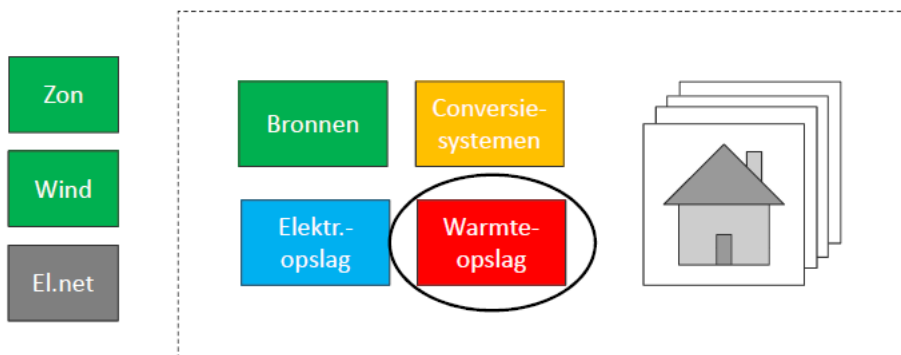
De taak van de Hanzehogeschool was: “In de systeemanalyse zal Hanze hogeschool op uurbasis berekenen hoeveel bronnen (wind en zon) er nodig zijn en hoe groot de capaciteit van de opslag en opwekking moet zijn om een minimale CO₂ uitstoot, minimale kosten of minimaal ruimtebeslag te krijgen.”

De Hanzehogeschool heeft de berekeningen gedaan met een simulatiemodel dat ze heeft ontwikkeld. In deze studie zijn voor twee warmteopslag-concepten de minimale kosten bepaald van het energiesysteem waarvan het warmteopslag-concept deel uitmaakt. De bronnen, conversiesystemen, elektriciteitsopslag en warmteopslag vormen samen het energiesysteem.

Beschrijving van het model

Hieronder wordt het model dat de Hanzehogeschool heeft ontwikkeld kort beschreven.

Op basis van de gegeven zon- en windprofielen, de elektriciteits- en warmtevraag (alle op uurniveau) en gegevens over kosten en emissies per onderdeel van het energiesysteem, voert het model een berekening uit. De uitkomst van die berekening is de capaciteit van de benodigde bronnen, conversiesystemen en opslag (zowel elektriciteit als warmte) waarbij ieder uur van de beschouwde periode (bijvoorbeeld een jaar) aan de elektriciteits- en warmtevraag wordt voldaan en de totale jaarlijkse kosten het laagst zijn. Figuur 1 geeft een schematische voorstelling van het model.



Figuur 1: Schematische voorstelling van het model dat de Hanze heeft ontwikkeld.

Tot nu toe kent het model zonnepanelen (PV), zonnecollectoren, grote en kleine windturbines en eventueel het elektriciteitsnet en een verwarmingstoestel, aangesloten op het gasnet (niet meegenomen in Figuur 1) als energiebronnen. In deze studie zijn alleen zonnepanelen, zonnecollectoren, en kleiner windturbines meegenomen. Een gemiddelde warmtepomp converteert elektriciteit in warmte. In plaats van een warmtepomp kan ook een verwarmingselement worden gekozen.

De elektrische opslag vindt plaats in een accu en de warmteopslag in een buffer gevuld met water of ander materiaal en rondom voorzien van een isolerende laag. Voor de accu wordt de minimaal benodigde opslagcapaciteit berekend. Voor de warmtebuffer worden de minimaal benodigde opslagcapaciteit en het daarbij behorende netto volume (d.w.z. exclusief het volume van de isolatie) berekend, maar er kan ook gerekend worden met een gegeven opslagcapaciteit.

Daarnaast kan het model o.a. de vulling van de opslagsystemen, het eventuele gebruik van en levering aan het elektriciteitsnet en de temperatuur van de warmtebuffer per uur weergeven en de gevoeligheid voor veranderingen van de samenstelling van het energiesysteem zichtbaar maken.

Model warmteopslag

De warmteopslag wordt in het model gemodelleerd als een kubus die bestaat uit te verwarmen materiaal dat rondom is omgeven met isolatiemateriaal. De soortelijke massa en de soortelijke warmte van het te verwarmen materiaal, de minimaal benodigde opslagtemperatuur en de maximaal toelaatbare opslagtemperatuur moeten worden opgegeven. Verder moeten de dikte en de geleidbaarheid van het isolatiemateriaal, een vaste temperatuur van de binnenzijde van de isolatie en een vaste omgevingstemperatuur worden opgegeven. Hieruit wordt een constante lek berekend, die wordt meegenomen in de berekeningen.

In deze studie zijn twee types warmteopslag gesimuleerd:

- Een opslag met water als te verwarmen materiaal. Het warmteopslagsysteem van Summerheat heeft ook water als te verwarmen materiaal. De waarden die voor dit type warmteopslag in deze studie zijn gebruikt zijn door de Hanze zelf gegenereerd en staan in Tabel 1.
- Het ontwerp van TNO, gebaseerd op staal als te verwarmen materiaal. In dit ontwerp is de werkelijke uitvoering van de isolatie complexer dan in het model is gemodelleerd. Voor de simulaties in deze studie heeft TNO de in Tabel 1 opgegeven waarden aangeleverd.

Tabel 1: modelwaarden gebruikt in de simulatie met een warmtebuffer met water en een warmtebuffer met staal.

	Warmtebuffer met water	Warmtebuffer met staal
Maximaal laadvermogen	10000 kW (quasi oneindig)	3,6 kW
Maximaal ontladvermogen	10000 kW (quasi oneindig)	10 kW
Laad-efficiëntie	95%	100%
Ontlaad-efficiëntie	95%	100%
Soortelijke massa te verwarmen materiaal	1000 kg/m ³	7850 kg/m ³
Soortelijke warmte te verwarmen materiaal	4200 J/(kg·K)	490 J/(kg·K)
Minimaal benodigde opslagtemperatuur	65 °C	100 °C
Maximaal toelaatbare opslagtemperatuur	90 °C	900 °C
Dikte isolatiemateriaal	30 cm	2 cm
Warmtegeleidbaarheid isolatiemateriaal	0,05 W/(m·K)	0,005 W/(m·K)
Temperatuur aan de binnenzijde van de isolatie	77,5 °C	95 °C
Omgevingstemperatuur	11 °C	11 °C

Optimalisatie

Het model rekent een groot aantal situaties door. Iedere situatie wordt gedefinieerd door de totale oppervlakte van de zonnepanelen, het aantal grote en kleine windturbines en de totale oppervlakte van de zonnecollectoren. Voor ieder van die situaties wordt, zoals eerder aangegeven, de minimaal benodigde grootte van de opslag (zowel elektriciteit als warmte) berekend en onder andere de totale jaarlijkse kosten en jaarlijkse emissies van het hele energiesysteem. (Met jaarlijkse emissie wordt bedoeld het totaal aan directe en indirecte emissies gedeeld door de levensduur.)

Een oplossing wordt beschouwd als geldig als de gekozen combinatie van bronnen, conversiesystemen en opslagsystemen in staat is ieder uur van de beschouwde periode (bijvoorbeeld een jaar) aan de elektriciteits- en warmtevraag te voldoen. Uit de hele set van geldige oplossingen wordt door het model dié oplossing bepaald die de laagste totale kosten geeft.

Het model geeft ook aan hoe gevoelig het eindresultaat is voor variatie van de genoemde parameters. Hiermee kan worden beoordeeld of het optimum voldoende nauwkeurig is bepaald. Verderop wordt een voorbeeld van een gevoeligheid gegeven.

Simulaties

De simulaties gaan uit van de elektriciteits- en warmtevraag van één huis. Het model neemt ook windenergie mee, maar natuurlijk zal een windturbine niet fysiek verbonden zijn aan één enkel huis, maar aan meerdere huizen. Daarom levert het model bij één huis in de regel een fractie van één windturbine.

Er is gekeken naar de situatie waarbij het huis niet is aangesloten op het elektriciteits- of gasnet, dus waarbij het huis volledig zelfvoorzienend is qua energie. Het energiesysteem wordt geoptimaliseerd voor de laagste kosten van het energiesysteem. De simulaties hebben betrekking op een heel jaar.

Er zijn vier scenario's bestudeerd, zie Tabel 2. De scenario's verschillen in het type warmteopslag (warmtebuffer met water of warmtebuffer met staal) en in het toepassingsgebied van de warmte (alleen voor tapwater of voor tapwater plus ruimteverwarming).

Tabel 2: gesimuleerde scenario's

Scenario's	Alleen tapwater	Tapwater plus ruimteverwarming
Warmtebuffer met water	Goedkoopste systeem	Goedkoopste systeem
Warmtebuffer met staal	Goedkoopste systeem	Goedkoopste systeem

Input van het model

De input van het model bestaat uit waarden voor de volgende elementen.

- Elektriciteitsvraag per uur
- Tapwater-warmtevraag per uur
- Totale warmtevraag per uur
- Zoninstraling per uur (KNMI data van weerstation Eelde)
- Windsterkte per uur (KNMI data van weerstation Eelde)
- Per bron/conversiesysteem/opslagsysteem:
 - CAPEX per eenheid, bijv. €/W
 - OPEX per eenheid per jaar, bijv. €/W per jaar
 - (Directe en indirecte) emissies
 - Levensduur
- Gegevens voor de zonnepanelen, windturbines, zonnecollectoren en warmtepompen

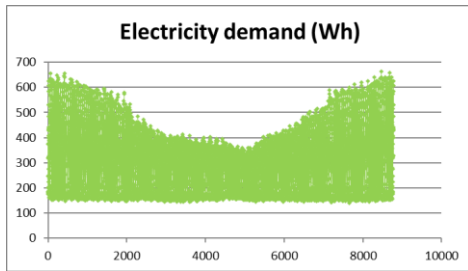
Om het jaarverbruik van elektriciteit en warmte te bepalen hebben we de website van Milieucentraal geraadpleegd (<https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/inzicht-in-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik>) en voor de berekeningen een huis gekozen in de categorie “oude kleine woning (hoek, tussen, 2 onder 1 kap)” met twee of meer bewoners. Dat geeft een elektriciteitsvraag van 2780 kWh/jaar en een totale warmtevraag (tapwater plus ruimteverwarming) van 12016 kWh/jaar (1230 m³/jaar aardgas * 35,17/3,6 kWh / m³ aardgas).

Om de jaarpatronen (de waarden per uur) van de totale warmte- en elektriciteitsvraag te bepalen is gebruik gemaakt van verbruiksprofielen op uurniveau van Liander voor elektriciteit en gas uit 2008 en resp. 2009 met een som van 1. (De profielen zijn soms iets aangepast vanwege het verschil in aantal dagen.) De jaarpatronen zijn bepaald door de uurwaarden van de profielen te vermenigvuldigen met het betreffende

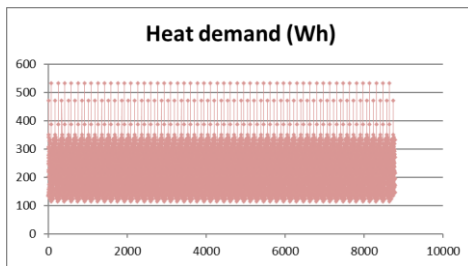
jaarverbruik. De gasvraag (omgerekend naar energie-eenheden) is gebruikt als benadering voor de totale warmtevraag.

Voor de warmtevraag t.b.v. tapwater is eerst een week van het jaar gezocht waarin de warmtevraag erg laag is. Omdat die week in de zomer ligt hebben we aangenomen dat de ruimteverwarming dan vrijwel nihil is en dat de warmtevraag in die week representatief is voor de warmtevraag voor tapwater. Het warmtevraagpatroon van deze week is toegekend aan de eerste week van het jaar en is vervolgens meerdere malen herhaald om een heel jaar te vullen.

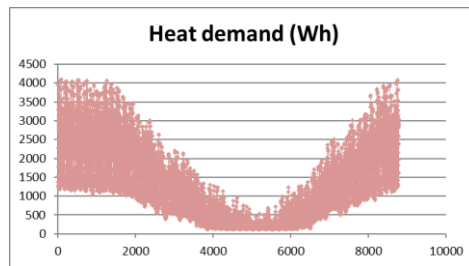
Zo hebben we het verloop van de elektriciteitsvraag (zie Figuur 2), warmtevraag t.b.v. tapwater (zie Figuur 3), warmtevraag t.b.v. tapwater plus ruimteverwarming (zie Figuur 4), zoninstraling (zie Figuur 5) en windsnelheid (zie Figuur 6) bepaald.



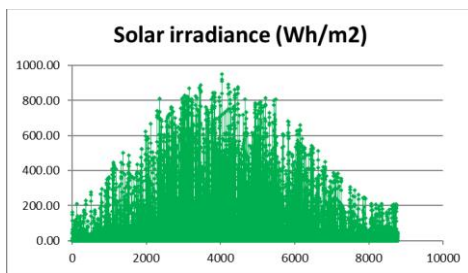
Figuur 2: elektriciteitsvraag voor het huis, per uur over een heel jaar



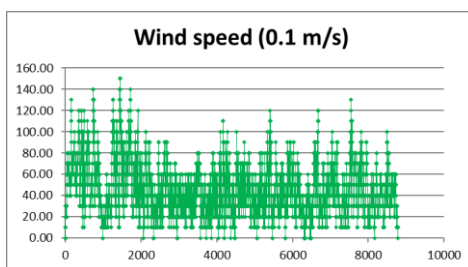
Figuur 3: warmtevraag voor tapwater voor het huis, per uur, over een heel jaar



Figuur 4: totale warmtevraag voor het huis (tapwater plus ruimteverwarming), per uur, over een heel jaar



Figuur 5: zoninstraling per uur, voor 2008 (KNMI weerstation Eelde)



Figuur 6: windsnelheid per uur, voor 2008 (KNMI weerstation Eelde)

Onderstaande tabel, Tabel 3, geeft aan welke CAPEX-, OPEX-, emissie- en levensduur-waarden we voor deze studie hebben gekozen voor de energiebronnen, conversiesystemen en opslagsystemen. Deze waarden zijn benaderingen, gebaseerd op meer algemene literatuurbronnen, websites en aannames.

Tabel 3: CAPEX, OPEX, emissie en levensduur waarden zoals gebruikt in de simulaties

variable	CAPEX		OPEX		Embodied emissions		Life span	
	value	unit	value	unit	value	unit	value	unit
PV panels	2.1	€/Wp	0.0085	€/Wp per year	470	kg CO2eq/m2	30	yr
Small wind turbines	4	€/W	0.035	€/W per year	0.45	kg CO2eq/W	20	yr
Solar collectors	360	€/m2	12	€/m2 per year	120	kg CO2eq/m2	20	yr
Heat pump	1	€/W	0.01	€/W per year	0.028	kg CO2eq/W	15	yr
Electricity storage	600	€/kWh	3	€/kWh per year	100	kg CO2eq/kWh	10	yr
Heat storage (water based)	30	€/kWh	0.0075	€/kWh per year	10	kg CO2eq/kWh	40	yr
Heat storage (metal based, in the case of tap water and space heating)	14	€/kWh	0.05	€/kWh per year	15	kg CO2eq/kWh	15	yr
Heat storage (metal based, in the case of only tap water)	42	€/kWh	0.05	€/kWh per year	15	kg CO2eq/kWh	15	yr

In het model vult een op water gebaseerde warmteopslag zich met warmte vanuit een warmtepomp. De warmtepomp zet elektriciteit om in warmte en die warmte wordt vervolgens toegevoegd aan de op water gebaseerde warmteopslag. Voor een op staal gebaseerde warmteopslag hebben we een verwarmingselement gemodelleerd i.p.v. een warmtepomp. De waarden voor CAPEX, OPEX en embodied emissions zijn in dat geval op 0 gesteld.

Voor de zonnepanelen is uitgegaan van 170 Wp/m² en een vaste efficiëntie van 17%. Als windturbine hebben we gekozen voor een kleine windturbine met een vermogen van 15 kW. In deze studie hebben de zonnecollectoren een efficiëntie van 60% en is de COP (Coefficient of Performance) van de warmtepomp op 2 gesteld.

Output van het model m.b.t. de vier scenario's

- benodigde zonnepanelen (m²)
- benodigd aantal kleine windturbines (kW)
- benodigde zonnecollectoren (m²)
- benodigde warmte- en elektriciteitsopslagcapaciteit voor minimale jaarlijkse kosten van het energiesysteem
- minimale kosten per jaar (gebaseerd op de ingevoerde CAPEX- en OPEX-kosten en de levensduur)
- totale jaarlijkse CO₂ emissies bij het energiesysteem met de minimale kosten

Tabel 4 vat de numerieke resultaten van de simulaties voor ieder van de vier scenario's samen. De waarden onder de minimale systeemkosten zijn telkens de door het model gevonden waarden die horen bij die minimale systeemkosten.

Tabel 4: resultaten van de scenario simulaties

Scenario's	Alleen tapwater	Tapwater plus ruimteverwarming
Warmtebuffer met water	Minimale systeemkosten: €2798 per jaar Zonnepanelen: 35 m ² Windturbines: 0,15 Zonnecollectoren: 0 m ² Accu: 21209 Wh Warmteopslagcapaciteit: 44621 Wh Warmteopslagvolume: 1,53 m ³ Jaarlijkse CO ₂ emissies: 833 kg CO ₂ eq	Minimale systeemkosten: €4665 per jaar Zonnepanelen: 60 m ² Windturbines: 0,4 Zonnecollectoren: 0 m ² Accu: 14242 Wh Warmteopslagcapaciteit: 460693 Wh Warmteopslagvolume; 15,8 m ³ Jaarlijkse CO ₂ emissies: 1362 kg CO ₂ eq
Warmtebuffer met staal	Minimale systeemkosten: €2420 per jaar Zonnepanelen: 40 m ² Windturbines: 0,15 Zonnecollectoren: 0 m ² Accu: 19879 kW Warmteopslagcapaciteit: 36802 Wh Warmteopslagvolume: 0,04 m ³ Jaarlijkse CO ₂ emissies: 913 kg CO ₂ eq	Minimale systeemkosten: €4127 per jaar Zonnepanelen: 30 m ² Windturbines: 0,475 Zonnecollectoren: 0 m ² Accu: 17388 kW Warmteopslagcapaciteit: 973525 Wh Warmteopslagvolume: 1,14 m ³ Jaarlijkse CO ₂ emissies: 1778 kg CO ₂ eq

Zoals te verwachten, is voor alleen tapwater de vereiste warmteopslag een stuk kleiner dan wanneer het systeem ook het huis moet kunnen verwarmen.

Wanneer een warmtebuffer met staal wordt gesimuleerd blijkt het benodigde volume van de warmteopslag veel kleiner dan wanneer een warmtebuffer met water wordt gesimuleerd.

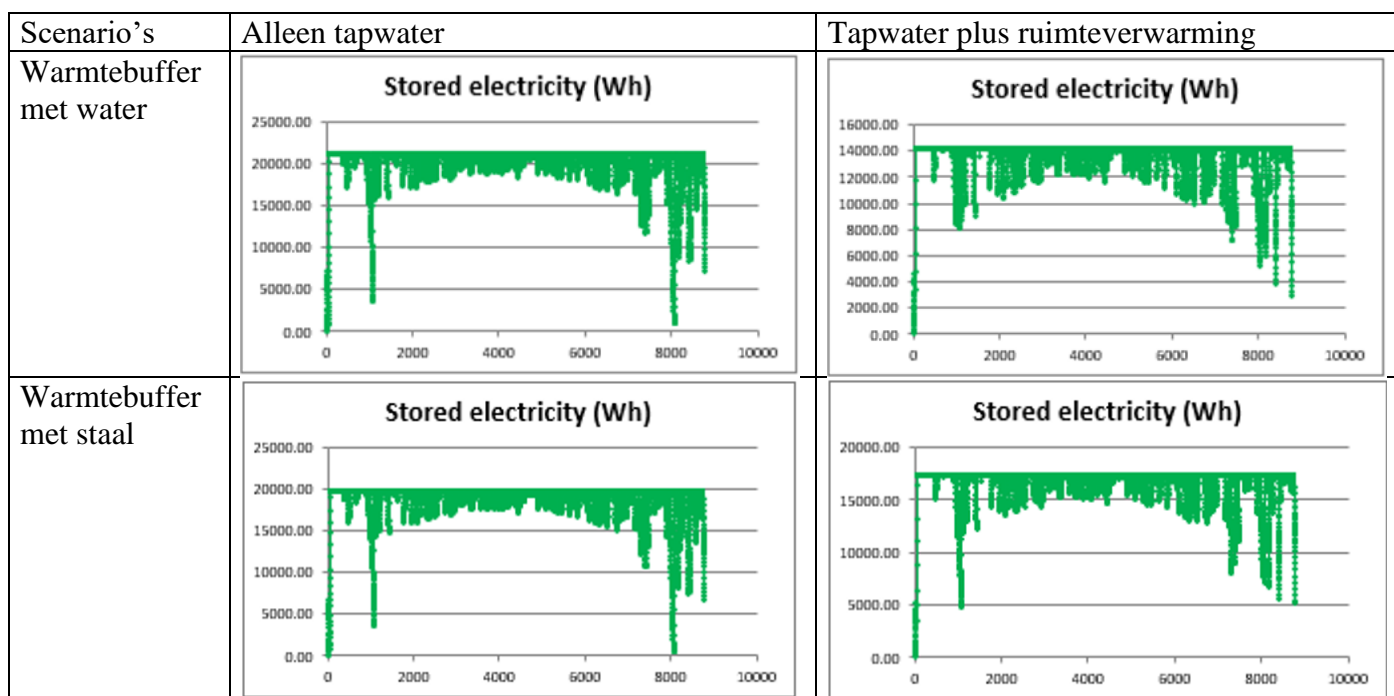
Met de waarden uit Tabel 1 en Tabel 3 zijn de totale kosten van de scenario's met een staal- of met een water- gebaseerde warmteopslag vergelijkbaar. We zien dat, met deze waarden, zonnecollectoren geen rol spelen. Hierbij moet wel worden aangetekend dat de gekozen CAPEX- en OPEX-waarden grove schattingen zijn.

Eveneens blijkt uit de tabel dat de totale jaarlijkse CO₂ emissies gerelateerd aan het energiesysteem met de minimale kosten, voor de scenario's voor alleen tapwater met een warmtebuffer met water en een warmtebuffer met staal redelijk vergelijkbaar zijn. Hetzelfde geldt voor de scenario's voor tapwater plus ruimteverwarming. Al deze emissie-waarden zijn, voor alle duidelijkheid, niet de laagst mogelijke emissie-waarden maar de emissie-waarden wanneer het energiesysteem wordt geoptimaliseerd voor de laagste jaarlijkse kosten.

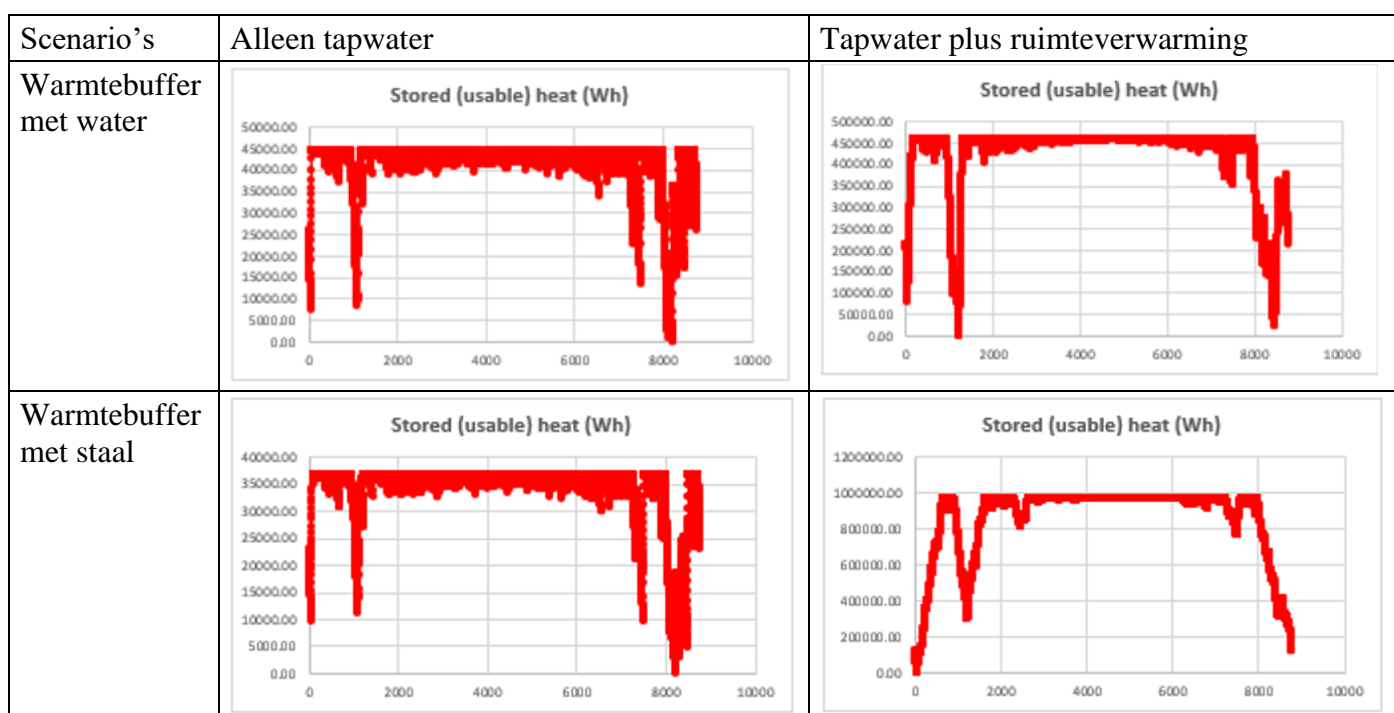
Ter illustratie tonen onderstaande tabellen voor ieder scenario het verloop als functie van het uur van het jaar van:

- de hoeveelheid energie in de accu (Tabel 5)
- de hoeveelheid energie in de warmtebuffer (Tabel 6)

Tabel 5: gesimuleerde hoeveelheid energie in de accu over een heel jaar; voor ieder van de scenario's



Tabel 6: gesimuleerde hoeveelheid energie in de warmtebuffer over een heel jaar; voor ieder van de scenario's

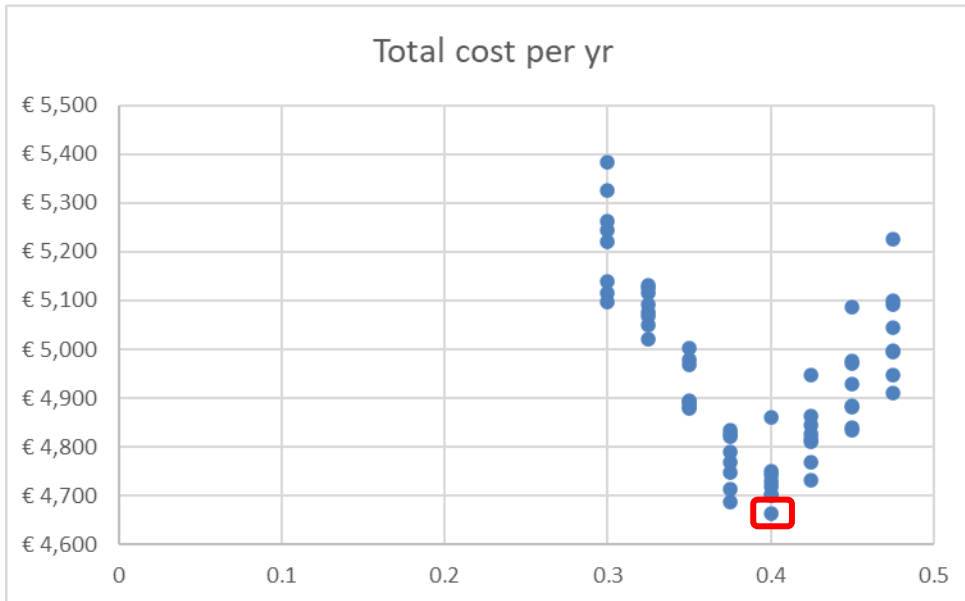


Voorbeeld gevoeligheidsanalyse

Zoals eerder gezegd, geeft het model ook aan hoe gevoelig het eindresultaat is voor variatie van ieder van de parameters. Als voorbeeld presenteren we hier de gevoeligheid van de jaarlijkse kosten van het energiesysteem voor de hoeveelheid kleine windmolens in het scenario met een warmtebuffer op waterbasis voor tapwater en ruimteverwarming.

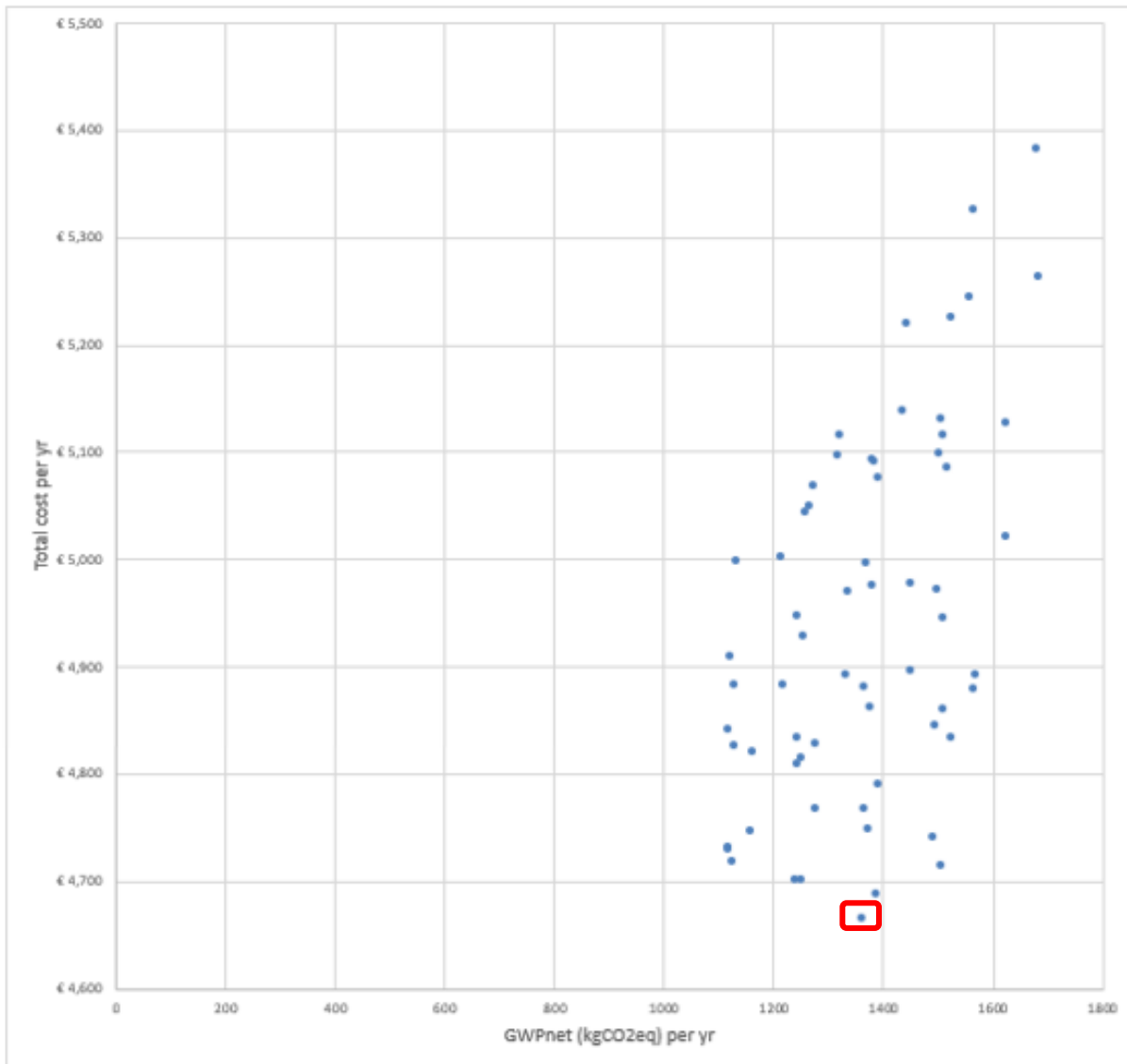
Figuur 7 laat zien hoe de totale kosten afhangen van het aantal kleine windturbines in het energiesysteem. Ieder puntje is een geldige oplossing, oftewel een set van bronnen, conversies en opslagsystemen waarbij het huis ieder uur van het jaar de gevraagde stroom en warmte krijgt. Het rood omlijnde puntje geeft die set aan

waarbij de totale kosten minimaal zijn. Uit de figuur komt duidelijk naar voren dat meer of minder kleine windturbines resulteren in hogere kosten. Het eindresultaat is dus gevoelig voor het aantal kleine windturbines.



Figuur 7: gevoeligheid van de kosten voor het totale energiesysteem als functie van het aantal kleine windturbines (scenario met een warmtebuffer op waterbasis en waarbij zowel tapwater als ruimteverwarming zijn meegenomen)

Eerder hebben we genoemd dat de emissie-waarden wanneer het energiesysteem wordt geoptimaliseerd voor de laagste jaarlijkse kosten niet de laagst mogelijke emissie-waarden zijn. Dit wordt bevestigd in Figuur 8 waar van de gevonden geldige oplossingen de gesimuleerde totale kosten per jaar zijn uitgezet tegen de berekende hoeveelheid CO₂ emissies per jaar.



Figuur 8: jaarlijkse CO₂ emissies en totale jaarlijkse kosten voor alle geldige oplossingen voor het scenario met een warmtebuffer op waterbasis en waarbij zowel tapwater als ruimteverwarming zijn meegenomen.

Conclusie

De kosten voor een optimaal energiesysteem voor een huis zijn voor een systeem met een op water of met een op staal gebaseerde warmteopslag voor de hier gekozen inputgegevens vergelijkbaar. Wel is het benodigde volume van een warmteopslag o.b.v. staal veel kleiner dan wanneer water als warmteopslagmedium wordt gebruikt.