

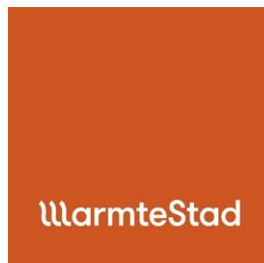


KWR 2026.060 | 2026

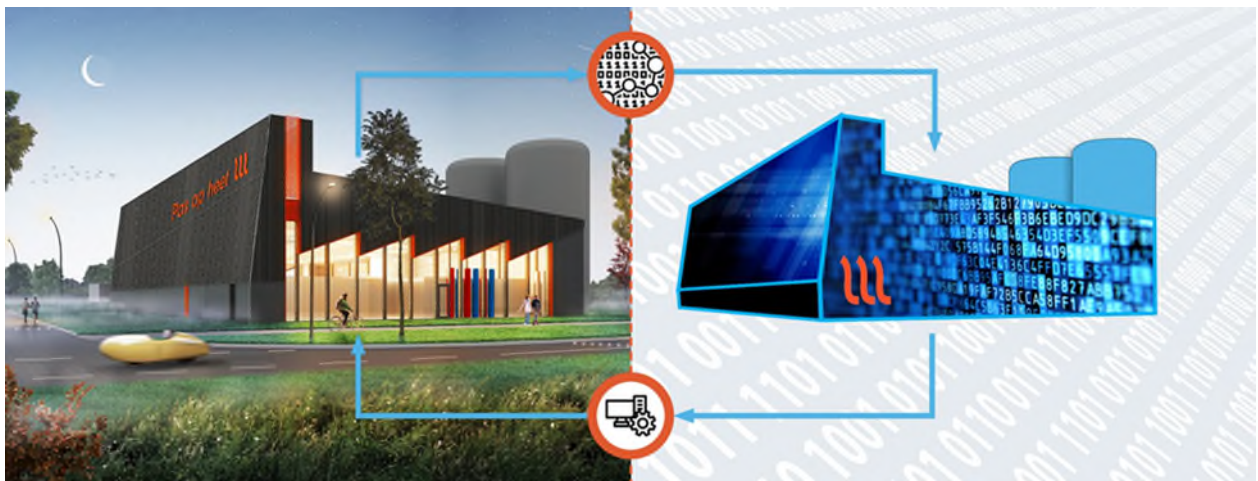
Digital Twin WarmteStad

Verduurzaming warmtenet Groningen
met zonthermie, datacenter-warmte en
seizoensopslag

Samenwerkingspartners



KWR



Colofon

Digital Twin WarmteStad

Verduurzaming warmtenet met zonthermie, datacenter-warmte en seizoensopslag

KWR 2026.060 | 2026

Projectnummer

403711

Projectmanager

Marette Zwamborn

Samenwerkingspartners

Demonstratieproject WarmteStad en KWR Water Research Institute

Auteur(s)

Daniël Bakker

Dirk Vries

Lotte Vijverberg

Marette Zwamborn (eindredactie)

Kwaliteitsborger(s)

Ad van Wijk

Verzonden naar

De resultaten komen voort uit een DEI+ demonstratieproject en zijn publiek beschikbaar gesteld.

Deze activiteit is mede gefinancierd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en de resultaten zijn openbaar. Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectueel en industrieel eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

verduurzaming; warmtenet; seizoensopslag; digital twin

Jaar van publicatie

2026

Meer informatie

Marette Zwamborn

T 030-6069677

E marette.zwamborn@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

The logo for KWR (Knowledge Water Research) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected, and the 'R' is slightly separated.

juni 2026 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

Deze rapportage is een opbrengst van een demonstratieproject ‘Verduurzaming van de warmte-voorziening in de stad Groningen met zonthermie, datacenter-warmte en seizoensopslag’ van WarmteStad en KWR Water Research Institute. In de projectperiode van 2021 tot 2026 heeft WarmteStad de Warmtecentrale Zernike gebouwd en daarbij een multi-bronnenstrategie toegepast met zonthermie, datacenter-warmte en seizoensopslag. De doelstelling is om warmte te leveren uit restwarmte van datacenters en zonthermie, overtollige duurzame warmte ondergronds op te slaan en een reductie te realiseren van CO₂-emissie. Het project is door KWR Water Research Institute benut als ‘living lab’, waarbij parallel aan de bouw van de warmtecentrale een digital twin is opgesteld. Deze digital twin is een virtuele representatie van de warmtecentrale, die gebruikt kan worden voor ontwerpevaluatie, optimalisatie en toekomstverkenning. Het demonstratieproject is mede gefinancierd met subsidie in het kader van de DEI+regeling.

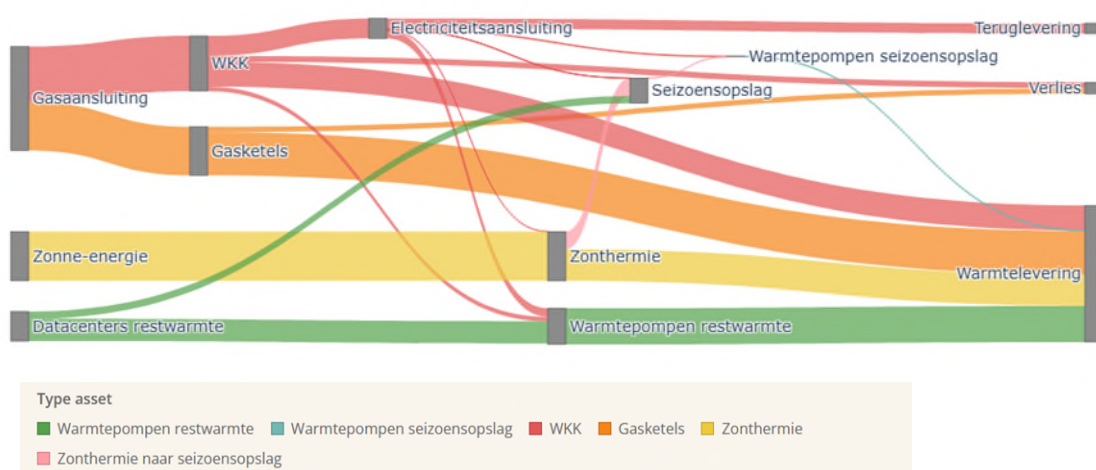
Warmtecentrale

De Warmtecentrale Zernike vormt de schakel tussen duurzame warmtebronnen, seizoensopslag en de levering aan het warmtenet. Het warmtenet is ontworpen voor een temperatuurniveau van ongeveer 75°C en levert op termijn warmte aan 11.500 woningequivalenten. De nieuwe Warmtecentrale Zernike is eind 2022 technisch in bedrijf genomen, met warmtepompen, WKK's, gasketels en een dagbuffer. De warmtepompen benutten restwarmte van datacenter QTS als duurzame bron. In de periode 2023-2024 is het zonthermiekamp Dorkwerd gebouwd en aangesloten op de warmtecentrale. In de zomer bestaat er een overschot aan zonnewarmte en restwarmte, terwijl in de winter de warmtevraag groter is dan het aanbod. Een ondergrondse seizoensopslag, waarbij een combinatie wordt gemaakt van opslag op lage temperatuur (LT-seizoensopslag, 25 °C) en midden temperatuur (MT-seizoensopslag, 45°C), is vanaf 2025 in gebruik genomen. In het daaropvolgende winterseizoen (eind 2025 – begin 2026), kon voor het eerst warmte uit de seizoensopslag worden benut voor de warmtelevering. In deze periode is ook de koppeling met restwarmte van datacenter Eurofiber voorbereid.

Monitoring en analyse

WarmteStad heeft een dataset van meetgegevens samengesteld uit de periode 2023-2026. De dataset omvat meer dan 80 parameters en vormt een selectie van alle beschikbare meetpunten. Op basis van de meetgegevens is een analyse van het functioneren van de assets in de warmtecentrale uitgevoerd. In 2025 waren alle bronnen binnen de multi-bronnenstrategie operationeel, de energiestromen in de warmtecentrale staan in onderstaande figuur. Na analyse van individuele assets blijken de componenten over het algemeen volgens ontwerpspecificaties te functioneren. De opbrengst van zonthermie bleek lager dan volgens ontwerp werd verwacht.

Energiestromen 2025



Digital twin

De digital twin heeft als doel om de functionele werking van de Warmtecentrale Zernike te simuleren. De digital twin omvat de Warmtecentrale Zernike, het zonthermiekpark Dorkwerd, de restwarmtelevering vanuit de datacenters en de seizoensopslag op MT- en LT-niveau. Belangrijkste input voor de digital twin is de warmtelevering door de Warmtecentrale Zernike, de beschikbaarheid van restwarmte en de ontwerpspecificaties van de assets. Bij de uitwerking van de digital twin is een iteratief proces gevolgd van modelopzet, verwerken van monitoringsdata, validatie, scenariostudie en evaluatie, waardoor parallel aan de ontwikkeling van de warmtecentrale de compleetheid van monitoringsgegevens is gecheckt, het functioneren van individuele assets is geëvalueerd en de regeling en inzetstrategie meermaals is besproken.

Scenariostudie

De verkenningen met de digital twin geven een beeld van het functioneren van de warmtecentrale tot 2030, op basis van aangeleverde prognoses door WarmteStad van de ontwikkeling van de warmtevraag en de beschikbaarheid van duurzame bronnen. De resultaten bieden zicht op een dalend aandeel in de warmtelevering van de gasketels en een groeiende inzet van duurzame warmte, zie onderstaande figuur.

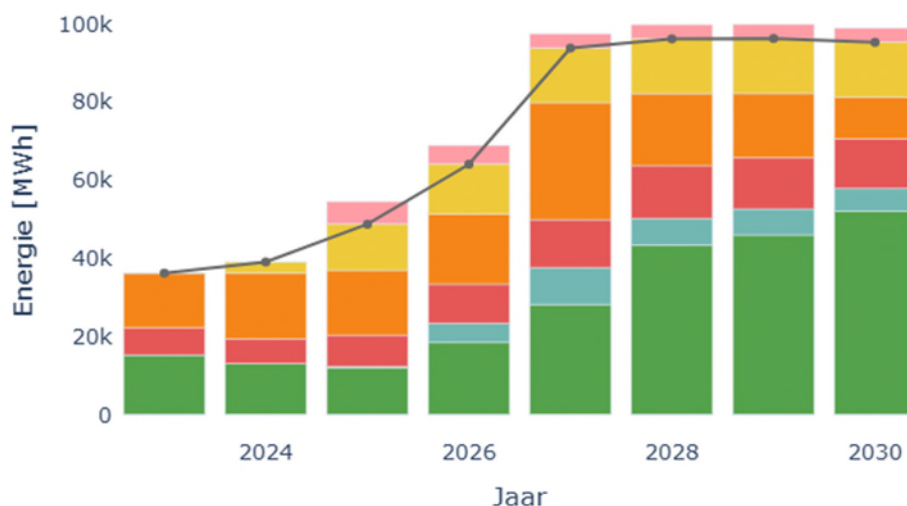
Rol van seizoensopslag

De rol van de seizoensopslag is in de scenariostudie geëvalueerd. Volgens deze verkenning draagt de warmtepomp die gekoppeld is aan de seizoensopslag vanaf 2026 substantieel bij aan de warmteproductie. In 2027 wordt vanuit de seizoensopslag een aandeel van 10% van de warmte geleverd, dit neemt vervolgens af tot 6% in 2030. In de situatie zonder seizoensopslag zou dit aandeel zijn geleverd door de gasketels.

Volgens de berekeningsresultaten van de digital twin kan – op basis van de gehanteerde uitgangspunten en inzetstrategie – niet alle opgeslagen warmte worden benut in het daaropvolgende winterseizoen. De resterende warmte in de seizoensopslag is deels nog beschikbaar voor volgende jaren. In het jaar 2027, een jaar met een relatief grote warmtevraag ten opzichte van het aanbod duurzame bronnen, kan het warmteoverschot van voorgaande jaren uit de seizoensopslag juist weer worden benut.

In de jaren 2028-2030 neemt de rol van seizoensopslag af, maar het aandeel duurzame bronnen stijgt, doordat een groter deel van de zonthermie en restwarmte direct kan worden ingezet bij de warmtelevering aan het warmtenet. Met een scenarioberekening is vervolgens verkend, of een grotere beschikbaarheid van zonthermie leidt tot een grotere inzet van seizoensopslag. Dat blijkt echter vrijwel niet het geval: er is dan weliswaar meer warmte beschikbaar om de seizoensopslag te laden, maar volgens de scenarioberekening - met de beschikbare capaciteit van de seizoensopslag-warmtepompen en de aangehouden inzetstrategie - blijkt de mogelijkheid voor warmte benutting uit seizoensopslag de beperkende factor te zijn.

Verkenning van de multi-bronstrategie van WarmteStad tot 2030



Evaluatie CO₂-emissiereductie

Bij de multi-bronnenstrategie van WarmteStad is als doelstelling gesteld om een cumulatieve reductie te realiseren van 15,7 kton CO₂-emissie in de eerste vijf jaar van de warmtecentrale. WarmteStad rapporteert de CO₂-emissie jaarlijks in de duurzaamheidsrapportage. Voor de digital twin is dezelfde berekeningswijze aangehouden. De CO₂-emissiereductie is berekend ten opzichte van warmtelevering met individuele gasketels.

Volgens de duurzaamheidsrapportages is in de periode 2023-2025 een totaal van 3,1 kton CO₂-emissiereductie bereikt. Op basis van de resultaten van de digital twin is de verwachting dat de beoogde totale reductie van 15,7 kton CO₂-emissie bereikt wordt in 2028 of 2029. Dit is binnen 5 à 6 jaar na ingebruikname van de warmtecentrale, afhankelijk van de gerealiseerde warmtevraag en groei in beschikbare duurzame bronnen.

Voor het jaar 2030 wordt een reductie van 7,5 kton CO₂-emissie verwacht. Dit komt overeen met een specifieke CO₂-emissiereductie van 29,8 kg/GJ_{th}, zodat warmte geleverd door WarmteStad 49% minder emissies oplevert dan warmtelevering door individuele gasketels.

Lessons learned

De toepassing van de digital twin heeft waardevolle inzichten en leerpunten opgeleverd voor WarmteStad en voor toekomstige, vergelijkbare systemen met een multi-bronnenstrategie:

- De multi-bron strategie van WarmteStad leidt tot veel keuzevrijheid waarmee flexibel kan worden ingespeeld op variërende marktontwikkelingen en duurzaamheidsdoelstellingen. De keerzijde hiervan is dat de aansturing snel complex wordt en zodoende veel vraag van operators en ontwikkelaars.
- Tijdens de ontwikkeling van de warmtecentrale is gebleken dat functioneel inregelen nodig is, voor elke toegevoegde asset opnieuw.
- In de situatie met een groeiscenario in vraag en aanbod, blijkt dat de seizoensopslag bijdraagt aan optimale benutting van duurzame bronnen op jaarbasis, maar ook een systeemfunctie heeft voor de langere termijn. Bij groeiende vraag en aanbod kan de seizoensopslag een bufferfunctie vervullen in de multi-bronnenstrategie, en zo fluctuaties en onzekerheden in het groeiscenario kan opvangen.
- Een digitale tweeling kan op diverse manieren meerwaarde hebben, bijvoorbeeld het evalueren van de werking van bestaande assets, of het ontwikkelen van vernieuwende aansturingsstrategieën. Verschillende doelstellingen stellen verschillende eisen aan de digitale tweeling. Door de doelstelling in een vroeg stadium vast te stellen in samenwerking met alle betrokken partijen kan meer focus worden aangebracht in de implementatie ervan.
- Bij de opzet van de digitale tweeling is een iteratief proces gevolgd van opzet digitale tweeling, verwerken van monitoringsdata, validatie, scenario studie en evaluatie, waardoor al tijdens de ontwikkelperiode een check wordt uitgevoerd op compleetheid van de monitoringsgegevens, het functioneren van individuele assets wordt geëvalueerd, en gerealiseerde wijzigingen ten opzichte van ontwerp specifiek zijn geïdentificeerd.

Overall hebben we geleerd dat met de multi-bronnenstrategie van WarmteStad het mogelijk is om bij een warmtenet met een groeiend aantal afnemers, stapsgewijs toe te werken naar een groeiende inzet van duurzame bronnen, wat leidt tot een steeds grotere emissiereductie.

Bij dit rapport hoort een webrapportage: <https://warmtestad.kwrwater.nl>

De webrapportage bevat een dashboard met interactieve grafieken van de meetgegevens van WarmteStad en de berekende scenario's met de digital twin. Via het dashboard kan worden geschakeld tussen verschillende visualisaties, en kunnen scenario's met elkaar worden vergeleken. De tijdreeksen met energiestromen kunnen worden ingezoomd naar uurwaarden of uitgezoomd tot een meerjarenoverzicht.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Colofon	3
Samenvatting	4
Inhoud	7
1 Inleiding	8
1.1 Verduurzaming warmtecentrale en opzet digital twin	8
1.2 Leeswijzer	8
2 Warmtecentrale	9
2.1 Multi-bronnenstrategie van WarmteStad	9
2.2 Ontwikkeling van Warmtecentrale Zernike	9
2.3 Warmtelevering en opgesteld vermogen	12
2.4 Regeling en inzetstrategie	13
3 Monitoring en analyse	15
3.1 Dataset	15
3.2 Warmteproductie per asset	16
3.3 Analyse energiestromen warmtecentrale	18
3.4 Aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte	19
3.5 Functioneren assets in de warmtecentrale	20
3.6 Functioneren zonthermie en seizoensopslag	25
4 Digital twin	27
4.1 Opzet digital twin	27
4.2 Validatie in drie stappen	28
4.3 Resultaten van validatie	30
5 Scenariostudie	33
5.1 Opzet scenariostudie	33
5.2 Resultaten verkenning warmtecentrale tot 2030	34
5.3 Resultaten verkenning van de rol van seizoensopslag	38
5.4 Resultaten verkenning rol van zonthermie	40
6 Evaluatie CO₂-emissiereductie	42
6.1 Doelstelling en bepalingswijze CO ₂ -emissiereductie	42
6.2 Resultaat CO ₂ -emissiereductie	42
7 Lessons learned	45
I Bijlage: bronnen	47

1 Inleiding

1.1 Verduurzaming warmtecentrale en opzet digital twin

Deze rapportage is een opbrengst van een demonstratieproject van WarmteStad en KWR Water Research Institute.

- In de projectperiode 2021-2026 werkte WarmteStad aan de verduurzaming van de warmtevoorziening in de stad Groningen. WarmteStad heeft de Warmtecentrale Zernike gebouwd en daarbij een multi-bronnenstrategie toegepast met zonthermie, datacenter-warmte en seizoensopslag. De doelstelling is om warmte te leveren uit duurzame bronnen, een reductie te realiseren van 15,7 kton CO₂-emissie in de eerste vijf jaar van de warmtecentrale, en overtollige restwarmte en zonthermie ondergronds op te slaan.
- Het project is door KWR Water Research Institute benut als 'living lab'. Parallel aan de bouw van de warmtecentrale is een digital twin opgesteld. Deze digital twin is een virtuele representatie van de warmtecentrale, die gebruikt kan worden voor ontwerpevaluatie, optimalisatie en toekomstverkenning. De toepassing van de digital twin heeft waardevolle inzichten en leerpunten opgeleverd voor WarmteStad en voor toekomstige, vergelijkbare systemen met een multi-bronnenstrategie.
- Dit demonstratieproject is mede gefinancierd met subsidie in het kader van de Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie (DEI+) regeling van het Ministerie van Economische Zaken.

1.2 Leeswijzer

Deze rapportage beschrijft zowel het functioneren van de warmtecentrale in de praktijk als de verwachte ontwikkeling van de verduurzaming in de komende jaren. De meetgegevens laten zien hoe de warmtecentrale in de praktijk functioneert. De scenarioberekeningen met de digital twin laten vervolgens zien hoe de verduurzaming zich naar verwachting kan ontwikkelen bij verdere groei van het warmtenet.

De rapportage is als volgt opgebouwd:

- **Warmtecentrale:** beschrijving van de ontwikkeling van de Warmtecentrale Zernike in de periode 2021-2026 en de multi-bronnenstrategie van WarmteStad.
- **Monitoring en analyse:** analyse van het functioneren van de warmtecentrale, op basis van meetgegevens. Hiervoor is een dataset samengesteld met meetgegevens uit de periode 2023-2026.
- **Digital twin:** omschrijving van de opzet en validatie van de digital twin. De validatie is uitgevoerd voor de jaren 2024 en 2025 en laat zien dat de digital twin de werking van de warmtecentrale goed kan simuleren.
- **Scenariostudie:** met de digital twin zijn verschillende scenario's doorgerekend. Hoeveel reductie van CO₂-emissie is gerealiseerd door de inzet van duurzame bronnen gedurende de projectperiode, en wat is de verwachte bijdrage van zonthermie, datacenter-warmte en seizoensopslag in toekomstige jaren?
- **Evaluatie CO₂-emissiereductie:** bepaling van de gerealiseerde CO₂-emissiereductie tot nu toe, en berekening op basis van de digital twin, of de beoogde CO₂-emissiereductie in de toekomstige jaren wordt gehaald.
- **Lessons learned:** overzicht van de belangrijkste inzichten uit de ontwikkeling en toepassing van de digital twin, en de leerpunten voor toekomstige, vergelijkbare systemen met een multi-bronnenstrategie.

Bij dit rapport hoort een webrapportage: <https://warmtestad.kwrwater.nl>

De webrapportage bevat een dashboard met interactieve grafieken van de meetgegevens van WarmteStad en de berekende scenario's met de digital twin. Via het dashboard kan worden geschakeld tussen verschillende visualisaties, en kunnen scenario's met elkaar worden vergeleken. De tijdreeksen met energiestromen kunnen worden ingezoomd naar uurwaarden of uitgezoomd tot een meerjarenoverzicht.

2 Warmtecentrale

2.1 Multi-bronnenstrategie van WarmteStad

WarmteStad ontwikkelt het warmtenet in de stad Groningen en breidt dit steeds verder uit. In de projectperiode 2021-2026 werd warmte geleverd aan een groeiend aantal klanten, van 3.000 tot 7.500 woningequivalenten. Dit aantal groeit naar verwachting tot ongeveer 11.500 woningequivalenten. Het aangelegde warmtenet is ontworpen voor een temperatuurniveau van ongeveer 75°C.

WarmteStad heeft als doel om op snelle en kosteneffectieve wijze verduurzaming van de warmtevoorziening te realiseren. Hiervoor wordt een multi-bronnenstrategie toegepast, waarbij gebruik wordt gemaakt van restwarmte uit datacenters van Eurofiber (voorheen Bytesnet) en QTS, en zonnewarmte van Zonthermiepark Dorkwerd.

De restwarmte uit de datacenters wordt met warmtepompen in de warmtecentrale tot een temperatuurniveau van 75°C gebracht. De benodigde elektriciteit voor de warmtepompen wordt opgewekt door warmtekrachtkoppeling (WKK), waarbij warmte en elektriciteit tegelijkertijd worden opgewekt. De warmteproductie van de WKK gaat naar het warmtenet.

In de zomer bestaat er een overschot aan warmte door de beschikbaarheid van zonnewarmte en restwarmte, terwijl in de winter de warmtevraag groter is dan het aanbod. Door warmte in de zomer op te slaan en in de winter te benutten, kan een groter aandeel duurzame energie worden bereikt. Een ondergrondse seizoensopslag, waarbij een combinatie wordt gemaakt van opslag op lage temperatuur (LT-seizoensopslag, 25 °C) en midden temperatuur (MT-seizoensopslag, 45°C), maakt deel uit van de multi-bronnenstrategie. De LT- en MT-seizoensopslagen liggen boven elkaar in de ondergrond, zodat warmteverlies uit de MT-seizoensopslag gedeeltelijk ten goede komt van de LT-seizoensopslag. De Warmtecentrale Zernike vormt de schakel tussen de duurzame warmtebronnen, de seizoensopslag en de levering aan het warmtenet.

2.2 Ontwikkeling van Warmtecentrale Zernike

In 2021 werd het warmtenet tijdelijk voorzien van warmte door gasketels in een tijdelijke warmtecentrale. Daarna is een nieuwe warmtecentrale ontwikkeld, waarin we drie fases onderscheiden.

Fase 1: Ingebruikname en functioneel inregelen

De nieuwe Warmtecentrale Zernike is in oktober 2022 technisch in bedrijf genomen en is op 1 november 2022 officieel geopend. Vanaf dat moment is restwarmte van datacenter QTS als duurzame bron ingezet. In de Warmtecentrale Zernike staan warmtepompen, WKK's, gasketels en een dagbuffer. In de loop van 2023 zijn de inzet, aansturing en monitoring van deze installaties steeds verder 'functioneel' ingeregeld tot een stabiele bedrijfsvoering. Functioneel inregelen is het proces van testen van de installatie als geheel en het bijstellen van de regeling, zodat de werking in de praktijk overeenkomt met het beoogde functioneren van de installatie.

Fase 2: Uitbreiding bronnen

In de periode 2023-2024 is het Zonthermiepark Dorkwerd gebouwd en aangesloten op de warmtecentrale. WarmteStad heeft in de zomer van 2024 de eerste warmte van het zonthermiepark ontvangen en geleverd aan het warmtenet.

In de zomer van 2024 zijn ook de LT- en de MT-seizoensopslag in bedrijf genomen. Ondanks dat de bronnen vanaf dat moment klaar waren voor gebruik, is in deze zomer nog geen warmte in de seizoensopslag geladen. Alle zonthermie kon namelijk als warmtelevering aan het warmtenet worden benut.

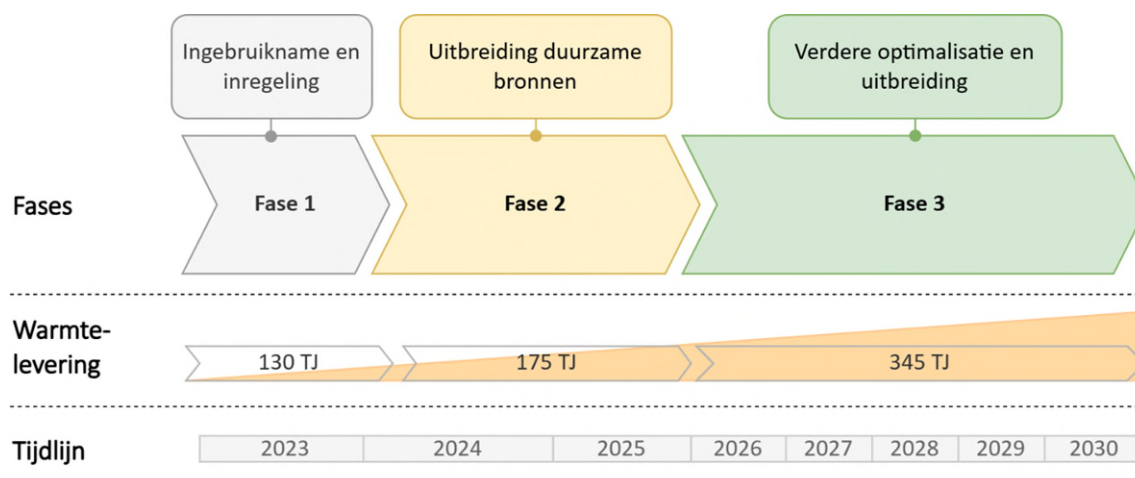
Vanaf medio 2025 draaide het zonthermiepark op volle capaciteit en is voor de eerste keer warmte uit het zonthermiepark gebruikt om de seizoensopslag te vullen. In het daaropvolgende winterseizoen (eind 2025 – begin 2026), kon voor het eerst warmte uit de seizoensopslag worden benut voor de warmtelevering. In deze periode is ook de koppeling met restwarmte van datacenter Eurofiber voorbereid.

Fase 3: Verdere optimalisatie en uitbreiding

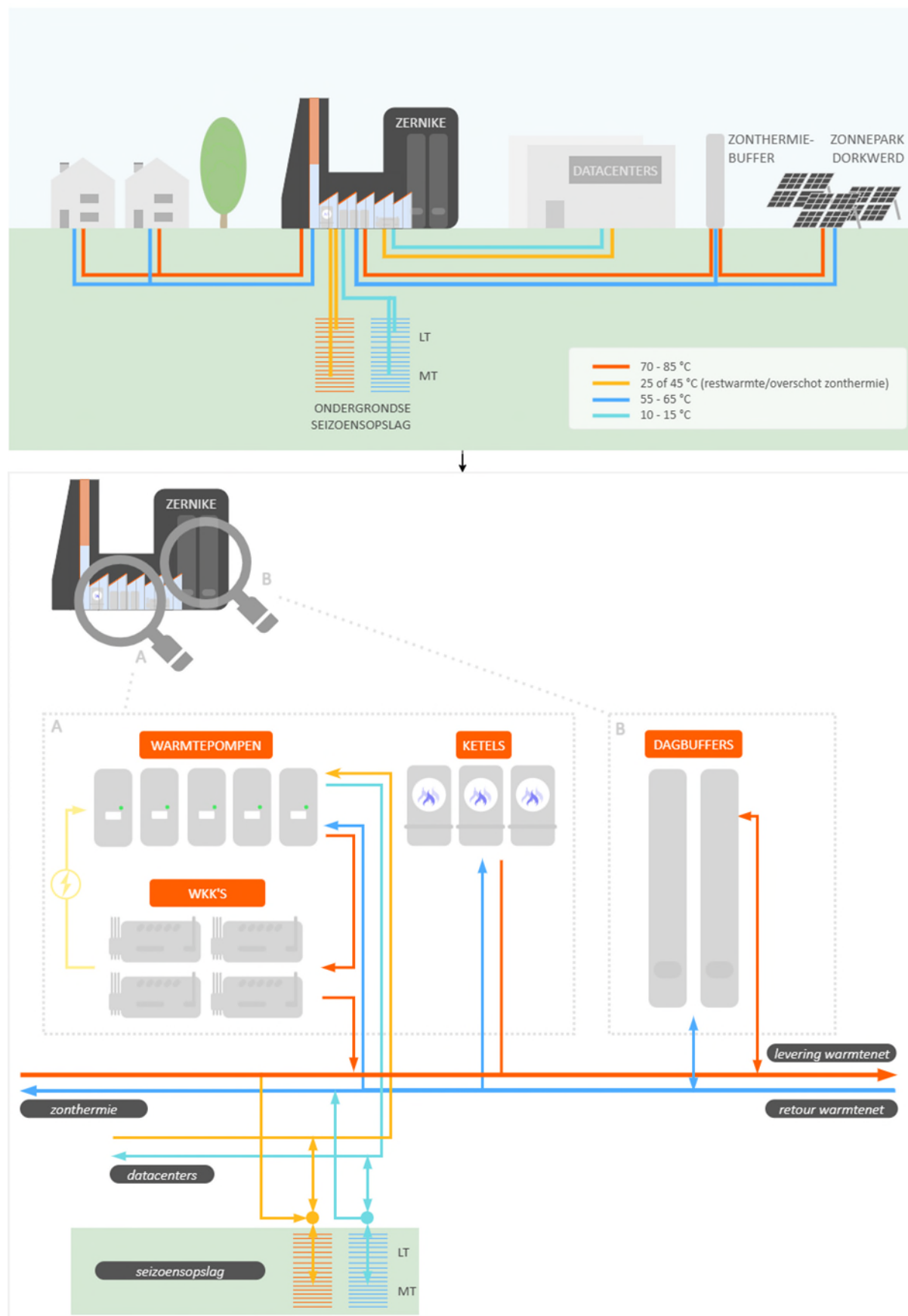
Na 2026 wordt een verdere groei van de warmtevraag voorzien. Het aandeel duurzame bronnen in de warmtelevering van WarmteStad zal naar verwachting verder stijgen door de start van restwarmtelevering van datacenter Eurofiber en door verdere benutting van de seizoensopslag. Eurofiber zal in de periode tot 2030 steeds verder worden uitgebreid, waardoor de beschikbare restwarmte verder doorgroeit tot 2030.

De ontwikkeling van de warmtecentrale is in Figuur 1 schematisch weergegeven. De hoofdonderdelen van de warmtecentrale en hun onderlinge samenhang staan in Figuur 2.

Figuur 1: Ontwikkeling van de Warmtecentrale Zernike in de periode 2023-2030



Figuur 2: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van de warmtecentrale met ontwerpcapaciteit



2.3 Warmtelevering en opgesteld vermogen

Warmtelevering

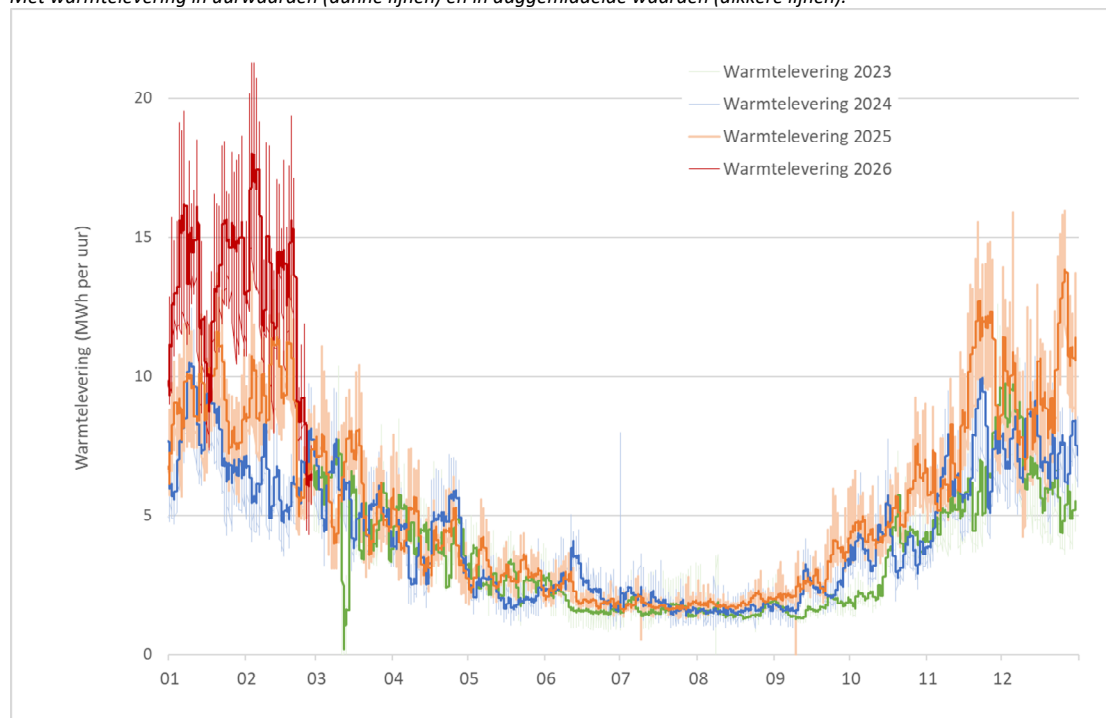
In de periode 2023-2025 groeide de warmtelevering vanuit de warmtecentrale van 130 naar 175 TJ. Naar verwachting neemt dit de komende jaren verder toe naar een niveau van 345 TJ in 2028-2030.

In Figuur 3 is de warmtelevering vanuit de warmtecentrale voor de periode 2023 tot en met februari 2026 weergegeven. In de grafiek staat de warmtelevering in uurwaarden opgenomen, waaruit de vermogensvraag kan worden afgeleid. De daggemiddelde waarden volgen hetzelfde seizoenspatroon, maar met afgevlakte piekwaarden.

Kenmerkend voor het leveringspatroon in de periode januari 2023 t/m februari 2026 zijn:

- Groei in pieklevering: van 13 MW in 2023 naar 22 MW in 2026
- Groei in hoogste daggemiddelde waarde: van 10 MW in 2023 naar 18 MW in 2026
- In de zomer ligt het daggemiddelde rond 1,5 MW.

Figuur 3: Warmtelevering door de warmtecentrale in de periode 2023 t/m februari 2026. Met warmtelevering in uurwaarden (dunne lijnen) en in daggemiddelde waarden (dikkere lijnen).



Opgesteld vermogen

In de eerste jaren lag de nadruk op leveringszekerheid. De jaren daarna is vanuit deze basis gewerkt aan het toevoegen van assets, gericht op een groeiend aandeel restwarmte en hernieuwbare energie.

De opgestelde vermogens van de assets in de warmtecentrale zijn opgenomen in Tabel 2.1. Ter illustratie zijn ook het aantal aansluitingen van het warmtenet en de warmtelevering in de tabel opgenomen.

Tabel 2-1: Kenmerken warmtelevering, opgesteld vermogen van assets en buffers in de warmtecentrale in de jaren 2023-2026, en beoogde uitbreiding voor de jaren 2027-2030.

		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Algemeen									
Aantal woningequivalenten	weq	4.300	4.700	5.800	7.700	11.200	11.500	11.500	11.500
Warmtelevering warmtecentrale	TJ	130	141	176	232	337	345	345	345
Productie assets									
Gasketels*	MW _{th}	12,0	12,0	18,0	18,0	24,0	24,0	24,0	24,0
WKK	MW _{th}	1,9	1,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Restwarmte	MW _{th}	1,5	1,5	1,8	2,3	3,2	6,2	6,6	9,1
Warmtepompen	MW _e	1,0	1,0	1,5	2,0	3,5	3,5	4,5	4,5
Zonthermie **	MW _{th}	-	12,4	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Totaal vermogen productie assets **	MW_{th}	16,4	16,4	24,1	25,1	33,5	36,5	37,9	40,4
Buffer inhoud									
Dagbuffer	TJ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Buffer zonthermie Dorkwerd	TJ	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Seizoensopslag LT	TJ/seiz	-	-	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Seizoensopslag MT	TJ/seiz			13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8

* WarmteStad overweegt om in 2027 een bio-olie ketel te installeren, in plaats van een vierde gasketel.

** Het vermogen van zonthermie is variabel, daarom is deze niet meegeteld in het totaal vermogen van de productie assets.

2.4 Regeling en inzetstrategie

Regeling dagbuffer

WarmteStad hanteert de volgende regeling voor de dagbuffer van de warmtecentrale:

- Fluctuaties gedurende de dag in de warmtevraag worden opgevangen door de dagbuffer.
- De setpoints voor de productie-assets worden ingesteld op de gemiddeld verwachte warmtevraag in de komende 24 uur. Deze setpoints worden elk uur geactualiseerd.

Inzetstrategie zomerperiode

In de zomerperiode geldt de volgende voorkeursvolgorde voor inzet van assets:

1. Zonthermie, bij overschot naar MT-seizoensopslag
2. Restwarmte uit datacenters met inzet warmtepompen, bij overschot naar LT-seizoensopslag
3. WKK (warmtekrachtkoppeling)
4. Gasketels

Inzetstrategie winterperiode

In de winterperiode geldt de volgende voorkeursvolgorde voor inzet van assets:

1. Zonthermie
2. Combinatie van:
 - Restwarmte met inzet warmtepompen
 - Warmte uit MT-seizoensopslag met inzet warmtepompen
 - Warmte uit LT-seizoensopslag met inzet warmtepompen
3. WKK
4. Gasketels

Inzet van restwarmte en warmte uit seizoensopslag

De voorkeursvolgorde van restwarmte en inzet van warmte uit de MT- en LT-seizoensopslag is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid van restwarmte en de hoeveelheid beschikbare warmte in de seizoensopslag. Ook speelt de langjarige energiebalans in de bodem een rol, hieraan zijn voorwaarden gesteld in de vergunning van de seizoensopslag. WarmteStad is nog bezig met het functioneel inregelen van dit onderdeel van de inzetstrategie.

Regeling WKK

WarmteStad kan de WKK's op drie manieren aansturen:

- Elektriciteit-aansturing: inzet van de WKK wordt afgestemd op de elektriciteitsbehoefte van de warmtepompen. Daaruit volgt de warmteproductie van de WKK. De resterende warmtebehoefte wordt ingevuld door gasketels. Met deze regeling heeft de warmtecentrale in principe geen elektriciteit vanuit het elektriciteitsnet nodig.
- Warmtevraag-aansturing: de WKK's worden ingesteld op maximale invulling van de warmtebehoefte. De geproduceerde elektriciteit wordt benut door de warmtepompen en het overschot wordt terug geleverd aan het elektriciteitsnet.
- Vollaststuring: de WKK's draaien op vollast, gericht op maximale terug levering van elektriciteit aan het elektriciteitsnet. Bij deze regelstrategie zet WarmteStad de WKK's prioritair in ten opzichte van de warmtepompen, door middel van een aanpassing aan de voorkeursvolgorde.

De elektriciteit-aansturing is de basisregeling. In (winter-)perioden waarin terug levering van elektriciteit gunstig is, kan WarmteStad de WKK inzetten met vollaststuring of warmtevraag-aansturing.

3 Monitoring en analyse

3.1 Dataset

Voor deze rapportage zijn de meetgegevens gebruikt over de periode van 2023 tot en met februari 2026. De dataset omvat meer dan 80 parameters, hoofdzakelijk debieten, temperaturen en energiestromen op verschillende meetpunten, waarvoor elk uur waarden zijn geregistreerd. Deze dataset vormt een selectie van alle beschikbare meetpunten in de Warmtecentrale Zernike.

2023: maandwaarden

WarmteStad monitort de warmtelevering en de inzet van de hoofdcomponenten sinds de technische inbedrijfstelling van de Warmtecentrale Zernike in oktober 2022. De warmtecentrale werd in de eerste maanden na inbedrijfstelling steeds verder ‘functioneel’ ingeregeld, door het testen van de installatie en het bijstellen van de regeling. Tijdens het inregelen werden ook steeds meer onderliggende meetpunten toegevoegd aan de monitoring, waardoor het functioneren van assets verder kon worden geëvalueerd. De gemeten uurwaarden van 2023 zijn niet getoond in deze rapportage, deze data van 2023 zijn immers niet representatief omdat tijdens dat jaar de werking van de assets nog veelvuldig werd getest en ingeregeld. De geaggregeerde maandwaarden van 2023 zijn wel gepresenteerd. Daarnaast zijn delen van de meetgegevens uit 2023 gebruikt voor een eerste analyse van het functioneren van individuele assets en als controle op de compleetheid van de monitoring.

2024 t/m februari 2026: uurwaarden

Vanaf 2024 worden de gemeten uurwaarden als representatief gezien voor een stabiel functionerende warmtecentrale met warmtepompen, WKK en gasketels. Na ingebruikname van de zonthermie in 2024 en de seizoensopslag in 2025 kwamen ook voor deze componenten monitoringsdata beschikbaar. Net als bij de eerdere assets zijn deze componenten in de eerste maanden na inbedrijfsstelling functioneel ingeregeld. De zomer van 2025 was het eerste seizoen, waarin zonthermie werd opgeslagen in de seizoensopslag. In de winterperiode van december 2025 tot en met februari 2026 is warmte uit de seizoensopslag voor het eerst benut. De monitoringsgegevens tot en met februari 2026 bevatten daarmee één cyclus van warmte laden en ontladen in de seizoensopslag. In deze periode waren alle bronnen binnen de multi-bronnenstrategie operationeel, waardoor het functioneren van de assets in samenhang kan worden geëvalueerd.

Datavalidatie

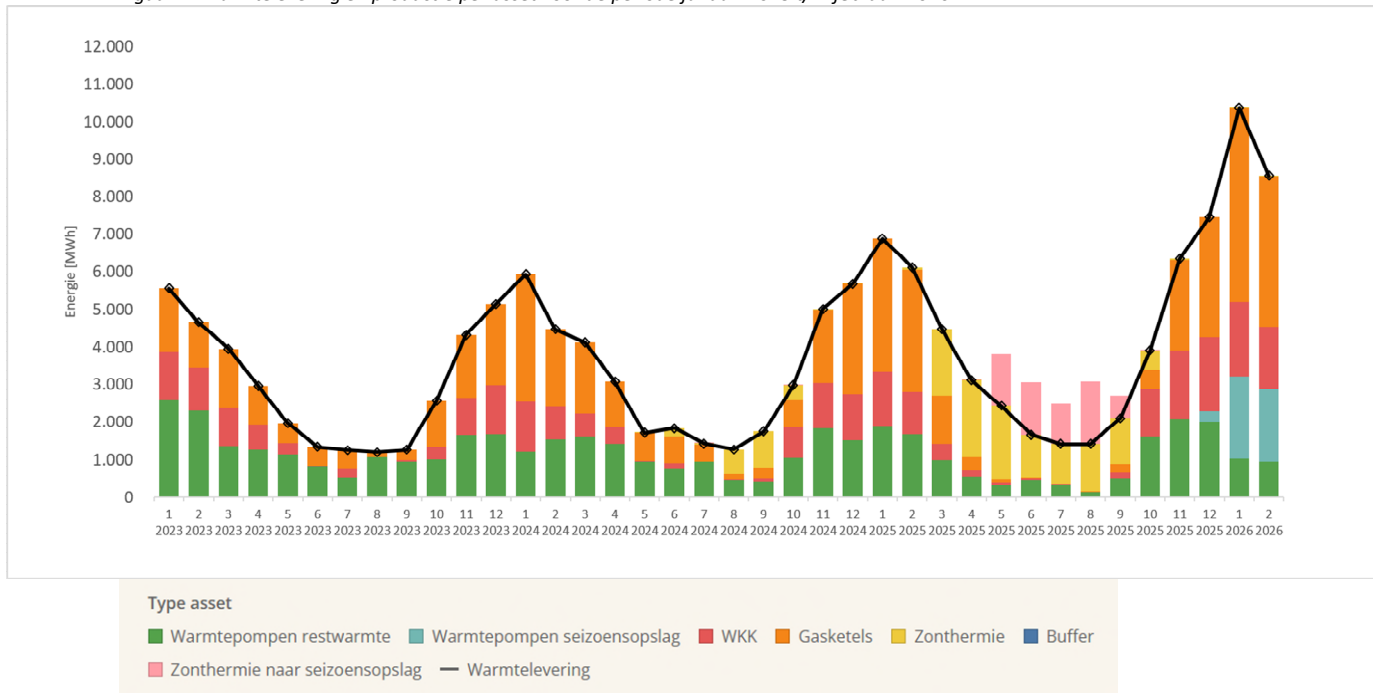
Bij operationele monitoring over een langere periode is het gebruikelijk dat meetreeksen nooit geheel volledig zijn. Datapunten (uurwaarden) kunnen ontbreken vanwege onderhoud of storingen. In een datavalidatie-stap zijn eventuele onregelmatigheden in de tijdreeksen waar nodig aangevuld of gecorrigeerd, zodat een consistente dataset is verkregen voor analyse.

3.2 Warmteproductie per asset

Overzicht warmteproductie per asset

Onderstaand figuur geeft een overzicht van de (geaggregeerde) maandwaarden van de warmteproductie per asset voor de periode januari 2023 tot en met februari 2026.

Figuur 4: Warmtelevering en productie per asset voor de periode januari 2023 t/m februari 2026.



Inzicht in functioneren van assets

Het functioneren van assets in de warmtecentrale wordt verder inzichtelijk gemaakt in Figuur 5, met uurwaarden-grafieken van de warmteproductie per asset voor een aantal kenmerkende perioden.

- In een warme, zonnige periode in de **zomer van 2024** wordt overdag warmte geproduceerd door het zonthermieveld. De warmte wordt gebufferd in de zonthermiebuffer van Dorkwerd. De warmteproductie van de warmtecentrale bestaat in deze periode vrijwel volledig uit zonthermie levering vanuit Dorkwerd (100% hernieuwbare warmte). De dagbuffer van de warmtecentrale wordt beperkt ingezet om dag-nacht fluctuaties op te vangen.
- In een koude periode in de **winter van 2024/2025** wordt warmte geproduceerd door de warmtepompen (op basis van datacenter-restwarmte), aangevuld met WKK en gasketels voor de pieklevering. Fluctuaties op dagbasis worden afgevlakt door inzet van de dagbuffer.
- In een zonnige periode in de **zomer van 2025** is de capaciteit van het zonthermieveld uitgebreid ten opzichte van de zomer van 2024. De warmteproductie van de warmtecentrale wordt volledig ingevuld door zonthermie. Het overschot aan zonthermie wordt in de MT-seizoensopslag opgeslagen.
- In een koude periode in de **winter van 2026** is de warmtevraag aanzienlijk hoger in vergelijking met de voorgaande winter. De warmtecentrale functioneert vergelijkbaar met vorige winter, met als belangrijk verschil de inzet van een extra warmtepomp die de warmte uit de MT-seizoensopslag benut.

Figuur 5: Warmtelevering door de warmtecentrale en warmteproductie per asset (uurwaarden) voor enkele kenmerkende perioden.



Type asset

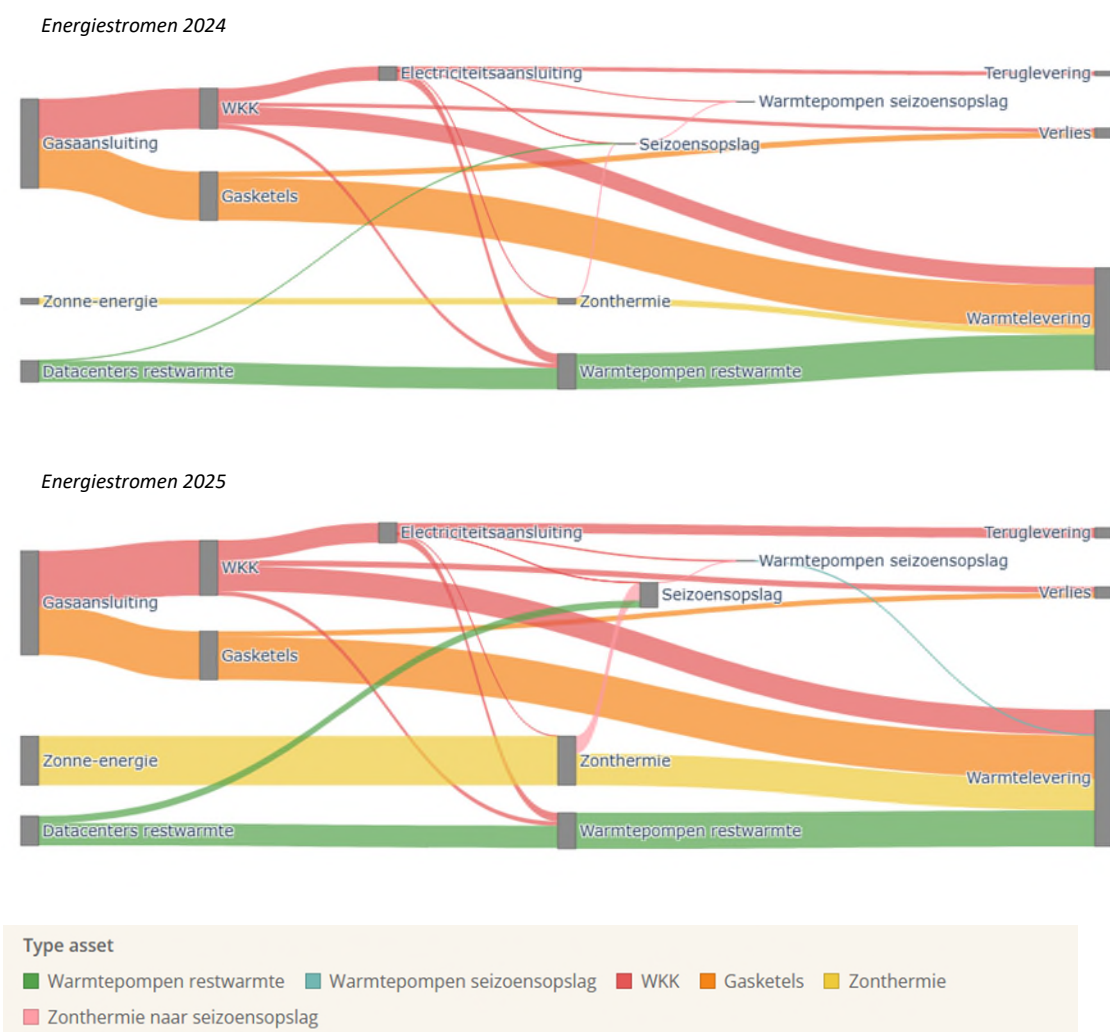
■ Wärmepompen restwarmte
 ■ Wärmepompen seizoensopslag
 ■ WKK
 ■ Gasketels
 ■ Zonthermie
 ■ Buffer
 — Warmtelevering

3.3 Analyse energiestromen warmtecentrale

In Figuur 6 zijn de energiestromen van de warmtecentrale weergegeven. De warmtebronnen, ingekochte energie, warmteopslag en warmteproductie per asset is op jaarbasis voor de jaren 2024 en 2025 in een Sankey-diagram gevisualiseerd.

- In 2024 werd 141 TJ warmte geleverd, voornamelijk door gasketels, WKK en restwarmte en een klein deel zonthermie. In 2024 is het zonthermieveld opgestart en ingeregeld. De LT-seizoensopslag werd (beperkt) gevuld met datacenter restwarmte, er is geen zonthermie opgeslagen in de MT-seizoensopslag.
- In 2025 werd 176 TJ warmte geleverd. We kunnen zien dat in 2025 het zonthermieveld relatief meer warmte heeft geleverd. Waar het in 2024 nog ging om het testen en opstarten, was het zonthermieveld in 2025 volledig in gebruik (hoewel de levering nog niet de specificatie haalt). Bovendien kunnen we zien dat in 2025 de opslag van zonthermie in de MT-seizoensopslag is opgestart, en is de eerste warmtelevering vanuit de MT-seizoensopslag zichtbaar. We zien dat het relatief grotere aandeel zonnewarmte leidt tot een relatief kleiner aandeel in de warmtelevering voor de gasketels. Tot slot zien we dat er in 2025 meer elektriciteit is teruggeleverd aan het net. De aanleiding is dat er meer werd geëxperimenteerd met alternatieve aansturingstrategieën voor de WKK's (zie paragraaf 2.4). In zijn totaliteit kunnen we zien dat de warmtelevering door de warmtecentrale in 2025 duurzamer is geworden in vergelijking met 2024.

Figuur 6: Energiestromen van de warmtecentrale voor de jaren 2024 (boven) en 2025 (onder).



3.4 Aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte

In Figuur 7 is het aandeel hernieuwbaar (zonthermie), restwarmte (datacenters) en WKK-warmte voor de jaren 2023-2025 weergegeven. Het aandeel is berekend ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen voor de warmtecentrale, bestaande uit restwarmte, zonthermie, gas- en elektriciteit.

Seizoensopslag in de bepalingmethode

De inzet van warmte uit de MTO wordt meegerekend als hernieuwbaar, aangezien deze warmte oorspronkelijk afkomstig is van zonthermie. De zonthermie warmte die in de zomer van 2025 is opgeslagen in de MTO, draagt slechts beperkt bij aan het aandeel hernieuwbaar in 2025; het grootste deel wordt pas in 2026 benut bij het ontladen van de MTO. De geladen warmte in de LTO, afkomstig uit datacenter restwarmte, heeft nog niet bijgedragen aan het aandeel restwarmte in de duurzaamheidsrapportages, aangezien deze warmte nog niet is benut.

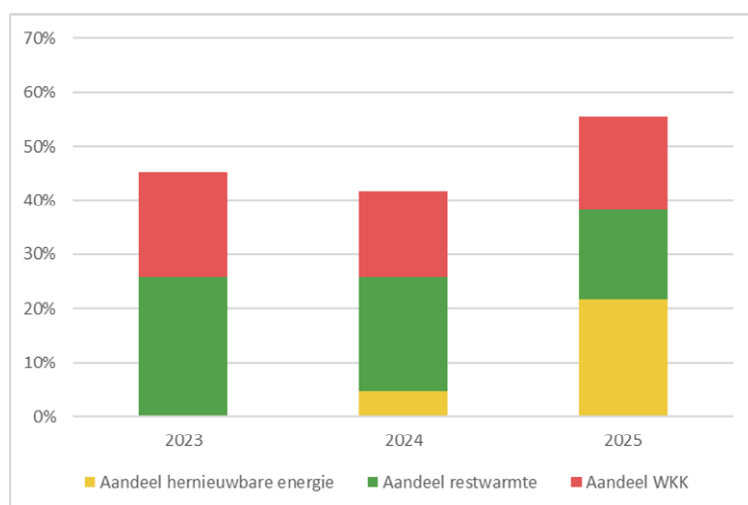
Beoordeling 'efficiënte stadsverwarming'

In de Energie Efficiëntie Richtlijn (EED) (EC, 2012) zijn de criteria opgenomen voor “efficiënte stadsverwarming en -koeling”, met als achterliggend doel het minimaliseren van de milieu-impact van de geleverde warmte. Daarin is opgenomen: “Efficiënte stadsverwarming en -koeling” is een systeem voor stadsverwarming of -koeling dat ten minste 50% hernieuwbare energie, of 50% restwarmte, of 75% warmte uit warmtekrachtkoppeling of 50% uit een combinatie van dergelijke energie en warmte gebruikt. Er is pas sprake van een combinatie als er een significant aandeel van hernieuwbare warmte of restwarmte is. Hiervoor geldt dat het aandeel restwarmte en hernieuwbare warmte tenminste 10% is van het totaal van de door die combinatie geleverde warmte.

De warmtelevering door de warmtecentrale voldoet aan de eis dat minstens 10% geleverd moet worden uit restwarmte en hernieuwbaar. Zodoende mag de WKK-warmte meegeteld worden wanneer wordt beoordeeld of de warmtecentrale voldoet aan de vereisten voor ‘efficiënte stadsverwarming’.

In 2025 voldeed de warmtecentrale aan de eisen voor ‘efficiënte stadsverwarming’: de combinatie van hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte kwam boven 50%.

Figuur 7: Aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen van de warmtecentrale voor de jaren 2023-2025.



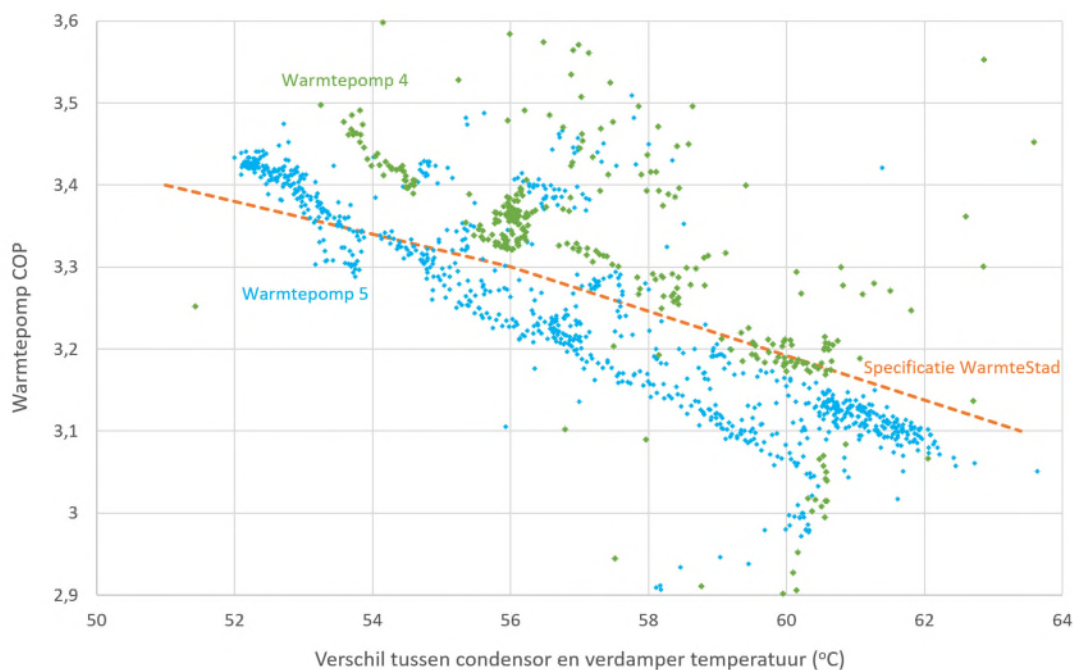
3.5 Functioneren assets in de warmtecentrale

Op basis van de meetdata en de specificaties van de assets van WarmteStad zijn de prestaties van de assets in de warmtecentrale geanalyseerd. Deze analyse heeft als doel om het daadwerkelijke functioneren van de warmtecentrale vast te stellen.

Warmtepompen

De gemeten prestaties van de warmtepompen 4 en 5 van de Warmtecentrale Zernike zijn weergegeven in Figuur 8, samen met de specificaties voor de warmtepompen. De prestaties van warmtepompen 4 (in groen) en 5 (in blauw) individueel zijn goed te vergelijken met de specificaties. Deze groene en blauwe datapunten zijn geselecteerd op de momenten dat de andere warmtepomp uit stond. De afhankelijkheid van de COP van het temperatuurverschil tussen condensor (leveringstemperatuur van de warmtepomp) en verdamper (temperatuur restwarmte) is sterker dan de afhankelijkheid die de specificaties laten zien, maar de algehele trend klopt. Zodoende hebben we ervoor gekozen om het functioneren van de warmtepompen in de digitale tweeling te baseren op de ontwerpspecificaties.

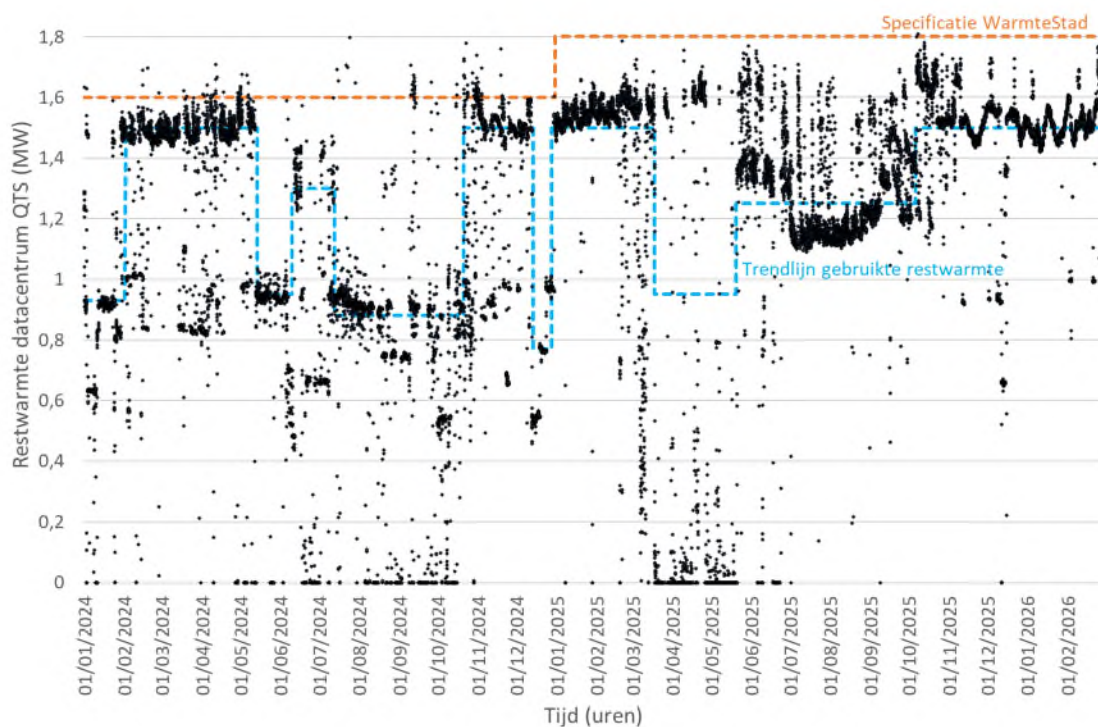
Figuur 8. Meetdata en specificaties van de warmtepompen in de Warmtecentrale Zernike, als functie van het temperatuurverschil tussen de geleverde restwarmte door het datacentrum (verdampers) en de geleverde warmte door de warmtepompen (condensor). De meetdata zijn afkomstig uit de periode van augustus 2023 tot en met maart 2024.



Restwarmte datacentrum QTS

De restwarmte die het datacentrum QTS beschikbaar stelt aan de warmtecentrale Zernike wordt benut als warmtebron voor de warmtepompen. Het gedrag van de restwarmte in de tijd is weergegeven in Figuur 9. De beschikbare restwarmte in 2024 en 2025 is respectievelijk 1,6 en 1,8 MW_{th} volgens de specificaties van WarmteStad. We observeren dat de gemeten restwarmte afgenomen van QTS door WarmteStad structureel lager is dan de specificaties. In warme periodes is dat begrijpelijk door de verminderde warmtevraag. Bij kouder weer zijn er echter ook periodes dat de afname lager is dan de specificatie. We vermoeden dat de oorzaak hiervoor ligt in tijdelijke verminderde beschikbaarheid van de warmtepompen, of (informatie over) de restwarmte. Zodoende kiezen we ervoor om de beschikbare restwarmte in de digitale tweeling te laten afwijken van de specificaties. In plaats daarvan gebruiken we de trendlijn die de afgenomen restwarmte benadert (zie blauwe lijn in de onderstaande grafiek).

Figuur 9. Specificaties van de beschikbare restwarmte van datacentrum QTS (oranje), en meetdata (zwart) en een trendlijn (blauw) voor de afgenomen restwarmte. De data is afkomstig uit de periode van januari 2024 tot en met februari 2026.

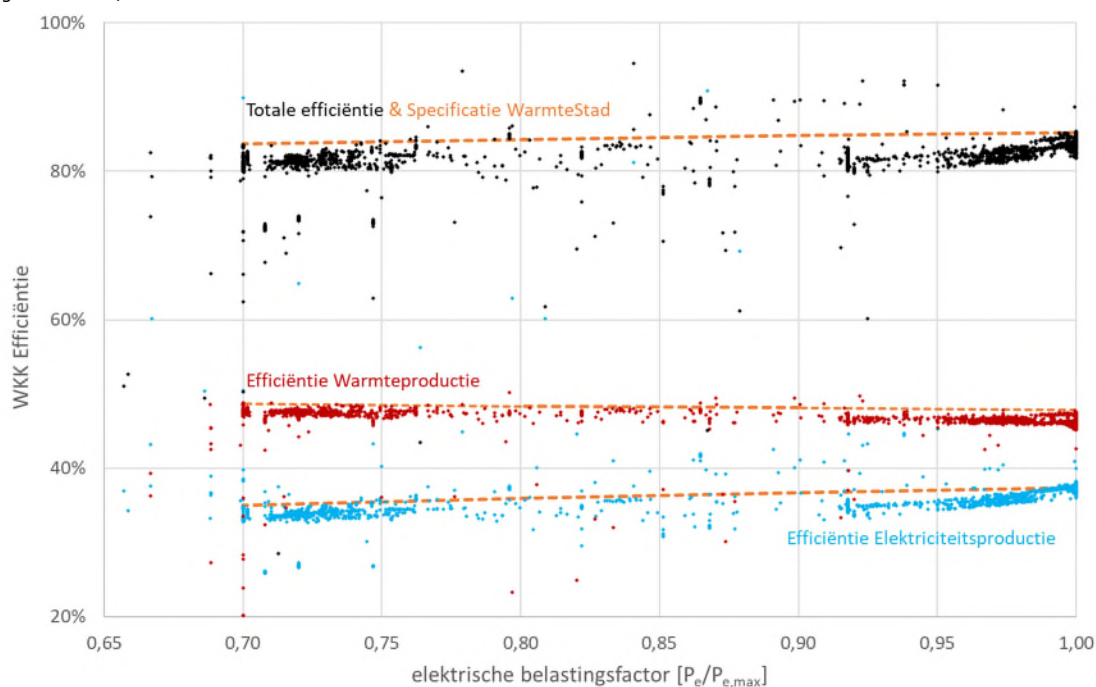


Warmtekrachtkoppeling (WKK)

De ontwerpspecificaties en de meetdata van de efficiëntie van WKK1 is weergegeven in Figuur 10. De prestaties van WKK 2 zijn vergelijkbaar en zijn in het kader van de leesbaarheid van de grafiek niet weergegeven. De efficiënties (t.o.v. de bovenwaarde van Gronings aardgas) zijn weergegeven als functie van de elektrische belastingsfactor, die laat zien op welke fractie van vollast de installatie tijdens elk meetpunt draait. De belastingsfactor van de WKK's is minimaal 0,7, een lagere belasting instellen is niet mogelijk voor deze asset. De totale efficiëntie van de WKK neemt volgens de ontwerpspecificaties licht toe bij een hogere belastingsfactor (richtingscoëfficiënt 0,050).

De meetdata van de totale efficiëntie liggen 4 tot 5 procentpunt lager dan de specificatie. Voor wat betreft de afhankelijkheid van de belastingsfactor laten de meetdata wel dezelfde richtingscoëfficiënt zien als de specificaties. De efficiënties voor de productie van warmte en elektriciteit afzonderlijk, laten eenzelfde beeld zien: lagere gemeten efficiënties, maar overeenkomstige afhankelijkheid van de belastingsfactor in vergelijking met de specificaties. Zodoende hebben we ervoor gekozen om in de digitale tweeling uit te gaan van de ontwerpspecificaties, waarbij we een aanvullende constante afwijking van de specificatie hebben geïntroduceerd die de afwijking tussen de meetdata en de specificaties weergeeft.

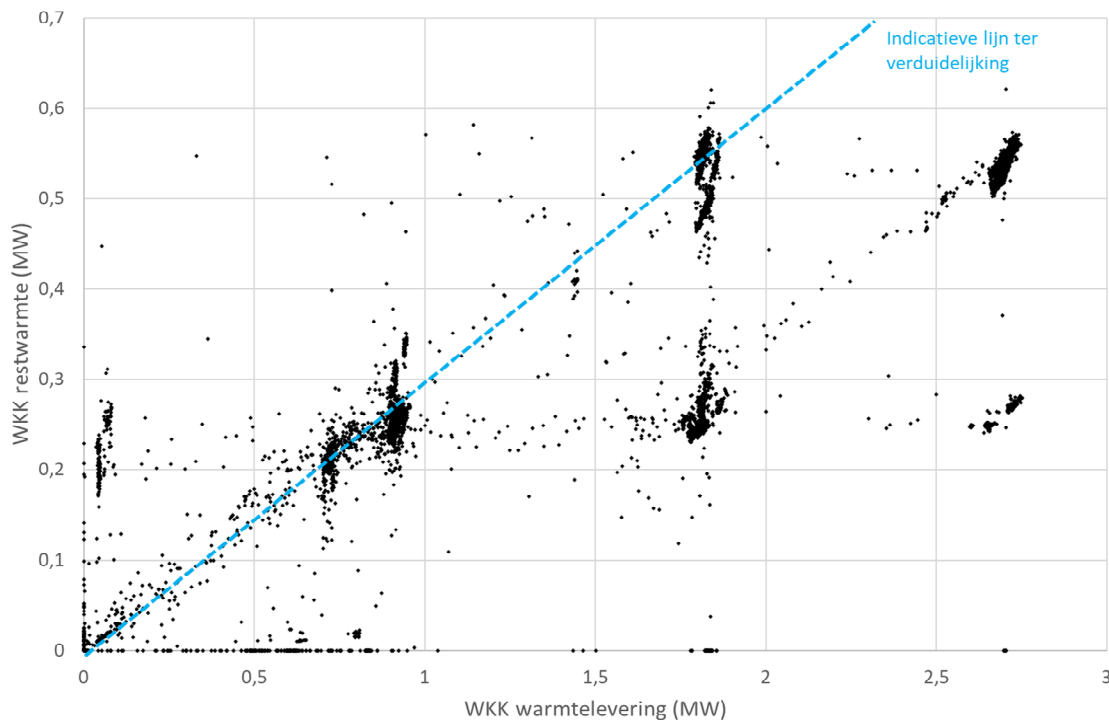
Figuur 10. Meetdata en ontwerpspecificaties van de efficiëntie van WKK 1 in de Warmtecentrale Zernike, als functie van de genormaliseerde inzet. In zwart is de totale gemeten efficiëntie weergegeven, in rood de warmte-efficiëntie en in blauw de efficiëntie voor elektriciteitsproductie. De meetdata is afkomstig uit de periode van maart 2023 tot en met maart 2024. De belastingsfactor van de WKK's kan niet lager worden ingesteld dan 0,7.



Restwarmte van de WKK's

De WKK's leveren niet alleen elektriciteit en warmte op leveringstemperatuur (tot 90°C), maar ook restwarmte op lagere temperatuur (afkomstig van de 2^e trap mengselkoeler van de WKK's). Deze vrijkomende restwarmte is qua temperatuurniveau geschikt voor inzet als warmtebron voor de warmtepompen. WarmteStad benut de restwarmte van de WKK's daarom als extra warmtebron, in aanvulling op de datacenter warmte. De geleverde restwarmte als functie van de geleverde warmte is weergegeven in Figuur 11, waaruit we kunnen opmaken dat er ongeveer 300 kW restwarmte kan worden geleverd per MW geleverde warmte. Dit is meegenomen in de digital twin.

Figuur 11. Meetdata van de geleverde restwarmte van de WKK's als functie van de geleverde warmte. In blauw is een indicatieve lijn ter verduidelijking aangegeven (let op, dit is geen wiskundige fit), waaruit we kunnen opmaken dat de geleverde restwarmte ongeveer 0,3 MW bedraagt per 1.0 MW geleverde warmte. De meetdata is afkomstig uit de periode van april 2024 tot en met februari 2026.

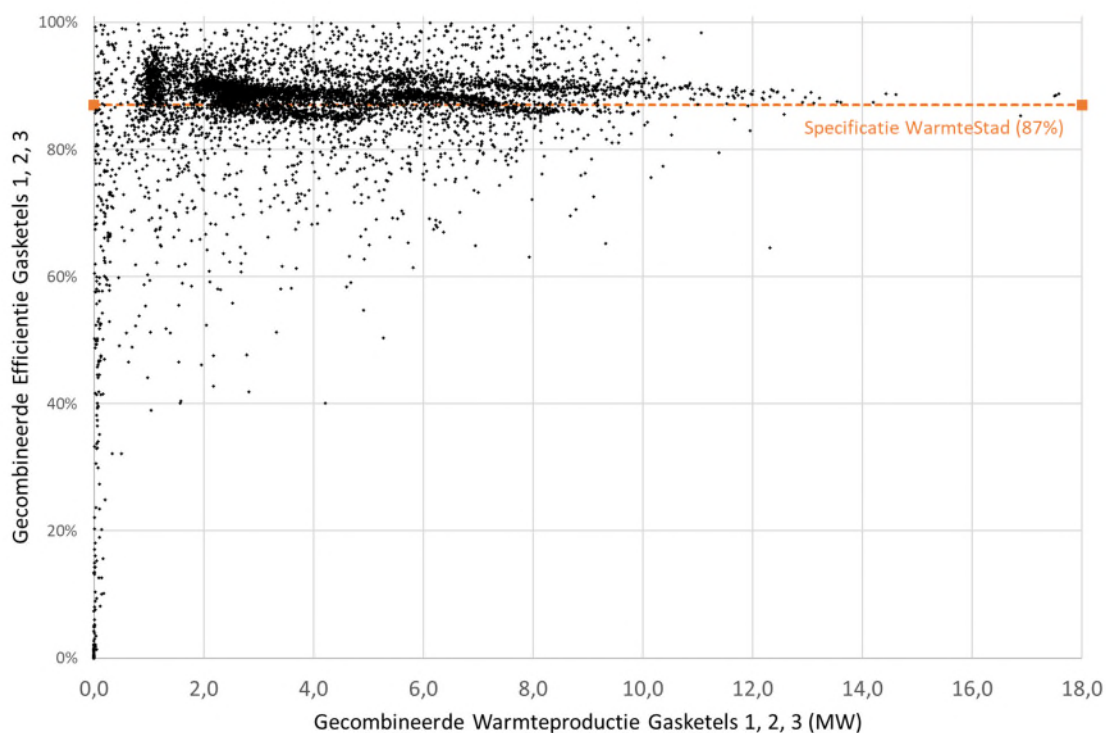


Gasketels

De warmtecentrale beschikt over een drietal gasketels die dienen als piekvermogen om de koudste dagen te kunnen overbruggen. De gasketels zijn gefaseerd in gebruik genomen, met een totaal uiteindelijk thermisch vermogen van 18 MW_{th}. De efficiëntie van de drie gasketels samen (t.o.v. de bovenwaarde van Gronings aardgas, het betreft condenserende gasketels) is voor de periode van januari 2024 tot en met februari 2026 weergegeven in Figuur 12, als functie van hun gezamenlijke warmteproductie. We observeren dat de gasketels meestentijds functioneren met een efficiëntie die hoger is dan de 87% die in de specificaties is opgenomen.

In de grafiek zien we enkele trends in de puntenwolk, met een afnemende efficiëntie als functie van de belasting. De verschillende verdichtingen in de puntenwolk betreffen vermoedelijk de individuele ketels die in hun prestaties lichtelijk van elkaar afwijken. Tegelijkertijd hebben we ook onderzocht of de efficiëntie van de gasketels nog een afhankelijkheid vertoont van de ingestelde temperatuur. Bij condenserende ketels (of HR-ketels) kun je immers verwachten dat de efficiëntie voor hogere temperaturen afneemt, omdat er minder warmte kan worden teruggewonnen uit de rookgassen. Dit wordt echter niet geobserveerd in de data.

Figuur 12. Gecombineerde efficiëntie van de drie gasketels in gebruik in Warmtecentrale Zernike, op basis van meetdata afkomstig uit de periode van januari 2024 tot en met februari 2026. Om de efficiëntie uit te rekenen is gebruik gemaakt van de calorische bovenwaarde van aardgas. De efficiëntie is weergegeven als functie van de gecombineerde warmteproductie van de drie gasketels, die gezamenlijk een thermisch vermogen van 18 MW_{th} kunnen produceren. De data zijn afkomstig uit de periode van januari 2024 tot en met februari 2026.

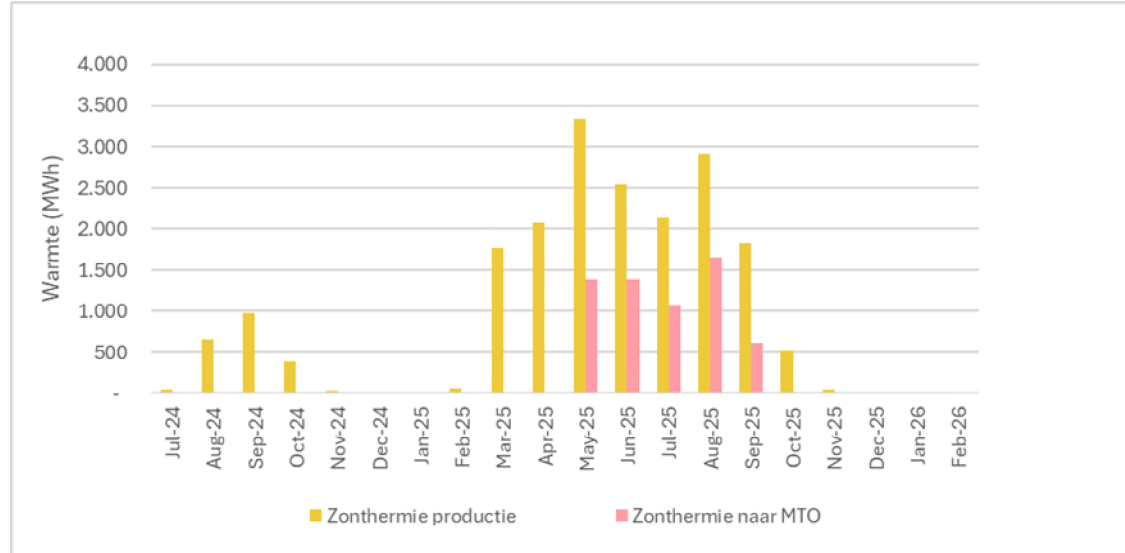


3.6 Functioneren zonthermie en seizoensopslag

Zonthermie

In Figuur 13 zijn de maandwaarden weergegeven van de warmte die door het zonthermieveld aan WarmteStad is geleverd. Vanaf mei 2025 is een deel van de zonthermie warmte gebruikt voor het laden van de MTO.

Figuur 13: Zonthermie warmte in de periode juli 2024 t/m februari 2026, inclusief het aandeel zonthermie dat wordt geladen in de MTO.



Seizoensopslag

De seizoensopslag heeft in de zomer van 2025 en winter van 2025/2026 zijn eerste laad- en ontlaadcycli doorlopen. De ontwerpgegevens van de MTO en LTO zijn in Tabel 3-1 opgenomen en vergeleken met de realisatie in de eerste laad- en ontlaadcycli. Figuur 14 geeft een beeld van de gerealiseerde laadcycli van de seizoensopslag in de periode 2024 t/m februari 2026.

Uit de gegevens blijkt dat in de zomer van 2025 de LTO en MTO warmte hebben geladen. De geladen warmte in de LTO bedraagt ongeveer de helft van de ontwerpwaarde en in de MTO is ongeveer 80% van de beoogde seizoensopslag aan warmte geladen. De ontwerpgegevens voor debiet en temperatuur volgen de ontwerpgegevens voor warmte laden en de vergunde waterhoeveelheden per seizoen zijn niet overschreden.

In de winter van 2025/2026 is de LTO niet ontladen. Vanuit de MTO is de ontladen warmte iets minder dan de helft van de ontwerpwaarde. Het maximaal debiet waarop de MTO wordt ingezet voor ontladen bedraagt de helft van de ontwerpwaarde. De verplaatste waterhoeveelheden zijn in de winter aanzienlijk lager dan ontwerp. De onttrekkingstemperatuur uit de warme bron van de MTO daalde tot ongeveer 30°C eind februari en bleef daarmee boven de afkaptemperatuur van 25°C. Dat geeft aan dat er nog bruikbare warmte in de bodem aanwezig is, die later nog kan worden onttrokken. De infiltratietemperatuur van de MTO werd in de eerste winter verder geoptimaliseerd: in december 2025 lag de infiltratietemperatuur nog op 19°C, na verder inregelen is de infiltratietemperatuur teruggebracht naar ongeveer 12°C in februari 2026. Dit is lager (en dus beter uitgeoeld) dan voorzien in het ontwerp.

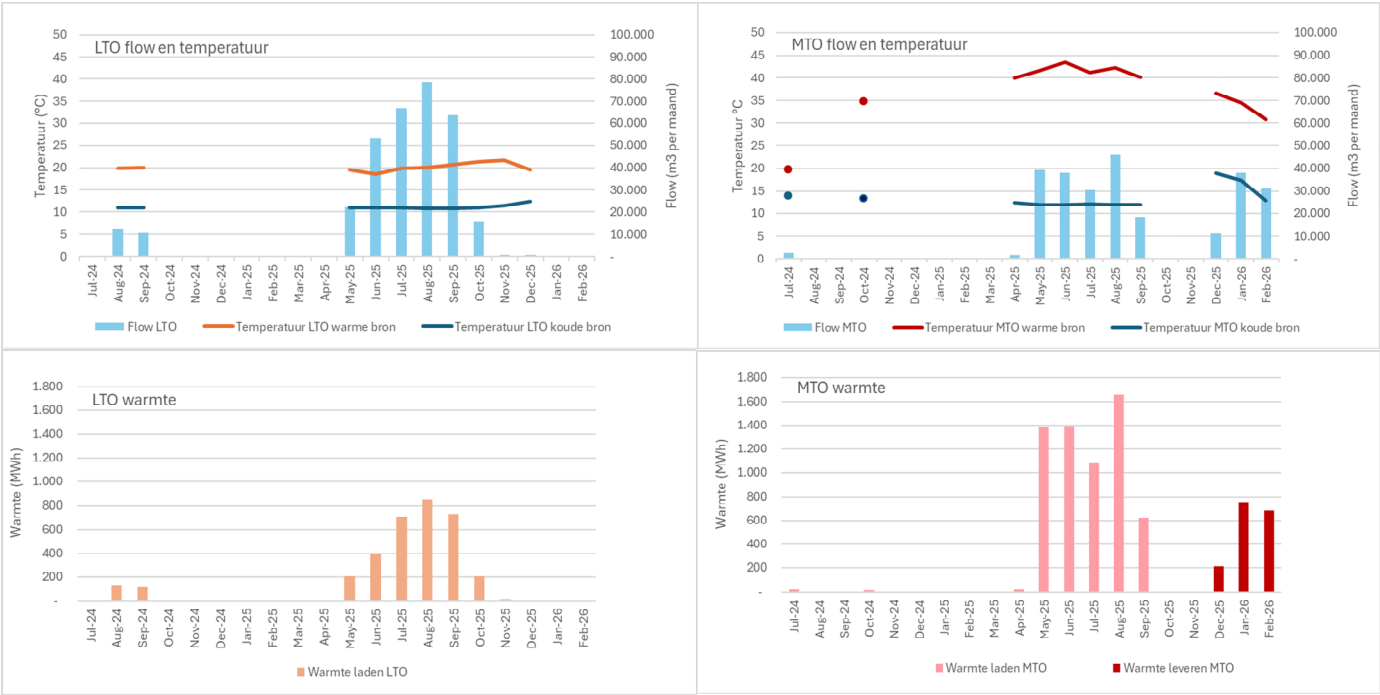
In de vergunningaanvraag van de MTO is een warmteschot in de bodem aangevraagd dat aansluit bij een terugwinrendement van 50%. In het ontwerp is er dus rekening mee gehouden dat 50% van de opgeslagen warmte in de MTO verloren zal gaan in de bodem.

In de winter van de eerste opslagcyclus is tot eind februari 27% van de geladen warmte weer onttrokken. De overige geladen warmte zal deels in het volgende jaar nog beschikbaar zijn voor warmteonttrekking en deels verloren gaan als warmteoverschot in de bodem. Houd er rekening mee dat in de eerste jaren van een seizoensopslag de bodem rond de warme bron nog moet opwarmen, en dat in latere jaren het terugwinrendement stijgt tot een stabiele waarde.

Tabel 3-1: Ontwerpgegevens van de MTO en LTO en realisatie in de eerste laad- en ontladcyclus.

Parameter		LTO		MTO	
Zomer (warmte laden)		ontwerp	2025	ontwerp	2025
Maximaal debiet	m³/uur	200	200	110	110
Infiltratietemperatuur warm	°C	25	19 à 22	40 à 45	40 à 44
Waterhoeveelheid per seizoen	m³/seizoen	max 660.000	301.000	max 336.000	174.000
Energiehoeveelheid	MWh/seizoen	8.000	3.097	7.650	6.150
Winter (warmte ontladen)		ontwerp	2025/2026	ontwerp	2025/2026
Maximaal debiet	m³/uur	200	-	110	~ 50
Onttrekking temperatuur warm	°C	25 → 16	-	40 → 25	37 → 30
Infiltratietemperatuur koud	°C	12 (min 5)	-	16	19 → 12
Waterhoeveelheid per seizoen	m³/seizoen	max 750.000	-	max 420.000	80.000
Energiehoeveelheid	MWh/seizoen	6.000	-	3.825	1.650

Figuur 14: Gegevens van het laden en ontladen van de seizoensopslag in de periode juli 2024 t/m februari 2026.



4 Digital twin

4.1 Opzet digital twin

De digital twin simuleert de productie, opslag, conversie en levering van warmte in de Warmtecentrale Zernike op een tijdschaal van één uur. Dit sluit aan bij doelstelling van de digital twin:

De digital twin representeert de warmtelevering door de Warmtecentrale Zernike op functioneel niveau ten behoeve van onderzoek naar en analyse van het ontwerp en de bedrijfsvoeringsstrategie.

De digital twin omvat de Warmtecentrale Zernike, het zonthermiefarm Dorkwerd, de restwarmtelevering vanuit de datacenters en de seizoensopslag op MT- en LT-niveau. De opgestelde vermogens en de regelstrategie in de digital twin komen overeen met de beschrijving in hoofdstuk 2. Belangrijkste input voor de digital twin is de warmtelevering door de Warmtecentrale Zernike. WarmteStad heeft uurwaarden aangeleverd van volumestroom, aanvoer- en retourtemperatuur.

De digital twin berekent de inzet per asset en de energiestromen, temperaturen en volumedebietstromen, in de volgorde van de inzetstrategie van WarmteStad. Specifieke parameters van de assets zijn bepaald op basis van de ontwerpspecificaties, die door WarmteStad zijn aangeleverd:

- De warmteproductie van het zonthermiefarm wordt berekend op basis van het aantal panelen, de hellingshoek en de zoninstraling (KNMI-data).
- De restwarmte vanuit de datacenters is een relatief constante warmtestroom.
- De COP van de warmtepompen wordt berekend afhankelijk van de temperatuurniveaus.
- Bij de inzet van WKK's is rekening gehouden met de ontwerpefficiëntie voor warmte- en elektriciteitsproductie en de verschillende modi waarop de WKK kan draaien.
- Bij de inzet van gasketels is rekening gehouden met de ontwerpefficiëntie van de ketels
- Het warmteverlies vanuit de dagbuffers wordt berekend afhankelijk van de omgevingstemperatuur
- De parameters van de seizoensopslag zijn overgenomen uit de effectenstudie; het warmteverlies in de bodem wordt door de digital twin gesimuleerd.

Het simulatieraamwerk waarin de digital twin draait noemen we het PowerToHubs-model. Het model heeft een korte rekentijd, waardoor volledige jaren of meerjarige perioden kunnen worden doorgerekend. Dynamische (opstart)effecten van individuele componenten zijn niet gemodelleerd. De evaluatieparameters (KPI's) zoals de inzet van duurzame bronnen en CO₂-emissies, worden berekend in een vervolgberekening, op basis van de uitkomsten van de digital twin. De kenmerken van de digital twin staan in onderstaande tabel op een rij.

Tabel 4-1: Kenmerken van de digital twin

Kenmerken van de digital twin	Specificatie
Tijdsresolutie	Uurbasis
Invoergegevens	Warmtevraag Eigenschappen (parameters) van assets Zon-instraling, omgevingstemperatuur
Uitvoer	Temperatuur, volumedebiet, energie (in kWh) per asset
Raamwerk	PowerToHubs-model (KWR), waarbij met een voorkeursvolgorde de assets sequentieel worden ingezet in de simulaties
Evaluatie	Prestatie indicatoren, zoals percentage inzet van bronnen en CO ₂ -emissies

4.2 Validatie in drie stappen

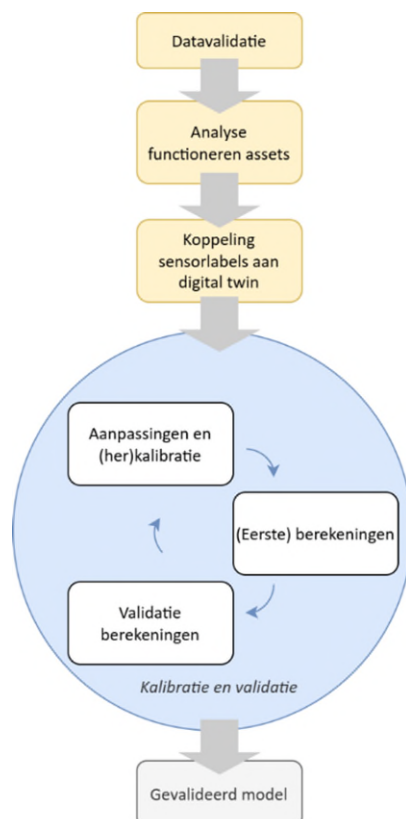
De validatie van de digital twin is uitgevoerd in drie iteraties:

1. Validatieronde 2024, op basis van een dataset t/m april 2024. De opgestelde assets omvatten nog geen zonthermie en seizoensopslag.
2. Validatieronde 2025, op basis van een dataset t/m feb 2025. In deze fase zijn zonthermie en seizoensopslag toegevoegd als assets, maar de seizoensopslag was nog niet operationeel in gebruik.
3. Validatieronde 2026, op basis van een dataset t/m feb 2026. De dataset omvat de eerste laad- en ontlaadcycli van de seizoensopslag.

In elke iteratie zijn de stappen doorlopen zoals opgenomen in Figuur :

- Datavalidatie: check op compleetheid van de monitoringsgegevens en validatie ervan.
- Analyse van het functioneren van (nieuw toegevoegde) assets.
- Koppeling van gebruikte labels van de sensorgegevens aan de berekeningswaarden van de digital twin.
- Eerste berekeningen met de digital twin.
- Verschilanalyse van het functioneren van de warmtecentrale met berekeningswaarden van de digital twin.
- N.a.v. verschilanalyse: aanpassingen aan het model, de rekenmethode en een kalibratie van de digital twin.
- N.a.v. analyse functioneren en verschilanalyse: nieuwe digital twin-berekeningen en operationele optimalisaties in de warmtecentrale.

Figuur 15: Stapsgewijze datavalidatie, kalibratie en validatie van de digital twin.



Validatieronde 2024

Bij de uitgevoerde validatieronde in 2024 (dataset t/m april 2024) lag de grootste nadruk op de check op compleetheid van de monitoringsgegevens, de validatie van deze gegevens en de koppeling van sensorlabels met de digital twin. De analyse van het functioneren van assets is uitgevoerd voor de restwarmte levering, warmtepompen, WKK en gasketels (zie hoofdstuk 3 Monitoring).

Uit de meetdata van deze eerste validatieronde bleek, dat in de warmtecentrale nog volop functionele inregeling plaatsvond, waardoor het uittesten van de digital twin niet goed mogelijk bleek. De testruns met de digital twin bleken wel nuttig voor het doorspreken van uitgevoerde aanpassingen ten opzichte van ontwerp en het functioneren van individuele assets. Mede naar aanleiding van deze besprekingen heeft WarmteStad operationele optimalisaties in de warmtecentrale kunnen doorvoeren. Ook zijn meetpunten in de datalogging van WarmteStad toegevoegd die behulpzaam zijn voor het analyseren van het functioneren van individuele assets.

Validatieronde 2025

Bij de validatieronde van 2025 (dataset t/m feb 2025) was analyse mogelijk van het functioneren van de zonthermie (zie hoofdstuk 3 Monitoring). De sensorlabels van zonthermie en seizoensopslag monitoring zijn gekoppeld aan de berekende waarden in de digital twin. De eerste representatieve validatie van de digital twin was mogelijk, en de eerste scenario-berekeningen zijn uitgevoerd.

Validatieronde 2026

De validatieronde van 2026 leidde tot een gevalideerde digital twin die de werking van de gehele warmtecentrale, inclusief seizoensopslag, goed kan representeren. Deze rapportage toont de resultaten van de gekalibreerde digital twin.

Inputprofielen, wijze van validatie, doorgevoerde aanpassingen

Voor het doorrekenen van de digital twin is gebruikgemaakt van de volgende inputreeksen:

- Profielen van de warmtelevering door de warmtecentrale (meetwaarden flow, levering- en retourtemperatuur).
- KNMI-gegevens voor omgevingstemperatuur en zoninstraling (weerstation Eelde).
- Beschikbaarheid van restwarmte (uit meetdata afgeleid)
- Instellingen van de aansturing van WKK's (uit de meetdata afgeleid)

De meest relevante aanpassingen in de drie validatierondes aan de digital twin zijn:

- Kalibratie van efficiëntie van individuele assets, binnen de range van aannemelijke waarden op basis van ontwerp specificaties.
- Toevoeging van restwarmte van de WKK naar de warmtepompen.
- Toevoeging van de drie verschillende manieren van regelen van de WKK's.
- Wijzigingen in de inzetstrategie van de seizoensopslag. De inzetstrategie bij WarmteStad wordt in de volgende laad- en ontladacyclus nog verder ingeregeld, bij het opstellen van de digital twin zijn hiervoor aannames gedaan. In de digital twin is gemodelleerd dat warmte uit de seizoensopslag gedurende het winterseizoen (oktober t/m april) wordt ingezet, zodra de gevraagde inzet van de warmtepomp van de seizoensopslag boven een drempelwaarde komt. Als eerste wordt dan de warmte van de MT-seizoensopslag benut, vervolgens de LT-seizoensopslag, en tenslotte restwarmte.
- Aanpassing van de zonthermie. Uit de meetgegevens bleek een lagere productie – of een hogere verliesfactor – dan verwacht op basis van de ontwerpgegevens van het zonthermieveld. In de digital twin is de zonthermie met een statische verliesfactor van 44% gemodelleerd, om de berekende waarden in overeenstemming te brengen met de meetgegevens. Deze verliesfactor representeert de verliezen in de leveringsketen van de zonthermie, van leidingverliezen, tot verliezen in de warmtewisselaar. WarmteStad zal dit verder onderzoeken, in overleg met Zonthermiepark Dorkwerd.

4.3 Resultaten van validatie

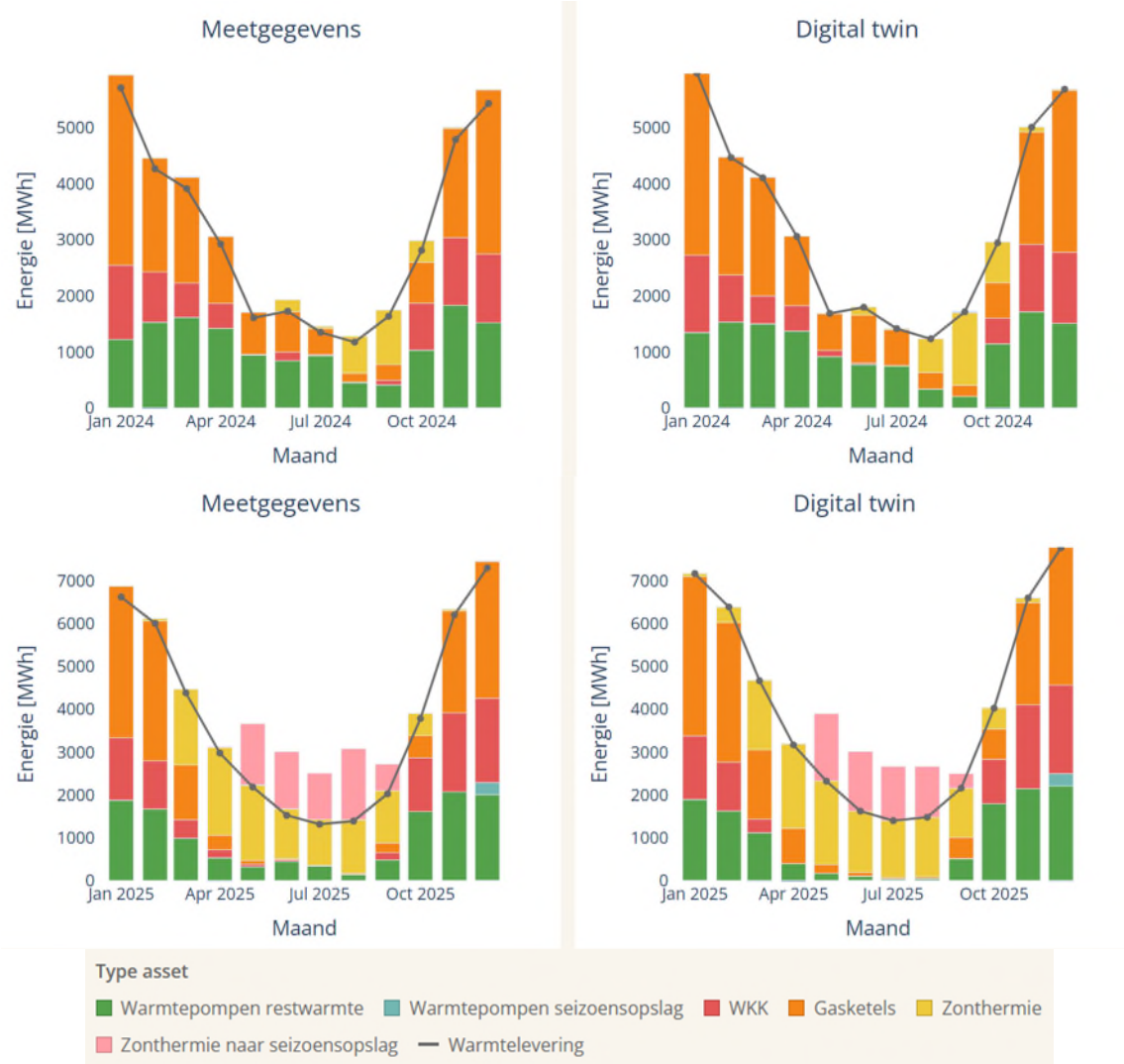
Om te bepalen of de digital twin de werking van de warmtecentrale goed kan representeren, zijn de berekeningsresultaten vergeleken met de gemeten waarden. Dit is op twee manieren gedaan:

- Warmteproductie van de individuele assets op maandbasis
- Aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen, op jaarbasis

Vergelijking van warmteproductie van de individuele assets op maandbasis

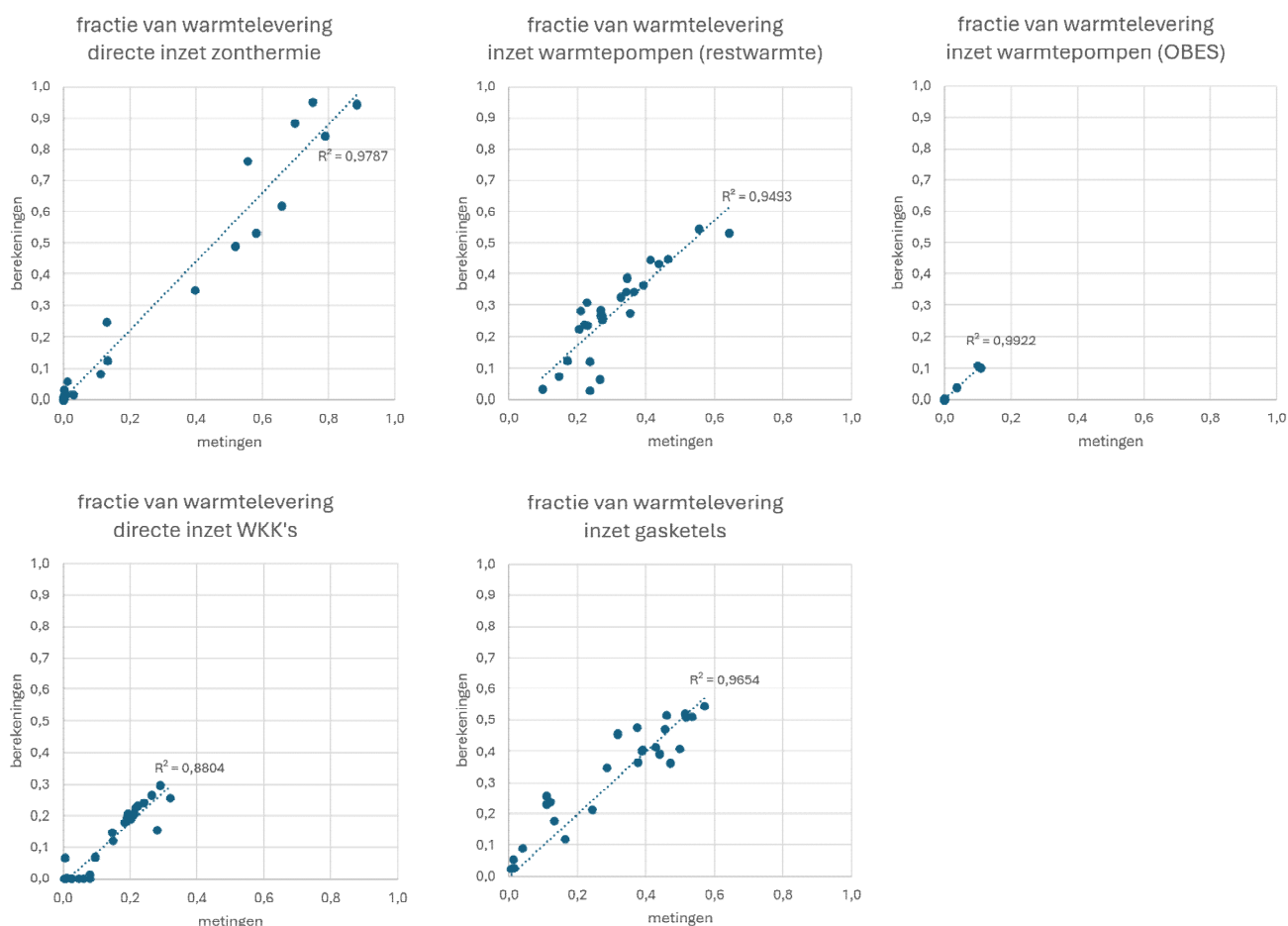
In Figuur 16 wordt de gemeten warmteproductie op maandbasis vergeleken met de berekende waarden, voor de jaren 2024 en 2025. Op basis van deze figuur is visuele vergelijking van het patroon door het jaar heen mogelijk.

Figuur 16: Gemeten warmteproductie per asset, en berekende waarden met de digital twin, voor de jaren 2024 (boven) en 2025 (onder).



Voor een kwantitatieve beoordeling van de resultaten van de validatie, zijn in Figuur 17 correlatiediagrammen opgenomen waarin per asset de gemeten en berekende maandwaarden zijn opgenomen. In elk correlatiediagram is de inzet van de asset als fractie van de totale warmtelevering weergegeven, voor de maandwaarden van januari 2024 t/m februari 2026. De determinatiecoëfficiënt (R^2) is in elk correlatiediagram weergegeven. R^2 is een getal tussen de 0 en 1 dat de mate aanduidt waarin een model de meetdata goed representeert. Bij een waarde van $R^2=1$ is sprake van een volledige overeenkomst tussen het model en de meetdata, $R^2=0$ betekent geen enkele overeenkomst tussen het model en de meetdata. Uit Figuur 17 blijkt dat een $R^2>0,95$ voor vrijwel alle assets, hetgeen we als representatief beoordelen. Alleen voor de WKK, waar in de validatieperiode drie verschillende manieren van regelen zijn uitgetest, wordt een lagere R^2 berekend (0,88). Op basis van deze lagere R^2 -waarde hebben we de modellen en meetdata nader beschouwd. Daaruit is gebleken dat verschillen voornamelijk optreden bij beperkte inzet van de WKK's in warmere periodes. Op basis daarvan beschouwen we de berekende inzet alsnog voldoende representatief, gezien de beperkte invloed van deze afwijkingen op de jaarresultaten.

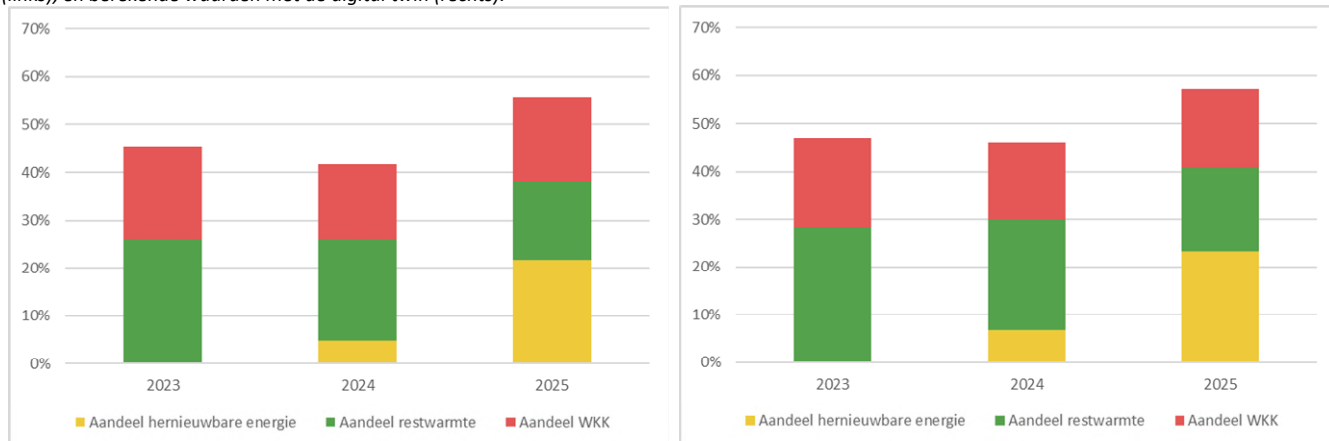
Figuur 17. Correlatiediagrammen van gemeten warmteproductie ten opzichte van de berekende waarden. Per asset is een apart correlatiediagram opgesteld, waarin de inzet van deze asset als fractie van de totale warmtelevering is weergegeven. De datapunten in de correlatiediagrammen zijn maandwaarden van januari 2024 t/m februari 2026 (validatie scenario).



Vergelijking van het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK

In Figuur 18 is het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen van de warmtecentrale opgenomen en vergeleken met de berekende waarden. Opgemerkt wordt, dat de digital twin het aandeel iets hoger berekent dan de meetwaarden. In 2025 was het verschil 1 procentpunt (57% t.o.v. 56%). Op basis van de resultaten is geconcludeerd dat de digital twin de werking van de warmtecentrale op functioneel niveau voldoende kan representeren.

Figuur 18: Aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen van de warmtecentrale (links), en berekende waarden met de digital twin (rechts).



5 Scenariostudie

5.1 Opzet scenariostudie

Doel van de scenariostudie

De scenariostudie met de digital twin is gericht op verkenning van het functioneren van de warmtecentrale in de periode tot 2030, en het uitvoeren van wat-als analyses voor de multi-bronnenstrategie van de warmtecentrale voor de periode 2023 tot en met 2030. De resultaten zijn gebruikt voor ontwerpevaluatie van de multi-bronnenstrategie en beschouwing van de duurzaamheidsprestaties van de warmtecentrale. Door scenario's te vergelijken, wordt zichtbaar wat de bijdrage van seizoenopslag en zonthermie is voor het aandeel duurzame bronnen en in de verwachte CO₂-emissies.

Overzicht van de scenario's

Een overzicht van de scenario's is hieronder in een tabel weergegeven. De set met meetgegevens in de periode 2023 t/m februari 2026 beschouwen we als 'scenario 0'.

Er zijn drie scenario's met de digital twin doorgerekend. Elk scenario bestaat uit een simulatie met de digital twin over de jaren 2023-2030, waarbij telkens een alternatieve multi-bronnenstrategie voor de warmtecentrale is doorgerekend.

De volgende scenario's zijn beschouwd:

- Scenario 0: **Meetgegevens** – data t/m feb 2026, benut voor validatie van de digital twin
- Scenario 1: **Digital twin** - doorrekening op basis van realisatie t/m februari 2026 & prognose tot 2030
- Scenario 2: **Wat-als: geen seizoenopslag** – zelfde als scenario 'Digital twin', zonder seizoenopslag
- Scenario 3: **Wat-als: meer zonthermie** – zelfde als scenario 'Digital twin', met grotere inzet zonthermie.

Input voor de scenario's

Als input voor scenario 1 zijn de kentallen gebruikt van de warmtelevering en de opgestelde assets in de periode 2023 t/m 2030 van Tabel 2.1 in hoofdstuk 2. De input voor de andere scenario's zijn varianten op scenario 1.

Voor de input is onderscheid gemaakt tussen verleden en toekomst:

- Voor de periode 2023 t/m februari 2026 zijn dezelfde parameters en inputreeksen gebruikt als bij de validatie.
- Voor de periode maart 2026 t/m 2030 is een inschatting gemaakt van de groei in warmtevraag, de beschikbaarheid van duurzame warmtebronnen en de opgestelde assets. De profielen door het jaar heen van de warmtevraag, restwarmte, zonthermie en de wijze van bedrijfsvoering van de WKK zijn geëxtrapoléerd op basis van de meetgegevens uit voorgaande jaren.

Tabel 5-1: Opzet van de scenario-studie.

Scenario	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
0. Meetgegevens (realisatie t/m feb 2026)		validatie (uurwaarden)						
1. Digital twin (realisatie & prognose)	Berekening op basis van opgestelde assets en meetdata warmtelevering en inzetprofielen			Berekening op basis van inschatting van ontwikkeling van de warmtevraag en opgestelde assets. Profielen van warmtevraag, beschikbare bronnen en bedrijfswijzen op basis van extrapolatie.				
2. Wat als: geen seizoenopslag	Als scenario 1,			maar dan zonder seizoenopslag				
3. Wat als: meer zonthermie	Als scenario 1,			maar dan met meer zonthermie				

5.2 Resultaten verkenning warmtecentrale tot 2030

Met de resultaten van scenario 1 'Digital twin' is het functioneren van de warmtecentrale in de periode tot 2030 verkend. De berekeningsresultaten van dit scenario voor de periode t/m februari 2026 zijn al gepresenteerd in hoofdstuk 4 bij de datavalidatie. Met de digital twin is de verdere prognose doorgerekend tot 2030.

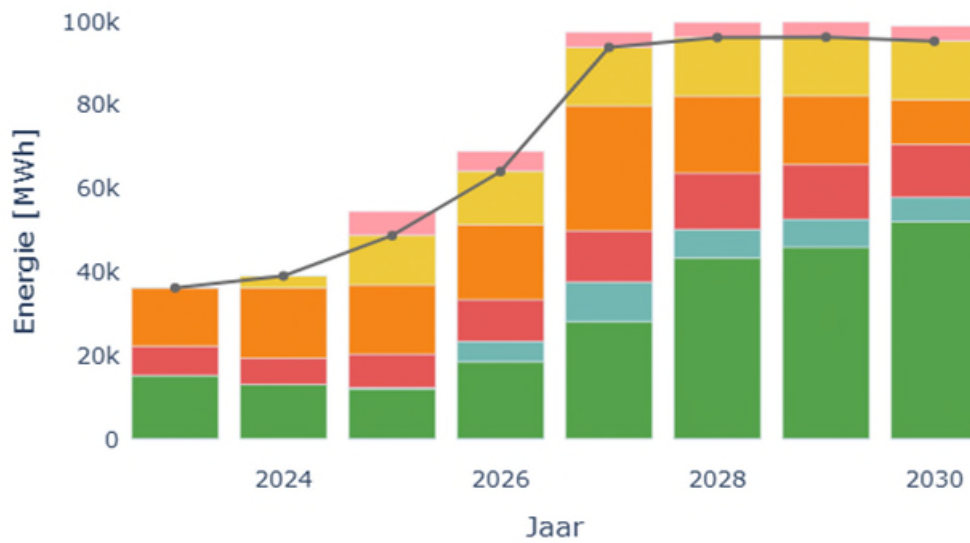
Resultaten verkenning tot 2030: meerjarenoverzicht warmteproductie per asset tot 2030

Figuur 19 geeft een overzicht van de prognose van de warmteproductie per asset van 2023 tot 2030. In de figuur wordt de groeiende inzet van duurzame bronnen zichtbaar, in het perspectief van een stijgende warmtelevering door de warmtecentrale van 36 naar 95 GWh (130 naar 345 TJ). In Figuur is het relatieve aandeel van de warmteproductie per asset opgenomen, als percentage van de totale warmtelevering door de warmtecentrale.

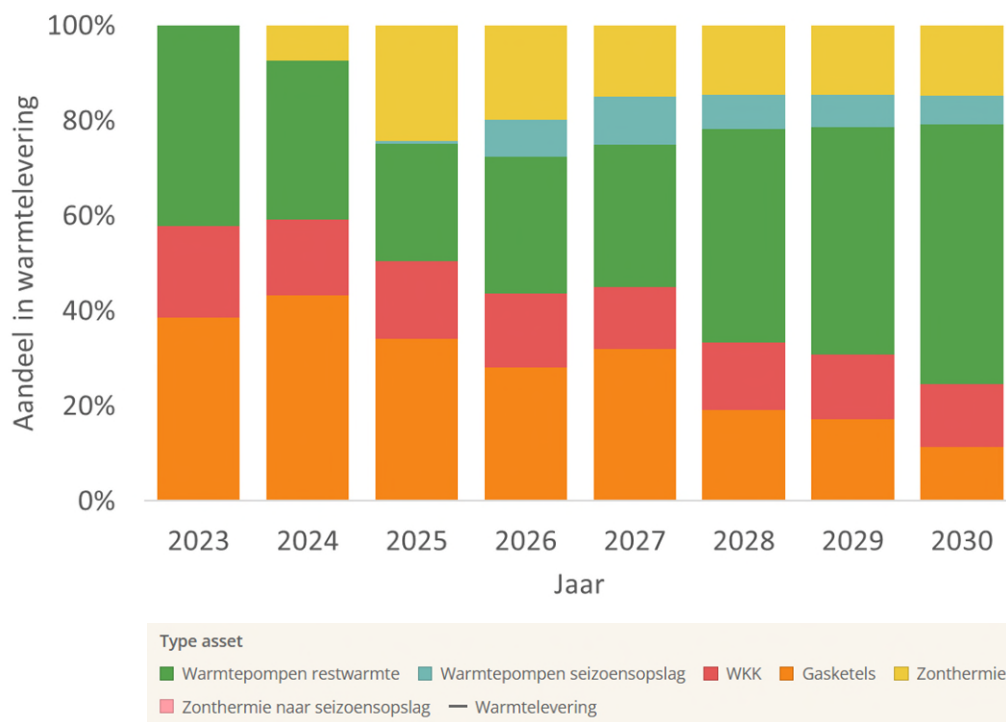
Uit de figuren blijkt:

- De productie van **zonthermie** wordt in de periode 2025-2030 berekend op 18 GWh per jaar. In 2025 kon 12 GWh zonthermie direct worden geleverd aan het warmtenet, en is 6 GWh opgeslagen in de seizoensopslag. In 2027 is de warmtevraag groter: er kan naar verwachting 14 GWh zonthermie direct aan het warmtenet worden geleverd, waardoor 4 GWh overblijft voor de seizoensopslag. Volgens de berekening blijft deze verdeling verder tot 2030 bestaan. Het aandeel zonthermie bedraagt dan 15% in de warmtelevering.
- De warmteproductie van de **restwarmte warmtepompen** stijgt tussen 2023 en 2030 van 15 naar 52 GWh, met toenemende beschikbaarheid van datacenter restwarmte. Volgens de berekening produceren de warmtepompen in 2030, na de laatste uitbreidingsstap van de datacenter restwarmte, 55% van de warmtelevering.
- De **seizoensopslag warmtepompen** dragen vanaf 2026 substantieel bij in de warmteproductie. In 2027 produceren de warmtepompen 9 GWh met warmte uit de seizoensopslag, dit is 10% van de warmtelevering van dat jaar. In 2028 is de inzet van de seizoensopslag warmtepompen weer lager (7 GWh), in de jaren daarna daalt de inzet verder tot 6 GWh in 2030, dit is 6% van de warmtelevering in 2030. Een verklaring van dit patroon is opgenomen in paragraaf 5.3.
- De warmteproductie van de **WKK** stijgt tussen 2023 en 2030 van 7 naar 13 GWh, in 2030 is dit 13% van de warmtelevering in 2030. De inzet van de WKK stijgt minder hard dan de inzet van de warmtepompen. Dit heeft effect op de elektriciteit inkoop of terug levering. De warmtecentrale levert in de jaren 2023-2026 netto elektriciteit terug aan het elektriciteitsnet, in de jaren 2027-2030 wordt netto aankoop van elektriciteit verwacht. In 2030 is de warmtelevering zodanig gestegen, dat de volledige WKK-elektriciteitsproductie van de WKK (10 GWh_e) direct wordt benut door de warmtepompen, en daarboven nog 7 GWh_e wordt ingekocht. Opgemerkt wordt, dat dit berekeningsresultaat afhankelijk is van de bedrijfswijze van de WKK.
- De **gasketels** produceren het overige deel van de warmte. Het aandeel warmteproductie door de gasketel laat een dalende trend zien tussen 2023 en 2030 van ongeveer 40% tot bijna 10% van de warmtelevering in 2030. In absolute hoeveelheden stijgt de inzet van de gasketels eerst van 14 GWh in 2023 tot 30 GWh in 2027, om daarna te dalen naar 11 GWh in 2030. Het groeitempo van de warmtelevering en het verschil met de groei in beschikbare duurzame warmtebronnen is bepalend voor de benodigde inzet van de gasketels.

Figuur 19: Berekende warmteproductie per asset voor de jaren 2023-2030 voor scenario 1 'Digital twin'.



Figuur 20: Berekend aandeel van de warmteproductie per asset voor de jaren 2023-2030 voor scenario 1 'Digital twin'.



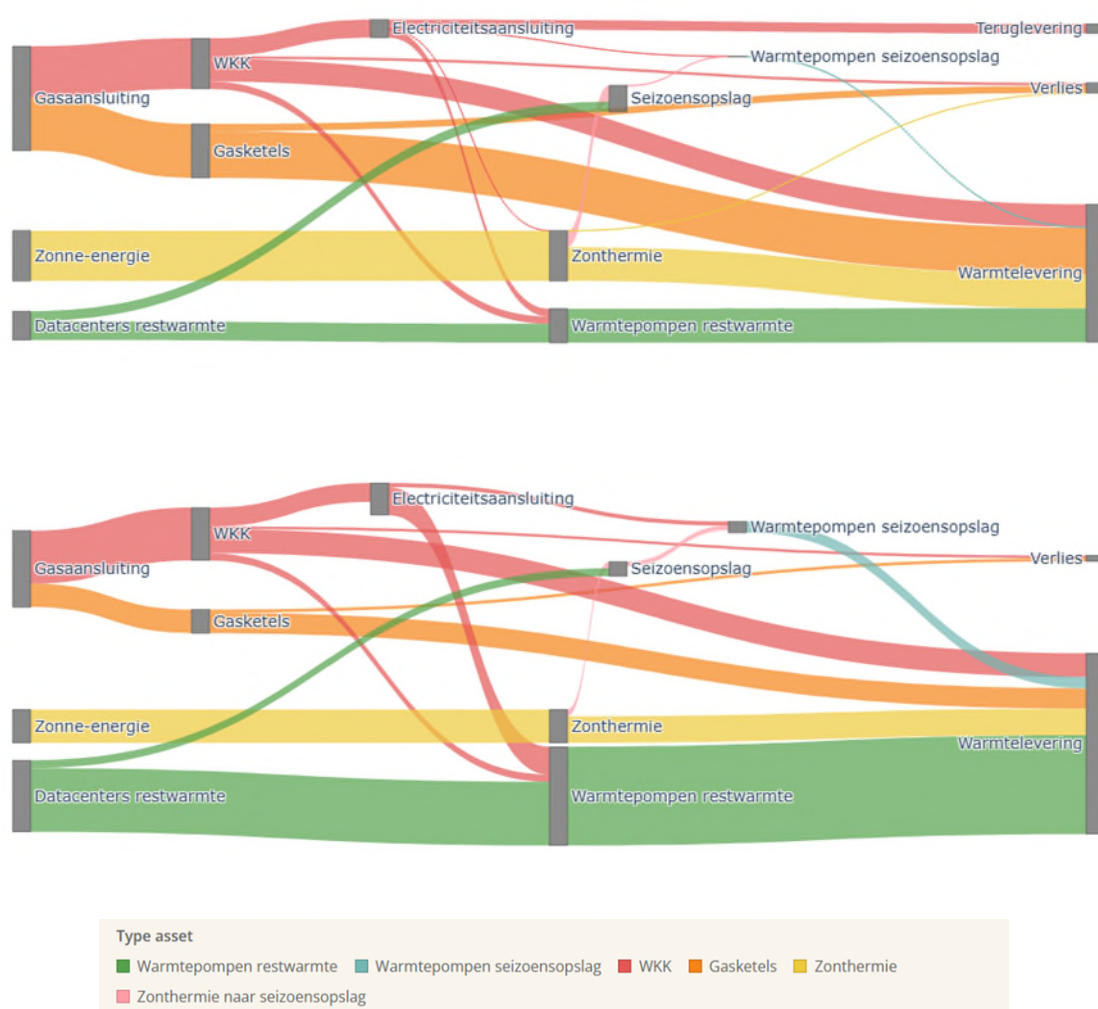
Resultaten verkenning tot 2030: overzicht energiestromen: vergelijking tussen 2025 en 2030

In Figuur 21 staat het overzicht van de berekende energiestromen van de warmtecentrale over 2025, in vergelijking met de prognose voor 2030. Het aandeel datacenter warmte is in 2030 aanzienlijk groter dan in 2025, het aandeel gas voor de gasketels en WKK is gedaald.

In 2025 wordt warmte geladen in de seizoensopslag, waarbij te zien is dat in 2025 nog vrijwel geen warmte uit de seizoensopslag wordt benut. Er wordt in dat jaar netto warmte opgeslagen in de bodem.

In 2030 is de elektriciteit inkoop zichtbaar door het tekort aan elektriciteit bij de elektriciteitsaansluiting. Teruglevering aan het elektriciteitsnet vindt niet meer plaats.

Figuur 21: Berekende energiestromen van de warmtecentrale in scenario 1: vergelijking tussen 2025 (boven) en 2030 (onder).
Opmerking: de warmtelevering door de warmtecentrale is in 2030 bijna tweemaal zo groot als in 2025.



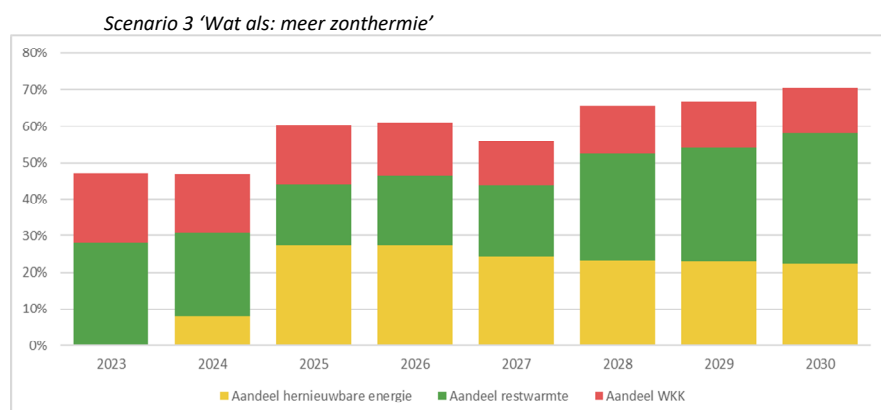
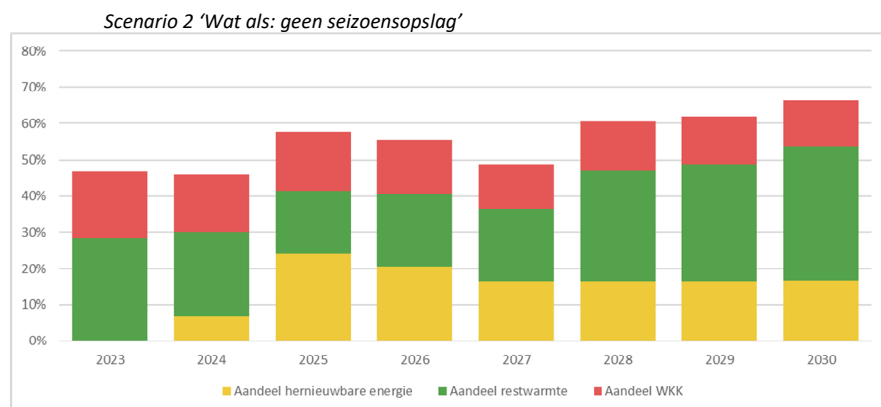
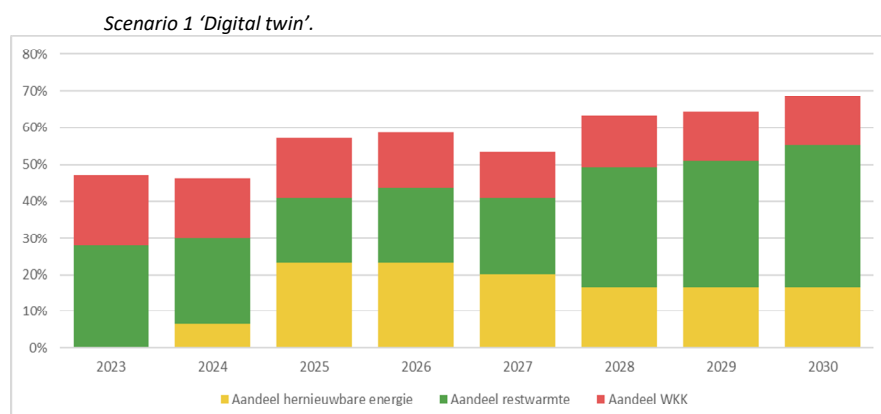
Resultaten verkenning tot 2030: aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte

De berekening van het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte met de digital twin voor scenario 1 is opgenomen in Figuur 22. Het gaat hier om het aandeel ten opzichte van in de primaire energiebronnen van de warmtecentrale, bestaande uit restwarmte, zonthermie, gas- en elektriciteit.

- Vanaf 2025 ligt het aandeel van de bronnen boven de 50%, waarmee voldaan is aan de eisen voor 'efficiënte stadsverwarming'.
- Opvallend is de daling van het aandeel duurzaamheid in 2027 ten opzichte van het voorgaande jaar. In het scenario neemt de warmtevraag in 2027 sterk toe, terwijl de beschikbaarheid van duurzame bronnen niet voldoende is meegegroeid. Dit wordt deels opgevangen door inzet van seizoensopslag.
- Het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte stijgt volgens het scenario tot 69% in 2030.

De resultaten van de andere scenario's zijn ook in Figuur 22 opgenomen, deze zijn in de volgende paragrafen besproken.

Figuur 22: Berekend aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte voor de jaren 2023-2030 in de drie scenario's.



5.3 Resultaten verkenning van de rol van seizoensopslag

De seizoensopslag is opgenomen in de multi-bronnenstrategie, om de disbalans tussen de beschikbaarheid van duurzame bronnen en de warmtevraag te overbruggen, en zo een grotere inzet van datacenter restwarmte en zonthermie te realiseren.

De rol van seizoensopslag is verkend op twee manieren:

- Door analyse van de rol van seizoensopslag in de verkenning tot 2030, op basis van de doorrekening van scenario 1 'Digital twin'.
- Door vergelijking van de scenario's met en zonder seizoensopslag (vergelijking van scenario 1 'Digital twin' met scenario 2 'Wat als: geen seizoensopslag')

Analyse rol van seizoensopslag in de verkenning tot 2030

Zoals beschreven in de paragraaf 5.2, neemt de warmtelevering vanuit de seizoensopslag toe tot een maximale waarde in 2027, waarna de warmtelevering vanuit de seizoensopslag weer lager wordt. Voor de verklaring van dit patroon spelen meerdere factoren een rol:

- In 2025 is gestart met het laden van de MT- en LT-seizoensopslag. In 2025 en 2026 wordt meer warmte geladen in de seizoensopslag dan er wordt benut. Het jaar 2027 wordt gekenmerkt door een relatief grote groei in warmtevraag, in vergelijking met de groei in het aanbod van restwarmte. In het jaar 2027 wordt de opgeslagen voorraad warmte van 2025 en 2026 uit de MT-seizoensopslag volledig benut. De LT-seizoensopslag wordt volgens de berekeningen in 2027 nog niet benut voor warmtelevering.
- In de periode 2028-2030 is het aanbod van zonthermie vergelijkbaar met 2027. Net als in 2027, wordt de geladen warmte in de MT-seizoensopslag in de daaropvolgende jaren volledig benut, alleen is er geen voorraad MT-warmte uit voorgaande jaren meer beschikbaar, waardoor de inzet van MT-seizoensopslag in 2028-2030 lager is dan in 2027. Vanaf 2028 wordt ook warmte uit de LT-seizoensopslag ingezet.
- In de periode 2028-2030 stijgt het aanbod van restwarmte, bij vrijwel gelijkblijvende warmtevraag. Daardoor is meer restwarmte beschikbaar om te laden in de LT-seizoensopslag. Echter, in de winterperiode is ook meer restwarmte beschikbaar, die direct wordt ingezet bij de warmtelevering, waardoor minder inzet van seizoensopslag nodig is. Met de aangehouden inzetstrategie in de digital twin wordt de opgeslagen warmte in de MT-seizoensopslag jaarlijks volledig benut, maar blijft in de LT-seizoensopslag jaarlijks nog een deel van de geladen warmte achter en wordt volgens de berekeningsresultaten een meerjarig warmteoverschot in de bodem opgebouwd.
- Opmerking: Een meerjarig warmteoverschot in de LT-seizoensopslag is volgens de vergunning niet toegestaan. Een aanpassing in de aansturing, waarbij minder warmte wordt geladen in de LT-seizoensopslag, kan ervoor zorgen dat wordt voldaan aan de vergunningsvoorwaarden. Deze aansturing is niet opgenomen in de digital twin, de digital twin biedt echter wel inzicht in de mate waarin lange termijn bijsturing nodig is.

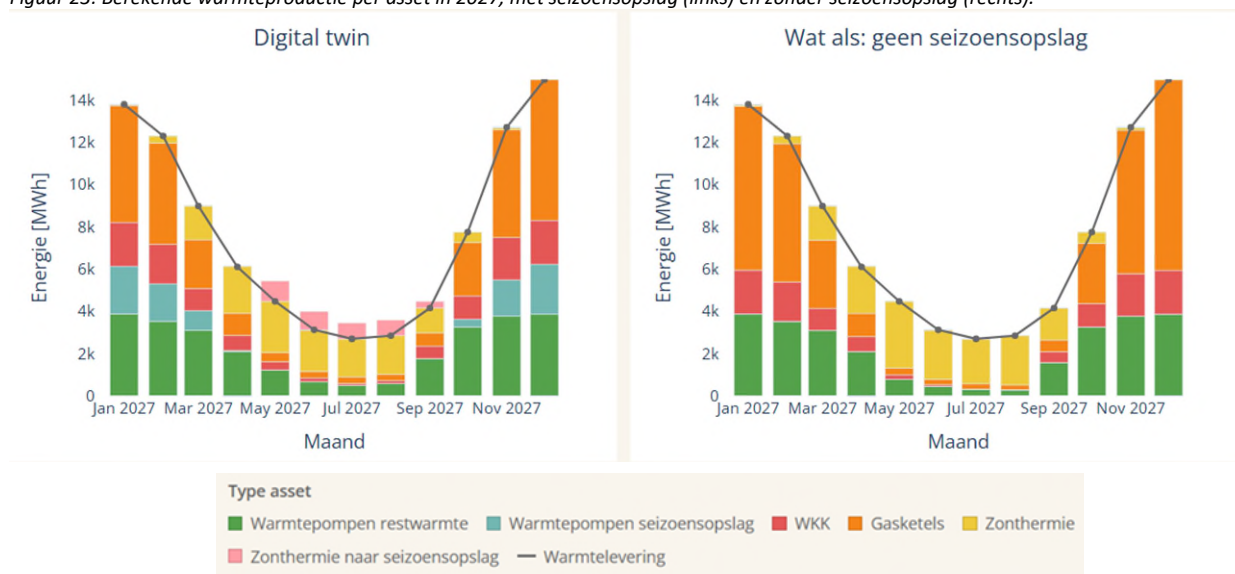
Vergelijking van scenario's met en zonder seizoensopslag

In 2027 wordt de grootste inzet van seizoensopslag verwacht, voor dat jaar is in

Figuur 23 de berekende warmteproductie per asset opgenomen voor de scenario's met en zonder seizoensopslag.

- In de situatie met seizoensopslag leveren de warmtepompen met warmte vanuit de LT- en MT-seizoensopslag 10% van de totale warmteproductie van 2027 (9 GWh). In de wintermaanden is de warmteproductie door de seizoensopslag-warmtepompen het grootst: in december 2027 is dit 16% van de maandproductie.
- In de situatie zonder seizoensopslag nemen de gasketels het aandeel warmteproductie vrijwel geheel over. Dat resulteert in 2027 in een toename van inzet van gasketels van 30 GWh met seizoensopslag tot 39 GWh in de situatie zonder seizoensopslag, in het jaar dat in absolute hoeveelheden al de hoogste inzet van gasketels wordt verwacht.

Figuur 23: Berekende warmteproductie per asset in 2027, met seizoensopslag (links) en zonder seizoensopslag (rechts).



In Figuur 22 (in paragraaf 5.2) staan de berekende waarden voor het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte van de scenario's.

- In 2027 blijkt dat zonder seizoensopslag het berekende aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte 49% bedraagt. Met seizoensopslag is dit 54%, een verschil van 5%-punt. In 2027 maakt de seizoensopslag het verschil tussen het wel of niet voldoen aan de eisen voor 'efficiënte stadsverwarming'.
- In de overige jaren 2026-2030 maakt seizoensopslag een verschil van 2 à 3 procentpunt voor het aandeel hernieuwbaar, restwarmte en WKK-warmte.

Opmerking: het gaat hier om het aandeel ten opzichte van de totaal gebruikte *primaire energiebronnen* voor de warmtecentrale. Deze percentages kunnen niet één op één worden vergeleken met de bijdrage van seizoensopslag in de *warmtelevering*.

Beschouwing rol van seizoensopslag in de multi-bronnenstrategie

Seizoensopslag draagt bij aan een grotere benutting van de beschikbare duurzame warmtebronnen. Volgens de verkenning van de ontwikkeling van de warmtecentrale tot 2030 met de digital twin, wordt berekend dat 6% tot 10% van de warmteproductie op jaarbasis wordt geleverd door de seizoensopslag-warmtepompen, en stijgt het aandeel ten opzichte van de totaal gebruikte primaire energiebronnen door toepassing van seizoensopslag met 2 tot 5 procentpunt.

Uit verdere beschouwing blijkt dat de inzet van seizoensopslag sterk afhankelijk is van de verhouding tussen vraag en aanbod van duurzame bronnen:

- Bij een relatief grote warmtevraag ten opzichte van het aanbod duurzame bronnen, kan de duurzame warmte gedurende een groot deel van het jaar volledig worden ingezet voor directe warmtelevering. In de zomerperiode is relatief weinig duurzame warmte beschikbaar om op te slaan in de seizoensopslag. De beschikbaarheid van duurzame warmte is in deze situatie de beperkende factor voor de inzet van de seizoensopslag.
- Bij een relatief groot aanbod van duurzame bronnen ten opzichte van de warmtevraag, kan in de winterperiode een groot deel van de warmtevraag direct worden ingevuld met duurzame warmtebronnen. Er is in de zomerperiode in principe voldoende duurzame warmte beschikbaar om op te slaan, alleen kan die warmte in de winter niet volledig worden benut. De mogelijke inzet van seizoensopslag in de winterperiode is dan de beperkende factor. Overigens zijn in deze situatie ook nog steeds ketels nodig in perioden met hoge warmtevraag, zodra de maximale capaciteit van de warmtelevering vanuit de seizoensopslag is bereikt.

- Als het jaargemiddelde aanbod van duurzame bronnen gelijk zou zijn aan de warmtevraag (en met een tegengesteld patroon door het jaar heen), dan wordt de seizoensopslag maximaal ingezet en wordt alle duurzame warmte benut (behoudens verliezen in de seizoensopslag). Het theoretisch maximum voor de inzet van seizoensopslag is 50% van de totale warmtelevering.
Het blijkt dat kleine verschuivingen in vraag- of aanbodpatroon leiden tot (veel) lagere inzet van seizoensopslag ten opzichte van het theoretisch maximum van 50%. – maar dit wordt deels gecompenseerd door meer directe inzet van de duurzame bronnen.

Volgens de berekeningsresultaten van de digital twin kan er in de meeste jaren méér warmte worden geladen, dan er kan worden benut. In de verkenning tot 2030 is alleen 2027 een voorbeeld van een jaar met een relatief grote warmtevraag ten opzichte van het aanbod, op dat moment is het warmteoverschot van voorgaande jaren uit de seizoensopslag benut.

In de situatie van WarmteStad, met een groeiscenario in vraag en aanbod, komt hiermee een andere functie van seizoensopslag tot uiting. Naast het zorgdragen van optimale benutting van duurzame bronnen op jaarbasis, heeft de seizoensopslag ook een systeemfunctie op langere termijn: bij groeiende vraag en aanbod kan de seizoensopslag een bufferfunctie vervullen in de multi-bronnenstrategie, die fluctuaties en onzekerheden in het groeiscenario kan opvangen.

5.4 Resultaten verkenning rol van zonthermie

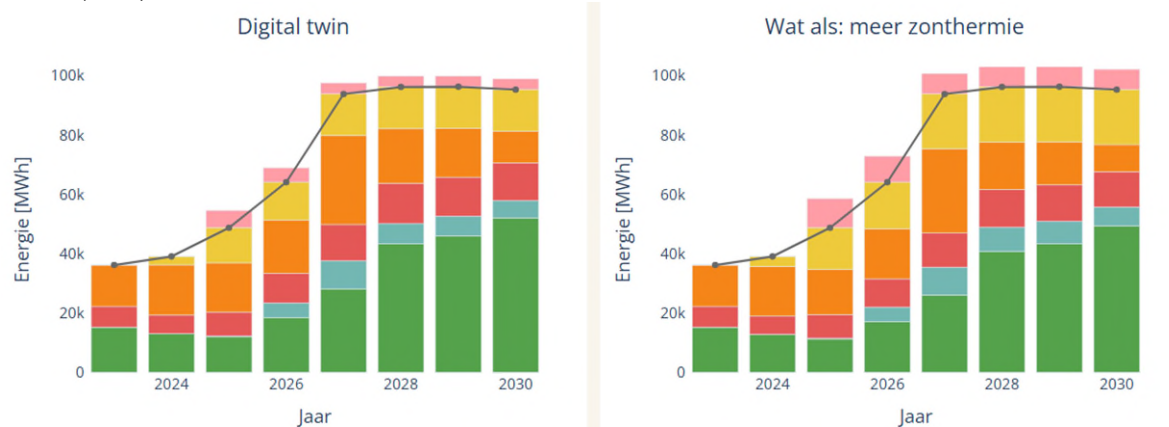
Zonthermie is een duurzame bron die variabel beschikbaar is. Bij de kalibratie van de digital twin productie van het zonthermieveld zijn de meetgegevens vergeleken met de modelresultaten. Aangezien de modelresultaten zijn gebaseerd op de ontwerpgegevens van het zonthermieveld (oftewel de ideale situatie) zien we in de meetdata een lagere productie – oftewel hogere verliezen, die worden veroorzaakt door o.a. leidingverliezen, verliezen in de warmteopslag en de warmtewisselaars. De assets zonthermie en MT-seizoensopslag zijn in de multi-bronnenstrategie in onderlinge samenhang beschouwd, rekening houdend met de groeiende warmtevraag.

In scenario 3 ‘*Wat als: meer zonthermie*’ is de situatie doorgerekend waarin dezelfde multi-bronnenstrategie wordt doorlopen als in scenario 1 ‘*Digital twin*’, maar dan met een hogere opbrengst van zonthermie. Dit is gemodelleerd door de statische verliesfactor te verkleinen van 44% naar 20%. Door vergelijking van scenario’s is de rol van zonthermie verkend, in onderlinge samenhang met de overige bronnen. In scenario 3 met meer zonthermie, wordt de productie van zonthermie in de periode 2025-2030 berekend op 24 à 25 GWh per jaar. Dit was in scenario 1 ‘*Digital Twin*’ 18 GWh.

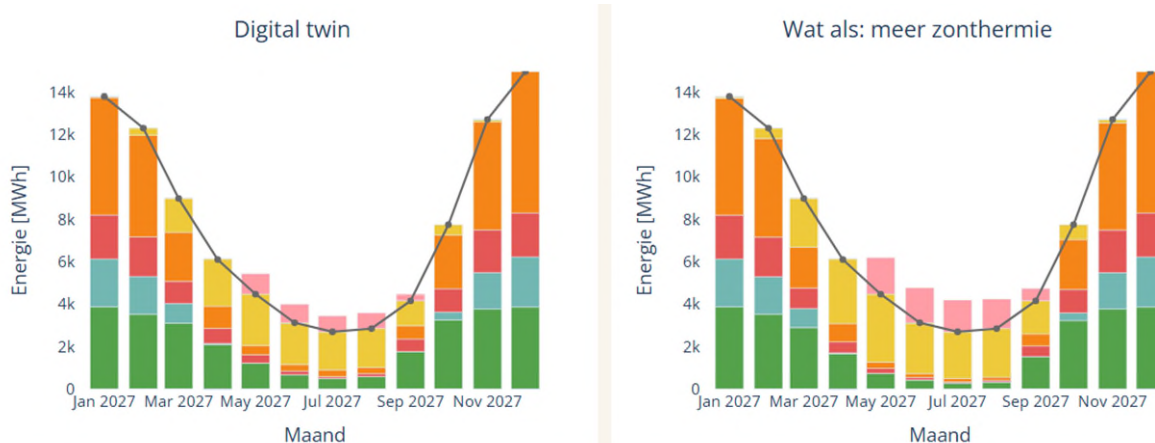
- In 2025 werd in scenario 1, 12 GWh zonthermie direct geleverd aan het warmtenet en 6 GWh opgeslagen in de seizoensopslag. In scenario 3 met meer zonthermie is dit 14 GWh directe levering en 10 GWh seizoensopslag.
- In 2027 is de warmtevraag groter: in scenario 1 was de verdeling 14 GWh zonthermie directe levering en 4 GWh zonthermie naar de seizoensopslag. Bij meer zonthermie wordt dit 18 GWh zonthermie directe levering en 7 GWh zonthermie naar de seizoensopslag.
- Volgens de berekening blijft deze verdeling verder tot 2030 bestaan. Het aandeel zonthermie in scenario 1 was 15% in de warmtelevering, in de situatie met meer zonthermie wordt dit 19%. Het grotere aandeel zonthermie komt deels in de plaats van inzet van restwarmte warmtepompen, en deels vervangt het de inzet van gasketels en WKK.
- Ondanks dat er jaarlijks 3 à 4 GWh meer zonthermie in de seizoensopslag wordt opgeslagen, neemt de warmteproductie van de warmtepompen uit seizoensopslag niet of zeer beperkt toe. Opvallend: in 2027, het jaar waarin de grootste inzet van gasketels is berekend – wordt de inzet vanuit seizoensopslag niet hoger. In de jaren daarna is de extra benutting slechts 0,5 GWh, terwijl er dus wel meer warmte wordt opgeslagen in de seizoensopslag. Uit verdere analyse van de berekeningsresultaten blijkt, dat de benutting van de

seizoensopslag verschuift van LT-warmte naar MT-warmte: de opgeslagen warmte in de LT-seizoensopslag wordt in het scenario met meer zonthermie helemaal niet meer benut.

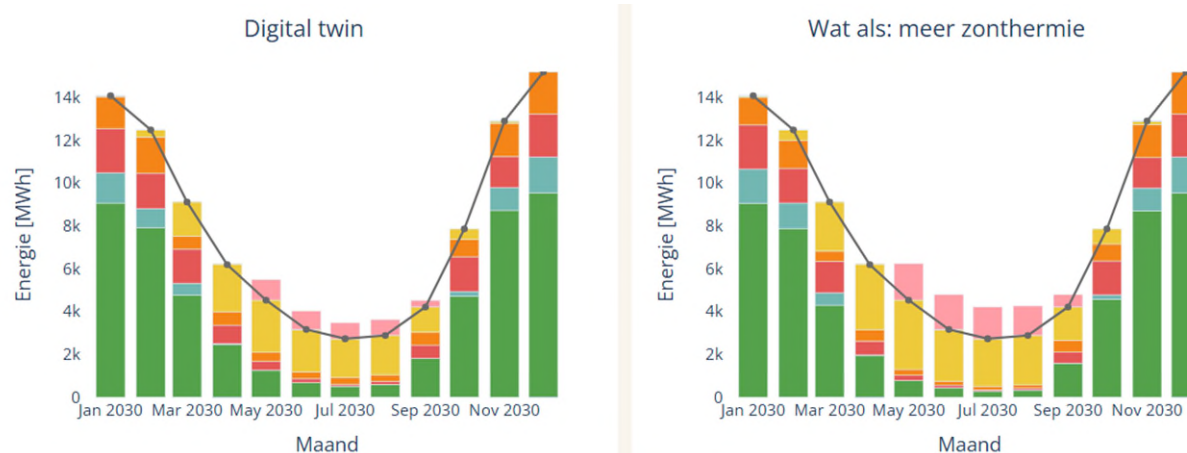
Figuur 24: Berekende warmteproductie per asset voor de jaren 2023-2030 voor scenario 1 'Digital twin' (links) en scenario 3 'Wat als: meer zonthermie' (rechts).



Figuur 25: Berekende warmteproductie per asset in 2027, voor scenario 1 'Digital twin' (links) en scenario 3 'Wat als: meer zonthermie' (rechts)



Figuur 26: Berekende warmteproductie per asset in 2030, voor scenario 1 'Digital twin' (links) en scenario 3 'Wat als: meer zonthermie' (rechts)



6 Evaluatie CO₂-emissiereductie

6.1 Doelstelling en bepalingwijze CO₂-emissiereductie

De multi-bronnenstrategie van WarmteStad heeft als doel om stapsgewijs toe te werken naar een groeiende inzet van duurzame bronnen. De specifieke doelstelling in het DEI+ project is een reductie van 15,7 kton CO₂-emissie in de eerste vijf jaar van de warmtecentrale.

Bepalingwijze CO₂-emissiereductie

WarmteStad rapporteert de CO₂-emissie jaarlijks in de duurzaamheidsrapportage. Voor de digital twin is dezelfde berekeningswijze aangehouden.

De CO₂-emissie wordt uitgedrukt in kg CO₂/GJ_{th}, en wordt berekend ten opzichte van de warmteafname door de gebruikers van het warmtenet. Voor de jaren 2023-2025 is de warmteafname door gebruikers overgenomen uit de duurzaamheidsrapportage. Voor de prognose 2026-2030 is rekening gehouden met hetzelfde warmteverlies in het warmtenet als in 2025.

De energie- en emissiefactoren voor de jaren 2023-2025 zijn overgenomen uit de duurzaamheidsrapportages van die jaren. Voor de jaren 2026-2030 is een geleidelijke afname van de emissiefactor van elektriciteit tot 25 kg/GJ_e aangenomen, gebaseerd op cijfers van de Klimaat- en Energieverkenning (PBL, 2025).

De reductie van CO₂-emissie is berekend ten opzichte van individuele gasketels (emissiefactor 58,5 kg/GJ_{th}).

6.2 Resultaat CO₂-emissiereductie

In Tabel 6-1 is het resultaat van de berekende CO₂-emissiereductie ten opzichte van gasketels opgenomen.

- **Meetgegevens en validatie digital twin:** De emissiereductie ten opzichte van individuele gasketels bereikte in de periode 2023-2025 een totaal van 3,1 kton CO₂. In de loop van de jaren is een stijgende lijn in emissiereductie te zien. In 2025 werd een reductie van 2,0 kton CO₂ ten opzichte van gasketels bereikt. De digital twin berekent voor deze periode een emissiereductie van in totaal 3,7 kton CO₂. Opgemerkt wordt, dat de digital twin de emissiereductie hoger berekent dan de meetwaarden.
- **Digital twin prognose:** op basis van de berekeningsresultaten voor de periode 2023-2030, is de verwachting dat de beoogde totale reductie van 15,7 kton CO₂-emissie bereikt wordt halverwege het jaar 2028. Rekening houdend met de hogere berekeningsresultaten van de digital twin ten opzichte van de meetgegevens, wordt verwacht dat in 2028 of 2029 de beoogde emissiereductie wordt behaald. Dit is binnen 5 à 6 jaar na ingebruikname van de warmtecentrale.
In 2030 wordt een jaarlijkse reductie van 7,5 kton CO₂-emissie verwacht: dit is 49% reductie ten opzichte van gasketels. Cumulatief wordt volgens de digital twin berekeningen een reductie van 30,8 kton CO₂-emissie bereikt ten opzichte van gasketels in de periode 2023-2030.
- **Rol van seizoensopslag:** De inzet van seizoensopslag resulteert op termijn in 0,5 kton lagere CO₂-emissie per jaar, zo blijkt uit de berekeningsresultaten van de jaren 2028-2030. In plaats van 49% reductie, wordt dan een reductie van 46% bereikt ten opzichte van gasketels.
- **Rol van meer zonthermie:** Een hogere productie van zonthermie resulteert op termijn in 0,6 kton lagere CO₂-emissie per jaar. De emissiereductie ten opzichte van gasketels is dan 53%.

Opmerking over de absolute doelstelling

Het doel voor de CO₂-emissiereductie is gesteld op 15,7 kton, en dit is een harde doelstelling. Deze doelstelling is bepaald op basis van een prognose van de warmtevraag en een dalende CO₂-emissie per eenheid warmteafname. Het doelbereik is daarmee mede afhankelijk van de gerealiseerde warmtevraag, die in de periode 2023-2025 achterbleef bij de oorspronkelijke prognose. Voor evaluatie van de duurzaamheid van de warmtecentrale in de toekomst, is vooral de CO₂-emissie per afgenomen eenheid warmte relevant.

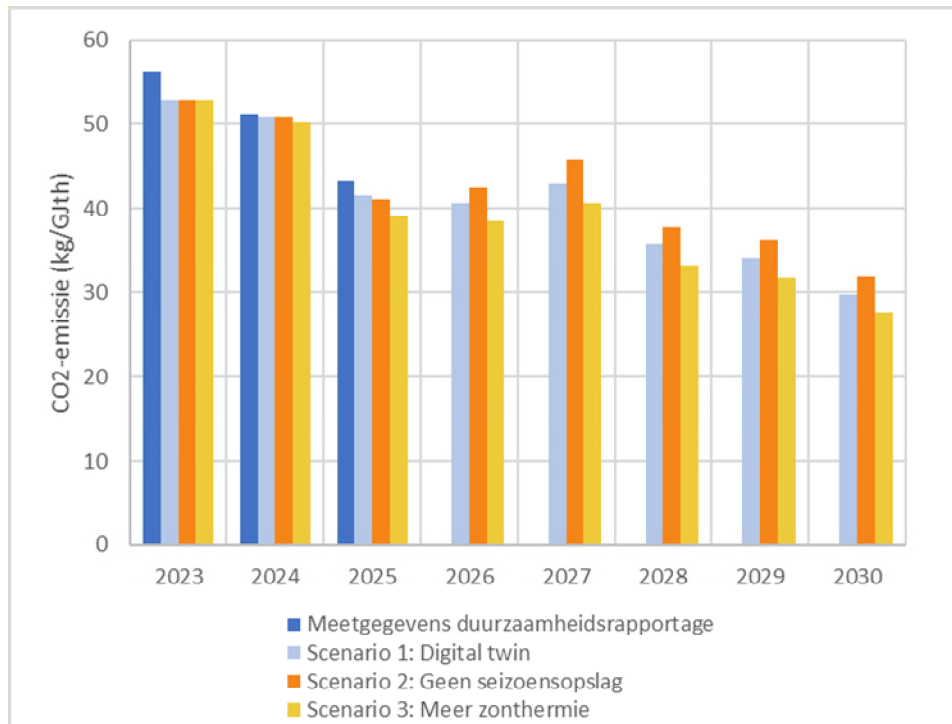
Resultaten CO₂-emissie per afgenomen eenheid warmte

De berekende waarden voor de CO₂-emissie per afgenomen eenheid warmte zijn in Tabel 6-1 gepresenteerd, en in Figuur 27 voor de scenario's weergegeven. Naar verwachting zal de dalende trend, die blijkt uit de meetwaarden voor 2023-2025, verder doorzetten. Volgens de prognose (scenario 1) wordt een CO₂-emissie van 30 kg/GJ_{th} in 2030 bereikt.

Tabel 6-1: CO₂-emissiereductie en overige prestatie indicatoren van de warmtecentrale 2023-2030.

Meetgegevens duurzaamheidsrapportage		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Aandeel hernieuwbare energie	%	0%	5%	22%					
Aandeel restwarmte	%	26%	21%	17%					
Aandeel WKK	%	19%	16%	17%					
Tot aandeel duurzaam	%	45%	42%	56%					
Primair fossiele energie-inzet	GJp/ GJth	1,11	1,12	0,86					
CO ₂ -emissie	kg/GJth	56,14	51,14	43,25					
CO ₂ -emissiereductie	kton	0,2	0,8	2,0					
CO ₂ -emissiereductie cumulatief	kton	0,2	1,1	3,1					
Scenario 1: Digital twin		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Aandeel hernieuwbare energie	%	0%	7%	23%	23%	20%	16%	16%	16%
Aandeel restwarmte	%	28%	23%	18%	20%	21%	33%	34%	38%
Aandeel WKK	%	19%	16%	16%	15%	13%	14%	13%	13%
Tot aandeel duurzaam	%	46%	46%	57%	59%	53%	63%	64%	68%
Primair fossiele energie-inzet	GJp/ GJth	1,05	1,01	0,83	0,80	0,85	0,71	0,69	0,63
CO ₂ -emissie	kg/GJth	52,85	50,84	41,51	40,62	42,96	35,86	34,17	29,81
CO ₂ -emissie reductie	kton	0,6	0,8	2,3	3,2	4,0	6,0	6,4	7,5
CO ₂ -emissiereductie cumulatief	kton	0,6	1,4	3,7	6,8	10,8	16,8	23,3	30,8
Scenario 2: Geen seizoensopslag		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Aandeel hernieuwbare energie	%	0%	7%	24%	21%	16%	16%	16%	17%
Aandeel restwarmte	%	28%	23%	17%	20%	20%	30%	32%	36%
Aandeel WKK	%	19%	16%	16%	15%	12%	13%	13%	13%
Tot aandeel duurzaam	%	46%	46%	58%	55%	49%	60%	61%	66%
Primair fossiele energie-inzet	GJp/ GJth	1,05	1,01	0,82	0,83	0,89	0,74	0,71	0,64
CO ₂ -emissie	kg/GJth	52,85	50,84	41,16	42,42	45,88	37,71	36,25	31,84
CO ₂ -emissie reductie	kton	0,6	0,8	2,3	2,8	3,3	5,5	5,9	7,0
CO ₂ -emissiereductie cumulatief	kton	0,6	1,4	3,7	6,6	9,8	15,3	21,2	28,2
Scenario 3: Meer zonthermie		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Aandeel hernieuwbare energie	%	0%	8%	27%	27%	24%	23%	23%	22%
Aandeel restwarmte	%	28%	23%	17%	19%	19%	29%	31%	35%
Aandeel WKK	%	19%	16%	16%	14%	12%	13%	13%	12%
Tot aandeel duurzaam	%	46%	47%	60%	61%	56%	65%	66%	70%
Primair fossiele energie-inzet	GJp/ GJth	1,05	1,00	0,78	0,76	0,80	0,67	0,65	0,59
CO ₂ -emissie	kg/GJth	52,85	50,29	39,15	38,49	40,72	33,30	31,71	27,55
CO ₂ -emissie reductie	kton	0,6	0,9	2,6	3,5	4,6	6,7	7,1	8,1
CO ₂ -emissiereductie cumulatief	kton	0,6	1,4	4,0	7,6	12,2	18,8	25,9	34,1

Figuur 27: Berekende CO₂-emissie per eenheid warmteafname voor de jaren 2023-2030.



7 Lessons learned

Door middel van het analyseren van de historische meetdata van de warmtecentrale Zernike, en het uitvoeren van modelberekeningen met de digitale tweeling hebben wij verschillende lessen geleerd. Bovendien is het proces om de digitale tweeling vorm te geven in samenwerking met WarmteStad leerzaam geweest. De lessen die wij hebben geleerd presenteren we in dit hoofdstuk, in de hoop dat in eventuele vervolgprojecten of soortgelijke projecten sommige hordes vermeden kunnen worden, andere hordes makkelijk genomen kunnen worden en onze successen worden herhaald.

Functioneren Warmtecentrale Zernike

Over het functioneren van de Warmtecentrale Zernike en de individuele assets hebben wij geleerd:

- De multi-bron strategie van WarmteStad behelst zonnewarmte, restwarmte, warmtepompen, elektriciteit en warmte uit WKK, elektriciteit van het elektriciteitsnet, warmte uit gasketels en in de toekomst zelfs biodieselketels. Dat wordt gecombineerd met warmteopslag voor de korte termijn in buffertanks en voor de lange termijn in seizoensopslag in de ondergrond. Deze strategie leidt tot veel keuzevrijheid waarmee flexibel kan worden ingespeeld op variërende marktontwikkelingen en duurzaamheidsdoelstellingen. De keerzijde hiervan is dat de aansturing snel complex wordt en zodoende veel vraagt van operators en ontwikkelaars.
- Uit analyse van meetgegevens blijkt dat de meeste assets naar behoren en naar specificaties werken.
- Wanneer het functioneren van de assets wordt geanalyseerd op een tijdschaal van uren dan zie we verschillende complexe verschijnselen optreden, zoals opstart- en afschakelverschijnselen, verschillen in prestaties tussen de verschillende assets van hetzelfde soort, etc. We hebben verschillende van dergelijke secundaire effecten inzichtelijk gemaakt met onze data-analyse, wat heeft geleid tot een meer gedetailleerd begrip van de warmtecentrale.
- Bij de analyse hebben we niet alle trends en secundaire effecten kunnen verklaren, zodat er voor WarmteStad verschillende vervolgvragen overblijven naar aanleiding van dit onderzoek. Dit betreft bijvoorbeeld de temperatuurafhankelijkheid van de COP van de warmtepompen, de variatie in de benutting van de restwarmte van de datacentra, en de beschikbare restwarmte van de WKK's als functie van de geproduceerde warmte.
- De gemeten waarden van de warmteproductie van het Zonthermie Dorkwerd zijn lager dan in het ontwerp werd beoogd. In 2025 is 44% minder zonthermie geleverd dan de ideale voorspelling van de warmteproductie door zonthermie op basis van de specificaties. Voor WarmteStad is een belangrijke vervolgvraag, hoe de warmtelevering vanuit zonthermie verder kan worden vergroot.
- De WKK's kunnen flexibel worden ingezet, bijvoorbeeld om de afname van stroom van het net te minimaliseren door de inzet van de warmtepompen zoveel mogelijk te volgen, of juist gericht op maximale teruglevering van stroom wanneer dat financieel aantrekkelijk is. Financiële optimalisatie wordt mogelijk door te handelen op korte termijn elektriciteitsmarkten, levering van netwerkdiensten op de balancerende markten, of netcongestie mitigatie. WarmteStad heeft dit in een vervolgtraject opgepakt.
- De seizoensopslag is opgenomen in de multi-bronnenstrategie om een grotere benutting van datacenter restwarmte en zonthermie te realiseren. De eerste laad- en ontladacyclus is doorlopen. Niet alle opgeslagen warmte in de seizoensopslag kon worden benut in het daaropvolgende winterseizoen. De resterende warmte in de seizoensopslag is deels nog beschikbaar voor volgende jaren en zal deels verloren gaan in de bodem. De functie van seizoensopslag bestaat niet alleen uit het zorgdragen van optimale benutting van duurzame bronnen op jaarbasis, maar heeft óók een bufferfunctie in een langjarig groeiscenario, om fluctuaties en onzekerheden in de ontwikkeling van de warmtevraag en het aanbod van duurzame bronnen op te vangen.
- In de duurzaamheidsrapportage wordt het aandeel hernieuwbare warmte en restwarmte bij de warmtelevering gerapporteerd. De geladen warmte in de seizoensopslag, die als voorraad naar volgende jaren wordt meegenomen, komt echter niet direct in de duurzaamheidsrapportage tot uiting.

Ontwikkeling warmtecentrale – ingebruikname assets en monitoring

Over het proces van ingebruikname van assets en monitoring hebben wij geleerd:

- Functioneel inregelen is nodig, voor elke toegevoegde asset opnieuw. Zodoende kan de werking van assets ten behoeve van modelkalibratie niet goed gekarakteriseerd worden op basis van de eerste periode van monitoringsdata.
- Het is aan te bevelen dataverzameling, export van data en datavalidatie zoveel mogelijk te automatiseren om arbeidsintensieve analyse en rapportage te beperken. Hiervoor zou bijvoorbeeld een dashboard met datavalidatie-service kunnen worden ingekocht of ontwikkeld.

Ontwikkeling digital twin, benutten ontwikkeling Warmtecentrale als 'living lab'

Gedurende het ontwikkelen van de digitale tweeling en de bijbehorende modellen in samenwerking met WarmteStad hebben we geleerd:

- Een digital twin voor de Warmtecentrale Zernike op uurbasis kan de werking van de warmtecentrale op functioneel niveau representeren. Om de samenhang tussen alle componenten van de Warmtecentrale Zernike goed te simuleren, is de digital twin specifiek voor de warmtecentrale ontwikkeld.
- Een digitale tweeling kan voor allerlei doeleinden worden gebruikt, zoals wat-als analyses, slimmer maken van de aansturing, of zelfs validatie van de werking van de daadwerkelijke warmtecentrale. Verschillende doelstellingen stellen verschillende eisen aan de digitale tweeling. Door de doelstelling in een vroeg stadium vast te stellen in samenwerking met alle betrokken partijen kan zo meer focus worden aangebracht in de implementatie ervan.
- Bij de opzet van de digitale tweeling van de multi-bronnenstrategie is een iteratief proces gevolgd van opzet digitale tweeling, verwerken van monitoringsdata, validatie, scenario studie en evaluatie. Door dit iteratieve proces is al tijdens de (intensieve) ontwikkelperiode van de warmtecentrale een check uitgevoerd op compleetheid van de monitoringsgegevens, is het functioneren van individuele assets geëvalueerd, en werden gerealiseerde wijzigingen ten opzichte van ontwerp specifiek geïdentificeerd.
- De verkenningen met de digital twin hebben een beeld gegeven van het functioneren van de warmtecentrale tot 2030, op basis van aangeleverde prognoses door WarmteStad van de ontwikkeling van de warmtevraag en de beschikbaarheid van duurzame bronnen. De resultaten bieden zicht op een dalend aandeel gasketels en een groeiende inzet van duurzame warmte. De resultaten bieden ook zicht op de rol van seizoensopslag, waarbij de seizoensopslag als meerjarige buffer dient in situaties dat de ontwikkeling van warmtevraag niet gelijk opgaat met de ontwikkeling van duurzame bronnen. Uit scenarioberekeningen hebben we daarnaast geleerd dat een grotere beschikbaarheid van duurzame bronnen niet leidt tot een evenredig grotere inzet van seizoensopslag: er is weliswaar meer warmte beschikbaar om de seizoensopslag te laden, maar de mogelijkheden voor warmte benutting uit seizoensopslag blijken de beperkende factor te zijn.

Evaluatie CO₂-emissiereductie Warmtecentrale Zernike

De specifieke doelstelling in het DEI+ project is een cumulatieve reductie van 15,7 kton CO₂-emissie in de eerste vijf jaar van de warmtecentrale. Op basis van de meetgegevens is de emissiereductie ten opzichte van individuele gasketels afgeleid. In de periode 2023-2025 bedroeg de gerealiseerde reductie 3,1 kton CO₂. Op basis van de resultaten van de digital twin is de verwachting dat de beoogde totale reductie van 15,7 kton CO₂-emissie bereikt wordt in 2028 of 2029. Dit is binnen 5 à 6 jaar na ingebruikname van de warmtecentrale, afhankelijk van de gerealiseerde warmtevraag en groei in beschikbare duurzame bronnen. In 2030 wordt een jaarlijkse reductie van 7,5 kton CO₂-emissie verwacht: dit is 49% reductie ten opzichte van gasketels.

Overall hebben we geleerd dat met de multi-bronnenstrategie van WarmteStad het mogelijk is om bij een warmtenet met een groeiend aantal afnemers, stapsgewijs toe te werken naar een groeiende inzet van duurzame bronnen, wat leidt tot een steeds grotere emissiereductie.

I Bijlage: bronnen

- AVM Duurzaamheidsrapportages 2023, 2024, en 2025. Bronhouder: WarmteStad Groningen.
- Ontwerpdocumenten assets. Bronhouder: WarmteStad Groningen.
- P&ID schema. Bronhouder: WarmteStad Groningen.
- Regeltechnisch ontwerp Bronhouder: WarmteStad Groningen.
- Effectenstudie open bodemenergiesysteem – WKO en MTO. IF Technology, 2021. Bronhouder: Warmtestad Groningen.
- Meteorologische gegevens, open data, periode 2023-2026. Bronhouder: KNMI.
- Klimaat- en Energieverkenning 2025. PBL.