

KWR 2025.104 | November 2025

**Potentie voor
verbeteren open
bodemenergiesystemen
door verhogen warme
brontemperatuur: twee
casussen in de
gemeente Utrecht**



Foto voorkant: Johan Bakker (2017) - CC BY-SA 3.0 IGO wikimedia.org

Samenwerkingspartners

KWR



*Financiële bijdrage
via UsET subsidie*

Colofon

Potentie voor verbeteren open bodemenergiesystemen door verhogen warme brontemperatuur: twee casussen in de gemeente Utrecht

KWR 2025.104 | November 2025

Opdrachtnummer

405095

Projectmanager

Broers, E.

Opdrachtgever

Gemeente Utrecht, Provincie Utrecht

Auteur(s)

Beernink, S. (KWR)
Kleinlugtenbelt, R. (IF Technology)
Baars, M. (IF Technology)

Kwaliteitsborger(s)

Hartog, N. (KWR)
Velvis, H. (IF Technology)

Verzonden naar

Gemeente Utrecht, Provincie Utrecht
Dit rapport is openbaar.

Met dank aan de volgende partijen voor hun medewerking en het aanleveren van gegevens

Woonin, Utrecht Science Park

Keywords OBES, grondwater, duurzame warmte, Utrecht

Jaar van publicatie
2025

Meer informatie
Stijn Beernink MSc
T +31306069607
E Stijn.Beernink@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

KWR

April 2025 ©

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

In opdracht van, en in samenwerking met, de gemeente Utrecht en de provincie Utrecht is een studie uitgevoerd door KWR en IF Technology om de potentie te verkennen van het verhogen van de warme brontemperatuur van Open Bodemenergie Systemen (OBES) in Utrecht. Specifieke aandacht was er hierbij voor de volgende aspecten: het beter in balans brengen van vraag en aanbod van (duurzame) elektriciteit, verdere reductie van de CO₂-emissie ten opzichte van conventionele OBES, doelmatiger gebruik van de ondergrondse ruimte en het verhelpen van het netto koude-overschot in de bodem. In de studie zijn drie type systemen beschouwd: een conventionele monovalente **OBES** (volledig elektrisch, regeneratie met oppervlaktewater (TEO) in zomer), **OBES+** (actief regenereren vanuit oppervlaktewater met warmtepomp (WP) en opslagtemperatuur warme bron 25°C) en **MT-OBES** (actief regenereren vanuit oppervlaktewater met WP en opslagtemperatuur warme bron 45 °C). Deze drie type systeemconcepten zijn technisch ontworpen en het technisch ontwerp en de regelstrategie is vertaald in een energiemodel dat de energiestromen door de verschillende componenten (zoals de WP, TEO en de bronnen) per uur berekent. Dit energiemodel is in Python gekoppeld aan een thermisch-hydraulisch ondergrondmodel om de actuele brontemperaturen per uur, en zo de interactie tussen het bovengrondse energie- en ondergrondmodel te kunnen doorrekenen. In deze studie is voor een periode van vijf jaar het functioneren van de drie systeemconcepten doorgerekend en geanalyseerd voor twee verschillende locaties: een locatie met nieuwbouwwoningen genaamd Zuilense Vecht met opslag in het eerste watervoerend pakket en voor een locatie met utiliteitsgebouwen op Utrecht Science Park met opslag in het tweede watervoerend pakket. Bij de vergelijking tussen OBES, OBES+ en MT-OBES is de grootte van de systeemcomponenten (zoals de warmtepomp en de regeneratiebron oppervlaktewater) daarbij (zoveel mogelijk) gelijk gehouden.

De resultaten laten zien dat met slechts kleine technische aanpassingen in het ontwerp, de warmtepomp bij OBES+ en MT-OBES actief ingezet kan worden om meer (20-38%) duurzame warmte op een hogere temperatuur te laden in de warme bron met beperkte extra inzet van stroomgebruik in de zomer. Bij OBES+ en MT-OBES zorgt de hogere ΔT die gerealiseerd kan worden bij deze concepten ervoor dat er met een kleiner debiet (minder stroomverbruik door pompen, minder brondoubletten nodig) dezelfde warmte kan worden geladen en geleverd. MT-OBES heeft daarnaast nog een bijkomend voordeel; een deel van de warmte kan direct worden geleverd (door lage koude brontemperatuur is inzet van de warmtepomp altijd deels nodig), wat in de winter tot een sterkere vermindering van het stroomverbruik voor de warmtepomp leidt (7-21%) en dus een verlaging van de CO₂-emissies (7-22%). Echter, het totale jaarlijkse stroomverbruik neemt toe (24-35%) doordat een deel van de warmte (en koude) verloren gaat in de bodem en met de huidige stroommix (2024, gemiddeld 0.202 kg CO₂/kWh_e) zorgt dat er ook voor dat er over het gehele jaar een stijging is van de totale CO₂-emissies (11-12%). Echter, met de verwachte verdere verduurzaming van de stroommix in de toekomst en slimmere aansturing is het te verwachten dat die emissies sterk gaan afnemen. Voor beide onderzochte locaties is er een sterk financieel voordeel bij het gebruik van hogere brontemperaturen doordat het aantal benodigde bronnen afneemt (kleinere debieten nodig door hogere ΔT). Voor Zuilense Vecht leidt dit ook tot een netto reductie op de investeringskosten, de situatie bij USP is complexer omdat dit gaat om een reeds bestaand systeem. Met het verhogen van de warme brontemperatuur wordt de ondergrond doelmatiger gebruikt doordat met minder bronnen, een kleiner opslagvolume en minder hydraulische beïnvloeding hetzelfde energierendement kan worden behaald. Initieel is het opgewarmde volume ondergrond ook kleiner (kleinere thermische straal van de bel), het is op basis van deze studie onduidelijk hoe over de operationele duur van het systeem (bijv. 30 jaar) de horizontale temperatuursverandering zich ontwikkelen bij verhoogde warme brontemperatuur ten opzichte van conventionele OBES. Het doelmatigere gebruik van de ondergrond en de potentie tot vergrootte CO₂-emissie afname en een kleiner aansluitvermogen in de winter dragen bij aan de vergunbaarheid van verhoogde warme brontemperaturen. Echter, bij hogere opslagtemperaturen zijn temperatuurseffecten naar omliggende systemen nader te onderzoeken en is het

waarschijnlijk(er) dat het open bodemenergiesysteem geen energiebalans kan behalen (neigt naar warmteoverschot).

Op basis van de resultaten en inzichten verkregen in deze studie zijn een aantal uitgangspunten en onzekerheden geconstateerd die verder onderzocht kunnen worden om de meerwaarde van verhoogde warme brontemperatuur te vergroten:

- Optimalisatie regelstrategie: regeling is nu vraaggestuurd, door beter te sturen op CO₂- en prijsverschillen op uurbasis (slimmere regeling) kan de meerwaarde (veel) groter zijn.
- Optimalisatie ontwerp: De dimensionering van de verschillende onderdelen is constant gehouden. In sommige situaties kunnen componenten kleiner worden uitgelegd (reductie kosten en elektriciteitsverbruik) of zou het toepassen van grotere componenten tot een beter energierendement kunnen leiden (bijv. grotere regeneratiecapaciteit).
- Toepassen meer-traps warmtepomp: door verdamper en condensers in serie met elkaar te plaatsen, zal het rendement van de warmtepomp (COP) bij een hogere brontemperatuur toenemen. Bij OBES+ en MT-OBES zal het elektriciteitsverbruik bij toepassen van een meer-traps warmtepomp dus dalen.
- Injectietemperatuur koude bron: bij het toepassen van hogere warme brontemperatuur zou mogelijk de temperatuur van de koude bron ook verhoogd kunnen worden en daarmee zou het rendement van de warmtepomp toenemen. Echter, voor het waarborgen van een bepaalde minimale ΔT en dus het aantal benodigde bronnen is een zo laag mogelijke injectietemperatuur in de koude bron wenselijk. Op dit moment is het onduidelijk onder welke condities de koude brontemperatuur verhoogd zou kunnen worden.
- Laden extra (duurzame en goedkope) warmte in warme bron in zomer: de resultaten van deze studie laten zien dat de temperatuur van de warme bron bij het MT-OBES scenario relatief snel afneemt tijdens het ontladen, en daarmee de meerwaarde van directe warmtelevering beperkt is. Door extra warmte te laden in de zomer (met regeneratie en de warmtepomp) zou de temperatuurafname tijdens het ontladen kunnen afnemen en daarmee de CO₂ reductie verder af kunnen nemen. Echter gaat dit mogelijk gepaard met een grotere thermische onbalans en verhoogde (jaarlijkse) stroomverbruik.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Colofon	3
Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Aanleiding	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Locaties	9
1.3 Doelstelling	9
2 Aanpak en methode	10
2.1 Beschrijving werkwijze en uitvoering project	10
2.2 Algemene uitgangspunten	11
2.2.1 Uurlijkse CO ₂ -emissiefactor elektriciteit	11
2.2.2 Uurlijks prijsprofiel elektriciteit	11
2.3 Beschrijving van de locaties	12
2.3.1 Locatie Zuilense Vecht	12
2.3.2 Locatie Utrecht Science Park	15
2.4 Beschrijving technische installatie en werking energiesysteem	18
3 Resultaten	20
3.1 Zuilense Vecht	20
3.1.1 Inzet en functioneren energiesysteem	20
3.1.2 Prestaties en dimensionering bronnen	20
3.1.3 Ruimtegebruik ondergrond en thermische effecten	23
3.1.4 Elektriciteitsverbruik en duurzaamheid	24
3.1.5 Investerings- en exploitatiekosten	27
3.2 Utrecht Science Park	30
3.2.1 Inzet en functioneren energiesysteem	30
3.2.2 Prestaties en dimensionering bronnen	30
3.2.3 Ruimtegebruik ondergrond en thermische effecten	33
3.2.4 Elektriciteitsverbruik en duurzaamheid	34
3.2.5 Investerings- en exploitatiekosten	37
4 Discussie	39
4.1 Temperatuurafname in warme bron bepaald door opslagcondities	39
4.2 Ruimtebesparing in de ondergrond	40
4.3 Netcongestie en CO ₂ besparing	41
4.4 Technische haalbaarheid	42

4.5	Financiële haalbaarheid	44
4.6	Vergunbaarheid verhoogde warme brontemperatuur	44
4.7	Reflectie potentie verhoogde opslagtemperaturen bij OBES in de praktijk in Utrecht	48
5	Conclusies	49
6	Referenties	51
I	Uitgangspunten gebouw en energiesysteem	52
II	Technische installatie en regelstrategie Zuilense Vecht	58
III	Technische installatie en regelstrategie Utrecht Science Park	66
IV	Berekeningsmethode energiestromen, vermogens en debieten.	72
V	Hydro-thermisch model: opzet, uitgangspunten en doorsnedes	75

1 Aanleiding

1.1 Achtergrond

Voor de verduurzaming van de energievoorziening van woningen en gebouwen biedt de ondergrond van de gemeente Utrecht potentie om warmte en koude op te slaan middels open bodemenergiesystemen (OBES). Binnen de gemeente Utrecht zijn er momenteel circa 90 conventionele OBES systemen actief die warmte met een vergunde maximale infiltratietemperatuur van 25°C op mogen slaan. Op een toename van het aantal OBES wordt geanticipeerd als onderdeel van de energietransitie. De opslag van warmte bij hogere temperaturen dan gebruikelijk wordt gehaald bij OBES (gewoonlijk bij 14-17 °C) kan mogelijk helpen bij een aantal uitdagingen:

1. **Beperkte ruimte in de ondergrond.** In bepaalde gebieden is de beschikbare ondergrondse ruimte voor nieuwe OBES reeds beperkt. Bij hogere infiltratietemperaturen is het benodigde bodemvolume voor de opslag van een bepaalde hoeveelheid warmte kleiner.
2. **Beter in balans brengen vraag en aanbod.** OBES systemen dragen door de opslag van warmte op een vrij constante temperatuur al sterk bij aan een verhoogde COP voor een warmtepomp ten opzichte van luchtwarmtepompen. Maar de grootste vraag naar elektriciteit is nog steeds in de winter en heeft dus invloed op het benodigde elektrische aansluitvermogen. Om netcongestie verder te beperken en vraag en aanbod beter in balans te brengen, kan het helpen om in de zomer de warme bron van een OBES op een hogere temperatuur te laden, zodat een lokaal overschot aan elektriciteit ook lokaal kan worden ingezet door deze om te zetten in warmte. Omgekeerd leidt een hogere opslagtemperatuur in de winter mogelijk tot een hogere efficiëntie (COP) van de warmtepomp waardoor het elektrisch (piek)vermogen van de warmtepomp afneemt. Afhankelijk van de opslagtemperatuur en de temperatuur van het warmte-afgiftesysteem kan mogelijk ook op directe wijze warmte worden geleverd waardoor de warmtepomp niet hoeft te worden ingezet.
3. **Reductie CO₂-emissie.** De gebruikte elektriciteit bij inzet van de warmtepomp op het moment van de warmtevraag in de winter is bij conventionele OBES vaak voor een groter deel “grijs”. Het verhogen van de temperatuur en dus het (deels) verplaatsen van elektriciteitsgebruik van de winter naar de zomer leidt potentieel tot de benutting van een groter aandeel duurzame stroom. Ook kan hiermee potentieel een hogere CO₂ besparing worden gehaald omdat duurzame elektriciteit efficiënter binnen de eigen organisatie/eigen gebouw kan worden benut.
4. **Netto koude-overschot.** Veel bestaande gebouwen met OBES als energievoorziening hebben een grotere warmte- dan koudevraag. Hierdoor kan er een netto koude-overschot in de bodem ontstaan, wat potentieel een negatieve invloed heeft op de geschiktheid van de bodem voor verwarming van omliggende (toekomstige) OBES. Het verhogen van de temperatuur in de warme bron is in dit geval gunstig omdat bij gelijkblijvende infiltratievolumes er netto meer warmte geïnfiltreerd wordt.

In dit onderzoek zijn de potentie, randvoorwaarden en aandachtspunten beschouwd voor het verhogen van de warme brontemperatuur voor twee locaties in de gemeente Utrecht. Middels modelsimulaties zijn voor deze locaties de mogelijkheid getest om de huidige vergunningsruimte tot 25°C beter te benutten (OBES+), aangezien uit monitoringsgegevens van de Regionale Uitvoeringsdienst Utrecht (RUD) blijkt dat de infiltratietemperaturen van bestaande OBES hier veelal ruim onder blijven. Daarnaast is het hanteren van infiltratietemperaturen tot maximaal 45°C (MT-OBES) onderzocht omdat voor gebouwen met een lage afgiftetemperatuur (zoals nieuwbouw) deze temperatuur voldoende hoog is voor directe verwarming en (nagenoeg volledig) gebruik kan worden gemaakt van materialen die standaard worden toegepast bij OBES. Het functioneren van deze twee typen systemen met hogere opslagtemperaturen zijn vergeleken met dat van een conventioneel OBES met lagere maximale opslagtemperatuur.

1.2 Locaties

Voor dit onderzoek zijn in overleg met de gemeente Utrecht twee locaties geselecteerd waar momenteel OBES realisatie actueel is. Om bredere kennis op te doen over de voor- en nadelen van OBES+ en MT-OBES ten opzichte van OBES is gezocht naar locaties waar de diepte van de opslag en de status van de OBES ontwikkeling verschilt. De twee geselecteerde locaties zijn:

1. Zuilense Vecht: dit is een nieuwbouwproject, welke nog niet gerealiseerd is. Het eerste watervoerende pakket is beschikbaar voor warmte en koude opslag.
2. Utrecht Science Park: dit is een project waarbij een deel van de gebouwen en installatie reeds aanwezig is, en een deel in ontwikkeling is. Warmte en koude wordt opgeslagen in het tweede watervoerend pakket.

Voor beide locaties is berekend hoe met de verschillende systeemconcepten (conventionele OBES, OBES+ en MT-OBES) kan worden voldaan aan de vraag naar ruimteverwarming en -koeling plus warm tapwater (indien relevant), waarbij uitgegaan wordt van een “all-electric monovalente” oplossing met OBES en warmtepompen. De verhoogde warme brontemperatuur wordt verkregen door de inzet van de warmtepompen in de zomer (power-to-heat). Bij OBES+ en MT-OBES zal door het toepassen van power-to-heat het totale elektriciteitsverbruik toenemen ten opzichte van conventionele OBES. Een deel van de opgeslagen warmte in de zomer zal immers in de winter weer verloren zijn gegaan door verliezen in de bodem. Elektriciteit in de zomer heeft door de toenemende productie van duurzame elektriciteit (met name door de zon) een lagere kostprijs en CO₂-emissie factor dan elektriciteit in de winter. Beide locaties zijn in meer detail toegelicht in hoofdstuk 2.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek was het vaststellen welke positieve dan wel negatieve impact het verhogen van de warme brontemperatuur biedt ten opzichte van standaard OBES bij de twee geselecteerde locaties voor de volgende punten:

1. Vermogensbesparing (elektrisch aansluitvermogen)
2. Energiebesparing (elektriciteitsverbruik)
3. Ruimtebesparing in de ondergrond
4. CO₂-besparing

Aanvullend is ook inzicht gegeven in:

5. Hoe het installatieconcept eruitziet en wat de aandachtspunten zijn ten opzichte van een standaard OBES-oplossing
6. De investeringen en baten van het systeem
7. In de vergunbaarheid van de MT-OBES

2 Aanpak en methode

2.1 Beschrijving werkwijze en uitvoering project

Het onderzoek is uitgevoerd in vier onderdelen, uitgevoerd door IF Technology en/of KWR.

1. Verzamelen uitgangspunten energiesysteem voor de twee locaties (IF & KWR)

Om de uitgangspunten voor het energiesysteem van de twee casussen te verzamelen hebben een aantal overleggen plaatsgevonden waaraan de uitvoerende partijen KWR en IF Technology, de opdrachtgevende partijen gemeente Utrecht en de provincie Utrecht en de relevante casus-specifieke partij deelnamen (Tabel 2-1). Voor het startoverleg is per mail een inventarisatie gedaan van de belangrijkste uitgangspunten zoals energievraag(verdeling), benodigde vermogens, manier van warmte- en koude-afgifte en bijbehorende stooklijn, projectomgeving en mogelijke componenten van het energiesysteem.

Tabel 2-1 Per locatie de betrokken partijen en de periode waarin het onderzoek is uitgevoerd.

Locaties	Partijen aangesloten	Startoverleg – eindoverleg
Zuilen Vecht	Woonin, Gemeente Utrecht, Provincie Utrecht	13 januari 2025 – 17 juni 2025
Utrecht Science Park	Utrecht University (campus & facilities), Gemeente Utrecht, Provincie Utrecht	27 januari 2025 – 15 juli 2025

2. Opstellen technische installatie en energieconcepten (IF & KWR)

IF Technology heeft op basis van de vastgestelde uitgangspunten een technisch ontwerp en regelstrategie gemaakt voor de drie systeemconcepten (OBES, OBES+ en MT-OBES) voor beide locaties. De technische installatie en regelstrategie is daarna door KWR vertaald in een energiemodel en in Python gekoppeld aan een ondergrondmodel.

3. Modelleren prestaties systeem voor verschillende concepten (KWR)

Het gekoppelde model is door KWR ingezet om de prestaties van de drie ontworpen systeemconcepten bij beide locaties per uur door te rekenen voor een tijdsduur van vijf jaar.

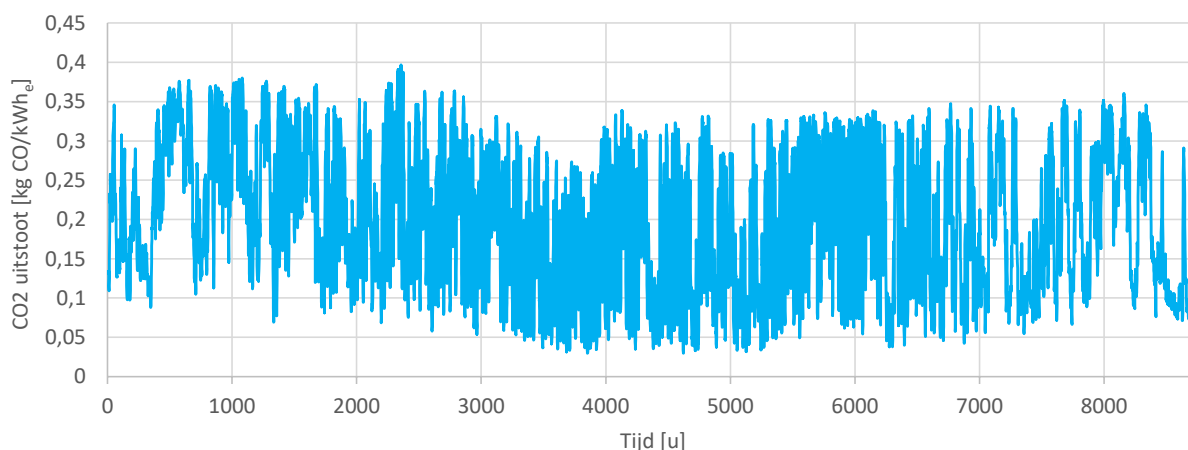
4. Analyse en beschrijving prestaties systeem voor verschillende concepten (KWR & IF)

De uitkomsten van het gekoppelde model (energiestromen, prestaties bronnen) zijn geanalyseerd en beschreven door KWR en IF Technology.

2.2 Algemene uitgangspunten

2.2.1 Uurlijkse CO₂-emissiefactor elektriciteit

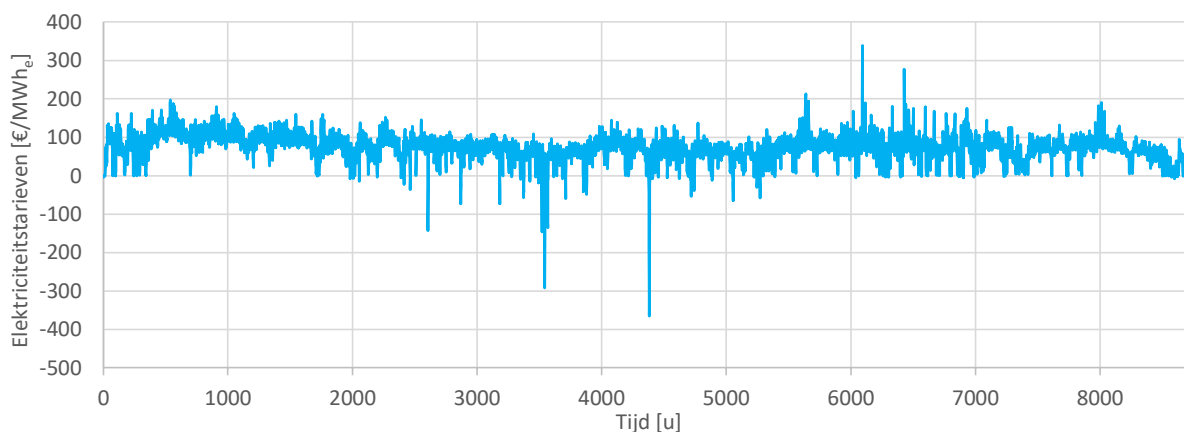
In de duurzaamheidsanalyse (zie paragrafen 3.1.4 en 3.2.4) wordt gerekend met een uurlijkse CO₂-emissiefactor. Hiervoor is een profiel voor 2023 gehanteerd (ned.nl, 2023). Dit profiel heeft een gemiddelde waarde van 0,215 kg CO₂/kWh_e. Doordat de elektriciteitsvoorziening in Nederland steeds verder verduurzaamt, daalt de CO₂ uitstoot elk jaar licht. In deze studie is gebruik gemaakt van de meest recent beschikbare gemiddelde waarde (2024: 0,202 CO₂/kWh_e). Om de koppeling met het klimaatjaar te behouden is het profiel voor 2023 gebruikt. Deze is wel geschaald naar de gemiddelde waarde voor 2024. De CO₂ emissie per kWh_e stroomverbruik is gegeven per uur in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Gehanteerde uurlijkse CO₂-emissie elektriciteit.

2.2.2 Uurlijks prijsprofiel elektriciteit

In de financiële analyse (zie paragrafen 3.1.5 en 3.2.5) wordt gerekend met prijsprofielen. In de basis is hierbij uitgegaan van de uurlijkse tarieven (day-ahead) voor 2023. De tarieven per uur zijn, in overleg met gemeente Utrecht, geschaald zodat de gemiddelde prijs 70 €/MWh_e bedraagt (exclusief BTW en energiebelasting) (Figuur 2-2). Hoewel de prijs momenteel hoger ligt, is de verwachting dat de komende jaren de gemiddelde prijs zal dalen (PBL, 2024).



Figuur 2-2 Gehanteerde uurlijkse elektriciteitsprijzen (excl. BTW en energiebelasting).

2.3 Beschrijving van de locaties

2.3.1 Locatie Zuilense Vecht

Zuilense Vecht is een nieuwbouwontwikkeling bestaande uit 31 grondgebonden woningen en 234 appartementen in het noorden van Utrecht (Figuur 2-3). Het betreft een ontwikkeling op het sportpark Zuilense Vecht in Utrecht, waarvan circa 100 woningen door woningcorporatie Woonin worden ontwikkeld.

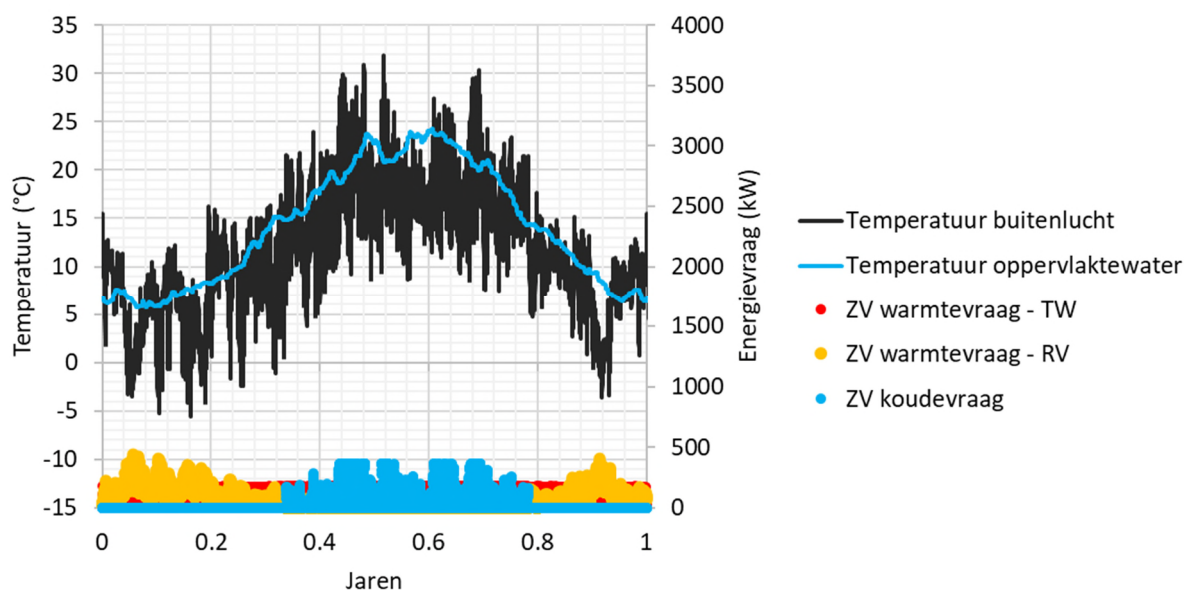


Figuur 2-3 Projectlocatie en -ontwikkeling Zuilense Vecht in Utrecht, langs het Amsterdam Rijnkanaal.

In overleg met de gemeente Utrecht en Woonin zijn de uitgangspunten van het energiesysteem vastgesteld. In bijlage I zijn de uitgangspunten en methode om de energieprofielen op te stellen beschreven. De warmte- en koudevraag zijn samengevat in Tabel 2-2. De totale warmtevraag, bestaande uit ruimteverwarming en tapwaterverwarming, is 915 MWh_{th} per jaar. De totale koudevraag is 275 MWh_{th}. Om voor een thermische balans te zorgen moet via regeneratie dus warmte ingevangen worden. De verschillende profielen voor vraag en temperatuur zijn weergegeven in Figuur 2-4. De warmte- en koudevraag is op basis van de buitenluchttemperatuur verdeeld over het jaar (bij <14 °C buitentemperatuur is er een warmtevraag, bij >18 °C buitentemperatuur is er een koudevraag, zie bijlage I).

Tabel 2-2 | Totale energievraag voor Zuilense Vecht

		Grondgebonden woningen	Appartementen	Totaal
Ruimteverwarming – Vermogen*	[kW _{th}]	79	388	467
Ruimteverwarming – Vraag	[MWh _{th}]	93	456	549
Warm tapwater – Vermogen	[kW _{th}]	31	152	183
Warm tapwater – Vraag	[MWh _{th}]	62	304	366
Koeling – Vermogen	[kW _{th}]	62	304	366
Koeling – Vraag	[MWh _{th}]	47	228	275



Figuur 2-4 Oppervlaktewatertemperatuur en energievraag per uur die zijn gebruikt als input voor de simulaties voor Zuilense Vecht.

Alle componenten van het energiesysteem van Zuilense Vecht is schematisch weergegeven in Figuur 2-5. Er wordt gebruik gemaakt van een open bodemenergiesysteem (OBES), in combinatie met de winning van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), in dit geval het Amsterdam-Rijnkanaal. Het energiesysteem heeft twee warmtepompen. Een lage temperatuur warmtepomp levert warmte voor ruimteverwarming (op 30 °C) en een hoge temperatuurwarmtepomp levert warmte voor warm tapwater (op 60 °C), zie Tabel 2-3 voor de exacte uitgangspunten. Koeling vindt direct plaats uit de OBES bron en uit het koelvermogen van de verdamper (indien deze aanwezig is). In de zomer wordt warmte ingevangen met TEO en afhankelijk van het systeemconcept (zie paragraaf 2.4) wordt de warmtepomp ingezet (power-to-heat) om warmte op te slaan. Er is een collectief systeem met één technische ruimte. Vanuit de technische ruimte wordt warmte en koude via een *4-pipes change over net* (geschikt voor zowel koeling en verwarming) naar alle gebruikers getransporteerd (Figuur 2-5). Twee van deze leidingen zijn voor het transport van warm tapwater. De andere twee worden afwisselend gebruikt voor ruimteverwarming en koeling. De demarcatie in deze studie is tot en met de technische ruimte, het 4-pipes change over net valt buiten de demarcatie en wordt dus verder niet behandeld. De gehanteerde uitgangspunten voor het afgiftesysteem zijn samengevat in Tabel 2-3.

Tabel 2-3 | Uitgangspunten afgiftesysteem en energietransport Zuilense Vecht

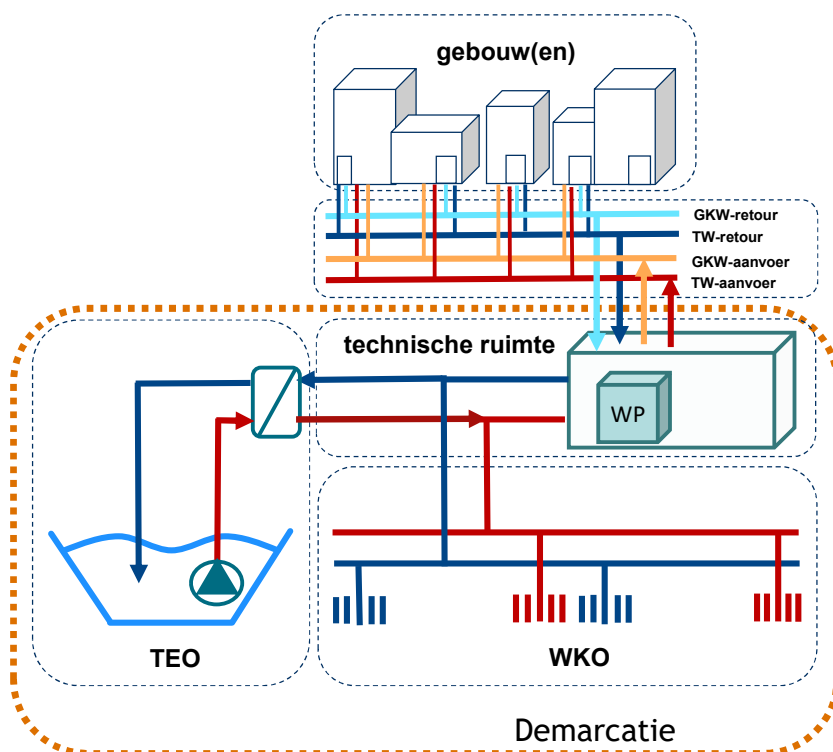
Type	Waarde
Temperatuurstraject ruimtekoeling	18 / 21 °C
Temperatuurstraject ruimteverwarming	30 / 25 °C
Temperatuurstraject warm tapwater	60 / 35 °C
*Warmteverlies transport	10%

De grootte van de verschillende componenten (bronnen, warmtepomp) van het energiesysteem zijn ingeschat om als randvoorwaarden mee te geven aan de simulaties (Tabel 2-4). Het maximale debiet van de TEO en de OBES bronnen is zodanig gekozen dat het standaard OBES scenario op jaarbasis energetisch ongeveer in balans draait. Voor de locatie Zuilense Vecht resulteert dit in een debiet (Q) van 50 m³/u van zowel de bronnen en de TEO-installatie. Voor de TEO-installatie is de ΔT tijdens warmteonttrekking vastgezet op 5 °C, het maximale vermogen ($Q \cdot \Delta T$) uit de TEO is daarmee circa 290 kW.

Tabel 2-4 | Uitgangspunten energiesysteem componenten Zuilense Vecht

Type	Waarde
TEO ΔT	5 °C
TEO minimale oppervlaktewatertemperatuur	14 °C

TEO maximaal debiet	50 m ³ /u
OBES bronnen maximaal debiet	50 m ³ /u



Figuur 2-5 Toegepaste basis systeemconcept en demarcatie Zuilense Vecht.

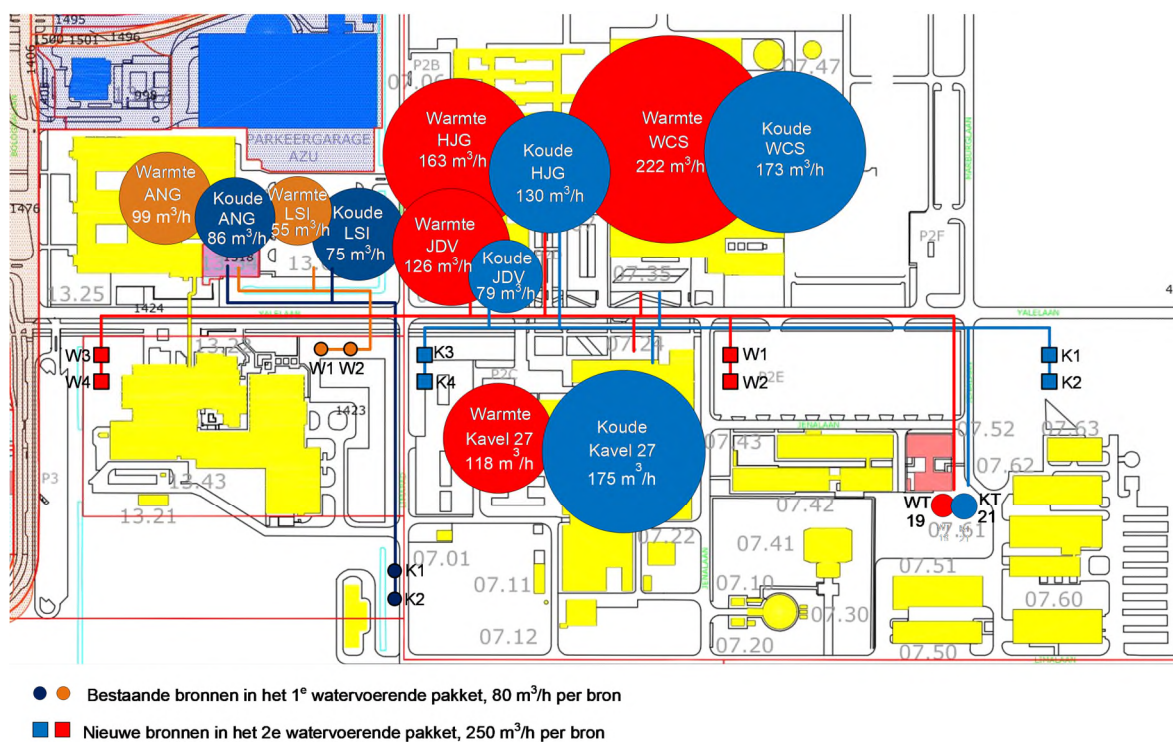
De opbouw van de ondergrond is in kaart gebracht op basis van eerder uitgevoerde studies in Utrecht en openbare regionale informatie uit DINOLOket. Een schematische weergave van de bodemopbouw, en het putontwerp, is gegeven in Tabel 2-5. Bij locatie Zuilense Vecht worden de putfilters geplaatst in het eerste watervoerende pakket (11-39m beneden maaiveld). Het maximale debiet in het eerste watervoerend pakket in Utrecht is ingeschat op 50 tot 80 m³/u. Op de projectlocatie is het eerste watervoerend pakket wat dunner dan in het centrumgebied. In deze studie is een maximaal debiet aangehouden van 50 m³/u.

Tabel 2-5 | Bodemopbouw Zuilense Vecht en geohydrologische eigenschappen

Diepte [m-mv]	Lithologie	Type laag	K _h / K _v (m/d)	Putontwerp
0 – 11	klei, matig fijn tot matig grof zand en veen	deklaag	0,001 / 0,0002	putbuis
11 – 39	matig fijn tot uiterst grof zand, zwak siltig en soms grindig	1 ^e watervoerend pakket	50 / 10	putfilter
39 – 41	klei	1 ^e scheidende laag	0,001 / 0,0002	zandvang
41 - 60	klei, leem en fijn zand	1 ^e gemengde laag	0,001 / 0,0002	-
60 – 140	matig fijn tot zeer grof zand, soms een lokale kleilaag	2 ^e watervoerend pakket	30 / 6	-
> 140	klei en fijn zand	hydrologische basis	0,001 / 0,0002	-

2.3.2 Locatie Utrecht Science Park

Voor deze locatie is specifiek het Diergeneeskundecluster beschouwd, welke in het zuidoosten ligt van Utrecht Science Park (USP). In Figuur 2-6 is een overzicht gegeven van de ligging van de diverse gebouwen, de warmte- en koudevraag en bestaande en geplande OBES systemen. In dit cluster ligt een bestaand OBES systeem in het eerste watervoerend pakket bestaande uit twee doubletten. Momenteel wordt gewerkt aan een nieuw OBES systeem in het tweede watervoerend pakket, waarop verschillende gebouwen worden aangesloten. Het Jeannette Donker-Voetgebouw (JDV), H. Jakobgebouw (HJG), W.C Schimmelgebouw (WCS) zijn bestaande universiteitsgebouwen. Deze gebouwen zijn in 2025 voorzien van een bodemenergiecentrale en een OBES-afleverset die deels in bedrijf zijn genomen. Momenteel wordt gewerkt aan de stroomvoorziening en verdere integratie van de bodemenergiecentrales. De gebouwen Tolakker en Kavel 27 zijn nieuwbouwprojecten die zijn voorbereid op toekomstige aansluiting op het open bodemenergiesysteem. Momenteel zijn in totaal vier doubletten voorzien voor het OBES-systeem in het tweede watervoerend pakket, daarvan zijn twee doubletten op dit moment reeds gerealiseerd (W1, W2, K1, K2, vierkante symbolen in Figuur 2-6).

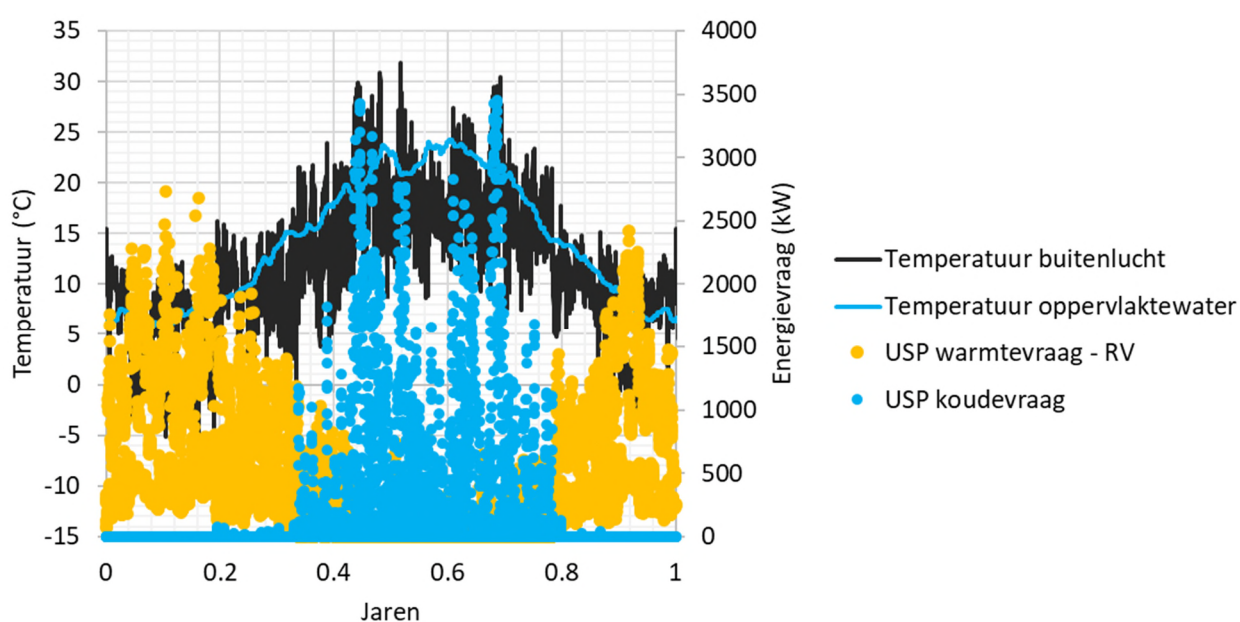


Figuur 2-6 Projectlocatie Diergeneeskundecluster op het Utrecht Sciencepark.

Op basis van een studie die eerder is uitgevoerd door IF Technology (Van der Werff & Velvis, 2021), en in overleg met Universiteit Utrecht, zijn de uitgangspunten bepaald voor de benodigde vermogens voor verwarmen en koelen (Tabel 2-6). In bijlage I zijn de uitgangspunten en methode om de energieprofielen op te stellen beschreven. In deze studie is gefocust op het deel van energieafgifte dat geleverd wordt met de luchtbehandelingskasten (LBK's), welke circa de helft van de totale warmte- en koudevraag leveren, omdat hiermee warmte op een relatief lage temperatuur en koeling op een relatief hoge temperatuur kan worden geleverd. De warmte- en koudevraag die met de LBK's geleverd worden zijn samengevat in Tabel 2-6. De warmtevraag geleverd met de LBK's is 3.538 MWh_{th} per jaar. De totale koudevraag geleverd met de LBK's bedraagt 1.425 MWh_{th}. Om voor balans te zorgen moet via regeneratie dus warmte ingevangen worden. De verschillende profielen voor energievraag en temperatuur zijn gegeven in Figuur 2-7.

Tabel 2-6 | Energievraag voor USP

Gebouw	Verwarmen met LBK's		Koelen met LBK's	
	Vermogen [kW _{th}]	Vraag [MWh _{th}]	Vermogen [kW _{th}]	Vraag [MWh _{th}]
Jeanette Donker-Voetgebouw	800	569	544	277
H. Jakobgebouw	645	982	900	395
W.C. Schimmelgebouw	655	997	800	351
Tolakker	145	221	223	90
Kavel 27	1.080	769	1.215	312
Totaal	3.157	3.538	3.682	1.425



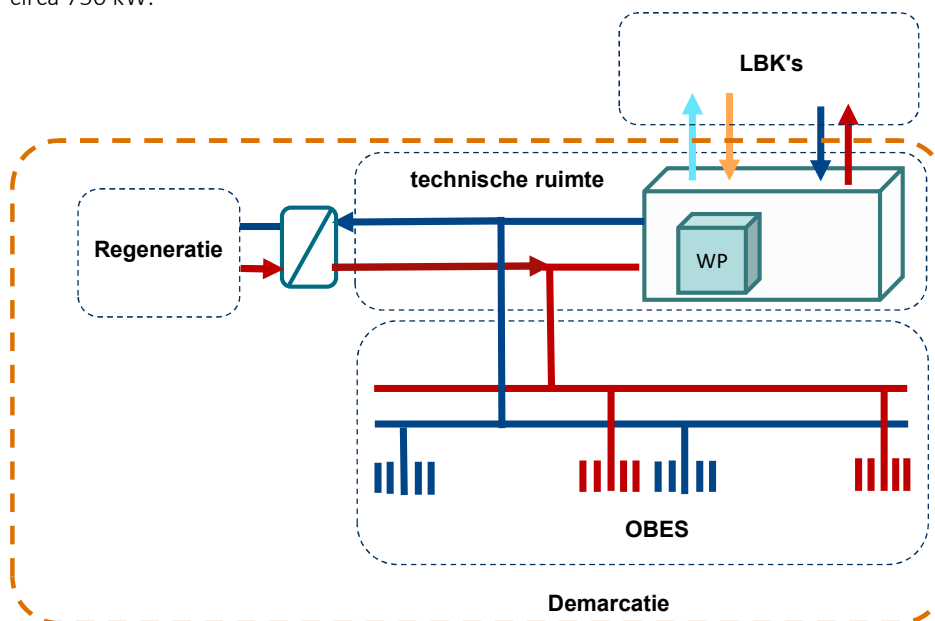
Figuur 2-7 Gebruikte input en uitgangspunten voor de doorrekening van het energiesysteem voor locatie Utrecht Science Park

Een overzicht van de componenten van het energiesysteem is weergegeven in Figuur 2-8. Er wordt gebruik gemaakt van een open bodemenergiesysteem (OBES). In het model is aangenomen dat geregenereerd wordt met een TEO systeem uit de Kromme Rijn. Nota bene, lopende het project is in overleg met de gemeente Utrecht naar voren gekomen dat het toepassen van een TEO-systeem onwaarschijnlijk is omdat omwille van de ecologische waarde van de Kromme Rijn maar een zeer beperkt aantal TEO-systemen worden toegestaan (een alternatief is regeneratie met droge koelers, echter, binnen deze studie is dit alternatief niet meegenomen, bij droge koelers ligt het aantal draaiuren lager dan bij TEO, hierdoor stijgt mogelijk het maximale debiet dat nodig is).

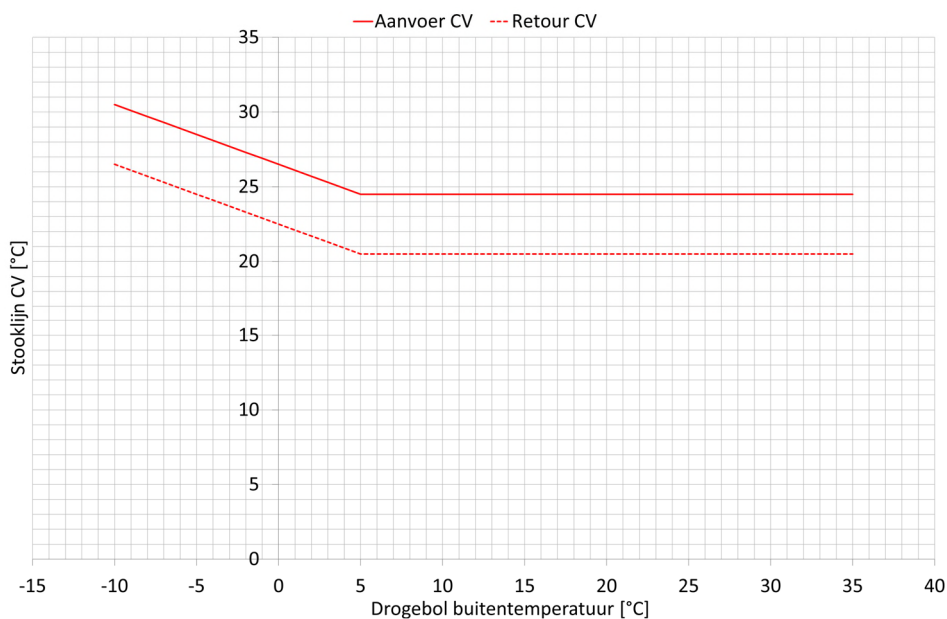
Een lage temperatuur warmtepomp levert warmte aan de LBK's. Koeling vindt direct plaats uit de OBES bron en uit het koelvermogen van de verdampers indien deze aanwezig is. In de zomer wordt, afhankelijk van het systeemconcept (zie paragraaf 2.4), de warmtepomp ingezet om extra warmte op te slaan (power-to-heat). De demarcatie in deze studie is tot en met de technische ruimte, de LBK's vallen buiten de demarcatie. Wel is rekening gehouden met de temperatuurstrajecten voor de LBK's, hierbij is uitgegaan van het toepassen van twin-coil LBK's (Figuur 2-9). De bestaande LBK's zullen, voor zover nodig, aangepast moeten worden om met de gewenste temperatuurstrajecten te kunnen werken.

Het maximale debiet van de TEO en de OBES bronnen is zodanig gekozen dat het conventionele OBES systeemconcept op jaarbasis energetisch ongeveer in balans draait. Voor de casus USP resulteert dit in een debiet

van 280 m³/u voor de bronnen en een maximaal debiet van circa 130 m³/u voor de TEO-installatie. Voor de TEO-installatie is de ΔT tijdens warmteonttrekking vastgezet op 5 °C, het maximale vermogen uit de TEO is daarmee circa 750 kW.



Figuur 2-8 Toegepaste basis systeemconcept en demarcatie USP.



Figuur 2-9 Stooklijn waterzijdige CV aanvoer- en retourtemperatuur voor twin coil LBK's.

De opbouw van de ondergrond is in kaart gebracht op basis van eerder uitgevoerde studies in Utrecht en openbare regionale informatie uit DINoloket. Een schematische weergave van de bodemopbouw is weergegeven in Tabel 2-7Tabel 2-5. Bij deze casus worden de putfilters geplaatst in het tweede watervoerende pakket. Het maximale debiet in het tweede watervoerende pakket is ingeschat op 250 m³/u per bron.

Tabel 2-7 | Bodemopbouw USP en geohydrologische eigenschappen

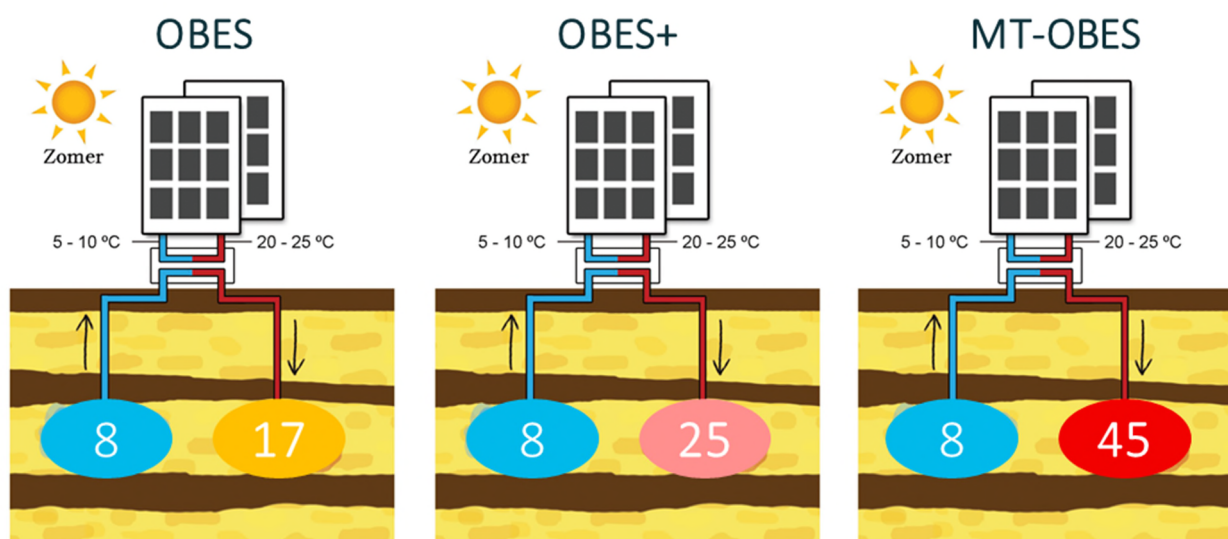
Diepte [m-mv]	Lithologie	Type laag	Doorlaatvermogen of weerstand [m^2/d] of [d]	Putontwerp
0 – 11	klei en fijn zand	deklaag	100 d / 70 m^2/d	putbuis
11 – 48	matig fijn tot matig grof zand met kleibrokjes	1 ^e watervoerend pakket	1,435 m^2/d	putbuis
48 – 60	klei en fijn zand	1 ^e scheidende laag	500 d	putbuis
60 – 120	matig grof tot grof zand met enkele kleibrokjes	2 ^e watervoerend pakket	2.800 m^2/d	putfilter: 60 tot 120m
> 120	klei en fijn zand	2 ^e scheidende laag	> 1000 d	zandvang

2.4 Beschrijving technische installatie en werking energiesysteem

In deze studie is voor locatie Zuilense Vecht (Bijlage II) en locatie USP (Bijlage III) een technisch ontwerp gemaakt voor de drie systeemconcepten conventionele OBES, OBES+ en MT-OBES (Figuur 2-10). De systeemconcepten zijn vrijwel identiek voor de twee locaties, de uitgangspunten (grootte componenten, temperaturen) die bij de twee locaties zijn gehanteerd verschillen. De belangrijkste verschillen tussen Zuilense Vecht en Utrecht Science Park zijn:

- Bij Zuilense Vecht wordt zowel ruimteverwarming als warm tapwater geleverd, waardoor er twee warmtepompen zijn voorzien. Bij Utrecht Science Park is er alleen een laagtemperatuur warmtevraag, waardoor slechts één warmtepomp wordt voorzien.
- Ruimteverwarming bij USP is op variabele temperatuur en kan worden geleverd op lagere temperatuur dan bij Zuilense Vecht (Figuur 2-9).

Op basis van het technische ontwerp is een energiemodel gemaakt in python en gekoppeld aan het grondwatermodel. In Tabel 2-8 is een samenvatting van de werking van het energiesysteem voor de drie concepten gegeven.



Figuur 2-10 Schematische weergave van de verschillende temperatuurniveau's die worden toegepast in de bronnen voor conventionele OBES, OBES+ en MT-OBES. Figuur aangepast uit Bloemendal and Hartog (2018).

Tabel 2-8 Beschrijving van de werking van de drie energieconcepten OBES, OBES+ en MT-OBES bij locaties Zuilense Vecht (ZV) en Utrecht Science Park (USP). Het technische ontwerp van deze concepten is gegeven in bijlage II en III en de berekeningen die gepaard gaan met deze systeemconcepten zijn gegeven in Bijlage I.

	Beschrijving werking energiesysteem
(conventionele) OBES	Koeling: - Vloerkoeling kan worden geleverd uit de koude bron van de OBES, of wordt (deels) gemaakt met de verdamper van de hoogtemperatuur warmtepomp als er gelijktijdig een tapwatervraag en koelvraag is, en de koelvraag groter is dan de koude gemaakt met de verdamper van de warmtepomp (anders alle koelvraag uit verdamper, geen OBES). - Tijdens koeling is de injectietemperatuur in de warme bron van de OBES 17 °C. - Daarnaast wordt er, indien de oppervlaktewatertemperatuur (T_{opp}) > 19 °C, <u>passief op 17 °C</u> extra warmte geladen (regeneratie). Als regeneratie mogelijk is wordt altijd de maximaal beschikbare/benutbare capaciteit uit de TEO gebruikt om extra warmte te laden. Verwarmen: - Ruimteverwarming en tapwaterwarmte wordt gemaakt door de warmtepompen met warmte uit de TEO, OBES of warmte teruggewonnen door koeling van het gebouw (wanneer er gelijktijdig een koelvraag en tapwatervraag is en de tapwatervraag groter is dan de koelvraag). Indien beschikbaar wordt eerst de capaciteit uit koeling van het gebouw benut, vervolgens de capaciteit van de TEO (als T_{opp} > 14 °C) en daarna wordt de OBES aangesproken als warmtebron. - De injectietemperatuur in de koude bron van de OBES is 8 °C.
OBES+	Koeling: - Koeling is voornamelijk direct, net zoals bij het OBES concept. Regeneratie van de warme bron met de TEO gebeurt indien T_{opp} > 14 °C. - Maar, injectie in de warme bron gebeurt <u>actief op 25 °C</u> door gebruik te maken van de laagtemperatuur warmtepomp, er kan op deze manier warmte worden opgeslagen op een hogere temperatuur. Verwarmen: - Verwarming wordt op dezelfde manier voorzien als bij het concept beschreven bij OBES
MT-OBES	Koeling: - Koeling is vergelijkbaar met het concept beschreven bij OBES+. - Maar, in plaats van het actief laden van de warme bron op 25 °C met de laagtemperatuur warmtepomp gebeurt dit bij MT-OBES <u>actief op 45 °C</u>. Verwarmen: - Tijdens verwarming leveren de bronnen zoveel mogelijk directe warmte aan het laagtemperatuur ruimteverwarmingsnet (indien de bron warmer is dan 26 °C en er een laagtemperatuur warmtevraag is). Tapwater kan niet direct worden geleverd en moet altijd worden geproduceerd met de HT-warmtepomp. - Omdat de temperatuur van het bodemzijdige circuit tijdens directe verwarming slechts kan worden uitgeoeld tot de retourtemperatuur van het ruimteverwarmingscircuit (bij ZV 25 °C, bij USP variabel), en de injectietemperatuur in de koude bron vast staat op 8 °C, is een bijdrage van de LT-warmtepomp altijd nodig tijdens directe warmtelevering. De warmtepomp staat dus altijd aan om de rest van de warmte uit de bron (26 °C) te benutten. - De maximale bijdrage van directe verwarming en het benodigde vermogen van de warmtepomp (voor zowel tapwater en ruimteverwarming) is dus afhankelijk van de onttrekkingstemperatuur van de warme bron en de hoeveelheid benodigde tapwatervraag en ruimteverwarmingsvraag (berekening zie bijlage IV). - Als de warme bron geen directe warmte meer kan leveren, gaat het systeem over op warmtelevering op eenzelfde manier als bij OBES en OBES+ (flow uit warme bron naar de warmtepompen). Daarnaast wordt ook warmte gewonnen uit de TEO indien dit mogelijk is.

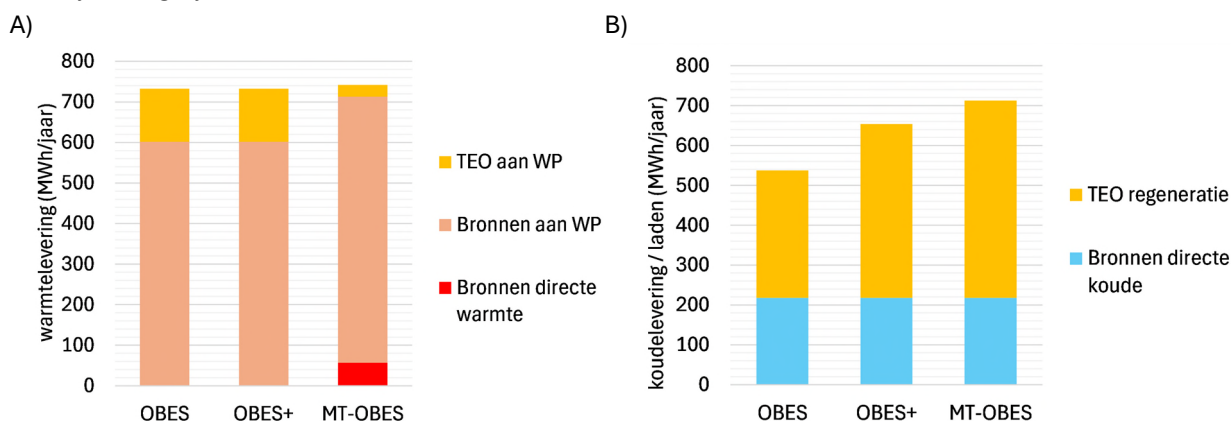
3 Resultaten

3.1 Zuilense Vecht

3.1.1 Inzet en functioneren energiesysteem

Bij de conventionele OBES en OBES+ maakt het energiesysteem eerst gebruik van de TEO voor warmtelevering voordat de OBES wordt aangesproken. Omdat de grootste warmtevraag bestaat in de winter en de TEO dan niet beschikbaar is (want de oppervlaktewatertemperatuur $< 14^\circ\text{C}$) wordt meer dan 90% van de jaarlijks benodigde warmte geleverd uit de bronnen van de OBES, de rest van de warmte komt uit de TEO (Figuur 3-1A). Bij MT-OBES maakt het energiesysteem eerst gebruik van de bronnen indien dat mogelijk is, en wordt alleen de TEO gebruikt voor warmtelevering als er niet voldoende capaciteit beschikbaar. Als gevolg hiervan wordt in dit scenario 100 MWh per jaar extra warmte geleverd uit de bronnen ten opzichte van het conventionele OBES en OBES+-scenario. Van de totale warmte geleverd met de bronnen van het MT-OBES scenario (713 MWh/jaar) wordt er 57 MWh/jaar direct geleverd aan het gebouw.

De grootte van de TEO-aansluiting is gelijk voor de drie systeemconcepten ($Q=50\text{ m}^3/\text{u}$ en $\Delta T=5^\circ\text{C}$). Toch kan er bij OBES+ en MT-OBES meer warmte worden geladen in de zomerperiode omdat ten eerste de warmtepomp hier wordt gebruikt voor het actief laden van de bronnen om extra warmte op te slaan terwijl de elektriciteit relatief duurzaam is. Ten tweede kan met de warmtepomp het oppervlaktewater voor een langere periode gebruikt worden als warmtebron (Bij OBES+ en MT-OBES wordt de warmtepomp namelijk ingezet om de warme bron te laden en hoeft de temperatuur van het oppervlaktewater niet hoger te zijn dan de laadtemperatuur van de warme bron, wat wel het geval is bij passief laden in het conventionele OBES systeemconcept) en kan er dus een langere periode in het jaar warmte worden geladen uit het oppervlaktewater. De onttrokken warmte uit de TEO voor regeneratie neemt hierdoor toe van 312 naar 436 MWh/jaar bij OBES+ en tot 494 MWh/jaar bij MT-OBES (Figuur 3-1B). De hoeveelheid koude geleverd aan het gebouw (oftewel de warmte gewonnen uit het gebouw) is 218 MWh/jaar en gelijk voor alle drie de scenario's.

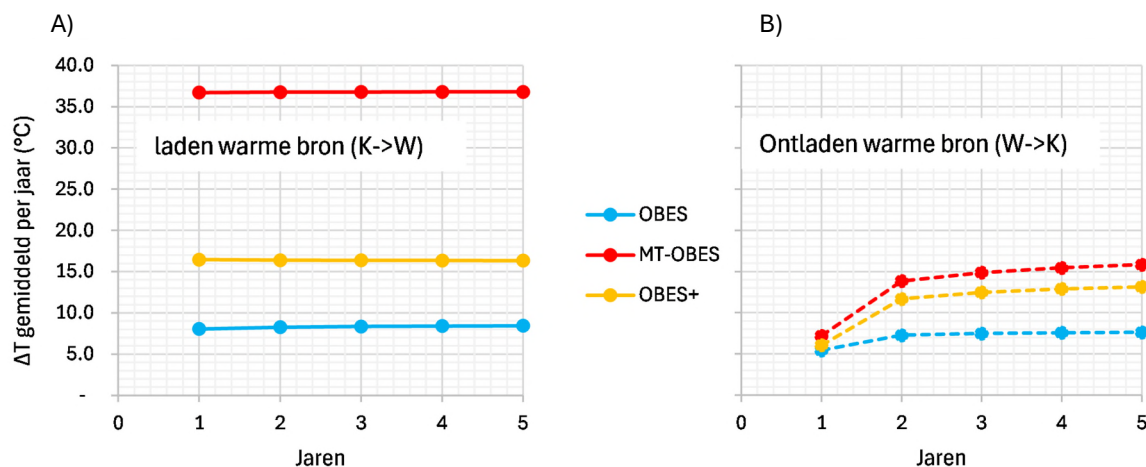


Figuur 3-1 A) Energie die jaarlijks wordt geleverd aan het systeem uit de bronnen en de TEO (warmtepompenergie dus niet meegeteld hier). B) De koelvraag die direct wordt geleverd door de bronnen en de hoeveelheid geregenereerde warmte uit de TEO (voor OBES+ en MT-OBES is dit incl. de warmtepompenergie).

3.1.2 Prestaties en dimensionering bronnen

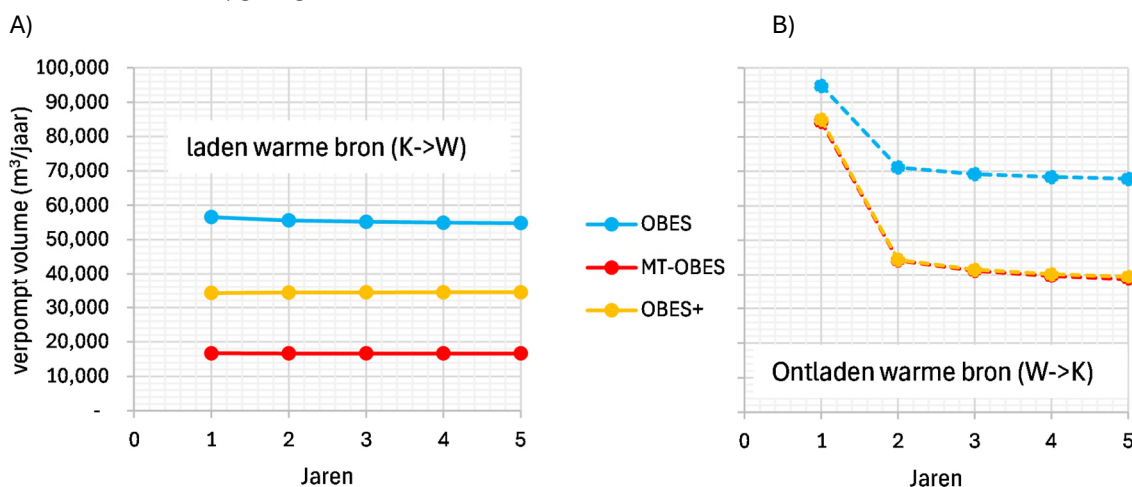
Bij het conventionele OBES systeemconcept is de gemiddelde jaarlijkse ΔT tijdens het laden (zomer) en ontladen (winter) van de warme bron ongeveer gelijk, circa 8°C (Figuur 3-2). Bij OBES+ en MT-OBES wordt de warme bron geladen op een hogere temperatuur, terwijl de onttrekkingstemperatuur uit de koude bron nagenoeg gelijk blijft. De gemiddelde ΔT tijdens het laden van de warme bron (Figuur 3-2B) neemt daarmee toe tot 17°C bij OBES+ en 37°C bij MT-OBES.

°C bij MT-OBES. De gemiddelde ΔT tijdens het ontladen van de warme bron neemt toe ten opzichte van conventionele OBES (8°C), tot 14 °C in jaar 5 bij OBES+ en tot 16 °C bij MT-OBES in jaar 5.



Figuur 3-2 Gemiddelde jaarlijkse ΔT (temperatuurverschil tussen warme en koude bronnen) tijdens A) ontladen van de warme bron en B) het laden van de warme bron.

In de eerste maanden van het eerste jaar is de warme bron nog niet geladen en wordt er water onttrokken met de natuurlijke grondwatertemperatuur (12.5 °C) en teruggepompt in de koude bron met 8 °C. Er wordt dus warmte gewonnen met een relatief kleine ΔT (Figuur 3-2B) wat dus resulteert in een groot onttrekkingsvolume uit de warme bron in het eerste jaar bij alle drie de scenario's (Figuur 3-3B). Tijdens het laden van de warme bron in jaar 1 en ook in de opvolgende jaren is het debiet dat wordt verpompt bij OBES+ en MT-OBES aanzienlijk kleiner dan het debiet in het OBES scenario. Dit komt omdat de ΔT verdubbelt (OBES+) of met meer dan een factor 4 toeneemt (MT-OBES), terwijl de totale hoeveelheid warmte die geladen wordt in de zomer zeer vergelijkbaar is voor de drie systeemconcepten (Figuur 3-1A, 22% en 33% toename voor OBES+ en MT-OBES ten opzichte van conventionele OBES). Dit resulteert in een opslagvolume in de warme bron in jaar 5 van 54.000 m³ bij conventionele OBES, 34.000 m³ bij OBES+ en 17.000 m³ bij MT-OBES. Tijdens het ontladen van de warme bron in jaar 5 wordt er bij OBES en OBES+ een vergelijkbare hoeveelheid volume onttrokken (Figuur 3-3B) ten opzichte van het laadvolume (Figuur 3-3A). Echter bij het MT-OBES scenario wordt in jaar 5 een factor 2.3 meer grondwater onttrokken uit de warme bron dan er wordt opgeslagen.

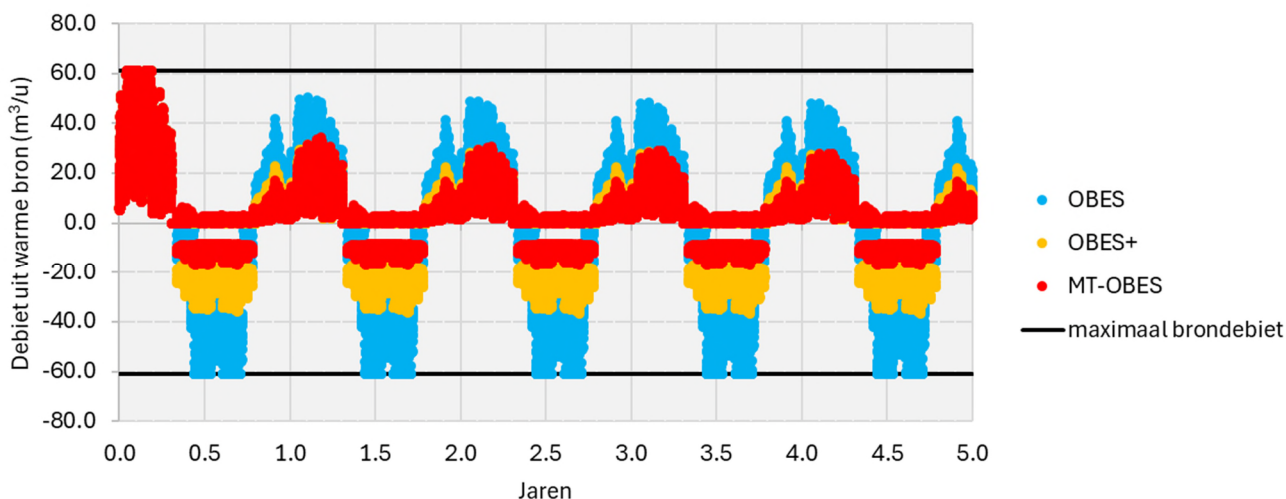


Figuur 3-3 Jaarlijkse totaal verpompt volume tijdens A) het ontladen van de warme bron en B) het laden van de warme bron.

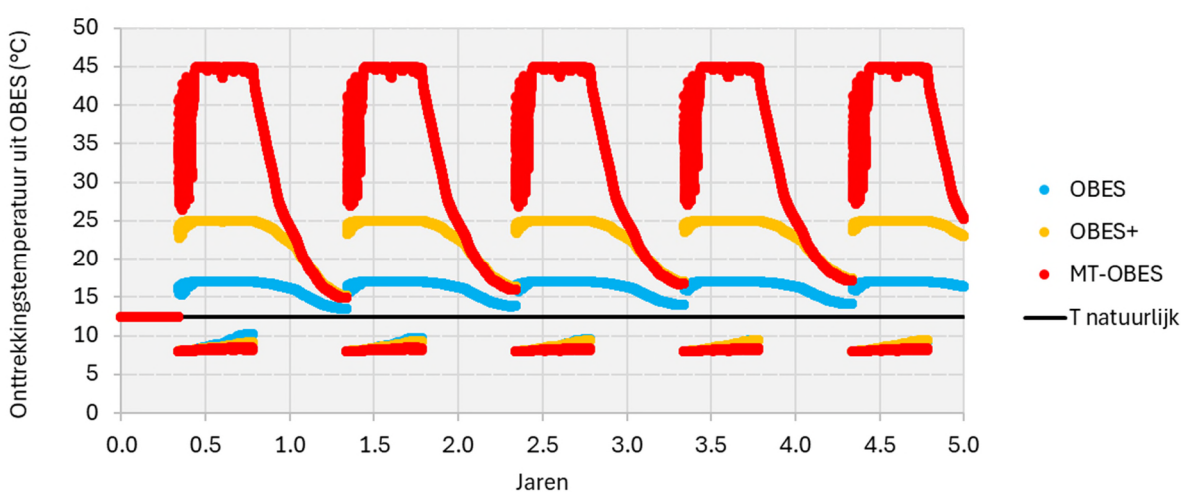
Aan de start van het ontladeseizoen van de warme bron is de warme bron nog op temperatuur (Figuur 3-4B) en kan er worden onttrokken met een grote ΔT en dus een klein grondwatervolume (Figuur 3-4A). Gedurende het

ontlaadseizoen daalt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron en neemt het debiet toe om aan de gevraagde hoeveelheid warmte te kunnen voldoen. Omdat de temperatuur in het MT-OBES scenario relatief snel en relatief sterk afneemt is hierbij het ontladdebiet aan het einde van het seizoen veel groter dan het laaddebiet. Hierdoor ontstaat een volume-onbalans in het systeem, omdat er met kleine volumes wordt geladen maar wel met steeds grotere volumes wordt ontladen (de volumes zijn nog altijd een stuk kleiner dan bij conventionele OBES).

A)



B)



Figuur 3-4 A) Onttrekkingsdebiet uit de bronnen (m^3/u) voor de drie scenario's. B) Temperatuur onttrokken uit de warme/koude bronnen.

Op basis van de uitgevoerde simulaties is de dimensionering van de hoofdcomponenten bepaald (Tabel 3-1). Het maximale debiet van het opslagsysteem is in alle drie de systeemconcepten hetzelfde ($61 \text{ m}^3/\text{h}$). Dit heeft te maken met de natuurlijke grondwatertemperatuur en het uitgangspunt dat de simulaties op 1 januari (in de winter) starten. Op dit moment is er een warmtevraag en wordt warmte onttrokken aan grondwater met een natuurlijke grondwatertemperatuur ($12,5 \text{ }^\circ\text{C}$). De startsituatie is in elk systeemconcept dus gelijk. Tijdens de eerste laadcyclus ontstaan er verschillen in opslagtemperaturen en daarmee ook in het maximale debiet. Bij OBES+ halveert het debiet ten opzichte van OBES vanaf jaar 2. Bij MT-OBES is, ondanks dat er hogere temperaturen worden opgeslagen, slechts een beperkte reductie te zien ten opzichte van OBES+. Dit komt doordat de temperatuur van de opgeslagen warmte sneller daalt dan bij OBES+ (zie Figuur 3-4). Aan het einde van het ontlad-seizoen is het temperatuurverloop vergelijkbaar met OBES+. Doordat na één laadcyclus het maximale debiet daalt bij OBES+ en MT-OBES, zijn in principe minder bronnen nodig, dit kan alleen echter tot een probleem leiden in de eerste

maanden van het 1^e jaar. Dit doet zich voor doordat er in het stookseizoen wordt begonnen met warmtelevering, als er wordt begonnen op een ander moment in het jaar is dit waarschijnlijk een minder groot of geen probleem.

De lage temperatuur warmtepomp wordt bij OBES+ en MT-OBES in de zomer ingezet om warmte op te slaan op een hogere temperatuur. Het grootste warmtepompvermogen wordt gevraagd in de winter en het benodigde vermogen van de warmtepompen blijft in alle drie scenario's dus gelijk (Tabel 3-1). Er is dus geen extra warmtepompvermogen nodig om voldoende warmte op te kunnen slaan in de zomer.

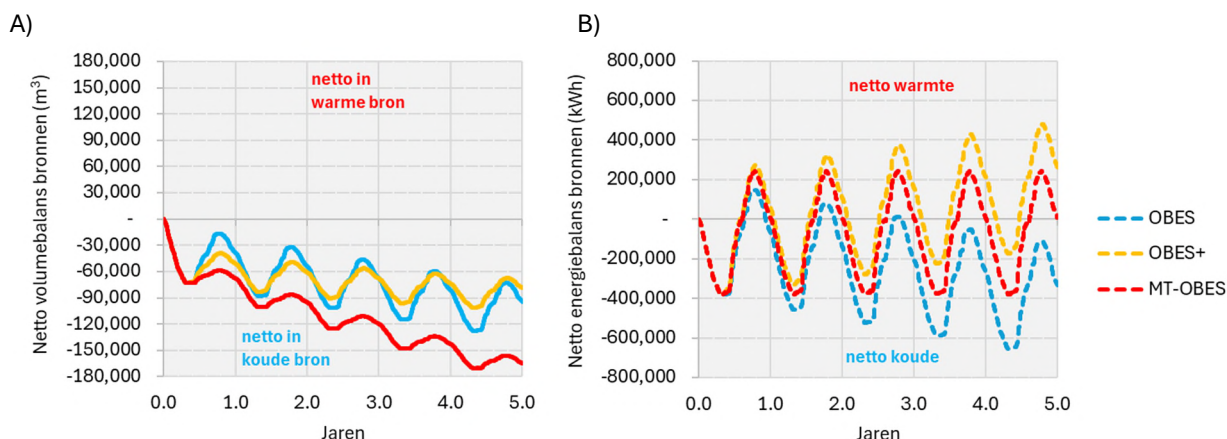
Tabel 3-1 | Dimensionering hoofdcomponenten systeemconcept Zuilen Vecht

		OBES	OBES+	MT-OBES
Opslag				
Max. debiet, jaar 1	[m ³ /u]	61	61	61
Max. debiet, vanaf jaar 2	[m ³ /u]	61	32	30
Aantal warme bronnen	[-]	2	1	1
Aantal koude bronnen	[-]	2	1	1
Warmtepompen				
Therm. vermogen lage temp. warmtepomp	[kW _{th}]	442	442	442
Vollasturen lage temp. warmtepomp	[u/jaar]	1.324	2.311	2.315
Therm. vermogen hoge temp. warmtepomp	[kW _{th}]	178	178	178
Vollasturen hoge temp. warmtepomp	[u/jaar]	2.425	2.425	2.425

3.1.3 Ruimtegebruik ondergrond en thermische effecten

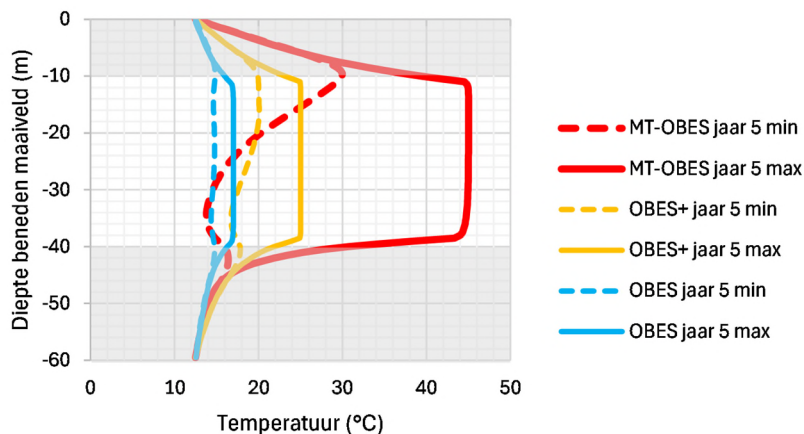
Het maximale debiet en het jaarlijkse volume dat wordt gebruikt voor het laden van de warme bron daalt met toenemende opslagtemperatuur (Figuur 3-3), het ondergrondse ruimtegebruik neemt daarmee qua hydrologische effecten af. Het thermische volume, en dus ruimtegebruik in de ondergrond, dat initieel wordt opgewarmd rondom de putten in de aquifer neemt dus af met hogere opslagtemperatuur bij het OBES+ en het MT-OBES scenario. Echter, de warmteverliezen naar buiten toe nemen juist toe met hogere opslagtemperatuur en met de jaren neemt het thermische volume dat is opgewarmd rondom de warme bron dus relatief sneller toe bij OBES+ en MT-OBES.

Voor zowel OBES, OBES+ en MT-OBES wordt er per jaar meer volume onttrokken uit de warme bron dan er wordt opgeslagen, wat leidt tot een negatieve volumebalans tussen de bronnen (Figuur 3-5A). Voor OBES en OBES+ blijft de netto onbalans na 2 jaar redelijk stabiel en is er dus een balans, terwijl voor MT-OBES ieder jaar een veel groter volume wordt onttrokken uit de warme bron en dus het netto volume opgeslagen in de koude bron ieder jaar sterk toeneemt (na 5 jaar 180 000 m³). Bij het conventionele OBES systeemconcept leidt de negatieve volumebalans ook tot een negatieve energiebalans; de ΔT aan beide kanten is gelijk ten opzichte van de initiële grondwatertemperatuur en dus aan beide kanten zijn er vergelijkbare energieverliezen per volume opgeslagen water. Omdat er relatief een groter volume koud water achter blijft in de koude bron dan warm water in de warme bron is er dus ook een negatieve energetische balans in de ondergrond. Bij het OBES+ scenario wordt meer energie opgeslagen en nemen ook de warmteverliezen in de warme bron iets toe (want groter temperatuurverschil met omgeving), wat leidt tot een positieve energiebalans, er blijft iets meer warmte achter in de warme bron dan er koude achter blijft in de koude bron. Alhoewel er voor het MT-OBES scenario een grotere volumeonbalans is, is er wel ongeveer een energiebalans (Figuur 3-5B). De warmteverliezen in de warme bron zijn in dit scenario relatief sterk door de hogere opslagtemperatuur en er blijft dus relatief veel warmte achter in de ondergrond ondanks dat er meer volume per jaar wordt onttrokken uit de warme bron. Ondanks dat er veel meer koud water achterblijft in de koude bron is dit qua energiehoeveelheid ongeveer gelijk aan de warmteverliezen in de warme bron en zijn daardoor in balans.



Figuur 3-5 A) Netto volumebalans (m^3 , warm – koud) en B) energiebalans (kWh, warmte – koude) in de bronnen na 5 jaar simulatie.

De gesimuleerde maximale (in het midden van het opgeslagen thermische volume) temperatuur in de kleilaag boven de opslag aquifer neemt vrijwel lineair toe vanuit de bovenkant van het opslagpakket richting maaiveld voor alle drie de systeemconcepten (Figuur 3-6). De warmte is dus in vijf jaar bijna volledig door de 10m dikke afsluitende laag gedrongen en het maximale thermische effect is op dat moment bereikt. Bij MT-OBES neemt per meter diepte onder maaiveld de temperatuur daardoor $3.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ toe. In de praktijk wordt de temperatuurgradiënt in de eerste $\pm 10\text{ m}$ onder maaiveld ook beïnvloed door de fluctuatie van de luchttemperatuur (Visser et al., 2015), dat is hier niet meegenomen. Het verticale effect naar onderen is vergelijkbaar voor het OBES en OBES+ scenario. Bij MT-OBES verplaatst de warmte zich door de oprijving naar de bovenkant van de aquifer wat zorgt voor het aantrekken van kouder water aan de onderkant van het putfilter. Dit zorgt ervoor dat een deel van het jaar de temperatuur aan de onderkant van het putfilter gelijk is aan natuurlijke grondwatertemperatuur. Hierdoor is de warmteverspreiding naar diepere lagen toe voor het MT-OBES scenario relatief kleiner, en op -44 m onder maaiveld (op 4 m onder onderkant van de aquifer) is voor deze condities de temperatuuroptename bij OBES+ zelfs groter dan bij MT-OBES.



Figuur 3-6 Gesimuleerde verticale temperatuurverdeling in de bodem tussen maaiveld en 60 m diepte in het midden van de warme bel op het moment dat de warme bron maximaal geladen is (max) en minimaal geladen is (min) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES.

3.1.4 Elektriciteitsverbruik en duurzaamheid

In deze paragraaf is gekeken naar de volgende aspecten:

- Elektriciteitsverbruik: dit is de hoeveelheid elektriciteitsverbruik van het bodemenergiesysteem (o.a. WP, TEO, bronpompen, voor gedetailleerde demarcatie zie Figuur 2-7).
- SPF (Seasonal Performance Factor): dit is de verhouding tussen de hoeveelheid nuttig geleverde warmte/koude en het elektriciteitsverbruik van het bodemenergiesysteem.
- CO_2 -uitstoot: dit is de hoeveelheid CO_2 -uitstoot als gevolg van het elektriciteitsverbruik.

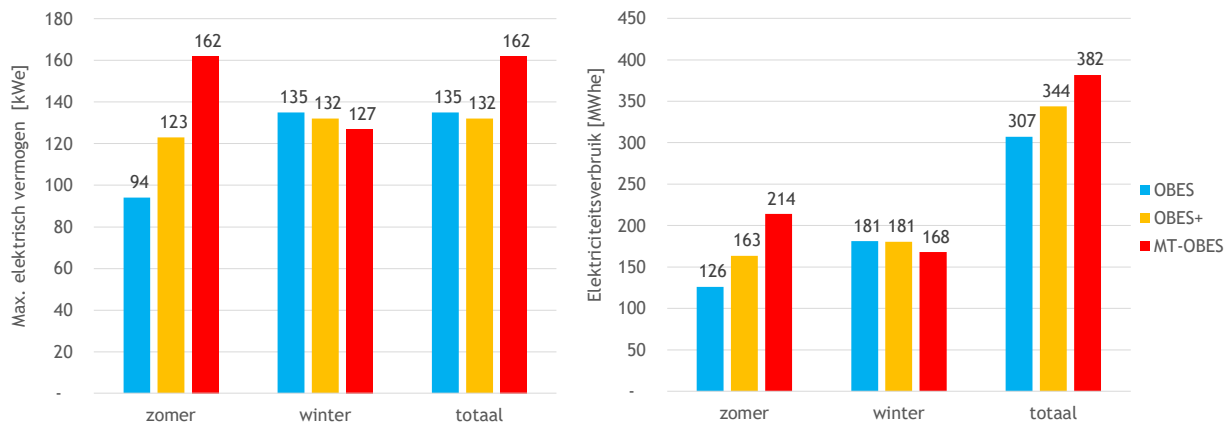
Het elektriciteitsverbruik van het bodemenergiesysteem is op uurbasis doorgerekend. Voor jaar 5 zijn de resultaten voor OBES, OBES+ en MT-OBES weergegeven in Figuur 3-7.



Figuur 3-7 Elektriciteitsverbruik in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case Zuilense Vecht.

Het maximale elektrisch vermogen en het elektriciteitsverbruik per seizoen is ook samengevat in Figuur 3-8. Bij OBES+ en MT-OBES is in de zomer door de inzet van de warmtepomp een duidelijke toename te zien in het elektriciteitsverbruik. Bij OBES+ is het elektriciteitsverbruik vergelijkbaar met conventionele OBES. Het warmteafgiftesysteem heeft een 30/25°C temperatuurstraject. Hierdoor is het bij OBES+ (met een opslagtemperatuur van maximaal 25°C) niet mogelijk om op directe wijze warmte te leveren. Bij MT-OBES is directe warmtelevering wel mogelijk. Hierdoor daalt het elektriciteitsverbruik in de winter. Het effect is echter beperkt. De retourtemperatuur van de vloerverwarming is 25°C. Bij directe warmtelevering kan water uit de MT-OBES worden afgekoeld (als gevolg van het leveren van verwarming) tot circa 26 á 27°C. De koude bron moet echter geladen worden met 8°C. Daarom wordt de retour van 26 á 27°C eerst nog langs de verdamper van de warmtepomp geleid om naar 8°C af te koelen. De inzet van de warmtepomp is ook bij directe warmtelevering dus nog steeds noodzakelijk vanwege deze verdere uitkoeling.. Dit heeft ook effect op de COP van de warmtepomp, die deels afhangt van de uittredetemperatuur. Voor een deel wordt in de winter warmte op directe wijze geleverd en voor een deel via de warmtepomp (zie Figuur 3-9). De besparing op elektriciteitsverbruik in de winter is kleiner dan het extra verbruik in de zomer. Het totale elektriciteitsverbruik op jaarbasis neemt toe bij OBES+ en MT-OBES, zoals ook verwacht. Dit komt doordat een deel van de warmte die opgeslagen wordt in zomer verloren gaat tijdens de opslagperiode. Door de inzet van de warmtepomp stijgt in de zomer het maximaal elektrisch vermogen voor OBES+ en MT-OBES. In de winter is er voor OBES+ een lichte daling te zien. Dit komt doordat de bronpompen een kleiner debiet hoeven te verpompen door het grotere temperatuurverschil. Bij MT-OBES is de daling groter, doordat de warmte voor een deel ook op directe wijze wordt geleverd. In totaal wordt circa 10% van de warmte op directe wijze geleverd. In de zomer daalt voor OBES+ en MT-OBES de SPF. Er is geen extra nuttig geleverde koude en

warmte, terwijl door de inzet van de warmtepomp om op hogere temperatuur te kunnen laden het elektriciteitsverbruik wel toeneemt. In de winter stijgt de SPF voor MT-OBES, doordat nu een deel van de warmte op directe wijze wordt geleverd. Overall is de SPF bij OBES+ en MT-OBES echter lager dan bij OBES doordat er in totaal meer stroom wordt verbruikt.



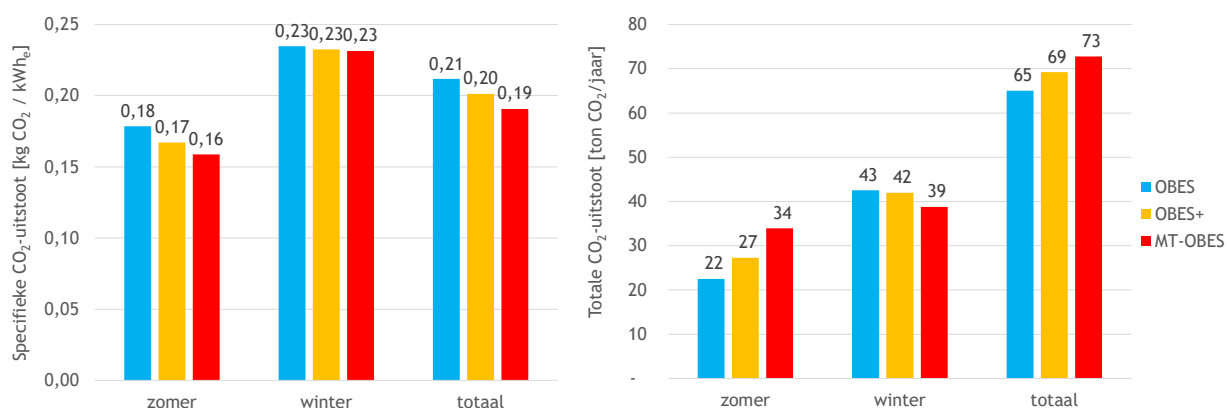
Figuur 3-8 Maximaal elektrisch vermogen (links) en elektriciteitsverbruik (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case Zuilense Vecht.



Figuur 3-9 Invulling ruimteverwarming (links) en SPF (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case Zuilense Vecht.

Op basis van het elektriciteitsverbruik is de CO₂-uitstoot berekend. In Figuur 3-10 is per seizoen en voor het gehele jaar zowel de specifieke CO₂-uitstoot (per kWh) als de absolute CO₂-uitstoot weergegeven. Bij OBES+ en MT-OBES ligt de specifieke CO₂-uitstoot lager dan bij OBES, omdat er meer stroom wordt verbruikt op momenten dat de stroom duurzamer is. Ondanks de lagere specifieke CO₂-uitstoot in de zomer neemt de totale CO₂-uitstoot in de zomer bij OBES+ en MT-OBES wel toe ten opzichte van OBES, de lagere specifieke CO₂-uitstoot in de zomer is niet voldoende om te compenseren voor het toegenomen elektriciteitsverbruik in de zomer. In de winter daalt de CO₂-uitstoot, de daling is echter lager dan de toename in de zomer. De totale CO₂-uitstoot ligt voor OBES+ en MT-OBES hoger dan voor OBES.

De regeling toegepast in deze studie is vraaggestuurd, de warmtepomp wordt dus nog niet specifiek ingezet op uren dat de CO₂-uitstoot het laagste is. In Tabel 3-1 is te zien dat bij OBES+ en MT-OBES het aantal vollasturen van de lage temperatuur warmtepomp rond de 2.300 uur per jaar ligt. Dit betekent dat er nog de nodige speelruimte is om de inzet van de warmtepomp in de tijd te optimaliseren.



Figuur 3-10 Specifieke CO₂-uitstoot (links) en totale CO₂-uitstoot (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case Zuilen Vecht.

3.1.5 Investerings- en exploitatiekosten

Op basis van het ontwerp (zie bijlage II) en de dimensionering (zie paragraaf 3.1.2) zijn op haalbaarheidsniveau de investeringskosten en exploitatiekosten geraamd (+/- 30%). Deze zijn respectievelijk weergegeven in Tabel 3-2 en Tabel 3-3. Na elke tabel is een korte toelichting gegeven. In het geval van OBES+ is een lagere investering mogelijk, doordat er minder bronnen nodig zijn. Hier wordt aangenomen dat bronnen van een MT-OBES wat duurder zijn dan van conventionele OBES omdat er wordt uitgegaan van kunststof met een hogere drukklasse en doordat er RVS wikkeldraadfilter wordt toegepast. Ondanks dat deze kosten per bron wat hoger zijn is er juist ook bij MT-OBES een besparing in de investeringskosten mogelijk doordat er minder bronnen nodig zijn.

Tabel 3-2 | Geraamde investeringskosten bij case Zuilen Vecht (excl. BTW, +/- 30%)

		OBES	OBES+	MT-OBES
Opslag	[€]	620.000	400.000	420.000
Technische ruimte (+WP)	[€]	500.000	500.000	520.000
TEO	[€]	270.000	270.000	270.000
Aansluiting elektriciteit	[€]	34.000	34.000	34.000
Subtotaal	[€]	1.400.000	1.200.000	1.300.000
Onvoorzien	[€]	140.000	120.000	130.000
Ontwerp, advies en vergunningen	[€]	140.000	120.000	130.000
Totaal	[€]	1.700.000	1.400.000	1.500.000

- Opslag: dit betreft de kosten voor de bronnen, inclusief putbehuizing en techniek in de bronnen en het leidingwerk van de bronnen naar de technische ruimte.
- Technische ruimte (+WP): dit betreft de kosten voor alle techniek in de technische ruimte, inclusief de lage temperatuur warmtepomp en hoge temperatuur warmtepomp.
- TEO: dit betreft de kosten voor de in- en uitlaatwerken van het TEO-systeem, inclusief alle techniek en het leidingwerk naar de technische ruimte.
- Aansluiting elektriciteit: dit is een inschatting voor de kosten van een elektriciteitsaansluiting. De capaciteit is ingeschat op basis van wat nodig is voor het bodemenergiesysteem. Er is niet gekeken of er voldoende capaciteit beschikbaar is op het elektriciteitsnet.
- Onvoorzien: doordat er in deze fase nog een hoge mate van onzekerheid is en er slechts een schetsontwerp is opgesteld, is een kostenpost voor onvoorzien opgenomen (10% van de investeringskosten).
- Ontwerp, advies en vergunningen: hiervoor is een stelpost opgenomen van 10% van de investeringskosten.

Tabel 3-3 | Geraamde exploitatiekosten bij case Zuilense Vecht (excl. BTW, +/- 30%)

		OBES	OBES+	MT-OBES
Elektriciteit	[€/jaar]	55.000	58.000	61.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	26.000	23.000	23.000
Reservering vervangingskosten	[€/jaar]	58.000	54.000	54.000
Monitoring	[€/jaar]	10.000	10.000	16.000
Subtotaal	[€/jaar]	160.000	150.000	160.000
Onvoorzien	[€/jaar]	16.000	15.000	16.000
Totaal	[€/jaar]	170.000	170.000	180.000

- Elektriciteit: dit zijn de variabele kosten van het elektriciteitsverbruik, inclusief energiebelasting, maar exclusief BTW.
- Onderhoud en beheer: dit zijn de kosten voor regulier onderhoud en beheer van de verschillende componenten.
- Reservering vervangingskosten: dit zijn de kosten voor vervanging van de onderdelen en zijn bepaald door de investeringskosten te delen door de technische levensduur.
- Monitoring: dit zijn de kosten voor monitoring in het kader van de BRL. Voor MT-OBES zijn extra kosten opgenomen voor extra bemonstering en beheeroverleg als gevolg van de hogere bodemtemperatuur.
- Onvoorzien: doordat er in deze fase nog een hoge mate van onzekerheid is, is een kostenpost voor onvoorzien opgenomen (10% van de exploitatiekosten).

Op basis van de modelberekeningen en het prijsprofiel voor elektriciteit zijn per uur de elektriciteitskosten berekend (zie Tabel 3-3). Er kan hierbij een opsplitsing gemaakt worden van de kosten in de winter en in de zomer. Dit is gedaan voor zowel de totale kosten als de specifieke kosten. De resultaten staan in Figuur 3-11. In de winter is er, door het lagere elektriciteitsverbruik, een besparing te zien in de totale kosten bij MT-OBES. De extra kosten in de zomer liggen echter hoger dan de besparing, waardoor de totale kosten hoger liggen. De specifieke kosten per kWh liggen lager bij OBES+ en MT-OBES, maar deze reductie in specifieke kosten is niet voldoende voor lagere totale energiekosten. Zoals eerder opgemerkt, geldt dat de regeling momenteel vraaggestuurd is. De warmtepomp wordt dus nog niet specifiek ingezet op uren dat de kosten voor elektriciteit het laagst is, waardoor hier wellicht nog optimalisatie mogelijk is (Tabel 3-1).



Figuur 3-11 Specifieke kosten elektriciteit exclusief energiebelasting en BTW (links) en totale kosten elektriciteit, inclusief energiebelasting en exclusief BTW (rechts) bij case Zuilense Vecht.

Voor de financiële haalbaarheid is gekeken naar de Total Cost of Ownership (TCO). Dit zijn de totale kosten over de looptijd van het project. In deze studie is uitgegaan van een looptijd van 30 jaar. Bij het bepalen van de TCO kan rekening worden gehouden met het duurder worden van de exploitatiekosten (indexatie) en de

waardevermindering (inflatie). Aangenomen is dat deze twee tegen elkaar wegvallen. De TCO wordt dan berekend door de som van de investeringskosten en 30 keer de exploitatiekosten. De TCO is het laagst voor OBES+. Door het lagere aantal bronnen ligt de investering lager dan bij conventionele OBES, terwijl de exploitatiekosten gelijk zijn. Bij MT-OBES is de TCO nagenoeg gelijk aan de TCO bij conventionele OBES. De investeringskosten liggen bij MT-OBES lager, maar dit voordeel wordt tenietgedaan door de hogere exploitatiekosten in de zomer voor het opslaan van extra warmte.

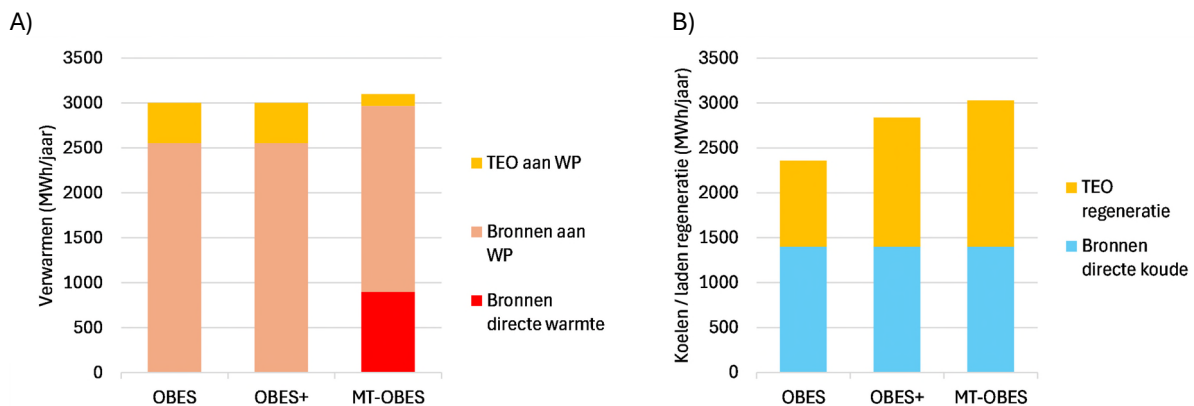
Tabel 3-4 | Total cost of ownership (TCO) over 30 jaar bij case Zuilense Vecht

		OBES	OBES+	MT-OBES
TCO, zonder indexatie	[€/jaar]	6.900.000	6.500.000	6.800.000

3.2 Utrecht Science Park

3.2.1 Inzet en functioneren energiesysteem

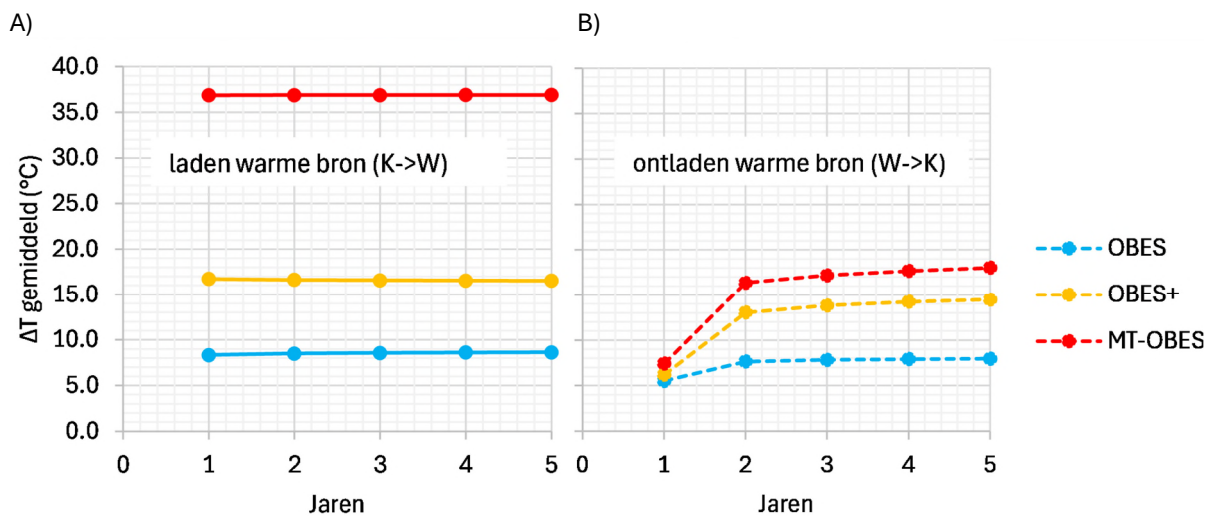
Ieder jaar wordt er ruim 3000 MWh warmte geleverd aan locatie Utrecht Science Park (USP) (Figuur 3-12A), waarvan bij alle drie de systemconcepten het grootste gedeelte wordt geleverd uit de bronnen van het open bodemenergiesysteem en een klein deel uit de TEO. Bij MT-OBES neemt de bijdrage van de TEO af omdat de MT-OBES bij dit concept altijd eerder wordt ingeschakeld dan de TEO. Tijdens het koelen van het gebouw wordt de warme bron geladen met de warmte gewonnen uit het gebouw en de extra ingevangen warmte uit de TEO (Figuur 3-12B). Bij het conventionele OBES systeemconcept wordt er 959 MWh per jaar passief geladen uit de TEO. Bij OBES+ en MT-OBES neemt dit toe tot 1436 en 1629 MWh per jaar. Dit komt omdat er energie geladen kan worden met een groter vermogen (door de bijdrage van de warmtepomp) en omdat de oppervlaktewatertemperatuur gedurende een langere periode (vanaf $>14^{\circ}\text{C}$ in plaats van $>19^{\circ}\text{C}$) geschikt is voor warmtewinning. Bij OBES+ en MT-OBES wordt de warmtepomp namelijk ingezet om de warme bron te laden en hoeft de oppervlaktewatertemperatuur niet hoger te zijn dan de laadtemperatuur van de warme bron, wat wel het geval is bij passief laden met conventionele OBES. De totale hoeveelheid warmte die geladen wordt in de warme bron is 2359 MWh voor het conventionele OBES concept, 2837 MWh voor OBES+ en 2968 MWh per jaar voor MT-OBES (Figuur 3-12B).



Figuur 3-12 Warmte die jaarlijks wordt geleverd aan het energiesysteem uit de bronnen en de TEO. B) De hoeveelheid koelvraag dat direct wordt geleverd door de bronnen en de hoeveelheid geregenereerde warmte uit de TEO (het totaal wordt geladen in de warme bron).

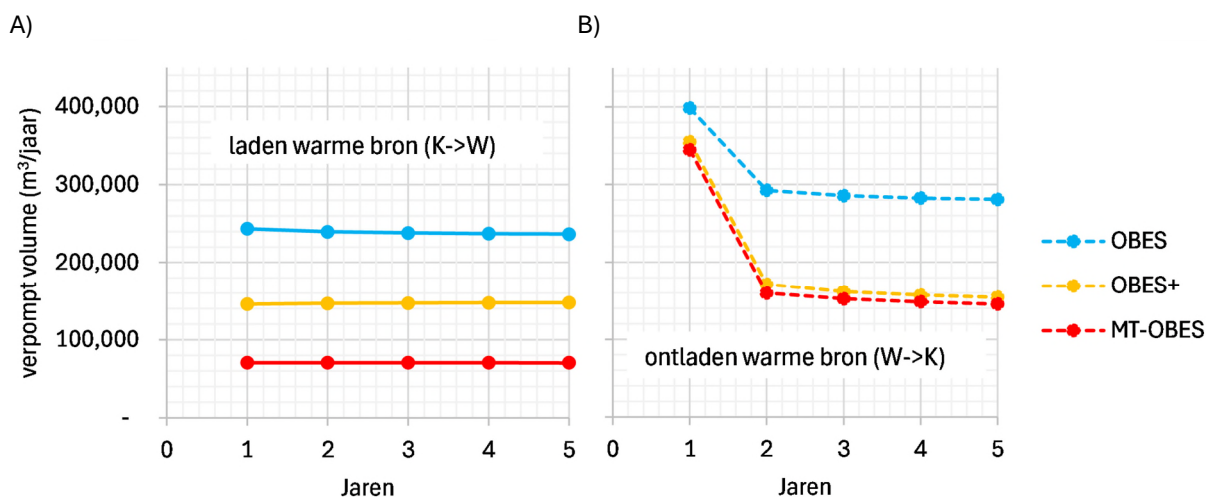
3.2.2 Prestaties en dimensionering bronnen

Bij het conventionele OBES systeemconcept is de gemiddelde jaarlijkse ΔT tijdens het laden (zomer) en ontladen (winter) van de warme bron ongeveer gelijk (ca. 8°C) (Figuur 3-13B). Bij OBES+ en MT-OBES wordt de warme bron geladen op een hogere temperatuur, terwijl de onttrekkingstemperatuur uit de koude bron nagenoeg gelijk blijft, de gemiddelde ΔT tijdens laden van de warme bron (Figuur 3-2B) neemt daarmee toe tot 17°C bij OBES+ en tot 37°C bij MT-OBES. De gemiddelde ΔT tijdens het ontladen van de warme bron neemt toe ten opzichte van conventionele OBES (8°C), tot 14.5°C in jaar 5 bij OBES+ en tot 18°C bij MT-OBES in jaar 5. De toename in ΔT voor de twee systeemconcepten is veel groter tijdens het laden van de warme bron t.o.v. het ontladen van de warme bron.

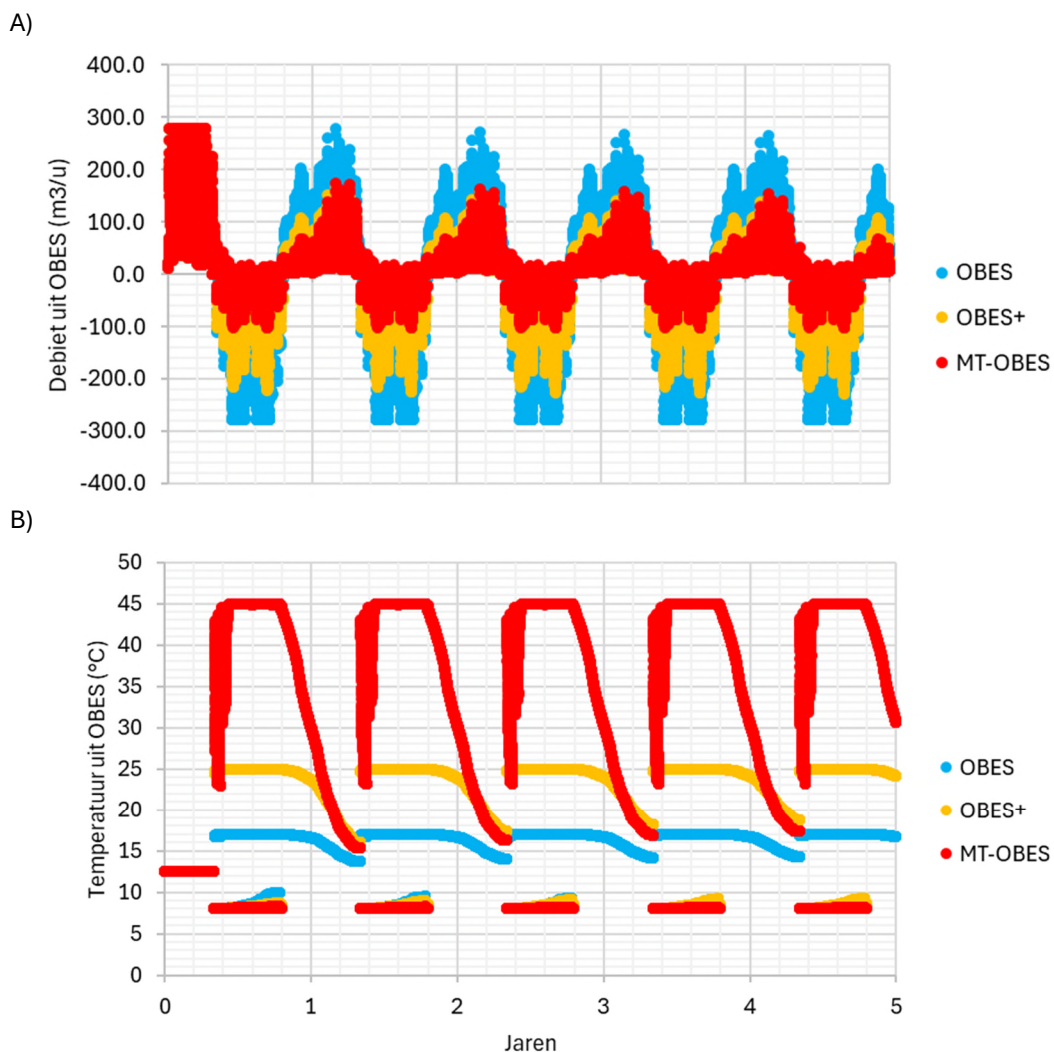


Figuur 3-13 Gemiddelde jaarlijkse ΔT (temperatuurverschil tussen warme en koude bronnen) tijdens A) laden van de warme bron en B) het ontladen van de warme bron.

In de eerste maanden van het eerste jaar is de warme bron nog niet geladen en wordt er water onttrokken met de natuurlijke grondwatertemperatuur (12,5 °C) en teruggepompt in de koude bron met 8 °C wat resulteert in een relatief kleine ΔT (Figuur 3-13A) en dus een groot onttrekkingsvolume uit de warme bron bij alle drie de systeemconcepten (Figuur 3-14A). Als er niet wordt gestart in het stookseizoen maar bijvoorbeeld in de lente of de zomer heeft dit een minder groot effect. Tijdens het laden van de warme bron in jaar 1 en ook in de opvolgende jaren is het debiet dat wordt verpompt bij OBES+ en MT-OBES aanzienlijk kleiner dan het debiet in het conventionele OBES systeemconcept (Figuur 3-15A) doordat de totale hoeveelheid warmte die geladen wordt in de zomer vergelijkbaar is voor de drie concepten (Figuur 3-12B, 20% en 28% toename voor OBES+ en MT-OBES ten opzichte van OBES), terwijl de ΔT wel verdubbelt (OBES+) of meer dan een factor 4 toeneemt (MT-OBES). Dit resulteert in een afnemend opslagvolume met hogere opslagtemperatuur; in jaar 5 is dit 236.000 m³ voor OBES, 148.000 m³ bij OBES+ en 70.000 m³ bij MT-OBES. Tijdens het ontladen van de warme bron in jaar 5 wordt er bij OBES en OBES+ een vergelijkbare hoeveelheid volume onttrokken (Figuur 3-14A) ten opzichte van het laadvolume (Figuur 3-14B). Bij het MT-OBES scenario in jaar 5 wordt een factor 2,3 meer grondwater onttrokken uit de warme bron dan er wordt opgeslagen. Dit komt doordat gedurende het ontladeseizoen de temperatuur in de warme bron van het MT-OBES scenario relatief snel daalt t.o.v. de andere scenario's en daardoor neemt het debiet toe om de gevraagde hoeveelheid warmte te leveren. Het ontladdebiet is hierdoor aan het einde van het seizoen veel groter dan het laaddebiet bij MT-OBES (Figuur 3-15B), maar nog steeds een stuk kleiner dan bij conventionele OBES.



Figuur 3-14 Jaarlijks totaal verpompt volume tijdens A) laden van de warme bron en B) het ontladen van de warme bron.



Figuur 3-15 Onttrekkingsdebiet uit de bronnen (m^3/u) voor de drie scenario's. B) Temperatuur onttrokken uit de warme/koude bronnen.

Op basis van de uitgevoerde simulaties is de dimensionering van de hoofdcomponenten bepaald (Tabel 3-5). Het maximale debiet van het opslagsysteem in het eerste jaar is in alle drie de concepten hetzelfde ($279 \text{ m}^3/\text{u}$) omdat in

de startsituatie in alle gevallen de bodemtemperatuur gelijk is. Tijdens de eerste laadcyclus ontstaan er verschillen in opslagtemperaturen en daarmee ook in het maximale debiet. Bij OBES+ daalt het debiet ten opzichte van OBES vanaf jaar 2 met circa 20% naar 223 m³/u. Bij MT-OBES daalt het maximale debiet nog verder naar 173 m³/u. Dit is een 40% reductie ten opzichte van OBES. Doordat na 1 laadcyclus het maximale debiet daalt bij OBES+ en MT-OBES, zijn in principe minder bronnen nodig, dit kan alleen echter tot een probleem leiden in de eerste maanden van het 1^e jaar wanneer geen mitigerende maatregelen worden genomen (zie paragraaf 3.2.2).

De lage temperatuur warmtepomp wordt bij OBES+ en MT-OBES in de zomer ingezet om warmte op te slaan op een hogere temperatuur. De grootte van de warmtepomp is berekend zodat in de zomer het totale vermogen dat beschikbaar is uit regeneratie met TEO kan worden opgeslagen in de warme bron. Dit betekent dat het warmtepompvermogen bij MT-OBES circa 20% groter is dan bij het OBES-systeem. De TEO draait niet altijd op vollast, waardoor het mogelijk zou moeten zijn om het vermogen naar beneden bij te stellen. Dit kan onderzocht worden als een mogelijke optimalisatie.

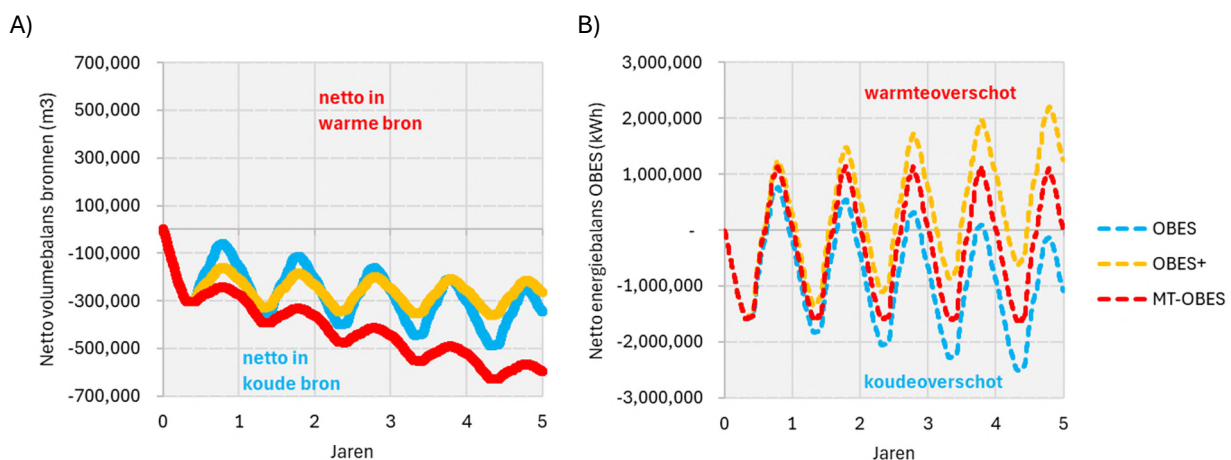
Tabel 3-5 | Dimensionering hoofdcomponenten systeemconcept USP

		Conventionele OBES	OBES+	MT-OBES
Opslag				
Max. debiet, jaar 1	[m ³ /u]	279	279	279
Max. debiet, vanaf jaar 2	[m ³ /u]	279	223	173
Aantal warme bronnen	[-]	2	1	1
Aantal koude bronnen	[-]	2	1	1
Warmtepompen				
Therm. vermogen lage temp. warmtepomp	[kW _{th}]	2.731	2.731	3.217
Vollaturen lage temp. warmtepomp	[u/jaar]	1.295	1.821	1.327

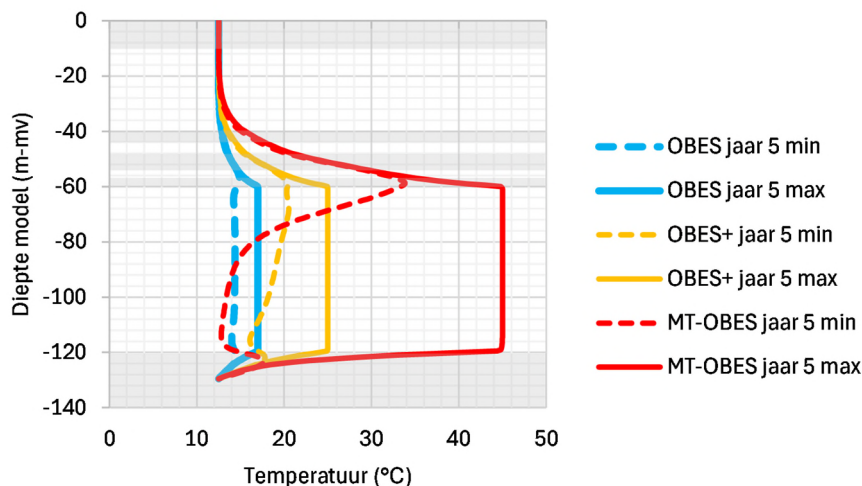
3.2.3 Ruimtegebruik ondergrond en thermische effecten

Het maximale debiet en het jaarlijkse volume dat wordt gebruikt voor het laden van de warme bron in de ondergrond daalt met toenemende opslagtemperatuur (Figuur 3-13), qua hydrologische effecten neemt het ruimtegebruik dus af met hogere warme brontemperatuur. Voor zowel OBES, OBES+ en MT-OBES wordt er per jaar meer volume onttrokken uit de warme bron dan er wordt opgeslagen, wat leidt tot een negatieve volumebalans tussen de bronnen (Figuur 3-16A). Het netto volume in de koude bron is in dat geval groter dan het volume in de warme bron. Voor OBES en OBES+ is na een aantal jaar een redelijke balans bereikt terwijl voor MT-OBES ieder jaar een veel groter volume wordt onttrokken uit de warme bron en dus het netto volume opgeslagen in de koude bron ieder jaar sterk toeneemt (na 5 jaar 600.000 m³). Bij OBES leidt de negatieve volumebalans ook tot een negatieve energiebalans; er blijft relatief meer koude achter in de koude bron dan warmte in de warme bron (ΔT aan warme en koude kant vergelijkbaar en dus vergelijkbare energieverliezen). Bij het OBES+ scenario wordt meer energie opgeslagen en nemen ook de warmteverliezen in de warme bron iets toe (want groter temperatuurverschil met omgeving), wat leidt tot een positieve energiebalans, er blijft iets meer warmte achter in de warme bron dan er koude achter blijft in de koude bron. Alhoewel er voor het MT-OBES scenario een grotere volumeonbalans is, is er wel een energiebalans (Figuur 3-16B). De warmteverliezen in de warme bron zijn dus relatief sterk en geconcentreerder bij de hogere temperatuur en blijven achter in de ondergrond ondanks dat er meer dan het dubbele volume per jaar wordt onttrokken en zijn daardoor in balans met de relatief grote hoeveelheid koude die achter blijft in de koude bron. Het volume in de ondergrond dat initieel wordt opgewarmd rondom de putten in de aquifer is dus lager voor het OBES+ en het MT-OBES scenario dan bij het OBES scenario. Echter, de warmteverliezen naar buiten toe zijn sterker en nemen dus met de jaren relatief toe t.o.v. het OBES scenario en worden bij vooral het MT-OBES scenario ook aan de bovenkant van de aquifer sneller verspreid door opdrijving (Figuur 3-17).

Het gesimuleerde maximale (in het midden van het opgeslagen thermische volume) verticale temperatuurseffect vanuit de aquifer richting maaiveld na 5 jaar is voor zowel OBES, OBES+ en MT-OBES te merken tot in de bovenliggende aquifer (Figuur 3-17), met een toename van +0,5 °C, +1°C en +3,5 °C respectievelijk. De toename richting maaiveld is het sterkst bij het MT-OBES scenario in de eerste meters boven het opslagpakket en neemt in toenemende mate af met afstand van het opslagpakket. In de praktijk wordt de temperatuurgradiënt in de eerste +/- 10m onder maaiveld sterk beïnvloed door de fluctuatie van de luchttemperatuur (Visser et al., 2015), dat is hier niet meegenomen. Het verticale effect naar onderen is tot 130m diepte gesimuleerd. Het effect naar onderen wordt gedempt bij het MT-OBES scenario doordat opdrukking ervoor zorgt dat tijdens het ontladen (in de loop van de winter) de warme bel leeg raakt en aan de onderkant relatief snel koud water uit het pakket aantrekt (Figuur 3-17 'MT-OBES jaar 5 min'). Aan de bovenkant heerst het tegenovergestelde effect, door de opdrukking van warmte blijft het boven in de aquifer relatief lang warm wat ervoor zorgt dat het (meerjarige) temperatuureffect naar boven relatief toeneemt.



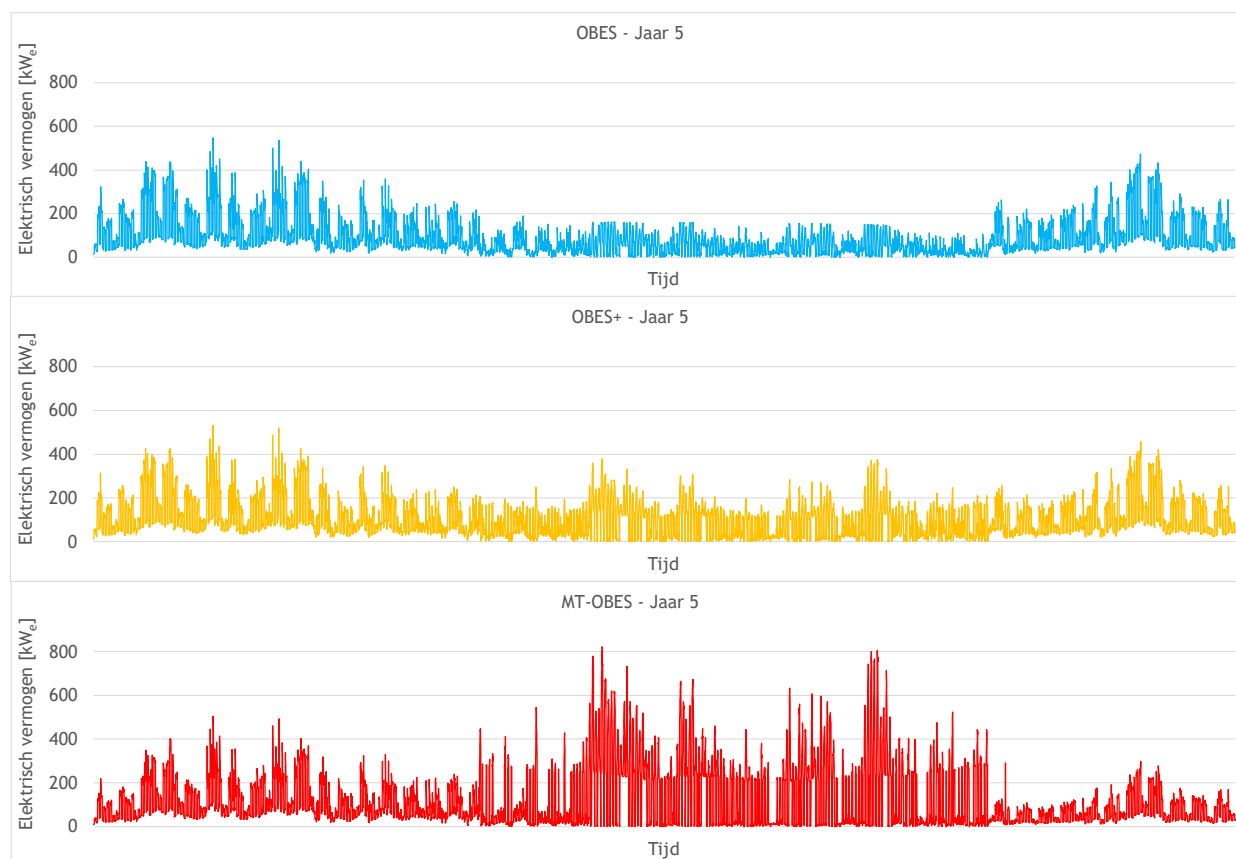
Figuur 3-16 A) Netto volumebalans in de bronnen en B) netto energiebalans in de bronnen voor het OBES, OBES+ en MT-OBES scenario.



Figuur 3-17 Maximale (vol geladen) en minimale (volledig ontladen) verticale temperatuureffect vanuit het opslagpakket op de locatie van de warme bron voor OBES, OBES+ en MT-OBES in jaar 5.

3.2.4 Elektriciteitsverbruik en duurzaamheid

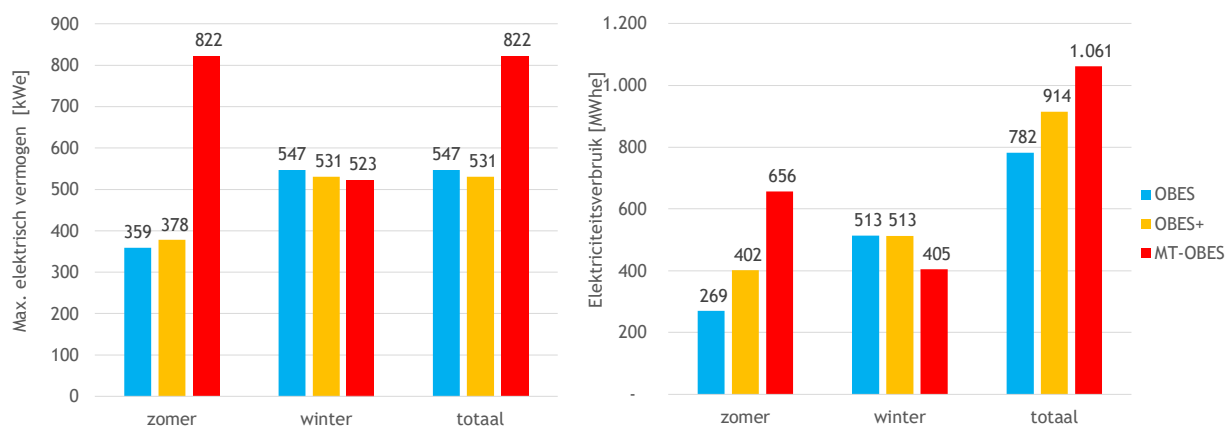
Het elektriciteitsverbruik van het bodemenergiesysteem is op uurbasis doorgerekend voor de verschillende systeemconcepten. Voor jaar 5 zijn de resultaten voor OBES, OBES+ en MT-OBES weergegeven in Figuur 3-18.



Figuur 3-18 Elektriciteitsverbruik in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case USP.

Het maximale elektrisch vermogen en het elektriciteitsverbruik per seizoen is ook samengevat in Figuur 3-19. Bij OBES+ en MT-OBES is in de zomer door de inzet van warmtepomp een duidelijke toename te zien in het elektriciteitsverbruik t.o.v. conventionele OBES. De toename in elektrisch vermogen in de zomer is voor OBES+ beperkt. Bij MT-OBES is een duidelijke toename in elektrisch vermogen te zien als gevolg van het toegenomen vermogen van de warmtepomp. Bij OBES+ is het elektrisch vermogen in de winter iets lager dan bij OBES. Bij MT-OBES kan door de hogere opslagtemperatuur directe warmte worden geleverd. Hierdoor daalt het elektrisch vermogen verder in de winter, het effect is echter beperkt. Doordat de koude bron geladen wordt met 8°C, is de inzet van de warmtepomp bij warmtelevering steeds noodzakelijk. Voor een deel wordt in de winter warmte op directe wijze geleverd en voor een deel via de warmtepomp (zie Figuur 3-20).

De besparing op elektriciteitsverbruik in de winter is kleiner dan het extra verbruik in de zomer, het totale elektriciteitsverbruik op jaarbasis is daarom hoger bij OBES+ en MT-OBES dan bij OBES, zoals ook verwacht. Bij MT-OBES is er een sterke reductie in het stroomverbruik in de winter doordat in totaal circa 25% van de warmte op directe wijze geleverd (Figuur 3-22). Door het invangen van extra warmte in de zomer daalt voor OBES+ en MT-OBES de SPF in de zomer. Er is geen extra nuttig geleverde koude en warmte, terwijl door de inzet van de warmtepomp om op hogere temperatuur te kunnen laden het elektriciteitsverbruik wel toeneemt. In de winter stijgt de SPF voor MT-OBES, doordat nu een deel van de warmte op directe wijze wordt geleverd. Overall is de SPF bij OBES+ en MT-OBES lager dan bij OBES.

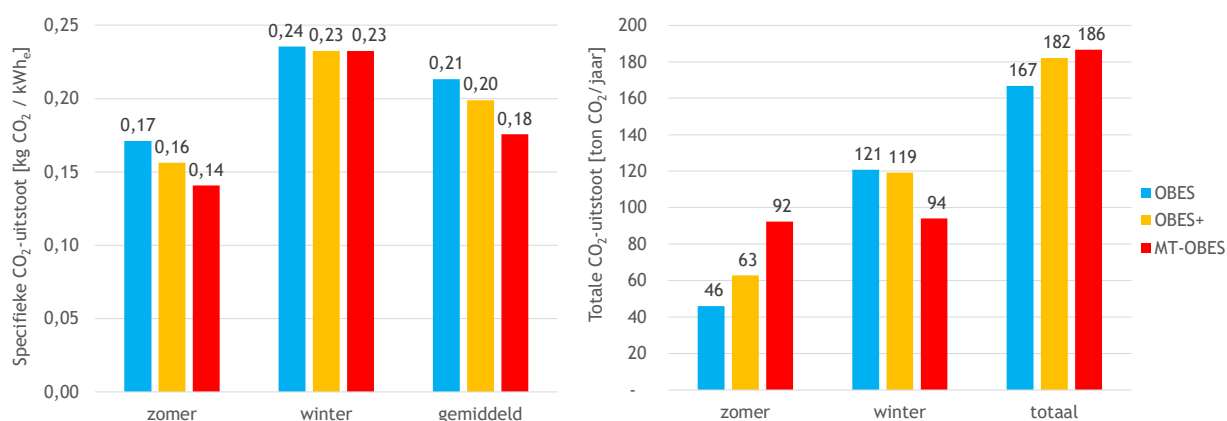


Figuur 3-19 Maximaal elektrisch vermogen (links) en elektriciteitsverbruik (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case USP.



Figuur 3-20 Invulling ruimteverwarming (links) en SPF (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case USP.

Op basis van het uurlijkse elektriciteitsverbruik en het CO₂-emissiefactor profiel (Figuur 2-1) is de CO₂-uitstoot berekend. In Figuur 3-10 staan zowel de specifieke CO₂-uitstoot als de totale CO₂-uitstoot. In de zomer ligt de specifieke CO₂-uitstoot lager dan in de winter, als gevolg van hogere beschikbaarheid van duurzame elektriciteit. Bij OBES+ en MT-OBES ligt de specifieke CO₂-uitstoot lager dan bij OBES. Ondanks de lagere specifieke CO₂-uitstoot in de zomer is de totale CO₂-uitstoot in de zomer bij OBES+ en MT-OBES wel hoger dan OBES. De lagere specifieke CO₂-uitstoot is niet voldoende om te compenseren voor het toegenomen elektriciteitsverbruik. In de winter is de CO₂-uitstoot voor OBES+ en MT-OBES lager dan van OBES. De daling is echter lager dan de toename in de zomer. De totale CO₂-uitstoot ligt voor OBES+ en MT-OBES hoger dan voor OBES. Net als bij de casus Zuilense Vecht is de regeling in het model vraaggestuurd. De warmtepomp wordt dus nog niet specifiek ingezet op uren dat de CO₂-uitstoot het laagste is. In Tabel 3-5 is te zien dat bij OBES+ en MT-OBES het aantal vollasturen van de lage temperatuur warmtepomp tussen de 1.300 en 1.800 uur per jaar ligt. Dit betekent dat er nog de nodige speelruimte is om de inzet van de warmtepomp in de tijd te vergroten en te verbeteren.



Figuur 3-21 Specifieke CO₂-uitstoot (links) en totale CO₂-uitstoot (rechts) in jaar 5 voor OBES, OBES+ en MT-OBES bij case USP.

3.2.5 Investerings- en exploitatiekosten

Voor het ramen van de kosten is het bestaande OBES systeem als startpunt genomen. Op basis van het ontwerp (zie bijlage II) en de dimensionering (zie paragraaf 3.2.2) zijn op haalbaarheidsniveau de extra investeringskosten en exploitatiekosten geraamd (+/- 30%) die nodig zijn om het bestaande OBES aan te passen naar een OBES+ of MT-OBES. Deze zijn respectievelijk weergegeven in Tabel 3-6 en Tabel 3-7. Een positieve waarde geeft meerkosten aan en een negatieve waarde geeft een kostenbesparing aan. De kosten zijn meegenomen tot en met de demarcatie. Eventuele kosten voor het aanpassen van de luchtbehandelingskasten (LBK's) zijn niet meegenomen. Op moment van schrijven zijn twee van de vier doubletten gerealiseerd. Uit Tabel 3-5 volgt dat bij OBES+ een reductie van circa 20% mogelijk is en bij MT-OBES een reductie van 40% op het benodigde debiet. Bij MT-OBES zou dit betekenen dat 1 doublet minder nodig is dan voorzien. Dit is een besparingspotentieel van circa 350.000 euro.

Tabel 3-6 | Geraamde meerinvestering t.o.v. OBES bij case USP (excl. BTW, +/- 30%, negatieve waarde is besparing)

		OBES+	MT-OBES
Opslag (inkoppeling)*	[€]	270.000	300.000
Warmtepomp)**	[€]	-	340.000
TEO	[€]	-	-
Aansluiting elektriciteit	[€]	-	-
Subtotaal	[€]	270.000	640.000
Onvoorzien	[€]	27.000	64.000
Ontwerp, advies en vergunningen	[€]	27.000	64.000
Subtotaal	[€]	330.000	770.000
Besparingspotentieel bronnen	[€]	-	-350.000
Totaal	[€]	330.000	420.000

* Om OBES+/MTO in te koppelen zijn extra leidingwerk en appendages nodig per gebouw.

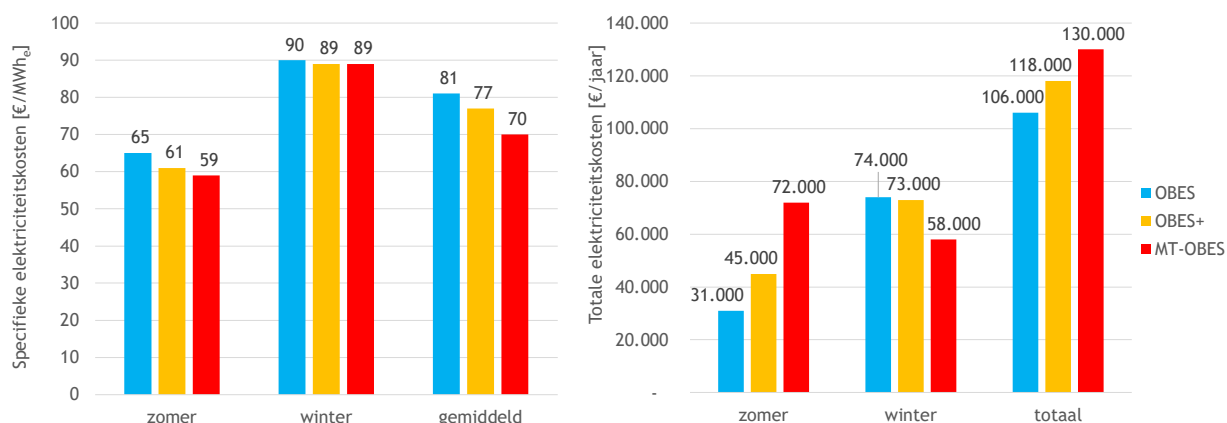
** Er wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de reeds aanwezige warmtepompen. Bij MTO is extra warmtepompvermogen nodig van circa 500 kW_{th}.

Tabel 3-7 | Geraamde meerkosten exploitatie t.o.v. OBES bij case USP (excl. BTW, negatieve waarde is besparing)

		OBES+	MT-OBES
Elektriciteit	[€/jaar]	12.000	22.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	2.200	16.200
Reservering vervangingskosten	[€/jaar]	7.400	31.000
Monitoring	[€/jaar]	-	5.800
Subtotaal	[€/jaar]	21.000	75.000
Onvoorzien	[€/jaar]	2.100	7.500
Totaal	[€/jaar]	24.000	82.000

Bij MT-OBES vormen de reservering vervangingskosten een belangrijke kostenpost bij exploitatie. De reservering vervangingskosten is berekend door de investeringskosten te delen door de levensduur van de componenten (zie ook toelichting onder Tabel 3-3). Voor de aanvullende investering in de opslag leidingwerk, kleppen, wisselaars etc.) is gerekend met een levensduur van 30 jaar en voor de warmtepomp is gerekend met een levensduur van 15 jaar). Dit gaat wel uit van langdurige voortzetting van het systeem. Wanneer het systeem bijvoorbeeld na 30 jaar wordt stopgezet, dan is geen reservering nodig voor het opslag-deel en is na 15 jaar geen verdere reservering nodig voor de warmtepomp.

Op basis van de modelberekeningen en het prijsprofiel voor elektriciteit zijn per uur de elektriciteitskosten berekend (zie Tabel 3-3). Er kan hierbij ook een opsplitsing gemaakt worden van de kosten in de winter en in de zomer. Dit is gedaan voor zowel de totale kosten als de specifieke kosten. De resultaten staan in Figuur 3-22. In de winter is er, door het lagere elektriciteitsverbruik, een besparing te zien in de totale kosten bij MT-OBES. De extra kosten in de zomer liggen echter hoger dan de besparing, waardoor de totale kosten hoger liggen. De specifieke kosten per kWh liggen lager bij OBES+ en MT-OBES, maar deze reductie in specifieke kosten is niet voldoende voor lagere totale energiekosten. Net als bij locatie Zuilense Vecht is de regeling in het model vraaggestuurd. De warmtepomp wordt dus nog niet specifiek ingezet op uren dat de kosten voor elektriciteit het laagste zijn. Hier is nog wel de nodige speelruimte voor aangezien het aantal vollasturen bij OBES+ en MT-OBES tussen de 1.300 en 1.800 uur per jaar ligt (zie Tabel 3-5).



Figuur 3-22 Specifieke kosten elektriciteit exclusief energiebelasting en BTW (links) en totale kosten elektriciteit, inclusief energiebelasting en exclusief BTW (rechts) bij case USP.

Zowel voor OBES+ als voor MT-OBES is er ten opzichte van conventionele OBES sprake van een toename in kosten bij zowel de investering als bij de exploitatie. Er is in deze situatie geen terugverdientijd te berekenen. Mogelijk dat er, na het toepassing van een slimme regeling die beter inspringt op de prijsverschillen van elektriciteit op uurbasis wel een kostenbesparing mogelijk is.

4 Discussie

4.1 Temperatuurafname in warme bron bepaald door opslagcondities

Doordat er bij OBES+ en MT-OBES ten opzichte van OBES relatief kleinere volumes worden opgeslagen neemt in de ondergrond de thermische straal (R_{th}) van het opslagvolume rondom het putfilter af (Tabel 4-1). Bij een kleinere thermische straal bij een bepaalde aquiferdikte neemt de verhouding van het oppervlak van de buitenschil van het verwarmde volume (A) ten opzichte van het opgeslagen volume (V), ook wel de verhouding A/V, toe. Met een toename van A/V nemen de relatieve conductieverliezen toe (Bloemendal & Hartog, 2018). Omdat er ongeveer gelijke hoeveelheden energie worden opgeslagen bij het OBES, OBES+ en MT-OBES systeemconcept, maar in toenemende mate met een ongunstigere A/V, nemen de absolute conductieverliezen toe. Tegelijkertijd neemt bij hogere opslagtemperaturen (bij MT-OBES) het dichtheidsverschil met het natuurlijke grondwater toe, wat kan leiden tot oprijving van het opgeslagen water. Het effect dat oprijving heeft op het terugwinrendement neemt af wanneer het thermische front verder van de put af ligt, ofwel bij een kleinere verhouding tussen de aquifer dikte en de thermische straal L/R_{th} , (Beernink et al., 2024). Oprijving is daarnaast afhankelijk van de doorlatendheid (horizontaal en verticaal) van het opslagpakket, bij hogere doorlatendheden treedt oprijving sterker op. Bij een hogere opslagtemperatuur (bij OBES+ en MT-OBES) nemen, voor een gegeven hoeveelheid opgeslagen energie, de verliezen dus toe door conductie en neemt ook de potentie van verliezen door oprijving toe.

Bij zowel casus Zuilense Vecht als Utrecht Science Park laten de simulatieresultaten zien dat bij het MT-OBES concept (opslagtemperatuur 45 °C) de temperatuur onttrokken uit de warme bron relatief snel (ten opzichte van het OBES+ en OBES scenario) daalt tijdens warmtelevering. Ten opzichte van Zuilense Vecht wordt bij Utrecht Science Park een groter volume opgeslagen (meer dan factor 4) en daarom is de verhouding A/V kleiner (ondanks dikkere opslagaquifer) en zijn dus de te verwachten verliezen door conductie kleiner (Tabel 4-1). Bij zowel ZV als USP leidt een combinatie van de hoge doorlatendheid van het opslagpakket (1^e watervoerende pakket 30 m/d, 2^e watervoerende pakket 50 m/d) en het dichtheidsverschil bij 45 °C (~991 kg/m³ ten opzichte van de natuurlijke achtergrondtemperatuur van 12.5 °C ~999 kg/m³) tot oprijving en kanteling van het thermische front (zie doorsnede simulatie in Bijlage V). Het effect van oprijving is naar verwachting bij USP relatief sterker dan bij ZV door de hogere doorlatendheid van het pakket en de grotere verhouding L/R_{th} (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Opslagcondities en resultaten van de simulaties voor de warme bron van de doorgerekende systeemconcepten (OBES, OBES+ en MT-OBES) voor locatie Zuilense Vecht en locatie Utrecht Science Park.

	Zuilense Vecht (1 ^e watervoerende pakket)			Utrecht Science Park (2 ^e watervoerende pakket)			eenheid
Doorlatendheid aquifer	$K_h=30 / K_v=6$			$K_h=50 / K_v=10$			m/d
Dikte opslagpakket	30			60			m
	OBES (17°C)	OBES+ (25°C)	MT-OBES (45°C)	OBES (17°C)	OBES+ (25°C)	MT-OBES (45°C)	
ΔT gemiddeld laden							°C
Opslagvolume laden	55 000	35 000	17 000	235 000	145 000	70 000	m ³ /jaar
Thermische straal R_{th}	30.6	24.4	17.0	44.8	35.2	24.4	m
L/R_{th}	1.0	1.2	1.8	1.3	1.7	2.5	-
A/V	0.13	0.15	0.18	0.08	0.09	0.12	1/m
Terugwinrendement warme bron jaar 5	86	79	82	91	83	86	(%)

Ondanks dat de opslagcondities tot een relatief snelle afname van de onttrekkingstemperatuur leiden bij de MT-OBES scenario's (Figuur 3-4 en Figuur 3-15) is het terugwinrendement zeer hoog van de warme bron (teruggewonnen energie ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur) in jaar 5 (Tabel 4-1). De warmteverliezen op jaarbasis, die in de ondergrond optreden, zijn zeer beperkt bij de MT-OBES scenario's omdat in beide gevallen het onttrekkingsvolume uit de warme bron veel groter is dan het opslagvolume (Figuur 3-3 en Figuur 3-14). Daardoor wordt het grootste gedeelte van de verspreide warmte (door oprijving en conductie) alsnog weer teruggewonnen uit de put, zei het op een lagere temperatuur.

Verminderen temperatuurafname tijdens ontladen MT-OBES

Zolang tijdens ontladen de onttrokken temperaturen hoog genoeg zijn voor directe warmtelevering (bij voorkeur gedurende de hele ontladperiode) kan er met een kleiner debiet gepompt worden. De temperatuurafname van de warme bron tijdens ontladen wordt beïnvloed door de volgende opslagcondities:

1. Eigenschappen opslagpakket

De mate van oprijving kan sterk worden beïnvloed door de doorlatendheid van het opslagpakket. De horizontale doorlatendheidscoëfficiënt (K_h) die is toegepast is redelijk betrouwbaar voor beide opslagpakketten, gebaseerd op andere systemen in Utrecht en pomptesten. In deze studie is een anisotropiefactor van 5 aangenomen ($K_h/K_v = 5$). Echter, de K_v , die op de lengteschaal van de aquifer beïnvloed kan worden door (dunne) slecht doorlatende horizontale lagen, kan mogelijk aanzienlijk variëren, afhankelijk van de lokale heterogeniteit van de ondergrond. Het nader bepalen van K_v kan dus tot een vermindering van oprijvingseffecten en dus een verbetering van het MT-OBES systeemconcept leiden.

2. Laden meer warmte in warme bron

De hoeveelheid warmte die momenteel wordt geladen wordt beperkt door de grootte van de TEO als regeneratiemiddel. Voor het OBES en OBES+ scenario lijkt de TEO qua grootte goed te passen, de concepten zijn voor zowel Zuilense Vecht en Utrecht Science Park redelijk in volume en energiebalans (Figuur 3-5 en Figuur 3-16). Bij MT-OBES zou een grotere TEO-aansluiting (groter debiet of grotere ΔT) in de zomer er toe leiden dat er meer warmte kan worden opgeslagen, hierdoor wordt het opslagvolume en daarmee de opslagcondities gunstiger en nemen de warmteverliezen door conductie en oprijving relatief af waardoor er een langere periode met een hoge temperatuur kan worden ontladen uit de warme bron. Het is nader uit te zoeken hoeveel groter de TEO zou moeten zijn om de MT-OBES voldoende te laden. Gelijktijdig neemt het opslagvolume dus toe (want meer energie) en neemt het onttrekkingsvolume af (want ΔT blijft langer hoog) dus de MT-OBES komt snel beter in volumebalans. De absolute hoeveelheid warmte die jaarlijks achter zal blijven in de ondergrond neemt toe (groter warmteoverschot, geen energiebalans) indien er verder geen aanpassingen aan het ontwerp worden gedaan.

3. Putontwerp en technische verbeteringen

Om het effect van oprijving tegen te gaan kan er in plaats van met 1 lang filter gewerkt worden met meerdere kortere putfilters boven elkaar (MPPW, *multiple partially penetrating wells*) die los van elkaar kunnen worden gebruikt. Studies laten zien dat deze oplossingen tot een duidelijke verbetering kunnen leiden voor putten waar oprijving van warmte tot sterke warmteverliezen leidt (van Lopik et al., 2022). De implicaties van toepassing van deze partiële putfilters bij MTO en HTO zou nader onderzocht moeten worden omdat deze nog niet in de praktijk zijn toegepast. Waarschijnlijk gaat toepassing gepaard met hogere kosten en complexere aansturing.

4.2 Ruimtebesparing in de ondergrond

Deze studie laat zien dat ten opzichte van conventionele OBES bij OBES+ en MT-OBES het maximale debiet en het jaarlijkse opslagvolume dat benodigd is in de warme bron sterk afneemt, zowel bij Zuilense Vecht en Utrecht Science Park. Door de kleinere debieten kunnen bronnen qua hydraulische interactie dichter bij elkaar. Daarnaast

kan bij hogere temperaturen met een kleinere druk meer worden geïnjecteerd doordat de viscositeit van het geïnjecteerde water sterk afneemt boven de 20 °C. In welke mate dit tot kleinere hydraulische effecten leidt is hier niet onderzocht.

Bij toenemende opslagtemperatuur ligt het qua thermische effecten wat ingewikkelder. Enerzijds neemt de thermische straal van het opslagvolume af bij hogere opslagtemperatuur. Door de warmteverliezen die iedere opslagcyclus optreden reiken, naarmate de tijd vordert, de horizontale temperatuurseffecten vanuit de opgeslagen bel echter verder dan deze thermische straal. Bij opslag bij hogere temperaturen is deze warmteverspreiding door conductie sterker doordat het temperatuurverschil groter is. Daarnaast wordt voor condities waar dit van toepassing is door opdrijving het temperatuurseffect vergroot aan de bovenkant van de aquifer, en verkleint aan de onderkant van de aquifer (Figuur 3-7). In relatie tot de ruimtelijke inpassing en vergunningsverlening van OBES systemen lijkt het zinvol om nader te onderzoeken hoe deze toename in radiale verliezen zich verhouden tot de afname qua initiële thermische straal, en hoe dit zich gedurende de operationele periode (bijv. 20 jaar) van een OBES ontwikkeld.

4.3 Netcongestie en CO₂ besparing

Bij netcongestie is er een tekort aan transportcapaciteit in het elektriciteitsnet. Door de toenemende elektrificatie in Nederland wordt netcongestie een steeds belangrijker aandachtspunt. Netcongestie kan op verschillende momenten optreden, zoals bijvoorbeeld tijdens piekverbruik op winterse dagen (afnamecongestie), in de zomer tijdens zonnige dagen (teruglevercongestie) of op specifieke momenten van de dag.

In de winter is er doorgaans sprake van afnamecongestie. In dat geval loont het om de maximale aansluitcapaciteit te verlagen (doelstelling 1, zie hoofdstuk 1). Voor OBES, OBES+ en MT-OBES is gekeken naar het elektriciteitsverbruik op uurbasis (zie Figuur 3-7 en Figuur 3-18). Voor de zomer en winter is het maximale elektrisch vermogen bepaald (zie Figuur 3-8 en Figuur 3-19). Bij OBES+ is een lichte daling in de winter te zien (circa 2-3%) ten opzichte van OBES. Deze daling is een gevolg van het grotere temperatuurverschil tussen de bronnen. Hierdoor is het debiet dat de bronpompen moeten verpompen kleiner. Bij MT-OBES is de daling circa 4-6%. Deze daling in de winter is een gevolg van de deels directe levering voor ruimteverwarming. Er zijn een aantal mogelijkheden om het maximale elektrisch vermogen in de winter verder te verlagen:

- Verhogen aandeel directe warmtelevering. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden:
 - Verlagen van de temperaturen van het afgiftesysteem. Hoe lager de temperaturen, hoe meer warmte op directe wijze geleverd kan worden.
 - Verhogen van de infiltratietemperatuur van de koude bron. In beide cases wordt de warmtepomp ingezet om de warme bron verder uit te koelen en het uitgeoelde water te infiltreren met 8°C. Door de infiltratietemperatuur in de koude bron te verhogen daalt de inzet van de warmtepomp. Wanneer de warmtepomp helemaal niet meer wordt ingezet, is de injectietemperatuur 1 á 2 graden hoger dan de retourtemperatuur van het warmteafgiftesysteem. Bij een hogere temperatuur van de koude bron daalt wel het temperatuurverschil tussen de warme en koude bron. Hierdoor zal het benodigde debiet van het open bodemenergiesysteem wel toenemen.
 - Vergroten van de opslag. Bij een groter opslagsysteem zal de temperatuur van de warme bron langzamer afnemen (zie 4.1). Hierdoor kan meer warmte op directe wijze worden geleverd. De opslag is echter gekoppeld aan de warmtevraag, en die is voor een project een gegeven. De opslag kan ook verder vergroot worden door een combinatie te zoeken met andere gebruikers.
- Toepassen warmtepomp met hoger rendement. In beide cases is momenteel het uitgangspunt dat gebruik wordt gemaakt van een standaard (1-traps) warmtepomp. In dat geval wordt het rendement van de warmtepomp bepaald door de uittredetemperatuur van de condensor en verdamper. Die zijn in elke situatie gelijk. Om beter gebruik te kunnen maken van de hoge brontemperatuur bij OBES+ en MT-OBES

kan gebruik worden gemaakt van meertraps warmtepompen. Door het in serie schakelen van de verdamper en condensers kan hierdoor een hogere overall COP worden gehaald. Daarmee zal het benodigde piekvermogen dalen.

- Toepassen van korte termijn buffer. Door het combineren van een (MT-)OBES systeem met een korte termijnbuffer kunnen kortstondige pieken afgevlakt worden.

In de zomer kan er op zonnige dagen sprake zijn van teruglevercongestie. Of dit lokaal ook zo is, zal afhangen van de hoeveelheid duurzame lokale elektriciteitsproductie. Wanneer er sprake is van lokale teruglevercongestie, dan kunnen zowel OBES+ als MT-OBES bijdragen aan het terugdringen hiervan door de inzet van de warmtepomp. In de zomer wordt namelijk elektriciteit via de warmtepomp omgezet in warmte en opgeslagen in de bodem (power-to-heat). Het maximale elektrische vermogen bij OBES+ stijgt ten opzichte van OBES met 5 - 30%. Bij MT-OBES is de stijging ruim 70-130%.

Bij het gehanteerde profiel voor CO₂-uitstoot (zie Figuur 2-1) is te zien dat de specifieke CO₂-uitstoot per kWh_e in de zomer lager ligt dan in de winter. Dit is ook terug te zien in de resultaten (zie Figuur 3-10 en Figuur 3-21). In de winter is geen significant verschil in specifieke CO₂-uitstoot te zien in de verschillende concepten. De verdeling van het elektriciteitsverbruik in de winter is in alle concepten (nagenoeg) vergelijkbaar (zie Figuur 3-7), en daarmee dus ook de specifieke CO₂-uitstoot per kWh_e. In de zomer is wel een daling te zien in de specifieke CO₂-uitstoot voor OBES+ en MT-OBES. Dit komt doordat er naast een seizoensfluctuatie ook een dagfluctuatie is in de specifieke CO₂-uitstoot. Gemiddeld is de CO₂-uitstoot laag in de middag en hoog in de nacht. In de huidige regeling wordt voornamelijk warmte geladen met de warmtepomp wanneer er ook een koudevraag is. De koudevraag is overdag het grootst, op momenten waarop de specifieke CO₂-uitstoot ook laag is. Het totale effect van de toename in elektriciteit met een lage specifieke CO₂ uitstoot is voor zowel OBES+ als MT-OBES echter kleiner dan de toename CO₂ uitstoot die gemoeid gaat met de overall toename in elektriciteitsverbruik, waardoor de totale CO₂-uitstoot over het jaar toeneemt (met het huidige CO₂-uitstoot profiel). Er zijn een aantal mogelijkheden en situaties voorzien om de CO₂-uitstoot te verminderen. Voor een deel zijn deze gelijk aan de mogelijkheden voor het verlagen van het elektrisch vermogen:

- Slimme regeling op basis van specifieke CO₂-uitstoot: de CO₂-uitstoot fluctueert per uur. Op dit moment wordt een “domme” regeling toegepast. Dat wil zeggen dat de warmtepomp warmte gaat laden wanneer er capaciteit beschikbaar is om te laden. Er is nog geen koppeling met de CO₂-uitstoot op dat moment. Door een slimme regeling te implementeren kan ingezet worden op maximaal laden op momenten dat de CO₂-uitstoot laag is en kan de warmtepomp aftoeren of zelfs helemaal uitgaan op momenten dat de CO₂ uitstoot hoog is.
- Toepassen van (korte termijn) buffering: buffervaten kunnen aanvullend worden toegepast in combinatie met een slimme regeling. Door buffervaten toe te passen heeft een slimme regeling meer mogelijkheden om te laden op momenten dat dit gunstig is voor de CO₂-uitstoot. Dit is ook mogelijk tijdens ontladen in de winter. Zo kan beter gebruik worden gemaakt van verschillen in CO₂-uitstoot op dagbasis.
- Meer directe warmtelevering (zie eerder genoemd punt).
- Toepassen warmtepomp met hoger rendement (zie eerder genoemd punt in deze paragraaf).

4.4 Technische haalbaarheid

De benodigde aanpassingen om van een conventionele OBES naar OBES+ of MT-OBES te komen is voor projecten in de ontwerpfasen (zoals bij locatie Zuilense Vecht) nog relatief beperkt terwijl deze in bestaande situaties (zoals bij Utrecht Science Park) juist relatief veel impact heeft. In onderstaande tekst wordt dat nader toegelicht.

Locatie Zuilense Vecht: nieuwbouw OBES, OBES+ of MT-OBES

In bijlage II is het hydraulische principeschema weergegeven voor zowel het OBES systeemconcept als voor OBES+ en MT-OBES. Qua installatietechniek verschillen deze opties niet veel van elkaar, al neemt de complexiteit bij

OBES+ en MT-OBES wel wat toe. De configuraties liggen nog redelijk in lijn met wat gebruikelijk is in de markt (ISSO39), daarbij komt dat er geen aanpassing van de afgiftesystemen nodig is. Enige (kleine) aanpassing is dat bij MT-OBES voor de bronnen RVS wikkeldraadfilters wordt geadviseerd en wordt een hogere drukklasse PVC toegepast.

Locatie Utrecht Science Park: transitie OBES naar OBES+ of MT-OBES

De situatie bij USP is gecompliceerder dan bij Zuilense Vecht. In bijlage III zijn de schema's opgenomen voor de hydraulische principes, dit is echter een vereenvoudigde weergave van de huidige situatie omdat in de schema's de focus alleen is gelegd op de LBK's. Dit toename in complexiteit heeft een aantal oorzaken:

1. De OBES van USP is al gerealiseerd, aanpassingen aan een bestaand systeem zijn altijd duurder en ingewikkelder dan in een nieuwbouwsituatie doordat eerst gesloopt moet worden en pas daarna weer opgebouwd
2. De bestaande LTCV netten zijn op een temperatuurniveau die directe levering vanuit de bronnen onmogelijk maakt (wat juist wenselijk is bij toepassen verhoogde warme brontemperatuur). De afgiftesystemen moeten dus uitgesplitst worden in delen die wel geschikt zijn voor directe warmtelevering (met name de LBK's) en delen die niet geschikt zijn (met name de radiatoren en convectoren). De CV leidingen vanuit de technische ruimte voeden vaak zowel installaties die wel geschikt te maken zijn voor directe levering als installaties die dat niet zijn. Dat betekent dat er in veel gevallen nieuwe LTCV netten aangelegd moeten worden in het gebouw.
3. In de bestaande LBK's zijn een aantal wijzigingen nodig: de koelbatterij moet uitgevoerd worden als change-over verwarmingsbatterij, het hydraulisch circuit zal change-over gemaakt moeten worden zodat geschakeld kan worden tussen verwarming en koeling en tenslotte zal de naverwarmer verwijderd moeten worden. Alleen het Schimmel- en Jakob gebouw hebben al circa 20 LBK's, wat wel aangeeft dat dit een aanzienlijke inspanning vergt.
4. Het open bodemenergiesysteem van USP is uitgevoerd als een collectieve installatie. Dit betekent dat bij het wijzigen van het concept (lees: het verhogen van de warme bron temperatuur in het geval van OBES+ en MT-OBES) alle aangesloten BodemEnergieCentrales (BEC's) aangepast moeten worden.

Kort samengevat is een OBES+ of MT-OBES implementatie in plaats van standaard OBES eenvoudig toe te passen wanneer het een nieuwbouw situatie betreft. Bij bestaande bouw kan de complexiteit sterk afhangen van de situatie. De complexiteit wordt vooral bepaald door de afgiftesystemen en de aanwezige distributienetten. Bij niet geschikte afgiftesystemen (niet geschikt voor lage temperatuur) zullen deze moeten worden aangepast. Wanneer er geen sprake is van een separaat distributienet voor deze afgiftesystemen, zal deze moeten worden aangelegd. De impact van deze beide zaken, in termen van kosten en overlast, is groot. De complexiteit neemt nog verder toe wanneer meerdere gebouwen op één OBES zijn aangesloten, zoals bij USP. De complexiteit van de schakelingen voor OBES+ en MT-OBES neemt toe ten opzichte van standaard OBES. Door dit bij het ontwerp vanaf het begin direct mee te nemen, het goed vast te leggen en hier duidelijk over te communiceren lijkt dit niet een onoverkomelijk probleem.

Wanneer het om een enkel gebouw gaat, waarbij het LTCV net en de afgiftesystemen reeds geschikt zijn, zal de complexiteit erg meevallen. Wanneer op zowel de LBK's als de LTCV-netten aangepast moeten worden, en daarnaast ook nog inpassingen gemaakt moeten worden in meerderere bodemenergiecentrales, zoals bij USP, is ombouwen van OBES naar OBES+ of MT-OBES zeer complex. Tussen deze twee situaties liggen allerlei andere mogelijkheden. Per situatie zal bekeken moeten worden welke aanpassingen nodig zijn. Aanvullend zal bij een bestaande situatie bepaald moeten worden wat de maximale opslagtemperatuur is. Deze zal tussen de 35 en 45°C liggen.

4.5 Financiële haalbaarheid

Afname hoeveelheid bronnen

Eén van de voordelen van OBES+ en MT-OBES is dat per bron meer vermogen kan worden geleverd door de grotere temperatuurverschillen. Hierdoor zijn minder bronnen nodig dan bij een OBES. Dit voordeel is terug te zien bij de locatie Zuilense Vecht. Bij OBES+ en MT-OBES zijn 2 bronnen nodig tegenover 4 bronnen voor OBES. Merk hierbij wel op dat het maximale debiet een grensgeval is. Er is 61 m³/u nodig, terwijl het haalbare debiet is ingeschat tussen de 50 en 80 m³/u. Doordat het watervoerend pakket hier dunner is dan gemiddeld, is voor nu uitgegaan van 50 m³/u. Wanneer het debiet gunstig uitvalt, kan wellicht ook bij OBES volstaan worden met 2 bronnen. Generiek kan echter wel geconcludeerd worden dat met OBES+ en MT-OBES minder bronnen nodig zijn. Op basis van de onderzochte locaties ligt de debietreductie bij OBES+ rond de 20-50% en bij MT-OBES rond de 40-50%. Bij Zuilense Vecht kan dit tot een reductie in de investeringskosten leiden van 200 a 300 k€. Dit komt neer op een reductie tussen de 12 en 18%.

Bij locatie Zuilense Vecht gaat het om nieuwbouw. Bij bestaande bouw (casus USP) ligt de situatie complexer. Ook hier is, in geval van MT-OBES, 1 doublet minder nodig. De besparing is echter kleiner dan de extra kosten die nodig zijn voor de aanpassingen bovengronds (technische ruimte, gebouwdistributie en gebouwafgifte). Voor een groter financieel voordeel in bestaande bouw kan gezocht worden naar “simpelere” situaties (zie ook paragraaf 4.4). Bijvoorbeeld een situatie waarin slechts één gebouw is aangesloten en/of het afgiftesysteem al volledig op lage temperatuurniveau is, zodat geen aanpassingen hoeven te worden gemaakt aan gebouwdistributie en afgiftesystemen. Bij een bestaand systeem is er dus niet direct een voordeel in het reduceren van het aantal bronnen. Dit is alleen aan de orde wanneer of het systeem nog in ontwikkeling is, en dus nog niet alle bronnen zijn gerealiseerd, of wanneer er een uitbreiding is aan de vraagkant, bijvoorbeeld door nieuwbouw.

Wanneer minder bronnen worden toegepast, bestaat het risico dat in jaar 1 het systeem vermogen tekort komt. In jaar 1 wordt namelijk gestart met een natuurlijke grondwatertemperatuur, waardoor de temperatuursverschillen, en daarmee ook het vermogen, kleiner is. Wanneer de gebouwen gefaseerd worden aangelegd, hoeft het tekort aan vermogen in jaar 1 niet direct tot problemen te leiden. Wanneer dit wel het geval is, zijn aanvullende maatregelen nodig. Mogelijke maatregelen zijn om, indien mogelijk, te starten met een laadcyclus (dus starten in de zomer). Een andere mogelijkheid is om te “pre-loaden”. In dit geval wordt, voordat het systeem daadwerkelijk warmte gaat leveren, alvast geladen met warmte. In dat geval dient het opslagsysteem wel eerder gereed te zijn dan de gebouwen.

Slimme aansturing

Een tweede mogelijk “verdienmodel” is een reductie op de elektriciteitskosten. Bij de prijsprofielen is te zien dat elektriciteit in de zomer goedkoper is dan in de winter en dat er op uurniveau ook sterke fluctuaties in de prijzen zijn. Door hier slim mee om te gaan kan mogelijk bespaard worden op de elektriciteitskosten. Uit de energetische analyse volgt dat het elektriciteitsgebruik bij OBES+ met circa 12-17 % toeneemt. Bij MT-OBES neemt het elektriciteitsverbruik met circa 24-36% toe. Om een besparing op de elektriciteitskosten te realiseren, dient de gemiddelde inkoopprijs meer te dalen. Bij de huidige regelstrategie is de daling 5 % bij OBES+ en 9-14 % bij MT-OBES. Dit is onvoldoende om te compenseren voor het extra elektriciteitsverbruik. Mogelijkheden om dit verder te verbeteren zijn vergelijkbaar met de mogelijkheden om de CO₂-uitstoot verder te reduceren (zie paragraaf 4.3). Daarnaast kan worden uitgezocht in hoeverre de komende jaren/decennia de fluctuaties in uurlijkse/seizoenale elektriciteitskosten gaan toenemen en er dus een groter financieel voordeel te behalen is.

4.6 Vergunbaarheid verhoogde warme brontemperatuur

Een OBES systeem tot 500m beneden maaiveld is onder de omgevingswet aangeduid als een ‘Milieubelastende Activiteit’. Hiervoor is een vergunning nodig. De provincie is daarbij bevoegd gezag. In het Besluit activiteiten

leefomgeving (Bal) zijn algemene landelijke regels beschreven waaraan een OBES moet voldoen (o.a. registratieplicht, systeemeisen, regels bodemwerkzaamheden, buitengebruikstelling). Daarnaast kunnen er aanvullende provinciale regels zijn opgesteld (omgevingsverordeningen). Voor OBES in de provincie Utrecht zijn dit aanvullende regels wat betreft (Provincie-Utrecht, 2022): interferentie met grondwateronttrekkingen voor drinkwatervoorziening, het doelmatig gebruik van de ondergrond en aanvullende voorwaarden bij MTO en HTO. Daarnaast kunnen er ook nog gemeentelijke regels zijn die van toepassing zijn op (de vergunningsaanvraag voor) een OBES (zoals een lokaal bodemenergieplan). Om de uniformiteit van beoordeling en vergunningverlening van vergunningaanvragen te bevorderen is De Besluitvormings Uitvoerings Methode (BUM) opgesteld dat in de praktijk wordt gebruikt als een hulpmiddel voor het toetsen en beschikken van aanvragen voor OBES in het kader van het Besluit activiteiten leefomgeving en de (provinciale) omgevingsverordening (SIKB, 2023).

Op basis van de verschillende vergunningseisen voor OBES kunnen er 4 generieke onderdelen worden gedefinieerd die relevant zijn in het kader van de vergunbaarheid van OBES met verhoogde warme brontemperatuur:

- Voorkomen van negatieve interferentie: negatieve thermische of hydrologische interactie met naburige systemen, dit wordt bepaald in de effectenstudie met een model.
- Doelmatig gebruik ondergrond en energierendement: volgens de algemene regels in de Bal moet een OBES een voldoende hoge gemiddelde ΔT tussen de warme en koude bron hebben om het doelmatig gebruik van de bodem te waarborgen (in de provincie Utrecht wordt een gemiddelde ΔT van minimaal 4 °C verplicht). Daarnaast moet het energierendement (o.a. de Seasonal Performance Factor) voldoende hoog zijn. Wat voldoende hoog is wordt per systeem afgewogen (bijv. een SPF van 4-7 is goed haalbaar als voorbeeld in de BUM).
- Energiebalans in bodem: volgens de algemene regels voor OBES moet er minimaal eens in de vijf jaar meer koude in de bodem zijn opgeslagen dan warmte. Oftewel, een (langdurig) warmte-overschot in de bodem is niet toegestaan. Een koude-overschot mag volgens de algemene regels wel. In de praktijk worden in de vergunning hiervoor maatvoorschriften opgenomen: een koude-overschot wordt over het algemeen redelijk makkelijk toegestaan. In de provincie Utrecht wordt er volgens het provinciale beleid gestuurd op een energiebalans en is er terughoudendheid wat betreft het vergunnen van een warmte-overschot. In de praktijk kan een warmte-overschot bijvoorbeeld worden toegestaan als er op gebiedsniveau geen netto warmte-overschot is of als dit gebeurt in het kader van een onderzoeks-/pilotproject.
- Temperatuur grondwater: in principe is de maximale injectietemperatuur volgens de algemene regels 25 °C. Maatwerkvoorschrift voor het verlenen van hogere temperaturen is per provincie verschillend. In sommige provincies is het mogelijk voor onderzoeks-/pilotprojecten om hogere temperaturen te gebruiken als het oogmerk en de strekking van de algemene regels in het Besluit activiteiten leefomgeving in acht worden genomen.

Wat betreft de vergunbaarheid van OBES bij verhoogde warme brontemperatuur zijn er verscheidene aspecten te beschouwen in relatie tot de hierboven beschreven toetsingscriteria:

Positieve aspecten van het verhogen van de temperatuur van de warme bron in relatie tot vergunbaarheid

Door het gebruik van een hogere warme brontemperatuur ten opzichte van normale OBES (25 en 45 °C ten opzichte van 17 °C) met gelijkblijvende koude brontemperatuur neemt de ΔT tijdens het laden en ontladen van de warme bron ten opzichte van conventionele OBES (8 °C) flink toe bij OBES+ (verdubbeling) en MT-OBES (ruim vier keer groter). Hierdoor is er een kleiner watervolume nodig voor dezelfde hoeveelheid energie en daardoor neemt dus het jaarlijkse opslagvolume sterk af (Figuur 3-3 en Figuur 3-14). Het vermogen en de geleverde energie dat per kubieke meter aquifer (of vierkante meter “footprint” aan maaiveld voor gegeven dikte aquifer) kan worden opgeslagen neemt op deze manier sterk toe en de ruimte in de ondergrond wordt zo dus doelmatiger gebruikt. Door de kleinere opslagvolumes bij hogere temperaturen neemt zowel het debiet (m^3/u) af voor OBES+ en MT-OBES als ook de viscositeit van het water (bij 45 °C is de viscositeit een factor ~ 3 kleiner dan bij de achtergrondtemperatuur van het grondwater). Alhoewel niet gekwantificeerd in dit onderzoek, zullen hierdoor de

hydrologische effecten (verlaging/verhoging in de bron) kleiner zijn ten opzichte van conventionele OBES. Naarmate de temperatuur in de warme bron afneemt (einde winter) neemt het debiet uit de warme bron toe (Figuur 3-4 en Figuur 3-15) en nemen ook de effecten van viscositeit af, in welke mate hydrologisch effecten kleiner zijn ten opzichte van conventionele OBES aan het eind van het ontladseizoen hangt dus sterk samen met de temperatuurafname in de warme bron.

Door de kleinere volumes die bij hogere temperaturen nodig zijn voor dezelfde hoeveelheid energie is ook de mogelijke verplaatsing van grondwaterverontreiniging kleiner. De plaatsing van OBES in drukke stedelijke gebieden met bodemverontreinigingen kan leiden tot snelle verspreiding van deze verontreinigingen (Hockin et al., 2022). Omdat er minder volume wordt rondgepompt bij hogere warme brontemperatuur verkleint de mate van verspreiding van verontreinigingen ten opzichte van conventionele OBES. Een mogelijk bijkomend positief voordeel is dat eventuele afbraak van verontreinigingen bij hogere temperatuur mogelijk sneller gaat.

Aandachtspunten in relatie tot huidige regelgeving

Bij conventionele OBES wordt standaard opgenomen dat er geen langdurig warmte-overschot in de bodem mag zijn (minimaal eens per vijf jaar meer koude in de bodem dan warmte). Omdat bij een conventionele OBES het temperatuurverschil met de achtergrondtemperatuur (bijv. 12 °C) van het grondwater in de aquifer voor de koude bron (-2 tot -4 °C) en de warme bron (+2 tot +4 °C) vergelijkbaar is, en de energieverliezen in de bronnen vergelijkbaar zijn, heeft de volumebalans en de energiebalans een vergelijkbaar patroon (OBES in Figuur 3-5 en Figuur 3-16). Echter, bij hogere opslagtemperaturen zoals bij OBES+ is het temperatuurverschil met de achtergrondtemperatuur groter in de warme bron (in deze studie heeft OBES+ ($T_w=25$ °C) een temperatuurverschil met de natuurlijke grondwatertemperatuur (12.5 °C) van 12.5 °C, in de koude bron is het temperatuurverschil 4.5 °C). Door het grotere temperatuurverschil nemen per volume-eenheid opgeslagen warmte de relatieve verliezen in de warme bron toe. Bij een volumebalans zal er dus meer warmte achterblijven in de warme bron en is een energiebalans niet mogelijk, resulterend in een warmteoverschot in de bodem (zie OBES+ scenario's ZV en USP). Voor het MT-OBES scenario (bij zowel ZV als USP) is er daarentegen een grote volume-onbalans (er wordt jaarlijks 130% meer volume onttrokken uit de warme bron) waardoor er wel ongeveer een energiebalans is (even veel energie achtergelaten in de warme en koude bron). Echter, de energie die achterblijft in de koude bron bevindt zich wel in een véél groter volume en met de jaren blijft de omvang van de koude bel, onder deze omstandigheden, rondom de koude put toenemen. Deze ongewenste volume-onbalans kan na verloop van tijd (afhankelijk van de afstand, de mate van volumeonbalans en dikte aquifer) leiden tot interactie met de eigen warme bron of met omliggende bronnen. Om een betere volumebalans te krijgen bij MT-OBES voor de twee casussen die hier onderzocht zijn zou er meer warmte moeten worden opgeslagen in de zomer (meer regeneratie), met als gevolg dat de temperatuur in de warme bron in de winter minder snel daalt en er dus minder volume wordt onttrokken uit de warme bron, echter neemt op deze manier wel het warmteoverschot in de warme bron toe (en is er dus geen energiebalans).

Al met al nemen bij een OBES met een koude en een verhoogde warme brontemperatuur de energieverliezen in de warme bron relatief (per m³ opgeslagen grondwater) toe en raakt dus de volume- en energiebalans voor een deel losgekoppeld van elkaar. Bij hogere warme brontemperatuur zal er relatief snel een warmteoverschot in de bodem ontstaan. In het geval dat er alleen een warmtevraag is (zoals bij MTO of HTO), of omdat koeling op een temperatuur boven de natuurlijke grondwatertemperatuur mogelijk is, kunnen OBES systemen worden ontworpen met een 'koude' brontemperatuur boven de achtergrondtemperatuur (in feite is het dan een ook een 'warme' bron). Een energiebalans is dan per definitie niet mogelijk omdat er in beide bronnen warmte (geen koude) wordt verloren ten opzichte van de achtergrondtemperatuur, er is dan dus altijd een warmte-overschot in de bodem.

Naast gevolgen voor de thermische balans zijn hogere opslagtemperaturen (>25°C) ook een aandachtspunt vanuit regelgeving voor het effect op de chemische en microbiologische kwaliteit (Schout & Bloemendal, 2022). De te verwachten effecten zijn groter bij toenemende opslagtemperatuur. Relevant voor de relatief lage temperatuurrange van MTO (tot 45 °C in deze studie) is de mogelijk mobilisatie van sporenelementen zoals arseen.

In dit temperatuur bereik zijn ook verschuivingen in de microbiologische populatie te verwachten. Onderzoek laat zien dat chemische veranderingen voor een deel van de parameters reversibel is bij terugkeer naar achtergrondtemperaturen. Microbiologische veranderingen zijn waarschijnlijk reversibel omdat de ondergrond waar warmteopslag heeft plaatsgevonden open is voor rekolonisatie. De te verwachten effecten zijn in detail beschreven in Schout and Hartog (2021). In de praktijk worden de effecten bij opslag met verhoogde warme brontemperatuur sinds ~3 jaar bij een aantal pilotlocaties gemonitord (o.a. door bemonsteren grondwater uit de put en de aquifer). Hierbij worden de in eerste instantie waargenomen watersamenstellingsveranderingen voornamelijk gedomineerd door processen als vermenging van grondwatertypen en het boren van de put zelf. Hierdoor zijn de mogelijke effecten door de verhoogde opslagtemperatuur lastiger te meten en te onderscheiden. Tevens kunnen sommige thermische effecten zich op de langere tijdschaal ontwikkelen. Hier kan verdere monitoring de komende jaren (bij huidige en toekomstige pilots met verhoogde opslagtemperatuur) meer inzicht in geven (Bloemendal et al., 2020; Schout et al., 2023). Het voorlopig afwegingskader dat kan worden gebruikt bij vergunningverlening voor HTO systemen (Bloemendal et al., 2021) kan als uitgangspunt gebruikt worden voor vergunningsverlening bij OBES met verhoogde warme brontemperatuur. Op basis van de specifieke aanvullende eisen voor MTO en HTO in de provincie Utrecht (Provincie-Utrecht, 2022) zullen er bij verhoogde warme brontemperatuur (>25 °C) in het eerste watervoerende pakket (bijvoorbeeld Figuur 3-6) voorwaarden aan de (maximale) temperatuursverhoging in de bovenste meters van het eerste watervoerende pakket en/of de eventuele deklaag gesteld worden, in combinatie met aanvullende monitoring.

Niet eenduidig op basis van huidige resultaten

De huidige studie laat zien dat de jaarlijkse SPF lager is bij OBES+ en MT-OBES ten opzichte van conventionele OBES doordat er relatief meer stroom gebruikt moet worden in de zomer om de warme bron te laden. Omdat een (klein) deel van de extra geladen warmte in de zomer verloren gaat tijdens opslag is de SPF voor opslag bij verhoogde warme brontemperatuur daarmee altijd lager over het gehele jaar heen. Echter, hierbij wordt geen onderscheidt gemaakt in de duurzaamheid, prijs en mate van netcongestie tijdens het gebruik van de elektriciteit. De SPF in de winter neemt bij OBES+ en MT-OBES wel degelijk toe (Figuur 3-9 en Figuur 3-20) doordat er dan minder elektriciteit gebruikt wordt, wat een positief effect heeft op de duurzaamheid van de stroom en netcongestie tegengaat (Figuur 3-10 en Figuur 3-21). De jaarlijkse SPF die bij conventionele OBES wordt gebruikt in vergunningsverlening is dus niet toereikend en representatief om inzicht te geven in het energierendement en het doelmatig gebruik van de ondergrond. De SPF zou bijvoorbeeld per seizoen beoordeeld kunnen worden (belangrijker in winter). De afname in CO₂- emissie (groenere stroom) of afname qua aansluitvermogen (netcongestie) zou ook beschouwd kunnen worden naast de SPF om een vollediger beeld van de toegevoegde waarde van een verhoogde warme brontemperatuur te krijgen.

Hoewel de kans op negatieve hydrologische interferentie tussen OBES systemen kleiner worden bij hogere opslagtemperatuur vanwege het kleinere debiet (zoals hierboven besproken), geven de resultaten van deze studie aan dat de thermische effecten van hogere opslagtemperaturen zich niet op vergelijkbare wijze laten versimpelen. Zo leidt de afname van het opslagvolume ten opzichte van conventionele OBES door een grotere ΔT bij hogere opslagtemperatuur initieel (tijdens de eerste laadcycli) in een kleiner ondergronds volume dat is opgewarmd (maar wel bij hogere temperatuur) rondom de warme bron. Tegelijk zorgt de hogere temperatuur echter voor een relatief groter energieverlies (zie hoofdstuk 4.1) doordat de warmte zich middels conductie (warmtegeleiding) sneller verspreidt naar het omringende koudere grondwater vanwege de hogere temperatuurgradiënt. In de tijd verspreidt de temperatuur zich dus sneller rondom de bron met verhoogde warme brontemperatuur ten opzichte van een conventionele warme bron. Hoe een kleiner ondergronds ruimtegebruik enerzijds en een sterker warmteverlies anderzijds van een OBES met hogere opslagtemperaturen netto uitwerken op de thermische effecten op de omgeving (onder andere op bovenliggende watervoerende lagen) zal sterk afhankelijk zijn van de opslag- en ondergrondcondities. Die gevoeligheid is niet nader onderzocht in deze studie maar valt naar verwachting te relateren aan locatiespecifieke condities (zoals de mate van opdroging, levensduur OBES, thermische eigenschappen, zoals beschreven in hoofdstuk 4.2). Bij de vergunningsverlening kan ook in ogenschouw

genomen worden dat interferentie tussen OBES systemen onderling ook positief kan zijn wanneer bronnen van hetzelfde type dichter bij elkaar worden geplaatst. In de praktijk wordt hier gewoonlijk ook al op organische wijze rekening mee gehouden (Beernink et al., 2022).

De in deze paragraaf besproken aspecten over de effecten van opslag bij hogere temperaturen op de vergunbaarheid zijn samengevat in Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Effect op vergunbaarheid dat is waargenomen bij huidige volgens huidige vergunningsverlening OBES

Positieve aspecten	Aandachtspunten in relatie tot huidige regelgeving	Nader te onderzoeken
Grotere ΔT , doelmatig ruimtegebruik	Energiebalans (warmte-overschot) en volumebalans	COP warmtepomp, Seasonal Performance Factor
Afname hydrologische beïnvloeding	Chemische en microbiologische verschuivingen grondwater	Temperatuureffecten op afstand van warme bron

4.7 Reflectie potentie verhoogde opslagtemperaturen bij OBES in de praktijk in Utrecht

De resultaten van deze studie laten zien dat OBES+ een geschikte techniek is bij nieuwe gebouwen die in een druk gebied zitten, het toepassen van hogere warme brontemperatuur kan ervoor zorgen dat er minder bronnen nodig zijn en dat daardoor deze bronnen makkelijker zijn in te passen tussen reeds bestaande OBES bronnen. Daarnaast kan het tot een significante besparing van de investeringskosten zijn door het gebruik van minder/ondiepere bronnen.

Voor gebouwen die reeds zijn uitgerust met een conventionele OBES laat locatie Utrecht Science Park zien, voor de uitgangspunten van deze studie (geen slimme sturing, simpele WP), dat de aanpassing naar een OBES+ installatie relatief veel kosten met zich meebrengt ten opzichte van de potentiële meerwaarde van de hogere warme brontemperatuur. Echter, indien de energievraag van een dergelijk gebouw zou toenemen of er een grotere gebouwoppervlak zou worden aangesloten dan zou dit door het upgraden naar OBES+ met hetzelfde aantal bronnen mogelijk kunnen zijn. Daarnaast zou de meerwaarde van een OBES+ installatie bij een bestaand gebouw al toenemen als er in de zomer slimmer wordt ingespeeld op inzet van duurzame/goedkope stroom in de zomer en/of de CO₂-intensiteit en prijs van de stroommix sterk gaat variëren door het jaar dan nu is meegenomen voor het 2023 scenario. Voor bestaande systemen die een koude-overschot hebben is er potentie om extra warmte te laden door inzet van de warmtepomp in de zomer en om daarmee het koude-overschot tegen te gaan, hiervoor zijn wel enige technische aanpassingen nodig (zoals bij locatie USP).

De potentie van MT-OBES om (een deel van) de warmtevraag in de winter direct te kunnen leveren en daarmee het stroomgebruik van de warmtepomp in de winter te omzeilen is zeker aanwezig. Echter, voor de twee systemen doorgerekend in deze studie is de temperatuurafname tijdens ontladen relatief groot, door o.a. relatief ongunstige opslagcondities en een relatief klein opslagvolume (zie hoofdstuk 4.1). MT-OBES komt beter tot zijn recht voor grotere opslagsystemen en kan een grotere bijdrage leveren wanneer er een groter aandeel warmte wordt geladen dan dat er in de winter nodig is. Op basis van de inzichten uit deze studie lijkt het erop dat MT-OBES het meest geschikt is bij relatief grote (gekoppelde) gebouwen en/of lokale warmtenetten met een warmtevraag van circa 2000 MWh per jaar of groter (~50,000 m³/jaar opslagvolume in warme bron bij ΔT van 35 °C).

5 Conclusies

Voor de twee onderzochte locaties in de gemeente Utrecht, Zuilense Vecht en Utrecht Science Park, heeft het meerwaarde om de warme brontemperatuur te verhogen tot 25 °C (OBES+) of zelfs 45 °C (MT-OBES) en daarbij het energiesysteem duurzamer en potentieel goedkoper te maken ten opzichte van een conventionele OBES (in deze studie met een warme bron op 17 °C). Dit is gedaan met een gekoppeld model: het energiemodel berekent per uur de benodigde vermogensvraag van het gebouw (warmte of koude) en het ondergrondmodel simuleert op zijn beurt met welk debiet en temperatuur dit uit/in de bronnen gaat. De hogere brontemperaturen kunnen gerealiseerd worden met dezelfde (relatief goedkope) type materialen en componenten in de installatie: een OBES doublet voor directe koeling en verwarming, een TEO (thermische energie uit oppervlaktewater) installatie voor warmtelevering en regeneratie en een warmtepomp. Bij OBES+ en MT-OBES wordt de warmtepomp ingezet in de zomer om actief meer warmte te laden op een hogere temperatuur. Voor een lengte van vijf jaar zijn deze 3 systeemconcepten doorgerekend voor beide locaties.

De verhoogde warme brontemperatuur, toegepast in het OBES+ en MT-OBES systeemconcept, laat duidelijke potentie zien om met een doelmatiger gebruik van de ondergrond de CO₂-emissies en investeringskosten te verkleinen. Met de uitgangspunten in deze studie (gelijke grootte technisch componenten, niet sturen op prijs/duurzaamheid van stroom) is de meerwaarde nog relatief beperkt, een slimmere aansturing en optimalisaties in het energiesysteem (bijv. COP warmtepomp) kunnen deze meerwaarde mogelijk verder vergroten. Voor een nieuw te ontwerpen OBES (zoals bij Zuilense Vecht) leidt het verhogen van de warme brontemperatuur in deze studie tot een potentiële sterke verlaging van de CAPEX van het OBES doordat er minder bronnen nodig zijn. Met de huidige uitgangspunten en simpele aansturing van het systeem (niet gestuurd op goedkope/duurzame stroom) is de OPEX bij OBES+ vergelijkbaar en bij MT-OBES iets hoger. Om verhoogde brontemperaturen te realiseren zijn in de nieuwbouwsituatie zoals bij Zuilense Vecht slechts ongecompliceerde aanpassingen aan het ontwerp nodig. Over een looptijd van 30 jaar ligt de Total Cost of Ownership voor OBES+ lager (-6%) en bij MT-OBES vergelijkbaar ten opzichte van conventionele OBES, zonder daarbij rekening te houden met slimme sturing op basis van dynamische elektriciteitsprijzen. Bij locatie Utrecht Science Park zijn de technische aanpassingen die nodig zijn om op lage temperatuur te kunnen verwarmen relatief complex en kostbaar omdat het gaat om een reeds bestaand energiesysteem, met de huidige uitgangspunten nemen de kosten voor zowel realisatie als exploitatie toe voor OBES+ en MT-OBES ten opzichte van conventionele OBES.

Op basis van de resultaten gepresenteerd in deze studie kunnen wat betreft de vier geformuleerde punten in hoofdstuk 1.1 de volgende conclusies getrokken worden:

Beter in balans brengen vraag en aanbod elektriciteit

OBES+ en MT-OBES dragen bij aan het beter in balans brengen van de beschikbare duurzame stroom in de zomer en warmtebehoefte in de winter, en leiden tot een lager benodigd aansluitvermogen voor het energiesysteem (voornamelijk de warmtepomp) in de winter. Doordat de warmtepomp actief wordt gebruikt in de zomer om een hogere warme bron temperatuur op te slaan is er een grotere elektriciteitsvraag in de zomer en een afname in de winter, het totale elektriciteitsverbruik neemt toe doordat een deel van de warmte wordt verloren in de bodem. Door de warmtepomp te gebruiken om de warme bron te laden op hogere temperatuur neemt het stroomverbruik in de zomer toe, ten opzichte van conventionele OBES is het voor OBES+ 30% en 50% hoger en bij MT-OBES 70% en 144% hoger voor respectievelijk Zuilense Vecht en Utrecht Science Park. Bij het MT-OBES systeemconcept kan door opslag bij 45 °C een deel van de warmte direct geleverd worden (geen gebruik warmtepomp) waardoor het stroomverbruik in de winter ten opzichte van OBES afneemt met 7% en 21%. Bij OBES+ is de afname van het stroomgebruik in de winter slechts gering. Omdat de COP van de warmtepomp niet toeneemt ondanks de hogere

onttrekkingstemperatuur (uitgangspunt is een 1-traps warmtepomp), wordt er dus alleen wat stroomverbruik bespaard door het kleinere pompdebiet. Het elektrisch aansluitvermogen dat nodig is in de winter neemt ook circa 5% af voor het MT-OBES scenario.

Reductie CO₂-emissie

De totale CO₂-emissies die zijn berekend in deze studie voor beide locaties nemen ten opzichte van het conventionele OBES scenario met circa 7% toe voor OBES+ en met 10% toe voor MT-OBES. Ondanks dat in het MT-OBES systeemconcept bij locatie Zuilense Vecht en Utrecht Sciece Park respectievelijk 10% en 22% CO₂-uitstoot wordt bespaard in de winter (want minder grijze stroom gebruikt in winter) neemt de totale CO₂ uitstoot toe omdat de extra stroom die gebruikt wordt in de zomer (nog) niet geheel duurzaam wordt opgewekt. In de toekomst worden de verschillen in CO₂-emissie factor groter (Harmelink et al., 2012) Het zal OBES+ en MT-OBES tot minder CO₂-uitstoot leiden op jaarbasis. Daarnaast kan een slimmere aansturing van het energiesysteem (alleen extra laden wanneer stroom goedkoop/duurzaam is) tot een sterkere afname van de CO₂ uitstoot leiden. Dat is in de huidige studie niet meegenomen. Er is dus een duidelijke potentie om de CO₂-emissies die gepaard gaan met verwarmen en koelen verder te verminderen ten opzichte van conventionele OBES, zeker als optimalisaties qua aansturing en inpassing worden meegenomen.

Ruimte in de ondergrond

Met het verhogen van de warme brontemperatuur (grotere ΔT) kan de ondergrond doelmatiger worden gebruikt doordat met minder bronnen, een kleiner opslagvolume en minder hydraulische beïnvloeding hetzelfde energierendement kan worden behaald. Initieel is het opgewarmde volume ondergrond ook kleiner (de thermische straal is bij OBES+ 20% en MT-OBES 45% kleiner ten opzichte van conventionele OBES), onduidelijk is echter nog hoe gedurende de operationele duur van het systeem (bijv. 20 jaar) de horizontale temperatuurseffecten, ten opzichte van conventionele OBES, zich zullen ontwikkelen voor verschillende condities en temperaturen.

Netto koude-overschot in de bodem

Door bij OBES+ en MT-OBES de warmtepomp in de zomer in te zetten om actief de warme bron te laden (op 25 of 45 °C respectievelijk) kan er met gelijke grootte van de componenten meer warmte worden geladen ten opzichte van conventionele OBES (+22 en +30% respectievelijk). Dit komt deels doordat regeneratie uit het oppervlaktewater een langere periode in het jaar mogelijk is omdat met het actief laden met de WP bij OBES+ en MT-OBES al vanaf 14 °C in plaats van 19 °C oppervlaktewatertemperatuur warmte kan worden gewonnen. Daarnaast wordt er ook meer warmte geladen doordat een deel van de geproduceerde warmte (circa 20%) de duurzame stroom is die de warmtepomp consumeert. Bij de gesimuleerde locaties in het onderzoek wordt met deze toename in geladen warmte een koude-overschot (OBES) omgezet in een warmte-overschot (OBES+). Bij het MT-OBES systeemconcept is er sprake van ongeveer een energiebalans, maar wel met een grote volume onbalans (relatief veel volume onttrokken uit de warme bron). Omdat een langdurige volumeonbalans niet gewenst is voor het functioneren van OBES op de lange termijn zullen open bodemenergiesystemen met verhoogde warme brontemperatuur in de praktijk neigen naar een warmte-overschot in de bodem.

6 Referenties

- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy. *Groundwater*, 54(5), 733-739. doi:10.1111/gwat.12413
- Beernink, S., Bloemendal, M., & Hartog, N. (2020). *Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen | WINDOW fase 1, werkpakket C2*. Retrieved from Nieuwegein: <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c2---prestaties-en-thermische-effecten.pdf>
- Beernink, S., Bloemendal, M., Kleinlugtenbelt, R., & Hartog, N. (2022). Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions. *Applied Energy*, 311, 118587. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118587
- Beernink, S., Hartog, N., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2024). Heat losses in ATEs systems: The impact of processes, storage geometry and temperature. *Geothermics*, 117, 102889. doi:https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102889
- Bloemendal, M., Beernink, S., Bel, N., Hockin, A. E., & Schout, G. (2020). *Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur. Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten*. Retrieved from Nieuwegein: <https://library.kwrwater.nl/publication/61755396/>
- Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 17, 306-319. doi:10.1016/j.geothermics.2017.10.009
- Bloemendal, M., Oerlemans, P., & Schout, G. (2021). *Voorlopig afwegingskader voor vergunningverlening HTO*. Retrieved from Nieuwegein:
- Harmelin, M., Bosselaar, L., Gerdes, J., Boonekamp, P., Segers, R., Pouwelse, H., & Verdonk, M. (2012). *Berekening van de CO₂-emissies, het primair fossiel energiegebruik en het rendement van elektriciteit in Nederland*. Retrieved from
- Hockin, A. E., Bloemendal, M., & Hartog, N. (2022). Verspreiding van grondwaterverontreinigingen door open bodemenergiesystemen: Effecten van bronplaatsing en mogelijkheden voor mitigatie *Stromingen*, 12. IF-Technology. (2021). *Inventarisatie toepassing WKO en TEO Zuilense Vecht - referentie 70315/LL/20210701*. Retrieved from
- ned.nl. (2023). <https://ned.nl/nl/dataportaal/energie-productie/elektriciteit/totale-elektriciteitsproductie>.
- PBL. (2024). *Klimaat- en energieverkenning 2024*. Retrieved from
- Provincie-Utrecht. (2022). *BODEM- EN WATERPROGRAMMA PROVINCIE UTRECHT 2022-2027 | 9 FEBRUARI 2022*. Retrieved from Utrecht: <https://www.provincie-utrecht.nl/sites/default/files/2022-04/Bodem-%20en%20Waterprogramma%20provincie%20Utrecht%202022-2027.pdf>
- Schout, G., & Bloemendal, M. (2022). *Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit, Deltafact, Kennisimpuls waterkwaliteit*. Retrieved from
- Schout, G., & Hartog, N. (2021, 2021). Effecten van HTO op grondwaterkwaliteit. *Bodem*, 31, 23-25. Retrieved from https://www.warmingup.info/documenten/schout_2021_bodem_temperatuurseffecten-hto-grondwaterkwaliteit.pdf
- Schout, G., Hartog, N., & Timmers, P. (2023). *Waterkwaliteitseffecten bij en monitoring van HTO systemen. Synthese en update op basis van de monitoring bij HTO Middenmeer*. Retrieved from
- SIKB. (2023). *Handreiking besluiten open bodemenergiesystemen (BUM BE deel 1 - OBES)*. Retrieved from https://www.sikb.nl/doc/BUMwbb/BUM_BE_deel1_OBES_versie3.0_230629_voorpublicatie.pdf
- Van der Werff, B., & Velvis, H. (2021). *WKO Diergeneeskunde UU, Definitie van toekomstige WKO ontwikkeling - referentie 64165/NL/20211015*. Retrieved from
- van Lopik, J. H., Hartog, N., & Schotting, R. J. (2022). Using multiple partially-penetrating wells (MPPWs) to improve the performance of high-temperature ATEs systems: Well operation, storage conditions and aquifer heterogeneity. *Geothermics*, 105, 102537. doi:https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102537
- Visser, P. W., Kooi, H., & Stuyfzand, P. J. (2015). The thermal impact of aquifer thermal energy storage (ATEs) systems: a case study in the Netherlands, combining monitoring and modeling. *Hydrogeology Journal*, 23(3), 507-532. doi:10.1007/s10040-014-1224-z

I Uitgangspunten gebouw en energiesysteem

I.1 Zuilense Vecht

Bouwprogramma en energie

Tabel I.6-1 | *Bouwprogramma en kengetallen energie voor Zuilense Vecht*

		Grondgebonden woning	Appartement	Totaal
Aantal	[-]	31	234	265
Gemiddeld oppervlak	[m ²]	100	65	69
Ruimteverwarming – Vermogen	[W/m ²]	30	30	
Ruimteverwarming – Vraag	[kWh/m ²]	30	30	
Warm tapwater – Vermogen	[W/m ²]	10	10	
Warm tapwater – Vraag	[kWh/m ²]	20	20	
Koeling – Vermogen	[W/m ²]	20	20	
Koeling – Vraag	[kWh/m ²]	15	15	

Tabel I.6-2 | *Energievraag voor Zuilense Vecht*

		Grondgebonden woning	Appartement	Totaal
Ruimteverwarming – Vermogen*	[kW _{th}]	79	388	467
Ruimteverwarming – Vraag	[MWh _{th}]	93	456	549
Warm tapwater – Vermogen	[kW _{th}]	31	152	183
Warm tapwater – Vraag	[MWh _{th}]	62	304	366
Koeling – Vermogen	[kW _{th}]	62	304	366
Koeling – Vraag	[MWh _{th}]	47	228	275

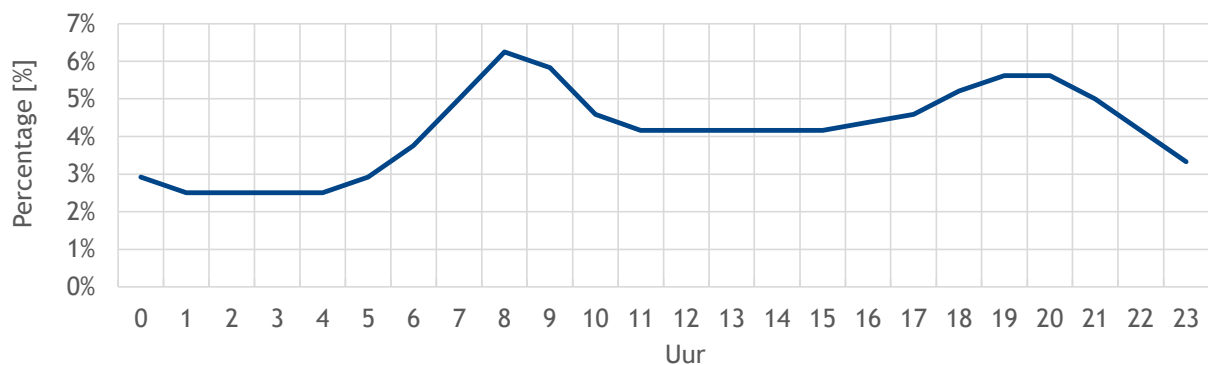
* Bij 85% gelijktijdigheid

Vraagprofielen

Voor een analyse op uurlijkse waarden zijn vraagprofielen opgesteld voor zowel ruimteverwarming, warm tapwater als ruimtekoeling.

Voor het profiel voor ruimteverwarming is de volgende methodiek gehanteerd:

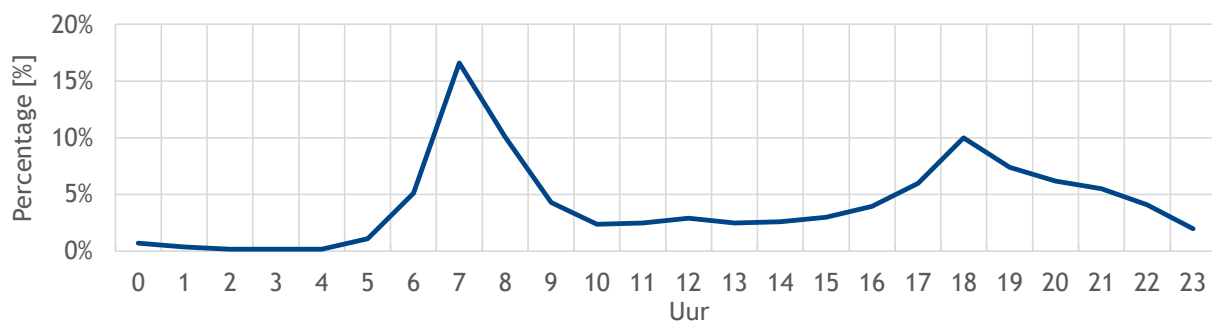
- Klimaatdata van De Bilt van het jaar 2023 is gebruikt
- Per dag is de gemiddelde temperatuur berekend
- Bij een gemiddelde dagtemperatuur lager dan 14°C is er een ruimteverwarmingsvraag
- De totale warmtevraag is per dag naar rato verdeeld, op basis van het verschil.
- Op dagbasis is de warmtevraag verdeeld aan de hand van een dagprofiel. Het gehanteerde dagprofiel is gegeven in Figuur I.6-1.
- Het resulterende piekvermogen voor ruimteverwarming is 464 kW_{th}. Dit komt nagenoeg overeen met het uitgangspunt voor ruimteverwarming (467 kW_{th}).



Figuur I.6-1 Dagprofiel voor ruimteverwarming. Dit profiel is gebaseerd op het dagprofiel dat door Deltares is opgesteld in de HTO verkenningen in het WarmingUp GOO onderzoeksproject.

Voor het profiel voor warm tapwater is de volgende methodiek gehanteerd:

- De totale vraag voor warm tapwater is gelijkmatig verdeeld over alle dagen in het jaar.
- Op dagbasis is de warmtevraag verdeeld aan de hand van een dagprofiel. Het gehanteerde dagprofiel is gegeven in Figuur I.6-2.



Figuur I.6-2 Dagprofiel voor warm tapwater. Dit profiel is gebaseerd op een dagprofiel dat beschikbaar is binnen IF technology, waarbij de ochtendpiek iets verhoogd is. In dit geval zijn dus de gehanteerde uitgangspunten leidend geweest voor het bepalen van het piekvermogen.

Er is gerekend met een warmteverlies van 10% van de totale warmtevraag (ruimteverwarming + tapwater). Deze is als volgt verdeeld:

- Gelijkmatig verdeeld over alle uren in het jaar
- Verdeeld over ruimteverwarming en warm tapwater naar rato van omvang van de warmtevraag.
- Verdeeld over ruimteverwarming en warm tapwater naar rato op basis van de temperatuurverschil met de omgeving.

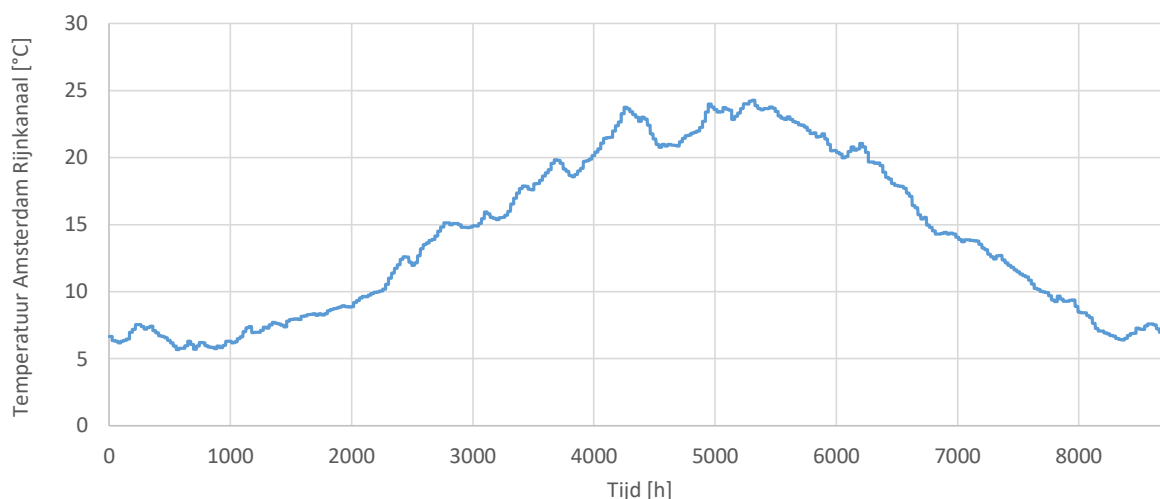
Voor het profiel voor ruimtekoeling is de volgende methodiek gehanteerd:

- Klimaatdata van De Bilt van het jaar 2023 is gebruikt
- Voor koeling is geen dagprofiel beschikbaar. De koelvraag is op uurbasis berekend.
- Bij een temperatuur hoger dan 18°C is er een koelvraag.
- De koudevraag is naar rato op uurbasis verdeeld op momenten dat er een koudevraag is, op basis van het temperatuurverschil ($T_{\text{buiten}} - 18$).
- Wanneer het koelvermogen boven de 20 W/m² uitkomt, is een cap toegepast van 20 W/m². Het overschot wordt “meegenomen” naar het volgende uur (carry forward).

Oppervlaktewater

Uit een eerdere studie van IF Technology (IF-Technology, 2021) volgt dat het Amsterdam Rijnkanaal geschikt is voor het toepassen van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO). Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Uitkoeling: 5°C
- Temperatuurverloop: Zie Figuur I.6-3



Figuur I.6-3 Temperatuurverloop Amsterdam Rijnkanaal

Afgiftesystemen

Voor verwarming en koeling wordt gebruik gemaakt van een vloerverwarmingssysteem. Met behulp van de online rekentool van WTH zijn de aanvoer en retourtemperatuur berekend zodanig dat voldaan kan worden aan de gevraagde vermogens. Dit resulteert in de volgende temperatuurtrajecten:

- Verwarmen: 30/25°C
- Koelen: 18/21°C

Een screenshot van de gehanteerde waarden in de tool is hieronder gegeven.

Afgifte berekening

Vloerverwarming / Koeling

Koeling ☐ Ja

Hart op hart afstand mm

Buis type

Vloeropbouw

Vloerafwerking

Afwerkvloer

Dikte afwerkvloer mm

Isolatie

print

Temperaturen

Ruimtetemperatuur °C

Aanvoertemperatuur verwarmen °C

Retourtemperatuur verwarmen °C

Ruimtetemperatuur koelen °C

Aanvoertemperatuur koelen °C

Retourtemperatuur koelen °C

Rc Waarden

Rc steen

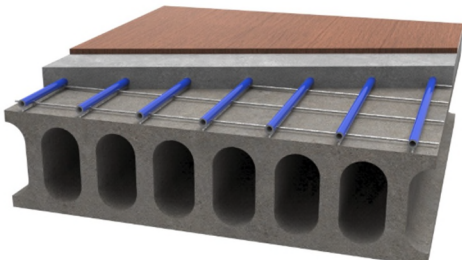
Rc Tapijt

Rc Linoleum

Rc Parket

Afgifte vloerverwarming *
34 W/m²
gem. vloertemperatuur 23.5 °C

Opname vloerkoeling *
20 W/m²
gem. vloertemperatuur 21.9 °C



Figuur I.6-4 Screenshot berekening met WTH tool vloerverwarming en -koeling. <https://www.wth.nl/support-en-service/afgifte-berekening>

I.II USP

Bouwprogramma en energie

Tabel I.6-3 | Vermogensvraag voor USP

Gebouw	Verwarmen			Koelen		
	LBK's [kW _{th}]	Overig [kW _{th}]	Totaal [kW _{th}]	LBK's [kW _{th}]	Overig [kW _{th}]	Totaal [kW _{th}]
Jeanette Donker-Voetgebouw	800	435	1.235	544	75	619
H. Jakobgebouw	645	1.063	1.708	900	-	900
W.C. Schimmelgebouw	655	1.659	2.314	800	400	1.200
Tolakker	145	-	145	223	-	223
Kavel 27	1.080	-	1.080	1.215	-	1.215
Totaal	3.157	3.157	6.482	3.682	475	4.157

De hoeveelheid warmte en koude die geleverd wordt door de LBK's is bepaald. Dit is gedaan op basis van de vermogens en op basis van vraagprofielen (zie volgende paragraaf "Vraagprofielen"). De resultaten staan in onderstaande tabel.

Tabel I.6-4 | Energievraag voor USP

Gebouw	Verwarmen met LBK's	Koelen met LBK's
	Vraag [MWh _{th}]	Vraag [MWh _{th}]
Jeanette Donker-Voetgebouw	569	277
H. Jakobgebouw	982	395
W.C. Schimmelgebouw	997	351
Tolakker	221	90
Kavel 27	769	312

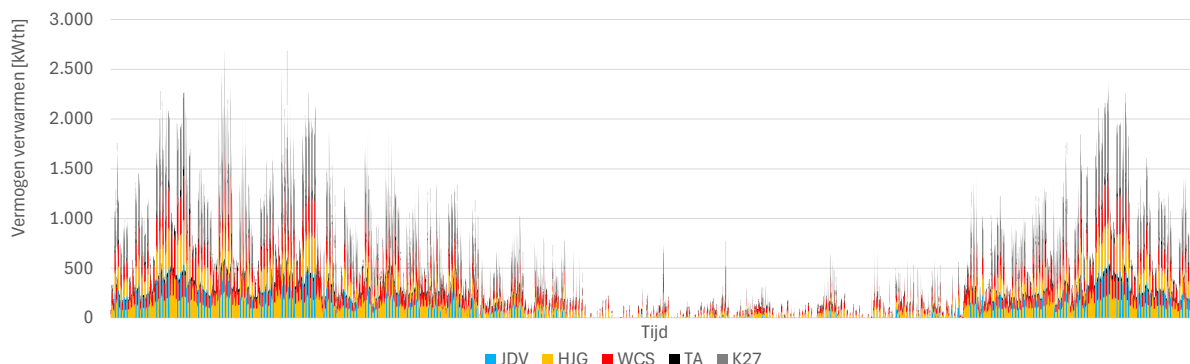
Totaal	3.538	1.425
--------	-------	-------

Vraagprofielen

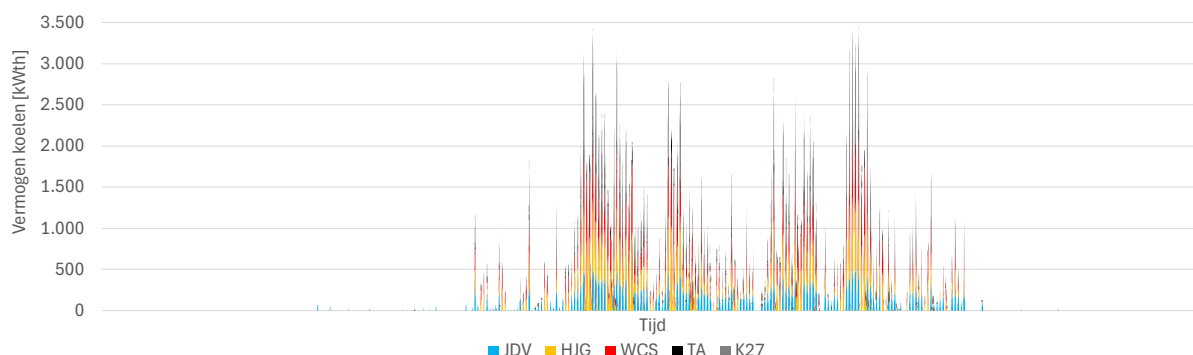
Voor ruimteverwarming- en koeling zijn profielen opgesteld met behulp van een tool die intern ontwikkeld is binnen IF. Deze tool is voor een ander project op USP gebruikt en de resulterende warmte- en koudevraag kwam in dat project goed overeen met de gemeten warmte- en koudevraag. In het kort wordt het profiel opgesteld via de volgende stappen en uitgangspunten:

- Het piekvermogen voor verwarming uit Tabel I.6-3 geldt bij een buitentemperatuur van -10°C .
- Het piekvermogen voor koelen uit Tabel I.6-3 geldt bij een buitentemperatuur van 30°C .
- Vanaf een buitentemperatuur lager dan 18°C is er een warmtevraag
- Vanaf een buitentemperatuur hoger dan 18°C is er een koudevraag
- Op basis van de buitentemperatuur wordt op uurbasis het benodigde koel- en verwarmingsvermogen bepaald.
- Een deel van de gebouwen wordt 24/7 geklimatiseerd (HJG, WCS en TA). Voor deze gebouwen wordt een dagprofiel meegenomen waarin het systeem 's nachts op een lagere capaciteit (50%) draait dan overdag. Het berekende koel- en verwarmingsvermogen wordt op basis hiervan aangepast.
- Een deel van de gebouwen (JDV en K27) wordt alleen tijdens kantooruren (07:00 – 19:00) geklimatiseerd. Het berekende vermogen wordt binnen deze uren niet aangepast. Daarbuiten wordt het vermogen op nul gezet.

De resulterende profielen voor verwarmen en koelen zijn respectievelijk gegeven in Figuur I.6-5 en Figuur I.6-6.



Figuur I.6-5 Berekende profiel ruimteverwarming USP



Figuur I.6-6 Berekende profiel ruimtekoeling USP

Oppervlaktewater

In deze studie is uitgegaan dat het OBES wordt geregenereerd via een TEO systeem uit de Kromme Rijn. Aangenomen is dat het temperatuurverloop vergelijkbaar is met dat van het Amsterdam Rijnkanaal. Het temperatuurprofiel zoals gegeven in Figuur I.6-3 is gebruikt.

Merk op dat ,lopende het project, in overleg met de gemeente Utrecht naar voren kwam dat het toepassen van een TEO systeem onwaarschijnlijk is. Een alternatief is regeneratie met droge koelers. Echter binnen deze studie was het niet meer mogelijk de berekeningen hierop aan te passen.

Afgiftesystemen

In deze case si gefocust op energieafgifte middels luchtbehandelingskasten (LBKs). De LBKs in de bestaande gebouwen worden vervangen/omgebouwd met twin coil warmteterugwinning en een change over warmtewisselaar voor koeling en verwarming. In de nieuwe gebouwen worden LBKs met (ten minste) twin coil warmteterugwinning geplaatst.

De change-over warmtewisselaar wordt gedimensioneerd op de koelfunctie met een waterzijdige temperatuur van 12/19 °C. Op basis van de specificaties van de warmtewisselaar wordt voor de verwarming een zo laag mogelijke stooklijn toegepast zodat zoveel mogelijk warmte rechtstreeks vanuit de warme bron aan de LBK geleverd kan worden. Deze stooklijn voor de CV aanvoer- en retourtemperatuur met de LBKs is weergegeven in Figuur 2-9 (informatie System Air, met enige vereenvoudiging vanuit IF).

II Technische installatie en regelstrategie Zuilense Vecht

In deze bijlage wordt de regelstrategie beschreven van de drie configuraties: OBES, OBES+ en MT-OBES voor project Zuilense Vecht (ZV). De drie vereenvoudigde principeschema's voor elk van de configuraties zijn als bijlage bijgevoegd.

In onderstaande beschrijving wordt per installatie onderdeel aangegeven wanneer het in en uit bedrijf gaat. Dit wordt gedefinieerd via variabelen die aangeduid worden met R-#, waarbij R staat voor Release (vrijgave). Wanneer een onderdeel in bedrijf is zal deze ook geregeld moeten worden. Dit wordt gedefinieerd via variabelen die aangeduid worden met C-#, waarbij de C staat voor Control (regeling).

De regelstrategie wordt gebaseerd op een aantal variabelen: de afname profielen, de oppervlaktewatertemperatuur en de onttrekkingstemperatuur uit de OBES.

Voor het vereenvoudigen van de regelstrategie in deze fase, worden in deze beschrijving de volgende uitgangspunten aangehouden:

- Alle componenten zijn volledig regelbaar (0-100%);
- Het ontwerp is op basis van één warmtepomp die in elke situatie het benodigde vermogen kan leveren;
- Er is geen rekening gehouden met eventuele storingen of onderhoud aan de installaties (installaties zijn 100% paraat).

Variabelen ten behoeve van vrijgaves en regelingen

In de volgende paragrafen wordt gebruik gemaakt van verschillende variabelen om tot vrijgave van een object te komen of om de capaciteitsregeling op te sturen. In Tabel II.6-5 staat een overzicht van de verschillende variabelen en een omschrijving.

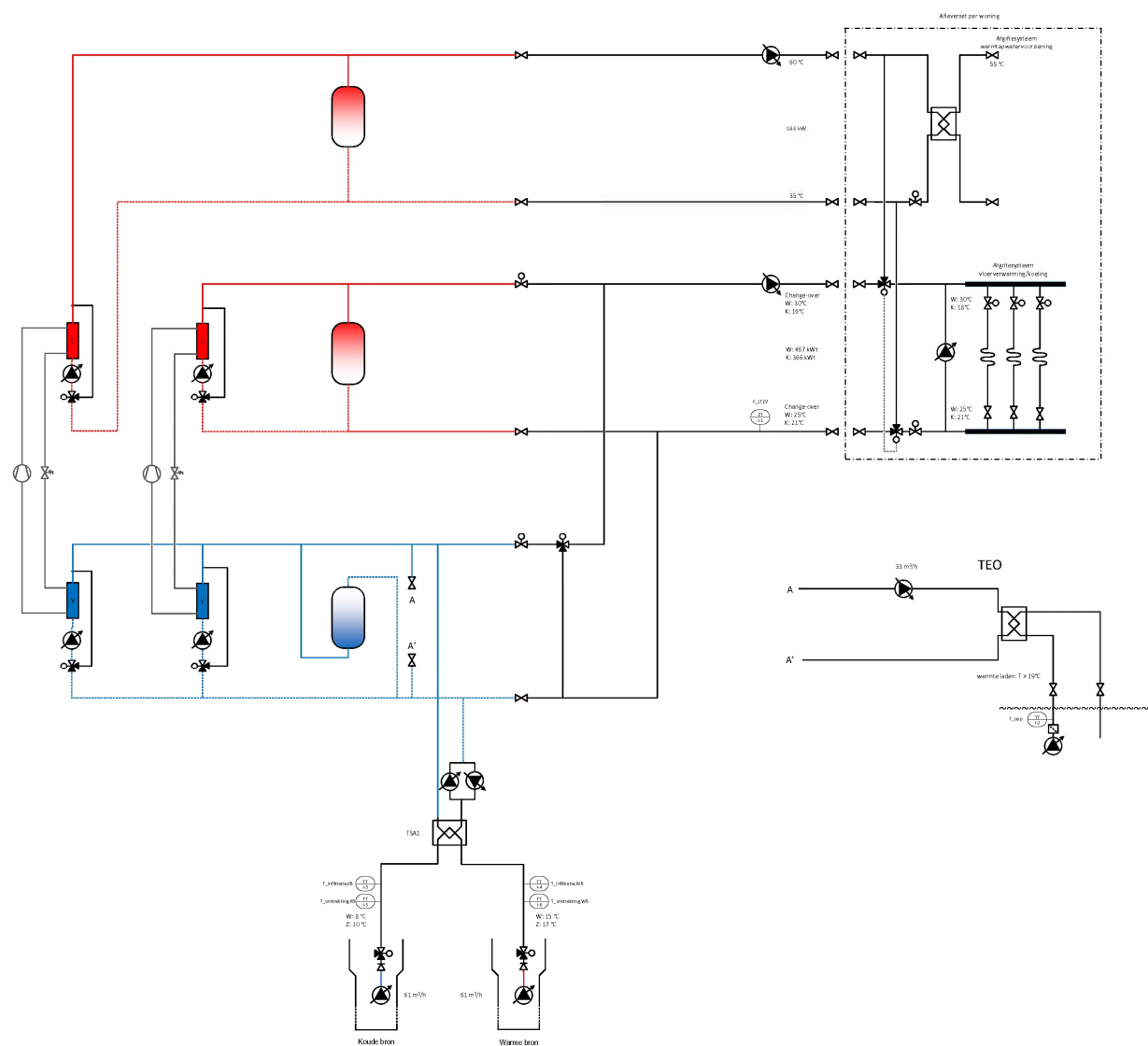
Tabel II.6-5 | Variabelen en omschrijving

Variabelen	Eenheid	Omschrijving
P_{TEO}	kW_t	vermogen vanuit TEO voor warmte levering/laden
$P_{TEO,max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit TEO voor warmte levering/laden
$P_{WKO,warmtelevering}$	kW_t	vermogen vanuit WKO voor warmtelevering
$P_{WKO,warmtelevering,max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit WKO voor warmtelevering
$P_{WKO,koudelevering}$	kW_t	vermogen vanuit WKO voor koudelevering
$P_{WKO,koudelevering,max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit WKO voor koudelevering
$P_{WKO,koudelevering,TSA1}$	kW_t	vermogen vanuit WKO TSA 1 voor koudelevering
$P_{HTCV, warmtevraag}$	kW_t	vermogen hoge temperatuur warmtevraag
$P_{LTCV, warmtevraag}$	kW_t	vermogen lage temperatuur warmtevraag
$P_{LTCV,vrije\ verwarming}$	kW_t	vermogen van warmtelevering door WKO TSA 2
$P_{koudevraag}$	kW_t	vermogen koudevraag
$P_{HTWP,verdamper}$	kW_t	vermogen van HT-WP aan de verdamperzijde
$P_{LTWP,condensor}$	kW_t	vermogen van LT-WP aan de condensorzijde
$P_{LTWP,verdamper}$	kW_t	vermogen van LT-WP aan de verdamperzijde
$P_{balans,GKWvat}$	kW_t	vermogensbalans in het GKW vat, gedefinieerd door: $+P_{TEO} - P_{HTWP,verdamper} - P_{LTWP,verdamper} + P_{koudevraag}$
$T_{aanvoer\ vrije\ verwarming}$	$^{\circ}C$	aanvoertemperatuur voor vrije verwarming

T_{buiten}	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur van de buitenlucht
$T_{\text{injectie,KB}}$	$^{\circ}\text{C}$	injectietemperatuur in de koude bron
$T_{\text{injectie,WB}}$	$^{\circ}\text{C}$	injectietemperatuur in de warme bron
$T_{\text{ontrekking,KB}}$	$^{\circ}\text{C}$	onttrekkingstemperatuur in de koude bron
$T_{\text{ontrekking,WB}}$	$^{\circ}\text{C}$	onttrekkingstemperatuur in de warme bron
T_{opp}	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur van het oppervlakte water
$T_{\text{uitrede,LTWP,condensor}}$	$^{\circ}\text{C}$	uitredetemperatuur uit de condensor LT-WP
$F_{\text{ontrekking,KB}}$	m^3/h	flow onttrekking koude bron
$F_{\text{LTCV naar TSA2}}$	m^3/h	flow tussen LTCV net en WKO TSA2
F_{LTCV}	m^3/h	flow LTCV net
$F_{\text{TSA1 naar GKW net}}$	m^3/h	flow tussen TSA1 en GKW net

Vrijgaves en regelkringen OBES

Het prinseschema voor OBES is gegeven in Figuur II.6-7. De vrijgaves en regelkringen zijn gegeven in Tabel II.6-6 en Tabel II.6-7.



Figuur II.6-7 P&ID OBES voor Zuilense Vecht.

Tabel II.6-6 | Vrijgaves OBES

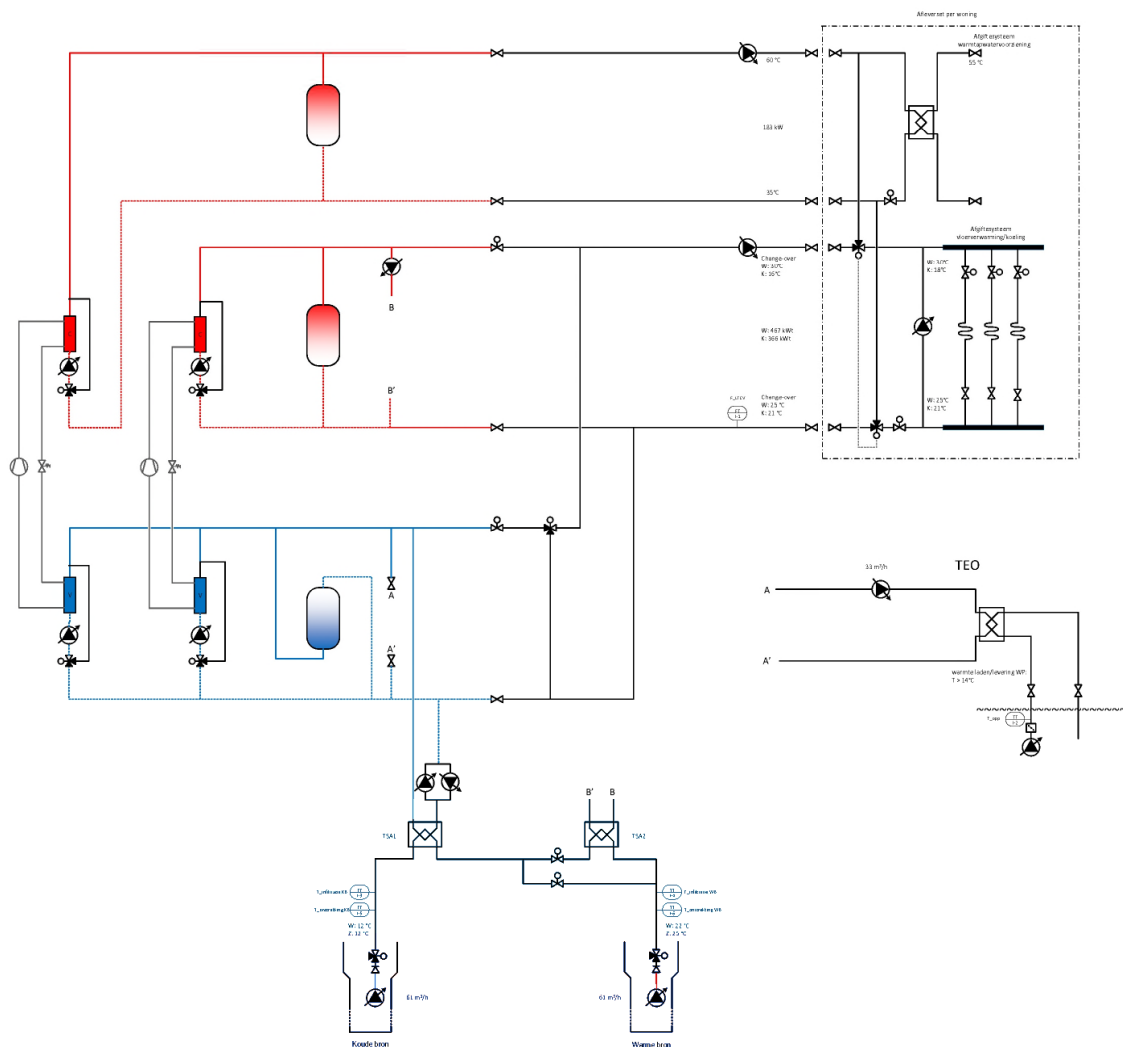
Code	Object	IN	UIT
R-1	CO status (0 = warmtelevering, 1 = koudelevering)	bij $T_{\text{buiten}} > 18^{\circ}\text{C}$	bij $T_{\text{buiten}} < 14^{\circ}\text{C}$
R-2	HTCV warmte gevraagd	Altijd in	
R-3	LTCV warmte gevraagd	R-1 CO status warmtelevering actief	R-1 CO status warmtelevering niet actief
R-4	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-5	Vrijgave HTWP	R-2 HTCV warmte gevraagd actief	R-2 HTCV warmte gevraagd niet actief
R-6	Vrijgave LTWP	R-3 LTCV warmte gevraagd actief	R-3 LTCV warmte gevraagd niet actief
R-7	Vrijgave TEO voor WP bedrijf	$T_{\text{opp}} > 14^{\circ}\text{C}$ EN [R-5 HTWP in WP bedrijf actief OF R-6 LTWP in WP bedrijf actief]	$T_{\text{opp}} < 14^{\circ}\text{C}$ OF [R-5 HTWP in WP bedrijf niet actief EN R-6 LTWP in WP bedrijf niet actief]
R-8	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{\text{opp}} > 19^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{opp}} < 19^{\circ}\text{C}$
R-9	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{\text{balans,GKWvat}} < 0$	$P_{\text{balans,GKWvat}} > 0$
R-10	Koppeling WKO koudelevering TSA1	$P_{\text{balans,GKWvat}} > 0$ EN R-7 Vrijgave TEO voor WP bedrijf niet actief	$P_{\text{balans,GKWvat}} < 0$ OF R-7 Vrijgave TEO voor WP bedrijf actief

Tabel II.6-7 | Regelkringen OBES

Code	Capaciteitsregeling	Omschrijving
C-1	Warmtelevering HTCV	Zie profiel tapwater
C-2	Warmtelevering LTCV	Zie profiel CV warmtevraag
C-3	Koudelevering GKW	Zie profiel GKW koudevraag
C-4	TEO warmtelevering aan WP	De capaciteit van de TEO warmtelevering aan WP wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{TEO}} = P_{\text{HTWP,verdamp}} + P_{\text{LTWP,verdamp}} - P_{\text{koudevraag}}$ b) $P_{\text{TEO,max}}$
C-5	TEO warmte laden	De capaciteit van de TEO warmte laden wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{TEO}} = P_{\text{WKO,koudelevering,max}} + P_{\text{HTWP,verdamp}} + P_{\text{LTWP,verdamp}} - P_{\text{koudevraag}}$ b) $P_{\text{TEO,max}}$
C-6	WKO warmtelevering	De capaciteit van de WKO warmtelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{WKO,warmtelevering}} = P_{\text{HTWP,verdamp}} + P_{\text{LTWP,verdamp}} - P_{\text{TEO}} - P_{\text{koudevraag}}$ b) $P_{\text{WKO,warmtelevering,max}}$
C-7	WKO koudelevering	De capaciteit van de WKO koudelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{WKO,koudelevering}} = - P_{\text{HTWP,verdamp}} - P_{\text{LTWP,verdamp}} + P_{\text{TEO}} + P_{\text{koudevraag}}$ b) $P_{\text{WKO,koudelevering,max}}$

Vrijgaves en regelkringen OBES+

Het prinsipeschema voor OBES+ is gegeven in Figuur II.6-8. De vrijgaves en regelkringen zijn gegeven in Tabel II.6-8 en Tabel II.6-9.



Figuur II.6-8 | P&ID OBES+ voor Zuilense Vecht

Tabel II.6-8 | Vrijgaves OBES+

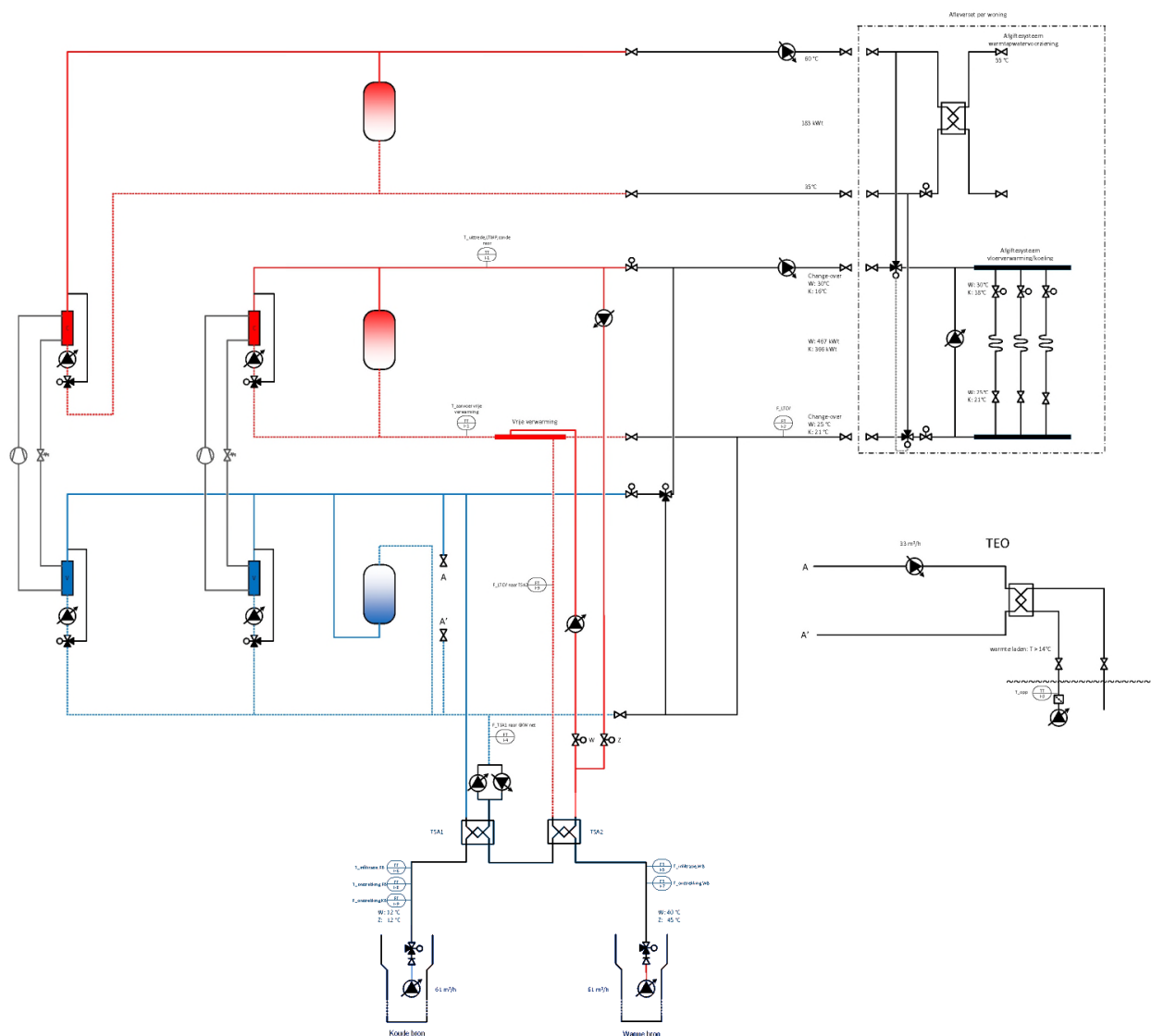
Code	Object	IN	UIT
R-1	CO status (0 = warmtelevering, 1 = koudelevering)	bij $T_{\text{buiten}} > 18^{\circ}\text{C}$	bij $T_{\text{buiten}} < 14^{\circ}\text{C}$
R-2	HTCV warmte gevraagd	Altijd in	
R-3	LTCV warmte gevraagd	R-1 CO status warmtelevering actief	R-1 CO status warmtelevering niet actief
R-4	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-5	Vrijgave HTWP	R-2 HTCV warmte gevraagd actief	R-2 HTCV warmte gevraagd niet actief
R-6	Vrijgave LTWP	R-3 LTCV warmte gevraagd actief OF R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-3 LTCV warmte gevraagd niet actief EN R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-7	Vrijgave TEO voor WP bedrijf	$T_{\text{opp}} > 14^{\circ}\text{C}$ EN [R-5 HTWP in WP bedrijf actief OF R-6 LTWP in WP bedrijf actief] EN R-1 CO status koudelevering niet actief	$T_{\text{opp}} < 14^{\circ}\text{C}$ OF [R-5 HTWP in WP bedrijf niet actief EN R-6 LTWP in WP bedrijf niet actief] OF

			R-1 CO status koudelevering niet actief
R-8	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{opp} > 14^{\circ}\text{C EN}$ R-10 Koppeling WKO koudelevering TSA1 actief	$T_{opp} < 14^{\circ}\text{C OF}$ R-10 Koppeling WKO koudelevering TSA1 niet actief
R-9	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{balans, GKWvat} < 0$	$P_{balans, GKWvat} > 0$
R-10	Koppeling WKO koudelevering TSA1	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-11	Vrijgave LTWP voor warmte laden TSA2	R-10 Koppeling WKO koudelevering actief EN R-8 Vrijgave TEO voor warmte laden actief	R-10 Koppeling WKO koudelevering niet actief OF R-8 Vrijgave TEO voor warmte laden niet actief
R-12	Koppeling WKO condensorwarmte afvoer TSA2	R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief

Tabel II.6-9 | Regelkringen OBES+

Code	Capaciteitsregeling	Omschrijving
C-1	Warmtelevering HTCv	Zie profiel tapwatervraag
C-2	Warmtelevering LTCv	Zie profiel CV warmtevraag
C-3	LTWP warmte laden	De capaciteit van de LTWP warmte laden wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $T_{injectie, WB}$, setpoint 25°C (opregelen bij overschrijding setpoint)
C-4	Koudelevering GKW	Zie profiel GKW koudevraag
C-5	TEO warmtelevering aan WP	De capaciteit van de TEO warmtelevering aan WP wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{TEO} = P_{HTWP, verdamper} + P_{LTWP, verdamper}$ b) $P_{TEO, max}$
C-6	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO warmtelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{WKO, warmtelevering} = P_{HTWP, verdamper} + P_{LTWP, verdamper} - P_{TEO} - P_{koudevraag}$ b) $P_{WKO, warmtelevering, max}$
C-7	Koppelcircuit WKO koudelevering TSA 1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO koudelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{WKO, koudelevering} = P_{koudevraag}$ b) $P_{WKO, koudelevering, max}$
C-8	Bronpomp warmtelevering	Zie C-6
C-9	Bronpomp koudelevering	De capaciteit van de WKO koudelevering wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) C-4

Het prinsipeschema voor MT-OBES is gegeven in Figuur II.6-9. De vrijgaves en regelkringen zijn gegeven in Tabel II.6-10 en Tabel II.6-11.



Figuur II.6-9 | P&ID MT-OBES voor Zuilense Vecht

Tabel II.6-10 | Vrijgaves MT-OBES

Code	Object	IN	UIT
R-1	CO status (0 = warmtelevering, 1 = koudelevering)	bij $T_{\text{buiten}} > 18^{\circ}\text{C}$	bij $T_{\text{buiten}} < 14^{\circ}\text{C}$
R-2	HTCV warmte gevraagd	Altijd in	
R-3	LTCV warmte gevraagd	R-1 CO status warmtelevering actief	R-1 CO status warmtelevering niet actief
R-4	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-5	Vrijgave HTWP	R-1 HTCV warmte gevraagd actief	R-1 HTCV warmte gevraagd niet actief
R-6	Vrijgave LTWP	R-2 LTCV warmte gevraagd actief OF R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief EN R-11 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-7	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{\text{opp}} > 14^{\circ}\text{C}$ EN R-10 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	$T_{\text{opp}} < 14^{\circ}\text{C}$ OF R-10 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief

R-8	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{\text{balans,GKWvat}} < 0$	$P_{\text{balans,GKWvat}} > 0$
R-9	Koppeling WKO koudelevering TSA1	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-10	Vrijgave LTWP voor warmte laden	R-9 Koppeling WKO koudelevering TSA1 actief EN R-7 Vrijgave TEO voor warmte laden actief	R-9 Koppeling WKO koudelevering TSA1 niet actief OF R-7 Vrijgave TEO voor warmte laden niet actief
R-11	Koppeling WKO condensorwarmte afvoer TSA2	R-10 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-10 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-12	Koppeling WKO vrije verwarming TSA2	R-2 LTCV warmte gevraagd actief EN R-8 Koppeling WKO warmtelevering TSA1 actief EN $T_{\text{onttrekking, WB}} > T_{\text{retour, LTCV}} + 3^{\circ}\text{C}$	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief OF R-8 Koppeling WKO warmtelevering TSA1 niet actief OF $T_{\text{onttrekking, WB}} < T_{\text{retour, LTCV}} + 2^{\circ}\text{C}$

Tabel II.6-11 | Regelkringen MT-OBES

Code	Capaciteitsregeling	Omschrijving
C-1	Warmtelevering HTCv	Zie profiel tapwatervraag
C-2	Warmtelevering LTCv	Zie profiel CV warmtevraag
C-3	LTWP warmte laden	De capaciteit van de LTWP warmte laden wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $T_{\text{uittrede, LTWP, condensor}}$, setpoint 45°C (opregelen bij overschrijding setpoint)
C-4	Koudelevering GKW	Zie profiel GKW koudevraag
C-5	TEO warmtelevering aan WP voor warmteladen	De capaciteit van de TEO warmtelevering aan WP voor warmte laden wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{TEO}} = P_{\text{HTWP, verdamper}} + P_{\text{LTWP, verdamper}} - P_{\text{WKO, koudelevering, TSA1}}$ b) $P_{\text{TEO, max}}$
C-6	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO warmtelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $P_{\text{WKO, warmtelevering}} = P_{\text{HTWP, verdamper}} + P_{\text{LTWP, verdamper}} - P_{\text{koudevraag}}$ b) $P_{\text{WKO, warmtelevering, max}}$
C-7	Koppelcircuit WKO koudelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO koudelevering wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar F_{TSA1} naar GKW net, setpoint $F_{\text{onttrekking, KB}}$
C-8	Bronpomp warmtelevering	Zie C-6
C-9	Bronpomp koudelevering	De capaciteit van de WKO koudelevering wordt bepaald door de maximale waarde van onderstaande regelingen: a) Regelaar $T_{\text{injectie, WB}}$, setpoint 45°C (opregelen bij overschrijding setpoint)
C-10	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA2	De capaciteit van het koppelcircuit wordt geregeld door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) F_{LTCV} naar TSA2 met als setpoint F_{LTCV} net (afregelen bij overschrijding setpoint) b) $T_{\text{aanvoer vrije verwarming}}$ met als setpoint stooklijn LTCV (afregelen bij overschrijding setpoint) c) $T_{\text{infiltratie, KB}}$ met als setpoint 12°C (afregelen bij overschrijding setpoint)

C-11	Koppelcircuit WKO warmteladen TSA2	De capaciteit van het koppelcircuit wordt geregeld door de onderstaande regeling: a) Regelaar $P_{LWP,condensor}$, setpoint 95% (opregelen bij onderschijding setpoint)
------	---	---

III Technische installatie en regelstrategie Utrecht Science Park

In dit hoofdstuk wordt de regelstrategie beschreven van de drie configuraties: OBES, OBES+ en MT-OBES voor project Utrecht Science Park (USP). De drie vereenvoudigde principeschema's voor elk van de configuraties zijn als bijlage bijgevoegd.

In onderstaande beschrijving wordt per installatie onderdeel aangegeven wanneer het in en uit bedrijf gaat. Dit wordt gedefinieerd via variabelen die aangeduid worden met R-#, waarbij R staat voor Release (vrijgave). Wanneer een onderdeel in bedrijf is zal deze ook geregeld moeten worden. Dit wordt gedefinieerd via variabelen die aangeduid worden met C-#, waarbij de C staat voor Control (regeling).

De regelstrategie wordt gebaseerd op een aantal variabelen: de afname profielen, de oppervlaktewatertemperatuur en de onttrekkingstemperatuur uit de OBES.

Voor het vereenvoudigen van de regelstrategie in deze fase, worden in deze beschrijving de volgende uitgangspunten aangehouden:

Alle componenten zijn volledig regelbaar (0-100%);

Het ontwerp is op basis van één warmtepomp die in elke situatie het benodigde vermogen kan leveren;

Er is geen rekening gehouden met eventuele storingen of onderhoud aan de installaties (installaties zijn 100% paraat).

Variabelen ten behoeve van vrijgaves en regelingen

In de volgende paragrafen wordt gebruik gemaakt van verschillende variabelen om tot vrijgave van een object te komen of om de capaciteitsregeling op te sturen. In Tabel III.6-12 staat een overzicht van de verschillende variabelen en een omschrijving.

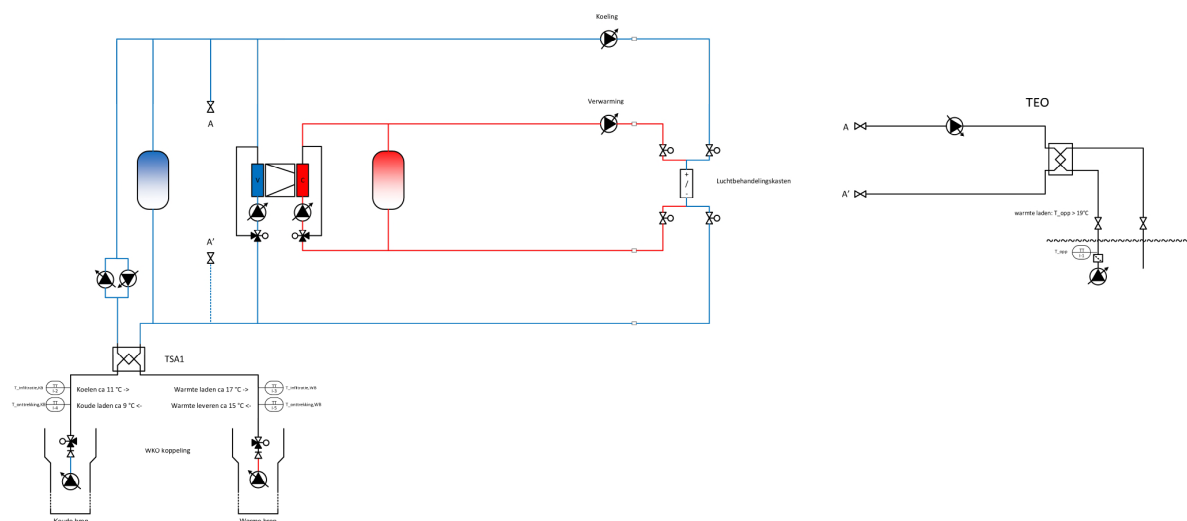
Tabel III.6-12 | Variabelen en omschrijving

Variabelen	Eenheid	Omschrijving
$F_{LTCV \text{ naar TSA2}}$	m^3/h	flow tussen LTCV net en WKO TSA2
F_{LTCV}	m^3/h	flow LTCV net
$F_{onttrekking, KB}$	m^3/h	flow onttrekking koude bron
$F_{TSA1 \text{ naar GKW net}}$	m^3/h	flow tussen TSA1 en GKW net
$P_{balans, GKWvat}$	kW_t	vermogensbalans in het GKW vat, gedefinieerd door: $+P_{TEO} \cdot P_{LTWP, verdamper} + P_{koudevraag}$
$P_{koudevraag}$	kW_t	vermogen koudevraag
$P_{LTWP, condensor}$	kW_t	vermogen van LT-WP aan de condensorzijde
$P_{LTWP, verdamper}$	kW_t	vermogen van LT-WP aan de verdamperzijde
P_{TEO}	kW_t	vermogen vanuit TEO voor warmte levering/laden
$P_{TEO, max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit TEO voor warmte levering/laden
$P_{WKO, warmtelevering}$	kW_t	vermogen vanuit WKO voor warmtelevering
$P_{WKO, warmtelevering, max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit WKO voor warmtelevering
$P_{WKO, koudelevering}$	kW_t	vermogen vanuit WKO voor koudelevering
$P_{WKO, koudelevering, max}$	kW_t	maximale vermogen vanuit WKO voor koudelevering
$P_{WKO, koudelevering, TSA1}$	kW_t	vermogen vanuit WKO TSA 1 voor koudelevering
$T_{aanvoer \text{ directe verwarming}}$	$^{\circ}C$	aanvoertemperatuur voor directe verwarming

T_{buiten}	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur van de buitenlucht
$T_{\text{injectie,KB}}$	$^{\circ}\text{C}$	injectietemperatuur in de koude bron
$T_{\text{injectie,WB}}$	$^{\circ}\text{C}$	injectietemperatuur in de warme bron
$T_{\text{onttrekking,KB}}$	$^{\circ}\text{C}$	onttrekkingstemperatuur in de koude bron
$T_{\text{onttrekking,WB}}$	$^{\circ}\text{C}$	onttrekkingstemperatuur in de warme bron
T_{opp}	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur van het oppervlakte water
$T_{\text{uitrede,LTWP,condensor}}$	$^{\circ}\text{C}$	uitredetemperatuur uit de condensor LT-WP

Vrijgaves en regelkringen OBES

Het prinsipeschema voor OBES is gegeven in Figuur III.6-10. De vrijgaves en regelkringen zijn gegeven in Tabel III.6-13 en Tabel III.6-14.



Figuur III.6-10 | P&ID OBES voor USP

Tabel III.6-13 | Vrijgaves OBES

Code	Object	IN	UIT
R-1	CO status (0 = warmtelevering, 1 = koudelevering)	bij $T_{\text{buiten}} > 18^{\circ}\text{C}$	bij $T_{\text{buiten}} < 14^{\circ}\text{C}$
R-2	LTCV warmte gevraagd	R-1 CO status warmtelevering actief	R-1 CO status warmtelevering niet actief
R-3	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-4	Vrijgave LTWP	R-2 LTCV warmte gevraagd actief	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief
R-5	Vrijgave TEO voor WP bedrijf	$T_{\text{opp}} > 14^{\circ}\text{C}$ EN R-4 LTWP in WP bedrijf actief	$T_{\text{opp}} < 14^{\circ}\text{C}$ OF R-4 LTWP in WP bedrijf niet actief
R-6	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{\text{opp}} > 19^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{opp}} < 19^{\circ}\text{C}$
R-7	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{\text{balans,GKWvat}} < 0$	$P_{\text{balans,GKWvat}} > 0$
R-8	Koppeling WKO koudelevering TSA1	$P_{\text{balans,GKWvat}} > 0$ EN R-5 Vrijgave TEO voor WP bedrijf niet actief	$P_{\text{balans,GKWvat}} < 0$ OF R-5 Vrijgave TEO voor WP bedrijf actief

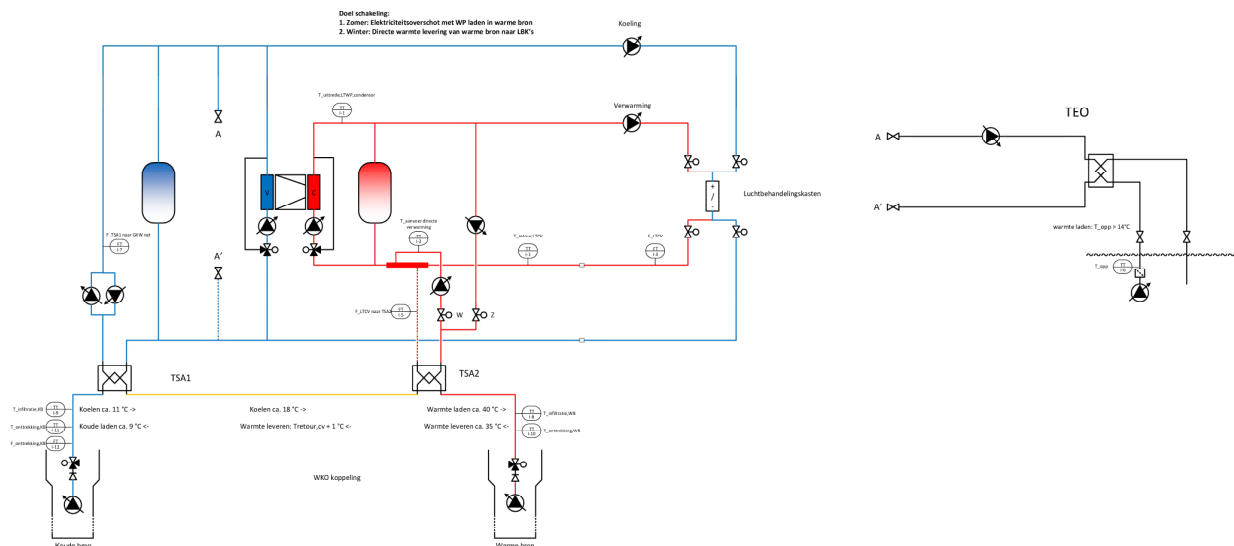
R-3	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-4	Vrijgave LTWP	R-2 LTCV warmte gevraagd actief OF R-9 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief EN R-9 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-5	Vrijgave TEO voor WP bedrijf	$T_{opp} > 14^{\circ}\text{C}$ EN R-4 LTWP in WP bedrijf actief EN R-1 CO status koudelevering niet actief	$T_{opp} < 14^{\circ}\text{C}$ OF R-4 LTWP in WP bedrijf niet actief OF R-1 CO status koudelevering actief
R-6	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{opp} > 14^{\circ}\text{C}$ EN R-8 Koppeling WKO koudelevering TSA1 actief	$T_{opp} < 14^{\circ}\text{C}$ OF R-8 Koppeling WKO koudelevering TSA1 niet actief
R-7	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{balans, GKWvat} < 0$	$P_{balans, GKWvat} > 0$
R-8	Koppeling WKO koudelevering TSA1	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-9	Vrijgave LTWP voor warmte laden TSA2	R-8 Koppeling WKO koudelevering actief EN R-6 Vrijgave TEO voor warmte laden actief	R-8 Koppeling WKO koudelevering niet actief OF R-6 Vrijgave TEO voor warmte laden niet actief
R-10	Koppeling WKO condensorwarmte afvoer TSA2	R-9 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-9 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief

Tabel III.6-16 | Regelkringen OBES+

Code	Capaciteitsregeling	Omschrijving
C-1	Warmtelevering LTCV	Zie profiel CV warmtevraag
C-2	LTWP warmte laden	De capaciteit van de LTWP warmte laden wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $T_{injectie, WB}$, setpoint 25°C (opregelen bij onderschrijding setpoint)
C-3	Koudelevering GKW	Zie profiel GKW koudevraag
C-4	TEO warmtelevering aan WP	De capaciteit van de TEO warmtelevering aan WP wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) Regeling P_{TEO} met als setpoint $P_{LTWP, verdamper}$ b) Regeling P_{TEO} met als setpoint $P_{TEO, max}$
C-5	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO warmtelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) Regeling $P_{WKO, warmtelevering}$ met als setpoint $P_{LTWP, verdamper} - P_{TEO} - P_{koudevraag}$ b) Regeling $P_{WKO, warmtelevering}$ met als setpoint $P_{WKO, warmtelevering, max}$
C-6	Koppelcircuit WKO koudelevering TSA 1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO koudelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) Regeling $P_{WKO, koudelevering}$ met als setpoint $P_{koudevraag}$ b) Regeling $P_{WKO, koudelevering}$ met als setpoint $P_{WKO, koudelevering, max}$
C-7	Bronpomp warmtelevering	Zie C-5
C-8	Bronpomp koudelevering	De capaciteit van de WKO koudelevering wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) C-3

Vrijgaves en regelkringen MT-OBES

Het prinsipeschema voor MT-OBES is gegeven in Figuur III.6-12. De vrijgaves en regelkringen zijn gegeven in Tabel III.6-17 en Tabel III.6-18.



Figuur III.6-12 | P&ID MT-OBES voor USP

Tabel III.6-17 | Vrijgaves MT-OBES

Code	Object	IN	UIT
R-1	CO status (0 = warmtelevering, 1 = koudelevering)	bij $T_{\text{buiten}} > 18^{\circ}\text{C}$	bij $T_{\text{buiten}} < 14^{\circ}\text{C}$
R-2	LTCV warmte gevraagd	R-1 CO status warmtelevering actief	R-1 CO status warmtelevering niet actief
R-3	GKW koeling gevraagd	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-4	Vrijgave LTWP	R-2 LTCV warmte gevraagd actief OF R-8 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief EN R-8 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-5	Vrijgave TEO voor warmte laden	$T_{\text{opp}} > 14^{\circ}\text{C}$ EN	$T_{\text{opp}} < 14^{\circ}\text{C}$ OF
R-6	Koppeling WKO warmtelevering TSA1	$P_{\text{balans, GKWvat}} < 0$	$P_{\text{balans, GKWvat}} > 0$
R-7	Koppeling WKO koudelevering TSA1	R-1 CO status koudelevering actief	R-1 CO status koudelevering niet actief
R-8	Vrijgave LTWP voor warmte laden	R-7 Koppeling WKO koudelevering TSA1 actief EN R-5 Vrijgave TEO voor warmte laden actief	R-7 Koppeling WKO koudelevering TSA1 niet actief OF R-5 Vrijgave TEO voor warmte laden niet actief
R-9	Koppeling WKO condensorwarmte afvoer TSA2	R-8 Vrijgave LTWP voor warmte laden actief	R-8 Vrijgave LTWP voor warmte laden niet actief
R-10	Koppeling WKO directe verwarming TSA2	R-2 LTCV warmte gevraagd actief EN R-6 Koppeling WKO warmtelevering TSA1 actief EN $T_{\text{onttrekking, WB}} > T_{\text{retour, LTCV}} + 3^{\circ}\text{C}$	R-2 LTCV warmte gevraagd niet actief OF R-6 Koppeling WKO warmtelevering TSA1 niet actief OF $T_{\text{onttrekking, WB}} < T_{\text{retour, LTCV}} + 2^{\circ}\text{C}$

Tabel III.6-18 | Regelkringen MT-OBES

Code	Capaciteitsregeling	Omschrijving
C-1	Warmtelevering LTCV	Zie profiel CV warmtevraag
C-2	LTWP warmte laden	De capaciteit van de LTWP warmte laden wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $T_{\text{uittrede,LTWP,condensor}}$, setpoint 40°C (opregelen bij overschrijding setpoint)
C-3	Koudelevering GKW	Zie profiel GKW koudevraag
C-4	TEO warmtelevering aan WP voor warmteladen	De capaciteit van de TEO warmtelevering aan WP voor warmte laden wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) Regeling P_{TEO} met als setpoint $P_{\text{LTWP,verdamer}} - P_{\text{WKO,koudelevering,TSA1}}$ b) Regeling P_{TEO} met als setpoint $P_{\text{TEO,max}}$
C-5	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO warmtelevering wordt bepaald door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) Regeling $P_{\text{WKO,warmtelevering}}$ met als setpoint $P_{\text{LTWP,verdamer}} - P_{\text{koudevraag}}$ b) Regeling $P_{\text{WKO,warmtelevering}}$ met als setpoint $P_{\text{WKO,warmtelevering,max}}$
C-6	Koppelcircuit WKO koudelevering TSA1	De capaciteit van het koppelcircuit WKO koudelevering wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $F_{\text{TSA1 naar GKW net}}$, setpoint $F_{\text{onttrekking,KB}}$
C-7	Bronpomp warmtelevering	Zie C-5
C-8	Bronpomp koudelevering	De capaciteit van de WKO koudelevering wordt bepaald door de onderstaande regeling: a) Regelaar $T_{\text{injectie,WB}}$, setpoint 40°C (opregelen bij overschrijding setpoint)
C-9	Koppelcircuit WKO warmtelevering TSA2	De capaciteit van het koppelcircuit wordt geregeld door de minimale waarde van onderstaande regelingen: a) $F_{\text{LTCV naar TSA2}}$ met als setpoint $F_{\text{LTCV net}}$ (afregelen bij overschrijding setpoint) b) $T_{\text{aanvoer directe verwarming}}$ met als setpoint stooklijn LTCV (afregelen bij overschrijding setpoint) c) $T_{\text{injectie, KB}}$ met als setpoint 9°C (afregelen bij overschrijding setpoint)
C-10	Koppelcircuit WKO warmteladen TSA2	De capaciteit van het koppelcircuit wordt geregeld door de onderstaande regeling: a) Regelaar $P_{\text{LTWP,condensor}}$, setpoint 95% (opregelen bij overschrijding setpoint)

IV Berekeningsmethode energiestromen, vermogens en debieten.

Maximale vermogen OBES en TEO

Het maximale vermogen uit de OBES of uit de TEO is het maximale debiet vermenigvuldigd met de temperatuursprong en de volumetrische warmtecapaciteit van water:

$$P_{\max} = Q_{\max} \cdot \Delta T \cdot C_w \quad (1)$$

Met een waarde voor $C_w = 4,18 \text{ MJ/m}^3$.

COP warmtepompen

De COP van een warmtepomp beschrijft hoeveel bruikbare warmte (condensor) gecreëerd kan worden met 1 deel elektrisch vermogen:

$$\begin{aligned} COP_{WP} &= \frac{P_{\text{condensor}}}{P_{\text{elektrisch}}} = \frac{P_{\text{verd}} + P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{elektrisch}}} = \frac{P_{\text{verd}}}{P_{\text{elektrisch}}} + 1 \\ P_{\text{condensor}} &= P_{\text{verd}} + P_{\text{elektrisch}} \\ P_{\text{condensor}} &= \frac{COP_{WP}}{COP_{WP} - 1} P_{\text{verd}} \end{aligned} \quad (2)$$

De COP van de warmtepompen wordt in deze studie berekend (ingeschat) door het carnot rendement (incl. de temperatuur sprong) te vermenigvuldigen met een efficiëntie factor.

$$COP_{WP} = WP_{\text{eff}} \frac{(273.15 + T_{\text{condensor_uit}} + T_{\text{sprong}})}{(T_{\text{condensor_uit}} - T_{\text{verdamer_uit}} - T_{\text{sprong}})} \quad (3)$$

In deze studie is aangenomen dat $WP_{\text{eff}}=0.55$ en $T_{\text{sprong}}=2.5 \text{ °C}$. Tijdens verwarming is $T_{\text{verdamer_uit}}$ gelijk aan de injectietemperatuur in de koude bron. Als de warmtepomp wordt gebruikt voor het actief laden van de warme bron (tijdens koelperiode) dan is $T_{\text{verdamer_uit}}$ gelijk aan retour temperatuur van de regeneratie (bijv. bij TEO casus Zuilense Vecht is dat $T_{\text{TEO}}-5 \text{ °C}$).

Vermogen warmtepompen

Het verdampervermogen van de warmtepompen wordt berekend door het aandeel elektrisch vermogen (o.b.v. de COP) van het gevraagde condensorvermogen af te trekken:

$$P_{\text{verdamer}} = P_{\text{vraag}} - P_{\text{elektrisch}} = P_{\text{vraag}} - \frac{P_{\text{vraag}}}{COP_{WP}} \quad (4)$$

Indien een deel van de lage temperatuur warmtevraag wordt ingevuld met directe verwarming (MT-OBES) neemt het verdampervermogen voor de lage temperatuur warmtepomp af.

Vermogen en debiet uit TEO

De TEO is de warmtebron voor regeneratie en extra warmtelevering. Het vermogen van de TEO wordt bepaald door de maximale capaciteit van de TEO (m^3/u) en de temperatuursprong (ΔT) maal de warmtecapaciteit van water:

$$P_{\text{TEO}} = Q_{\text{TEO}} \cdot \Delta T \cdot C_w \quad (4)$$

Vermogen en debiet uit OBES

Het totale vermogen dat de OBES moet leveren tijdens **koelen** wordt bepaald door:

- + koude vraag
- + regeneratievermogen (bijv. TEO)
- Verdampers vermogen warmtepomp (voor tapwater, indien aanwezig)

$$P_{OBES_K} = P_{koud} + P_{reg} - P_{verd_H} \quad (5)$$

Het totale vermogen dat de OBES moet leveren wordt tijdens **verwarming** bepaald door:

- + Verdampers vermogen warmtepompen (P_{verd})
- Koude vraag (P_{koud})
- Vermogen uit regeneratie (P_{reg}) (bijv. TEO)

$$P_{OBES_W} = P_{verd_L} + P_{verd_H} - P_{koud} - P_{reg} \quad (6)$$

Indien het vermogen uit de regeneratiebron (bijv. TEO) groot genoeg is om aan de warmtevraag te voldoen dan is het vermogen uit de OBES nul.

Het debiet uit de OBES wordt berekend voor een bepaalde vermogensvraag (verwarmen of koelen) o.b.v. de temperatuur van de bronnen en de vastgestelde injectietemperatuur berekend als:

$$Q_{OBES} = \frac{P_{OBES}}{\Delta T \cdot C_w} \quad (7)$$

MT-OBES: berekening energiestromen laden/ontladen op 45 °C

(deels) directe verwarming met MT-OBES

Indien de warme brontemperatuur hoog genoeg is wordt bij MT-OBES (een deel van) de lage temperatuurwarmtevraag voorzien door directe verwarming. Het aandeel directe verwarming dat gegenereerd kan worden t.o.v. indirecte verwarming (met de WP) is het resultaat van de warme bron temperatuur (T_w), de minimale temperatuur waarop de warmte nog direct benut kan worden ($T_{LTCV} + T_{TSA_sprong}$) en de injectietemperatuur in de koude bron (T_k , setpoint):

$$f_{direct} = \frac{T_w - (T_{LTCV} + T_{TSA_sprong})}{(T_{LTCV} + T_{TSA_sprong}) - T_k} \quad (8)$$

Optie A. Bij een relatief hoge hoog temperatuurwarmtevraag (t.o.v. de laag temperatuur warmtevraag) kan alle laag temperatuurwarmtevraag worden voorzien door directe verwarming die gepaard gaat met de flow naar verdampers van de hoog temperatuur warmtepomp :

$$P_{vraag_H} \cdot f_{direct} > P_{vraag_L} \quad (9)$$

In dit geval wordt de verdampers van de laag temperatuur warmtepomp dus niet gebruikt en is het vermogen in de OBES bepaald volgens:

$$P_{OBES_W} = P_{vraag_L} + P_{verd_H} - P_{koud} - P_{reg} \quad (10)$$

NB: hier is t.o.v. de berekening in vergelijking (6) P_{verd_L} vervangen door P_{vraag_L} .

Optie B. Bij een relatief grote lage-temperatuur warmtevraag moet alsnog de laag temperatuur warmtepomp aan de slag om in een deel van de lage-temperatuur warmtevraag te voorzien (in feite komt het erop neer dat de warmtepomp nodig is om de lage injectietemperatuur in de koude bron mogelijk te maken). In dit geval wordt eerst het maximale aandeel direct verwarming uit de hoge temperatuur warmtepomp ($P_{verd_H_direct_L}$) berekend en vervolgens wordt de rest verdeeld o.b.v. de verhouding f_{direct} (vergelijking 7).

$$P_{verd_H_direct_L} = P_{verd_H} \cdot f_{direct} \quad (11)$$

$$P_{vraag_L_rest} = P_{vraag_L} - P_{verd_H_direct_L} \quad (12)$$

De overige laag temperatuur warmtevraag (voor ruimteverwarming) die nog overblijft moet worden opgevuld door de flow naar de laag temperatuur warmtepomp (wat dus ook weer resulteert in een aandeel direct en een aandeel indirect met de warmtepomp). Het verdampers vermogen dat nodig is om aan de totale vraag te voldoen wordt dus bepaald door de fractie f_{direct} en het verdampersvermogen:

$$P_{verd_L_direct_L} = P_{verd_L} \cdot f_{direct} \quad (13)$$

Het verdampersvermogen is echter ook afhankelijk van het aandeel dat direct kan worden geproduceerd.

$$P_{verd_L} = (P_{vraag_L_rest} - P_{verd_L_direct_L}) - \frac{(P_{vraag_L_rest} - P_{verd_L_direct_L})}{COP_L} \quad (14)$$

Door vergelijking 13 en 14 aan elkaar gelijk te stellen en op te lossen blijkt dat het verdampers vermogen van de lage-temperatuur warmtepomp dat nodig is om de overige warmtevraag te leveren:

$$P_{verd_L} = \frac{\left(P_{vraag_L_rest} \cdot \frac{(COP-1)}{COP} \right)}{1 + \left(f_{direct} \cdot \frac{(COP-1)}{COP} \right)} \quad (15)$$

En het aandeel directe verwarming wat daar uit volgt is:

$$P_{verd_L_direct_L} = P_{verd_L} \cdot f_{direct} \quad (16)$$

Het totale vermogen dat vervolgens geleverd moet worden met de OBES wordt berekend als:

$$P_{OBES_W} = P_{verd_H} + P_{verd_H_direct_L} + P_{verd_L} + P_{verd_L_direct_L} - P_{koud} - P_{reg} \quad (17)$$

Het debiet uit de OBES wordt vervolgens gewoon berekend zoals aangegeven in vergelijking 7.

Laden warmte MT-OBES: post-processing

Om de uitkomsten van het energiemodel te valideren zijn via post-processing de resultaten van het model verder geanalyseerd. Uit deze analyse volgde dat er tijdens het opslaan van warmte met de warmtepomp (OBES+ en MT-OBES) in een aantal situaties een energieonbalans ontstond. Hoewel het effect beperkt is tot een paar procent afwijking, is er wel voor gekozen dit via post-processing aan te passen.

De energieonbalans werd veroorzaakt doordat het berekende vermogen over tegenstroomapparaat 1 (TSA 1, zie P&ID's in bijlage III) te hoog was. Hier is in de post processing een correctie op toegepast. Het maximale vermogen is gegeven door:

$$P_{TSA1,max} = Q_{OBES} \cdot C_w \cdot (T_{warme\ bron} - T_{TSA,uit}) \quad (18)$$

Hierin wordt $T_{TSA,uit}$ bepaald door de retourtemperatuur van het afgiftesysteem voor koeling en de temperatuursprong over TSA 1. In dit geval bedraagt de waarde 18°C.

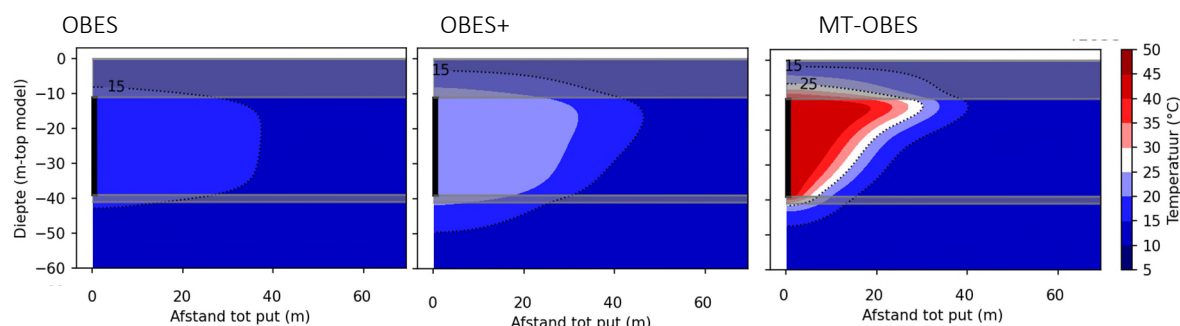
Wanneer de situatie optreedt dat het berekende vermogen over TSA1 groter is dan $P_{TSA1,max}$, wordt te weinig warmte geladen in de (MT)-OBES. Om de resultaten van het ondergronds model valide te houden, dienen de volumes en injectietemperaturen gelijk te blijven. Om dit te realiseren is er voor gekozen om het debiet over het (MT)-OBES systeem constant te houden en het tekort aan geleverde vermogen door TSA 1 toe te kennen aan de lage temperatuur warmtepomp. Deze slaat de 'ontbrekende hoeveelheid warmte' op en gebruikt hiervoor de TEO als bron. Als gevolg hiervan stijgt de inzet van de lage temperatuur warmtepomp en het TEO systeem. De resultaten in deze rapportage zijn hierop aangepast. Aanbevolen wordt om bij een vervolg het model hierop aan te passen.

V Hydro-thermisch model: opzet, uitgangspunten en doorsneden

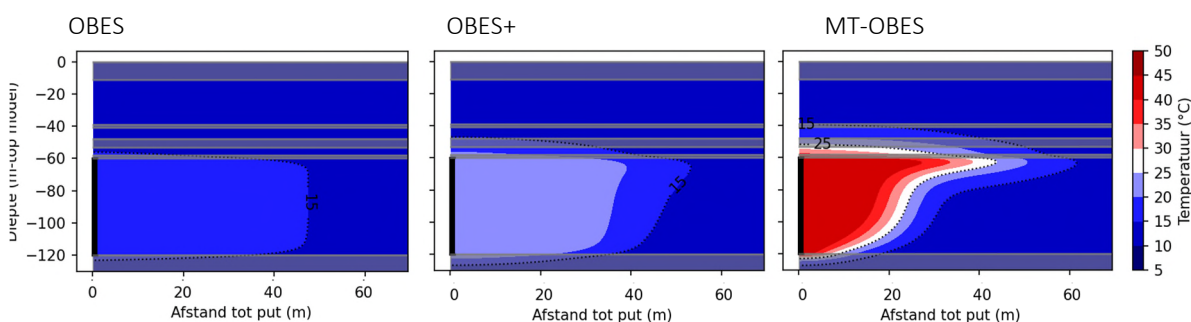
Beschrijving gekoppelde model

Het hydro-thermische model SEAWATv4 is gebruikt om de prestaties van de bronnen te simuleren. In Python is het ondergrondmodel aangestuurd via Flopy (Bakker et al., 2016) en gekoppeld aan het energetische model dat is opgezet in dit onderzoek (zie samenvatting in Tabel 2-8). Per uur is aan de hand van de input (warmte/koudevraag, buitentemperatuur, oppervlaktewatertemperatuur) het benodigde vermogen in/uit de OBES bepaald met het energetische model. Op basis van deze input en de brontemperaturen in het ondergrondse model wordt er een bepaald debiet verpompt in/uit de bronnen, de injectietemperatuur staat daarbij vast (varieert bij OBES, OBES+ en MT-OBES scenario's), de onttrekkingstemperatuur wordt berekend door het ondergrondmodel.

De warme en koude bron zijn in een axisymmetrisch grid gemodelleerd (radiaal symmetrisch), dit wil zeggen dat de bronnen afzonderlijk van elkaar zijn gesimuleerd (geen interactie tussen de bronnen). De niet-lineair temperatuur afhankelijke dichtheid en viscositeit van water zijn meegenomen in het model. De buitenranden van het model (boven-, zij- en onderkant) hebben een vaste temperatuur (12.5 °C) en stijghoogte (0m) en het model is stationair doorgerekend. De verticale celgrootte is gelijk in het gehele model en is 0.5m. De horizontale (in feite radiaal omdat het axisymmetrisch is) celgrootte van het model is dicht bij de put 0.25m. Vanaf 2.5m afstand van de put neemt de celgrootte logaritmisch toe tot er aan de rand van het model (>250m) een celgrootte van 15m is bereikt. Met deze discretisatie kon de invloed van de ondergrondse opslag op de energieprestaties van de verschillende OBES concepten zoals beoogd in deze studie voldoende goed en snel doorgerekend worden. De resulterende ondergrondse verspreiding van warmte, met name op grotere afstand is indicatief. De gebruikte werkwijze volgt verder de aanpak die in meer detail is beschreven in Beernink et al. (2020). Dwarsdoorsneden van de modelresultaten met indicatieve temperatuurcontouren zijn voor beide locaties en de drie systeemconcepten na volledig laden (einde zomer) in jaar 5 hieronder weergegeven (Figuur 6-13 en Figuur 6-14).



Figuur 6-13 Doorsnede van de ondergrond van de warme bron voor locatie Zuilen Vecht (volledig geladen in jaar 5)



Figuur 6-14 Doorsnede van de ondergrond van de warme bron voor locatie USP (volledig geladen in jaar 5)