

Gedetailleerde kostenberekening aquathermie

Varianten onderzoek en gedetailleerde
kostenberekeningen

Gedetailleerde kostenberekening aquathermie

ontwikkelaars:



techniplan adviseurs bv
RAADGEVEND INGENIEURSBUREAU



IF Technology **Creating energy**

begeleidingscommissie:

Deltares



VATTENFALL



Auteurs: Ruben Cardose (Techniplan), Tom van der Velden (IF Technology), Jan Westerweel (Techniplan), Frank Niewold (IF Technology), Rik Molenaar (Techniplan)

10 juni 2022

Begeleidingscommissie: Anton de Fockert (Deltares), Ronald Roosjen (Deltares), Mark de Bel (Deltares), Marten van Schie (HVC), Thijs Mandersloot (Vattenfall), Barry Scholten (Ennatuurlijk), Gert Jan de Joode (Eteck), Koen Smekens (TNO), Paul Erades (gemeente Nijmegen), Sander Lensink (PBL), Lex Bosselaar (RVO), Peter van Vugt (RVO)

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001.

WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Projectnummer

11205156

Keywords

aquathermie, gedetailleerde kostenberekening

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

Frank Niewold (IFT)	Ruben Cardose (TP)	Anton de Fockert (Deltares)
T 06 117 522 37	06 518 885 82	06 469 111 71
E F.Niewold@iftechnology.nl	ruben.cardose@techniplan.nl	anton.defockert@deltares.nl

06/2022 ©

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

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	5
Lijst met afkortingen	9
1 Inleiding	10
1.1 Achtergrond	10
1.2 Doel onderzoek	10
1.2.1 Bijdrage begeleidingscommissie	11
1.3 Leeswijzer	11
1.4 Disclaimer	11
2 Uitgangspunten	12
2.1 Demarcatie systeem	12
2.2 Beschouwing elektriciteitsprijs	12
2.2.1 Elektriciteitsprijs in fase 1	12
2.2.2 Elektriciteitsprijs in fase 2	13
2.3 Beschouwing CO ₂ -uitstoot	15
2.4 Jaarbelastingduurkromme	15
2.5 temperatuurprofiel oppervlaktewateren	16
3 Fase 1: variantenonderzoek	17
3.1 Onderzoeksmethode	17
3.2 Basisberekening	19
3.2.1 Stap 1 (tabblad 1.1-1.2 in Excel-model)	19
3.2.2 Stap 2 (tabblad 1.3 in Excel-model)	19
3.2.3 Stap 3 (tabblad 1.4 in Excel-model)	19
3.2.4 Stap 4 (tabblad 1.5 in Excel-model)	20
3.3 Resultaten	20
3.3.1 Gevoeligheidsanalyse	20
3.3.2 Beschouwing fase 1	21
4 Fase 2: gedetailleerde kostenberekening	22
4.1 Onderzoeksmethode	22
4.2 Gekozen varianten	23
4.3 Omschrijving varianten	24
4.3.1 Variant 1	24
4.3.2 Variant 2 & 3	26
4.3.3 Variant 4	27
4.3.4 Variant 5	28
4.3.5 Variant 6	28
4.3.6 Variant 7	29

4.4	Resultaten	30
4.5	Beschouwing op resultaten	32
5	Conclusie en aanbevelingen	35
5.1	Conclusie	35
5.2	Aanbevelingen	36

Managementsamenvatting

Aquathermie is een kansrijke en duurzame energiebron, waarbij thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED) gebruikt kan worden voor verwarmingsdoeleinden. Binnen werkpakket 3C van het WarmingUp kennisprogramma wordt gekeken naar de kosten van aquathermiesystemen. Om deze kosten inzichtelijk te maken zijn in dit onderzoek voorbeeld kostenberekeningen gemaakt voor verschillende type aquathermiesystemen. Hiermee kan een realistische inschatting gemaakt worden van de kosten per geleverde GJ-warmte (kostprijs) en de uitstoot van CO₂. Het resultaat moet beleidsmakers en initiatiefnemers ondersteunen in het maken van keuzen voor de toepassing van aquathermie. De randvoorwaarden, uitgangspunten en resultaten zijn beschreven in dit onderzoek. Een bijbehorende spreadsheet geeft meer detail van de totstandkoming van de kostprijs. De berekeningen en achterliggende kengetallen zijn opgesteld in samenwerking met een begeleidingscommissie. In deze begeleidingscommissie waren overheidspartijen, energiebedrijven, kennisinstellingen en adviesbureaus betrokken om de beschikbare kennis en ervaringen te gebruiken in dit onderzoek. De begeleidingscommissie bestaat uit Deltares, HVC, Vattenfall, Eteck, RVO, PBL, TNO, Ennatuurlijk en de gemeente Nijmegen. Tijdens de ontwikkeling van deze kostenberekening is er regelmatig afstemming geweest met de begeleidingscommissie, om de meest representatieve kennis en ervaringen mee te kunnen nemen in dit onderzoek.

Om tot het gewenste resultaat te komen zijn een tweetal fases doorlopen in dit onderzoek:

- 1 In fase 1 is een basisberekening en gevoeligheidsanalyse opgesteld met als doel het inzichtelijk maken van technische en financiële parameters die een grote impact hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. Het belangrijkste resultaat van fase 1 is een gevoeligheidsanalyse in de vorm van een tornadoplot.
- 2 In fase 2 zijn gedetailleerde kostenberekeningen opgesteld van 7 realistische aquathermie varianten. Deze kostenberekeningen kunnen als voorbeeld dienen voor beleidsmakers, zodat ze in de toekomst de financiële haalbaarheid van een aquathermiesysteem eenvoudiger kunnen toetsen.

Op de twee fases zijn een aantal randvoorwaarden en uitgangspunten van toepassing. Onderstaande randvoorwaarden en uitgangspunten worden extra benadrukt in het kader van de twee fases in dit onderzoek én in het kader van vergelijking met andere technieken dan aquathermie:

- Demarcatie: in samenwerking met de begeleidingscommissie is besloten dat de demarcatie van het aquathermiesysteem loopt tot en met de technische ruimte (TR). Deze TR kan dienen als centrale opwekking of voor de distributie van bronwarmte aan het warmtenet. Eventuele piekvoorzieningen in de TR zijn **niet** meegenomen.
- Elektriciteitsprijs: In fase 1 is voor alle varianten een elektriciteitstarief gehanteerd van €68/MWh, gebaseerd op de klimaat- en energieverkenning 2021. Daarnaast is de elektriciteitsprijs zelf als parameter meegenomen in de gevoeligheidsanalyse. In fase 2 is gewerkt met een drietal elektriciteitsscenario's, waarmee de impact van de elektriciteitsprijs duidelijk naar voren komt.
- CO₂-uitstoot: gebaseerd op de KEV 2021 is een gemiddelde elektriciteit emissie factor gebruikt van 80 kg/MWh gedurende de looptijd van een aquathermieproject (30jr). Deze factor is zowel in fase 1 als fase 2 van het onderzoek toegepast. Hierbij daalt de CO₂-uitstoot per geproduceerde kWh elektriciteit van 300 kg/MWh in 2020 naar 0 kg/MWh in 2050.

- Jaarbelastingduurkrommes (JBDK): in fase 1 van dit onderzoek zijn alle varianten gekoppeld aan één JBDK afkomstig van IF Technology en Techniplan. In fase 2 heeft elke variant een eigen JBDK gekregen.

Fase 1

De eerste stap in fase 1 was het opstellen van een basisberekening. Deze basisberekening bevat veelvoorkomende variabelen en is daarmee representatief voor een “gemiddeld” aquathermie systeem in Nederland. Door telkens één technische of financiële variabele van de basisberekening aan te passen zijn er een 30-tal varianten ontstaan, waarmee de gevoeligheid van de parameters inzichtelijk is gemaakt. Middels een tornadoplots is vervolgens gevisualiseerd welke parameters een grote invloed hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. Dit zijn voornamelijk:

- SDE++ subsidie;
- Gehanteerde elektriciteitsstarieven;
- Aanvoertemperatuur warmtenet;
- Vollasturen warmtenet;
- Vermogen warmtenet;
- Met of zonder WKO-systeem.

In overleg met de begeleidingscommissie is aan het einde van fase 1 besloten om de SDE++ subsidie niet mee te nemen in de gedetailleerde kostenberekeningen in fase 2. Op deze manier is de kostprijs van aquathermie zo zuiver mogelijk. Met de overige zeer bepalende variabelen zijn 7 realistische varianten, waarbij gevarieerd is met deze variabelen, zodat de spreiding en hoogte van de kostprijs een representatief beeld oplevert.

Fase 2

De meest invloedrijke variabelen vormden het uitgangspunt voor het vaststellen van 7 varianten, waarvoor een gedetailleerde kostenberekening is gemaakt. De varianten zijn in overleg met de begeleidingscommissie tot stand gekomen. Belangrijk uitgangspunt voor de varianten is dat iedere variant een wezenlijk verschillend aquathermiesysteem vertegenwoordigt. Door verschillende thema's te bedenken zijn 7 varianten ontstaan die verschillen in grootte, locatie, type watergang en technische/financiële configuraties. Hierbij een korte omschrijving van de varianten met daarbij de belangrijkste variabelen:

- Variant 1: de basisvariant met gemiddelde waarden;
- Variant 2: TEO-systeem aangesloten op een groot warmtenet en een grote rivier waarbij de warmtepompcentrale draait op basislast;
- Variant 3: TEO-systeem aangesloten op klein lokaal warmtenet;
- Variant 4: een variant met thermische energie uit afvalwater (TEA), waarbij geen WKO benodigd is;
- Variant 5: TEO-systeem gekoppeld aan open warmtenet;
- Variant 6: TEO-systeem aangesloten op een grote rivier in een grote stad, waarbij geen WKO benodigd is;
- Variant 7: TEO-systeem aangesloten op een ZLT-net, waarbij ook koude geleverd kan worden.

De uitgangspunten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Parameters	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7
Vermogen warmtenet	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	5 MW	20 MW	2,3 MW
Vollasturen warmteafzet WP	3.500	6.000	2.000	3.500	6.000	3.500	1500
Vermogensaandeel piek	38%	71%	0%	38%	72%	29%	0%
Wel/geen warmte/koudeopslag	Met WKO	Met WKO	Met WKO	Zonder WKO	Met WKO	Zonder WKO	Met WKO
Type watergang	Kanaal	Grote rivier	Sloten	Effluent	Vaart	Grote rivier	Plas
Vollasturen TEO/TEA-systeem	3000	5000	2800	3500	2500	3500	1300
Aanvoertemperatuur	70 °C	45 °C	70 °C	70 °C	70 °C	45 °C	ZLT

Uit de gedetailleerde kostenberekening in fase 2 van de 7 varianten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Schaalgrootte en vollasturen van het aquathermiesysteem spelen een belangrijke rol in de kostprijs van aquathermiesystemen. Gebieden met een grote warmtevraag, waarbij de warmtepompcentrale alleen de basislast levert hebben een lagere kostprijs.
- Een warmtebron die jaarrond warmte kan leveren zonder gebruik te maken van seizoensopslag (WKO) resulteert in een lagere kostprijs. Dit maakt een grote rivier of een TEA-systeem aantrekkelijk.
- De aanvoertemperatuur van het warmtenet heeft een grote invloed op het elektriciteitsverbruik en daarmee de operationele kosten en de CO₂-uitstoot van het systeem. Dit met als reden dat een lagere aanvoertemperatuur met een hogere COP geproduceerd kan worden.
- Een ZLT-net waarbij ook koude geleverd kan worden heeft een lage kostprijs en CO₂-uitstoot t.o.v. de overige varianten. Met name voor grote gebiedsontwikkelingen zijn deze systeem aantrekkelijk.
- De gehanteerde elektriciteitsprijs heeft een grote impact op de kostprijs van aquathermiesystemen.

Daarnaast is het ook belangrijk om onderstaande relevante punten mee te laten wegen in de conclusie van het onderzoek:

- Op het moment dat de warmtebron aquathermie met andere warmtebronnen vergeleken wordt is het van belang dat de methode van elektriciteitsprijsbepaling vergelijkbaar is, en ook alle andere kostenposten vergelijkbaar meegenomen. Als dit niet het geval is, kunnen de warmtebronnen **niet** goed met elkaar vergeleken worden.
- Tijdens het onderzoek zijn de kosten van aquathermiesystemen doorgerekend met verschillende aanvoertemperaturen in het warmtenet, namelijk 70 °C, 45 °C en ZLT. Bij meerdere varianten bevindt een gedeelte van de opwekinstallaties zich daarmee achter de demarcatie. Dit betekent dat de varianten extra kosten bevatten die op dit moment niet zijn meegenomen in de berekende kosten van het aquathermiesysteem. De kostprijs van de varianten met verschillende aanvoertemperaturen kunnen hierdoor niet één op één met elkaar vergeleken worden.
- Om appels met appels te vergelijken is het belangrijk de juiste kostprijs te gebruiken. In de huidige studie is een kostenberekening gemaakt zonder SDE++ mee te nemen. Hieruit volgt een kostprijs (€/GJ) van het aquathermiesysteem. Mocht de SDE++ subsidie worden meegenomen dan levert dit inkomsten op. Dit zorgt ervoor dat de kostprijs (€/GJ) van het aquathermiesysteem daalt.
- De gehanteerde CO₂-emissie factor heeft een grote impact op de resultaten van de CO₂-uitstoot. Indien de resultaten uit dit onderzoek vergeleken worden met andere

warmtebronnen is het noodzakelijk dat dezelfde CO₂-emissie factor wordt aangehouden voor alle installaties die elektriciteit verbruiken.

Tot slot om het draagvlak van aquathermie te vergroten en aquathermie beter op de kaart te zetten wordt aanbevolen een aantal vervolgstappen te zetten:

- De kostenberekeningen uit deze studie visualiseren in heldere principeschema's en/of infographics met de spreadsheet als rekenkundige module. Voor beleidsmakers is aquathermie nog steeds een onbekend terrein. Veel onderzoeken, informatie, presentatie gaan al snel te diep in de techniek. Door gebruikers de controle te geven over het systeem met simpele visualisaties krijgt men inzicht welke mogelijkheden er zijn en welke factoren belangrijk zijn.
- Dit kan plaatsvinden met een nieuwe begeleidingscommissie bestaande uit gebruikers, waarbij de focus meer licht op gebruiksgemak en toepassing, dan op techniek.

Lijst met afkortingen

BuCa	business case
GSB	gestuurde boring
LT	lage temperatuur
MT	midden temperatuur
SCOP	seasonal coefficient of performance
TCO	total cost of ownership
TEA	thermische energie uit afvalwater
TEO	thermische energie uit oppervlaktewater
TR	technische ruimte
WKO	warmte-/koudeopslag
WP	warmtepomp
ZLT	zeer lage temperatuur

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het coalitieakkoord van de Nederlandse overheid staat: "Nederland wil koploper in Europa zijn bij het tegengaan van de opwarming van de aarde. Om uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te zijn, scherpen we het doel voor 2030 in de Klimaatwet aan tot tenminste 55% CO₂ reductie. We committeren ons hard aan dit doel en zullen indien nodig extra stappen zetten om dit te realiseren. Om dit doel ook zeker te halen, spreken we af om ons in het beleid te richten op een hogere opgave, wat neerkomt op circa 60% in 2030. Ook na 2030 is het nodig om ambitieus door te gaan met CO₂ reductie. We zetten in op een reductie van 70% in 2035 en 80% in 2040." Dit is nodig om de temperatuur op aarde niet verder te laten stijgen dan anderhalve graad. Om deze doelstellingen te halen is een energietransitie onvermijdelijk. Een belangrijk onderdeel in deze transitie is de warmtetransitie. De warmtetransitie is de overgang van een niet-duurzame manier van verwarmen met fossiele brandstoffen naar een duurzame manier van verwarmen. Een kansrijke techniek om deze overgang mede vorm te geven is aquathermie. Dit bleek ook uit een studie van CE Delft en Deltares, waaruit naar voren kwam dat aquathermiesystemen circa 40% tot 50% van de totale warmtevraag in Nederland kunnen leveren¹.

Toch wordt de techniek maar beperkt toegepast in de praktijk. Om hier verandering in te brengen besteed het WarmingUp onderzoek aandacht aan de opschaling van de techniek aquathermie. Een belangrijk aspect voor de opschaling van aquathermiesystemen is het inzichtelijk maken van de kosten, zodat initiatiefnemers en beleidsbepalers aquathermie beter mee kunnen nemen in hun energiestrategieën.

Binnen werkpakket 3C van het WarmingUp traject wordt gekeken naar de kosten van aquathermiesystemen. In een voorgaand onderzoek hebben de adviesbureaus IF Technology en Techniplan Adviseurs kostenkanten opgeleverd voor componenten van een aquathermiesysteem. Echter blijkt het voor veel beleidsmakers, initiatiefnemers nog erg ingewikkeld om deze kostenkanten op een goede manier verwerken in een gedetailleerde kostenberekening. Om beleidsmakers te helpen met het inzichtelijk krijgen van de kosten, worden er in dit onderzoek voorbeeldberekeningen gemaakt voor aquathermiesystemen, waarmee een realistische inschatting gemaakt kan worden van de kosten per geleverde GJ-warmte en de reductie in CO₂ uitstoot.

1.2 Doel onderzoek

Het voorliggende onderzoek heeft als gewenst resultaat een zevental gedetailleerde kostenberekeningen. Deze voorbeeldberekeningen moeten een representatief beeld geven van verschillende typen aquathermiesystemen in Nederland. Denk daarbij aan verschillen in grootte, locatie en andere technische/financiële configuraties. Om tot het gewenste resultaat te komen zijn een tweetal fases doorlopen in dit onderzoek:

1. *Basisberekening en gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 3)*

¹ Schepers, Benno., & Kruit, Katja., Nationaal potentieel van aquathermie. CE Delft.

Het doel van de eerste fase is het inzichtelijk maken van welke technische en financiële parameters een grote impact hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. Het belangrijkste resultaat van fase 1 is een gevoeligheidsanalyse in de vorm van een tornadoplots. Met de verzamelde gegevens en resultaten uit fase 1 kunnen een zevental representatieve en diverse varianten worden opgesteld in fase 2.

2. Gedetailleerde kostenberekeningen (hoofdstuk 4)

In de tweede fase van dit onderzoek zijn de gekozen varianten verder uitgewerkt in een gedetailleerde kostenberekening. Het doel van deze kostenberekeningen is het als voorbeeld kunnen dienen voor beleidsmakers, zodat ze in de toekomst de kosten van een aquathermiesysteem zelfstandig op hoofdlijnen kunnen bepalen aan de hand van voorliggend rapport. De hypothetische casussen moeten een representatief beeld geven van verschillende grootte, verschillende locaties en verschillen configuraties van aquathermiesystemen. Indien de beleidsmaker meer achtergrondinformatie wenst, wordt verwezen naar de bijbehorende spreadsheet.

1.2.1 Bijdrage begeleidingscommissie

Om een zo breed mogelijk draagvlak te creëren voor dit onderzoek, is het belangrijk om verschillende partijen te betrekken. Daarom is er een begeleidingscommissie opgesteld die de berekenmethodes en gehanteerde waarden van de adviesbureaus kan toetsen. De begeleidingscommissie bestaat uit Deltares, HVC, Vattenfall, Eteck, RVO, PBL, TNO, Ennatuurlijk en de gemeente Nijmegen.

Naast het controleren van de werkzaamheden heeft de begeleidingscommissie ook informatie aangeleverd voor het onderzoek. Zo zijn de gebruikte jaarbelastingduurkromme's (JBDK) afkomstig van de warmtebedrijven uit de commissie. Wat de JBDK precies inhoudt en hoe deze zijn toegepast wordt nader toegelicht in paragraaf 2.4.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is onderverdeeld in de basisberekening en gevoeligheidsanalyse van fase 1 (hoofdstuk 3), en de gedetailleerde kostenberekening van (hoofdstuk 4). Deze hoofdstukken zijn verder onderverdeeld in een methode, uitgangspunten en resultaten. Ten slotte worden algemene conclusies en aanbevelingen gegeven voor fase 1 en fase 2 samen.

1.4 Disclaimer

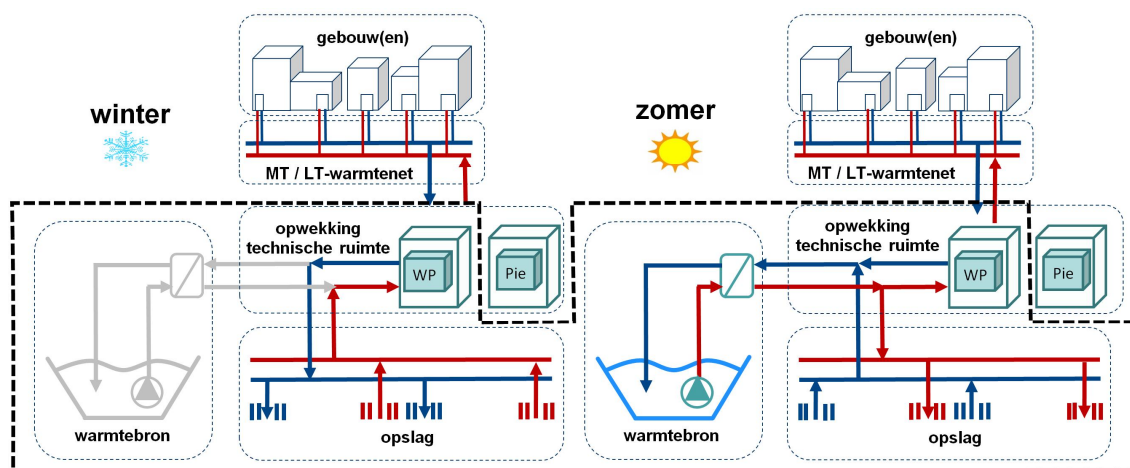
De resultaten van dit onderzoek zijn slechts bedoeld om de kosten van verschillende typen aquathermiesystemen inzichtelijk te maken. De kostprijs, voorbeeldberekeningen en achterliggende kentallen zijn opgesteld in samenwerking met een begeleidingscommissie en hoewel wij ernaar streven om de kostprijs up-to-date en correct te berekenen, geven wij geen garanties van welke aard dan ook, uitdrukkelijk of impliciet, over de volledigheid, nauwkeurigheid, betrouwbaarheid of geschiktheid met betrekking tot de kostprijs van een echt aquathermiesysteem, voor welk doel dan ook. Zo zijn ook alle genoemde kostprijzen, kentallen en voorbeeldberekeningen indicatief. Alle vertrouwen die u in deze informatie stelt is daarom strikt op eigen risico.

2 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden enkele belangrijke uitgangspunten uit dit onderzoek toegelicht. Te beginnen bij de gehanteerde demarcatie van het energiesysteem. Vervolgens volgt een beschouwing van de elektriciteitsprijs en de gehanteerde CO₂-emissie per MWh elektriciteit. In de laatste paragraaf wordt de functie van een jaarbelastingduurkromme (JBDK) toegelicht.

2.1 Demarcatie systeem

De demarcatie van de gedetailleerde kostenberekening is weergegeven in Figuur 2.1. Deze ligt na de technische ruimte waar eventuele centrale opwekking én distributie van LT-warmtebron plaatsvindt en voor de uitkoppeling in het warmtenet (distributienet). De pieklast opwekking valt tevens buiten de onderzoeksscope. In het geval het zeer lage temperatuur (ZLT) warmtenet zijn er geen collectieve warmtepompen aanwezig. In dat geval liggen de individuele warmtepompen in de gebouwen buiten de demarcatie.



Figuur 2.1 | Demarcatie onderzoek is weergegeven met dikke zwarte stippellijn. De figuur heeft betrekking op een systeem met een MT- en LT-net, waarbij een collectieve warmtepomp in de technische ruimte staat. In het geval van een ZLT-net (niet weergegeven in de figuur) ligt ook de warmtepomp (WP) buiten de demarcatie.

2.2 Beschouwing elektriciteitsprijs

Deze paragraaf gaat over de variabele elektriciteitsprijs. De elektriciteitsprijs is een invloedrijke parameter. De OPEX bij een aquathermieproject bestaat voor een significant deel uit elektriciteitskosten. De warmtepompen en alle distributiepompen verbruiken elektriciteit om de warmte op te wekken en te distribueren. In de volgende paragrafen is onderbouwd welke uitgangspunten zijn gehanteerd in de verschillende fasen van het onderzoek.

2.2.1 Elektriciteitsprijs in fase 1

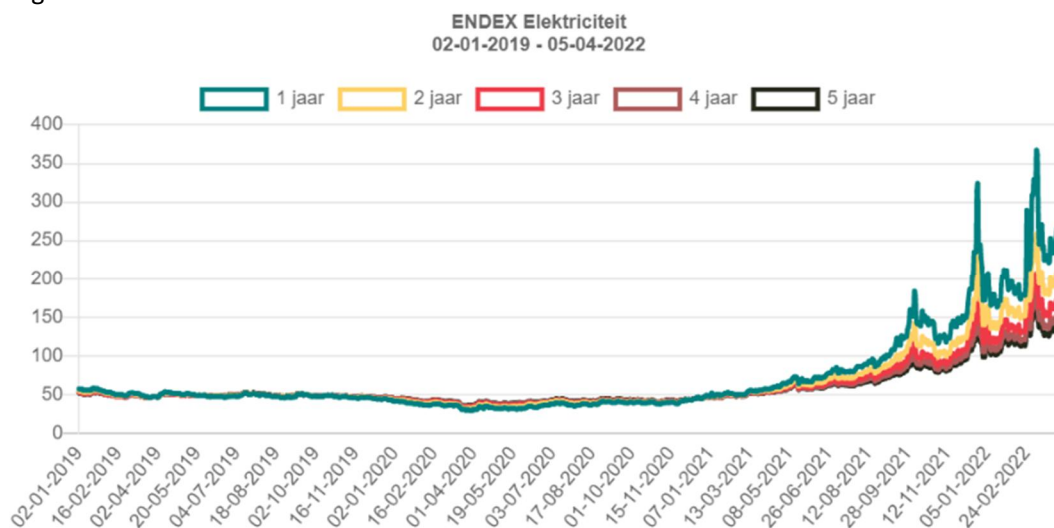
In fase 1 (hoofdstuk 3) is onderzoek gedaan naar de gevoeligheid van de elektriciteitsprijs. De elektriciteitsprijzen zijn gebaseerd op de KEV 2021 en de 'huidige' elektriciteitsprijzen, ca. 170

€/MWh_e (conform ICE ENDEX² op 1 januari 2022 voor een termijn van 1 jaar). De huidige prijzen zijn door diverse “extreme” omstandigheden (COVID-19, oorlogssituatie Oekraïne, etc.) sinds Q3 2021 flink gestegen. Daarnaast is ook de gevoeligheid onderzocht wanneer de elektriciteitsprijs hoger of lager is op de kostprijs. In de KEV 2021 ligt de elektriciteitsprijs in 2030 tussen 32 – 68 €/MWh. In fase 1 wordt in de basisberekening met 68 €/MWh gerekend. De gevoeligheid wordt onderzocht met een lage en hoge elektriciteitsprijs van respectievelijk 32 en 170 €/MWh.

2.2.2 Elektriciteitsprijs in fase 2

Voor fase 2 is een elektriciteitsprijs gekozen die representatief is voor de gehele levensduur van toekomstige aquathermiesystemen en in lijn met de prijs die voor andere bronnen worden gehanteerd. In overleg met de begeleidingscommissie wordt in fase 2 “onafhankelijk” van de zeven gekozen varianten met een bandbreedte van de elektriciteitsprijs gerekend. In de volgende paragraaf wordt daar specifiek op in gegaan.

De elektriciteitsprijs is niet of nauwelijks afhankelijk van type en locatie van aquathermie. De kosten van een aquathermie-systeem echter is wel afhankelijk van de elektriciteitsprijs. De elektriciteitsprijs is dus een variabele die hoe dan ook voor elk variant geldt. Bij de huidige hoge elektriciteitsprijs (1^e kwartaal 2022) zijn de variabele operationele kosten dominant in de operationele kosten (OPEX). Meer dan 50% van de totale projectkosten (TCO over 30 jaar) bestaat uit elektriciteitskosten. In Figuur 2.2 geeft de handelsprijzen van elektriciteit op de ENDEX-markt weer (d.d. 19 april 2022). Dit zijn lange termijn handelsprijzen tot en met vijf jaar in de toekomst. De prijzen zijn weergegeven in €/MWh. De prijzen zijn in het eerste kwartaal van 2022 gemiddeld bijna vier keer zo hoog als de periode voor 2021. Om de kosten van een aquathermie-systeem goed in te kunnen schatten over een langere tijd is het dus zeer belangrijk om een representatieve elektriciteitsprijs te gebruiken. Daarnaast is het zeer belangrijk dat de methode van elektriciteitsprijsbepaling bij andere warmtebronnen vergelijkbaar is. Als dit niet het geval is, kunnen warmtebronnen niet met elkaar vergeleken worden.



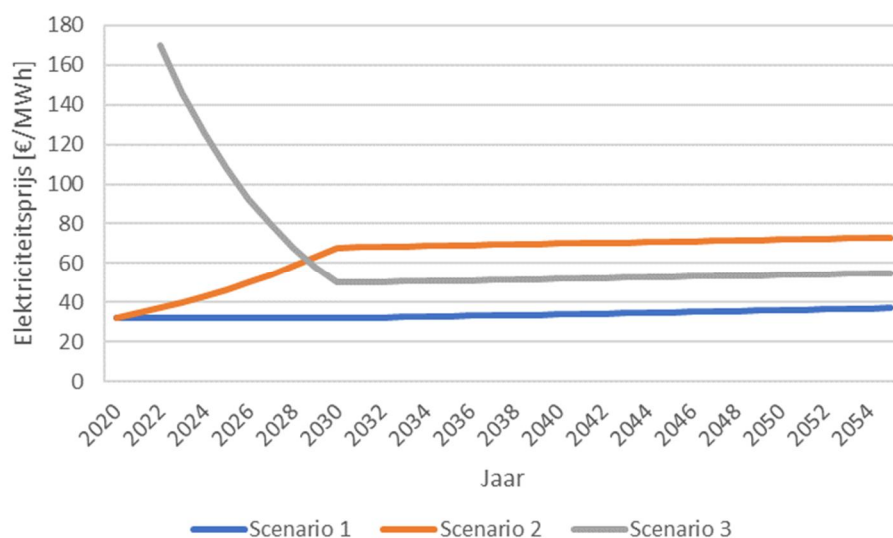
Figuur 2.2 | ENDEX elektriciteit. De prijzen zijn in €/MWh. Bron: <https://vanhelder.nl/zakelijke-energie/actuele-beursprijzen>.

Een prijs bepalen die representatief is voor de periode 2025 – 2055 is zeer lastig. Daarom wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van een bandbreedte uit de KEV 2021³. De groothandelsprijs elektriciteit in 2020 is 32 €/MWh. In 2030 ligt deze prijs tussen 32 – 68 €/MWh.

² ‘Actuele prijzen’, vanhelder.nl

³ <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-klimaat-en-energieverkenning-2021-4681.pdf>.

In Figuur 2.3 zijn drie elektriciteitsprijs scenario's weergegeven. Scenario 1 & 2 hebben allebei als startpunt de bepaalde elektriciteitsprijs van de KEV in het jaar 2020. Scenario 1 gaat er vervolgens vanuit dat de elektriciteitsprijs laag blijft en symboliseert daarmee de ondergrens van de bandbreedte. Scenario 2 stijgt tot en met het jaar 2030 naar de hoogste waarde van de KEV. Scenario 3 gaat uit van de huidige elektriciteitsprijs in 2022 (circa €170/MWh) en zakt vervolgens naar de gemiddelde elektriciteitsprijs van de KEV. Onder de figuur zijn overige karakteristieken van de scenario's beschreven.



Figuur 2.3 | Elektriciteitsprijs scenario's voor de periode 2025 – 2055.

1. Scenario 1: 2020 t/m 2030 uit KEV 2021 á 32 €/MWh. Vanaf 2030 tot 2050 is de stijgende “Stated Policies” prijs van gas overgenomen uit de World Energy Outlook 2021⁴. De “Stated Policies Scenario” is een meer conservatieve benchmark, waarbij rekening wordt gehouden dat niet alle gestelde doelen door overheden gehaald worden. Dit komt neer op een prijsstijging van omgerekend ca. 4 €/MWh van 2030 tot 2050. In 2050 is dit dan 36 €/MWh. Vanaf 2050 tot 2055 is deze geëxtrapoleerd.
2. Scenario 2: 2020 t/m 2030 uit KEV 2021 á 32 €/MWh in 2020 en 68 €/MWh in 2030. Vanaf 2030 tot 2050 is de stijgende stated policies prijs van gas overgenomen uit de World Energy Outlook. Dit komt neer op een prijsstijging van omgerekend ca. 4 €/MWh van 2030 tot 2050. In 2050 is dit dan 72 €/MWh. Vanaf 2050 tot 2055 is deze geëxtrapoleerd.
3. Scenario 3: Huidige elektriciteitsprijs als uitgangspunt. Gemiddelde van 170 €/MWh (ENDEX). In 2030 gemiddelde van KEV is 50 €/MWh. Vanaf 2030 tot 2050 is de stijgende stated policies prijs van gas overgenomen uit de World Energy Outlook. Dit komt neer op een prijsstijging van omgerekend ca. 4 €/MWh van 2030 tot 2050. In 2050 is dit dan 54 €/MWh. Vanaf 2050 tot 2055 is deze geëxtrapoleerd.

Er is bewust voor gekozen om **geen** scenario mee te nemen, waarin de elektriciteitsprijzen gelijk blijven aan het huidige prijsniveau van €170/MWh. Zoals al eerder omschrijven wordt de huidige elektriciteitsprijs veroorzaakt door een ophoping van grote marktstoringen. Naar alle waarschijnlijkheid gaan de prijzen in de komende jaren dalen door natuurlijke marktwerking.

⁴ International Energy Agency (2021), World Energy Outlook 2021.

Daarmee wordt de kans zeer klein geacht dat een scenario met gelijkblijvende prijzen zich zal voordoen.

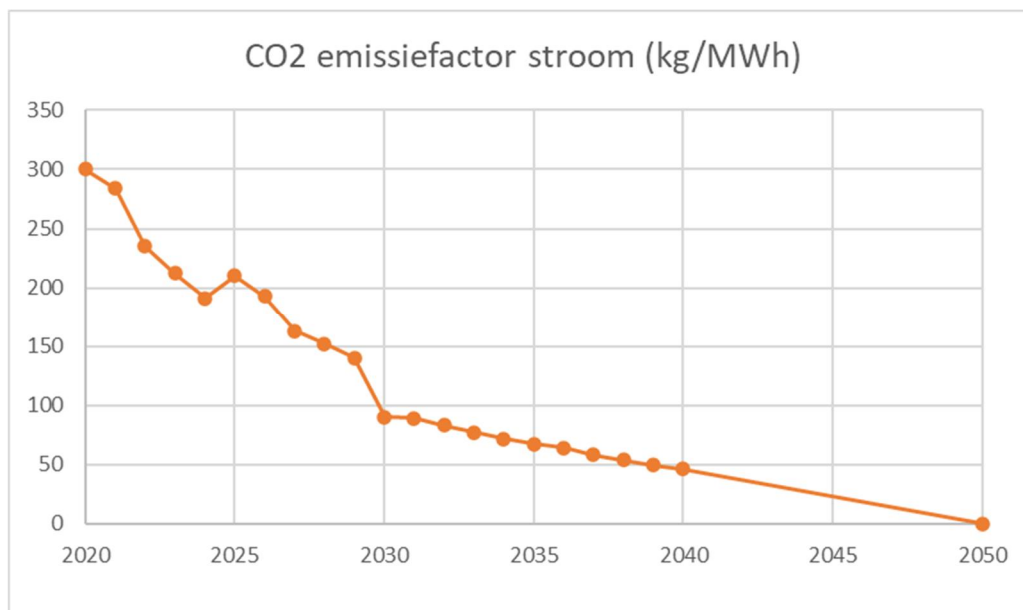
2.3 Beschouwing CO₂-uitstoot

Naast de elektriciteitsprijs is ook de hoogte van de CO₂-uitstoot variabel gedurende de looptijd van een aquathermieproject. Door verduurzaming van de elektriciteitsproductie is de CO₂-emissie van aquathermie op dit moment (2022) anders dan dat het geval zal zijn in 2050. Met welke snelheid deze verduurzamingsslag gaat plaatsvinden wordt jaarlijks ingeschat door het planbureau voor de leefomgeving. In de voorliggende studie is het meest recente rapport van het planbureau geraadpleegd, met de titel “klimaat- en energieverkenning 2021”.

Uit de opgestelde prognoses van het PBL komen de volgende resultaten naar voren:

- CO₂-emissie 2020: 300 kg/MWh
- CO₂-emissie 2025: 210 kg/MWh
- CO₂-emissie 2030: 90 kg/MWh
- CO₂-emissie 2050: 0 kg/MWh

De tussenliggende waarde tot en met het jaar 2050 zijn ingeschat en aangeleverd door TNO. In Figuur 2.4 is inzichtelijk gemaakt wat de CO₂-emissie is gedurende de komende jaren.



Figuur 2.4 | CO₂-emissiefactor elektriciteitsopwekking Nederland voor de periode 2020 – 2055.

De CO₂-emissie is op basis van bovenstaande waarden gelijk aan 80 kg/MWh geproduceerde elektriciteit gedurende de looptijd van een aquathermieproject (30 jaar).

2.4 Jaarbelastingduurkromme

In fase twee van dit onderzoek zijn de varianten gekoppeld aan een jaarbelastingduurkromme (JBDK). Een JBDK maakt de geproduceerde vermogensvraag van een warmtenet inzichtelijk gedurende een tijdsbestek van één jaar (circa 8.760 uur). Op basis van de JBDK kan de

vermogensverdeling, energievraag en het aantal vollasturen van een basis-/pieklast nauwkeurig worden berekend.

De begeleidingscommissie heeft voor elk van de zeven varianten in fase twee een passende JBDK aangeleverd. Met “passende” wordt bedoeld dat de curve en oppervlak onder de JBDK een realistisch situatie vormt voor de gekozen technische uitgangspunten in de variant. In Figuur 4.1 t/m Figuur 4.7 zijn de aangeleverde JBDK per variant afgebeeld en beschreven.

2.5 temperatuurprofiel oppervlaktewateren

Voor fase 2 is een temperatuurprofiel van het oppervlaktewater gekozen die representatief is voor het type water waarin het aquathermiesysteem actief is. Alle 7 varianten zijn gekoppeld aan een type watergang. Vanuit Deltares is voor elke watergang een temperatuurprofiel aangeleverd die gekoppeld is aan de variant. Deze profielen zijn gebaseerd op de volgende wateren:

- kanaal (stromend): Wilhelminakanaal;
- grote rivier (stromend): Waal;
- sloten: afkomstig uit database Techniplan/IF Technology;
- vaart (stilstaand): Merwedekanaal Utrecht;
- plas (stilstaand): Zegerplas;
- effluent: dit jaarprofiel is niet aangeleverd. Variant 4 is gekoppeld aan watertype sloten.

De temperaturen zijn gebaseerd op modelberekeningen van 1980 tot 2011. De laatste 10 jaar zitten niet in de modelberekeningen. Voor een ontwerpberekening wordt dit door Deltares als representatief geacht, omdat het ontwerp niet van een TEO-systeem niet alleen op warme jaren wordt ontworpen.

3 Fase 1: variantenonderzoek

3.1 Onderzoeksmethode

De kosten van een aquathermiesysteem zijn van verschillende aspecten afhankelijk. Denk daarbij aan de ontwerpkeuzes en financiële uitgangspunten. In de eerste fase van het WarmingUp 3C project is onderzocht welke aspecten/parameters een grote invloed hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. In dit hoofdstuk staat de volgende vraag centraal:

“Welke parameters hebben een grote invloed op de kosten van een aquathermiesysteem uitgedrukt in euro’s per geleverde GJ-warmte?”

IF Technology en Techniplan hebben in de eerste fase van dit onderzoek een vijftal stappen ondernomen om een antwoord te kunnen formuleren op de bovenstaande vraag:

1. Opstellen parameters
Op basis van ervaring hebben IF Technology en Techniplan een combinatie van 17 technische en financiële vergelijkingsparameters opgesteld, waarvan wordt verwacht dat deze een aanzienlijke impact hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. De onderzochte parameters en variabelen zijn weergegeven in Tabel 1 en Figuur 3.1.
2. Opstellen variabelen
Bij elke parameter zijn 2 of 3 onderliggende variabelen opgesteld. Tijdens het opstellen zijn twee uitgangspunten aangehouden. Het eerste uitgangspunt was dat alle variabelen een realistische waarde moesten krijgen. Het tweede uitgangspunt was dat de variabelen een meest gunstige situatie, een minst gunstige situatie en een gemiddelde situatie vertegenwoordigen.
3. Opstellen basisconcept/basisberekening
In de eerste fase van het WarmingUp onderzoek is een basisconcept opgesteld. Dit concept bevat veelvoorkomende variabelen en is daarmee representatief voor een “gemiddeld” aquathermie systeem in Nederland. Het basisconcept functioneert als vergelijkingskader voor de overige varianten. De gekozen variabelen voor het basisconcept staan weergegeven in Tabel 1.

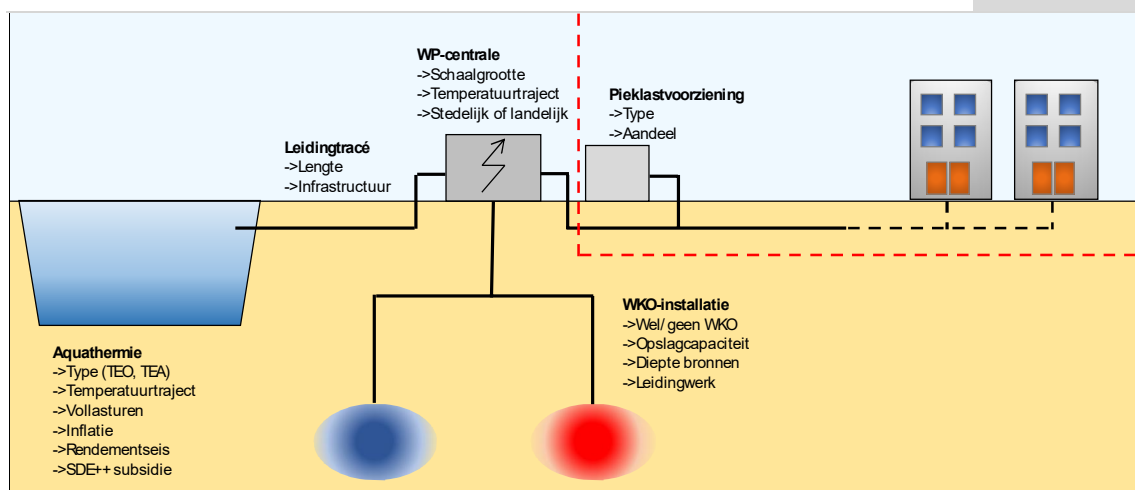
De achterliggende jaarbelastingduurkromme (JBDK) in fase 1 is afkomstig van IF en Techniplan. De 30 varianten maken ook gebruik van deze JBDK. In de tweede fase van dit onderzoek zijn de zeven varianten gekoppeld aan een bijpassende JBDK afkomstig vanuit de begeleidingscommissie.
4. Opstellen varianten
Het basisconcept geldt in dit onderzoek als referentiekader. Door telkens één onderliggende variabele te veranderen zijn er 30 varianten ontstaan ten opzichte van het basisconcept.

5. Opstellen kostenberekening

Als laatste stap is een kostenberekening opgesteld voor het basisconcept en de 30 varianten. De kosten zijn berekend in een Excel model dat gebaseerd is op NEN-norm 2699. De achterliggende berekenmethode en gehanteerde kentallen zijn afkomstig van IF & Techniplan en gecontroleerd door de begeleidingscommissie. Het resultaat van stap vijf is een tornado plot, waarin per variant de kosten per geleverde GJ-warmte naar voren komt.

Tabel 1 Gekozen parameters met onderliggende variabelen. Met de parameters en onderliggende variabelen is een “gemiddeld” aquathermie systeem in Nederland opgesteld (zie kolom “Basisconcept”) en 30 varianten waar telkens één variabele is veranderd.

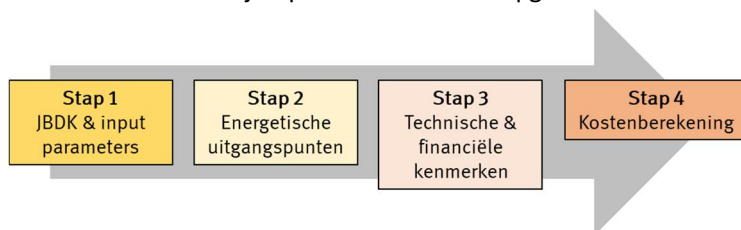
Parameters	Eenheid	Variabel 1	Variabel 2	Variabel 3	Basisconcept
Vermogen afnemer/warmtenet	MW	20	5	1	5
Vollasturen warmteafzet warmtepomp	-	6.000	3.500	2.900	3.500
Vollasturen aquathermiesysteem	-	6.000	5.500	5.000	5.500
Temperatuurtraject aquathermiesysteem	°C	10	5	3	5,0
Elektriciteitsprijs	€/MWh	32	68	170	68
Vermogensaandeel piekvoorziening	%	70	16	10	16
Wel/geen warmte- en koudeopslag	-	met WKO	zonder WKO	-	met WKO
WKO-opslagcapaciteit per doublet	m ³ /uur	250	90	50	90
Diepte WKO-bronnen	m-mv	230	150	80	150
Leidingwerk tussen TEO/TR	m	500	2.000	Gestuurde boring	500
Leidingwerk tussen WKO/TR	m	500	2.000	Gestuurde boring	500
Situatie onttrekking	-	Stedelijk	Landelijk	-	Stedelijk
Indexatie energiekosten	%	4	3	2	3
Financiële rendementseis	%	8	6	4	6
SDE++ subsidie	-	Ja	Nee	-	Nee
Variant met TEA/TEO	-	TEO	TEA	-	TEO
Maximale aanvoertemperatuur	°C	70	40	ZLT	70



Figuur 3.1 | Schematische tekening van de variabelen in het variantenonderzoek.

3.2 Basisberekening

De kostenberekening is opgebouwd uit een aantal opeenvolgende stappen, zoals weergegeven in Figuur 3.2. In dit hoofdstuk worden de verschillende stappen nader toegelicht met het basisconcept als uitgangspunt. De paragraaf fungeert als handleiding voor het rekenmodel. De andere varianten uit fase 1 en fase 2 zijn op dezelfde manier opgebouwd.



Figuur 3.2 | Stappenplan kostenberekening.

3.2.1 Stap 1 (tabblad 1.1-1.2 in Excel-model)

De eerste stap in de kostenberekening is het bepalen van de energetische uitgangspunten uit de input parameters. In het basisconcept is dit gedaan met een middelgrote vermogensvraag van 5,0 MW en een vermogensaandeel van 50% voor de piekvoorziening. In fase 1 is in eerste instantie geen jaarbelastingduurkromme (JBDK) gebruikt, maar vollasturen van de warmteafzet warmtepomp en het aquathermiesysteem zijn bepaald en ingevoerd als vaste waarden in overleg met de begeleidingscommissie. Met behulp van deze gegevens is vervolgens de energievraag berekend. In fase 2 is wel een JBDK gebruikt om de energie en vermogensvragen te berekenen. Meer uitleg over de JBDK is te lezen in paragraaf 4.3.

3.2.2 Stap 2 (tabblad 1.3 in Excel-model)

De energievraag en – verdeling resulteerde voor de basisberekening van fase 1 in een totale warmtevraag van 63 TJ. Met behulp van de vollasturen volgend uit de JBDK is bepaald dat met 50% van het totaal beschikbare vermogen van 5,0 MW het duurzame systeem (WKO + TEO) circa 95% van de warmte kan leveren (59 TJ). De rest van de warmte wordt geleverd door pieklastvoorzieningen in de vorm van E-ketels. Er is gekozen voor E-ketels, omdat dit het meest gangbare duurzame alternatief is voor gas.

3.2.3 Stap 3 (tabblad 1.4 in Excel-model)

Op basis van de energetische uitgangspunten en input parameters (Tabel 1) zijn vervolgens de technische en financiële kenmerken uitgewerkt. Hierin is een onderverdeling gemaakt tussen de verschillende onderdelen van het totale systeem, bestaande uit de warmtepompen in de energiecentrale, het TEO-systeem, het WKO-systeem, het leidingtracé van de WKO en TEO-systemen naar de energiecentrale, en een financieel gedeelte. De kenmerken zijn berekend en vastgesteld met behulp van ervaringsgetallen van IF Technology en Techniplan, gecontroleerd door de begeleidingscommissie. De bronvermelding voor ieder kengetal is weergegeven in het Excel-model. Voor de basisvariant is uitgegaan van een gemiddelde situatie met veel voorkomende kengetallen en toepassing van zowel TEO als WKO. Een overzicht van alle gebruikte kentallen is te vinden in het Excel model.

3.2.4 Stap 4 (tabblad 1.5 in Excel-model)

Met behulp van de technische en financiële kengetallen is ten slotte een kostenberekening gemaakt. De stichtingskosten (CAPEX) en exploitatiekosten (OPEX) worden berekend voor ieder onderdeel van de aquathermie installatie. Door alle kosten over een projectperiode van 30 jaar bij elkaar op te tellen ontstaat er een Total Cost of Ownership (TCO). Houd hierbij rekening dat in fase 1 van dit onderzoek nog geen rekening is gehouden met de tijdsvoorkoor van geld.

Vervolgens kan de kosten per geleverde GJ bepaald worden. Dit is gedaan door het TCO-bedrag (€ 34.180.000) te delen door het totaal geleverde GJ's gedurende een periode van 30 jaar. In de basisvariant levert dit als resultaat een bedrag op van 19 €/GJ. In Tabel 2 is ook de CO₂ uitstoot van de basisvariant weergegeven. De CO₂ uitstoot wordt veroorzaakt door het elektraverbruik van de warmtepomp en distributiepompen in het systeem. Een overzicht van de complete kostenberekening is te vinden in de bijbehorende spreadsheet.

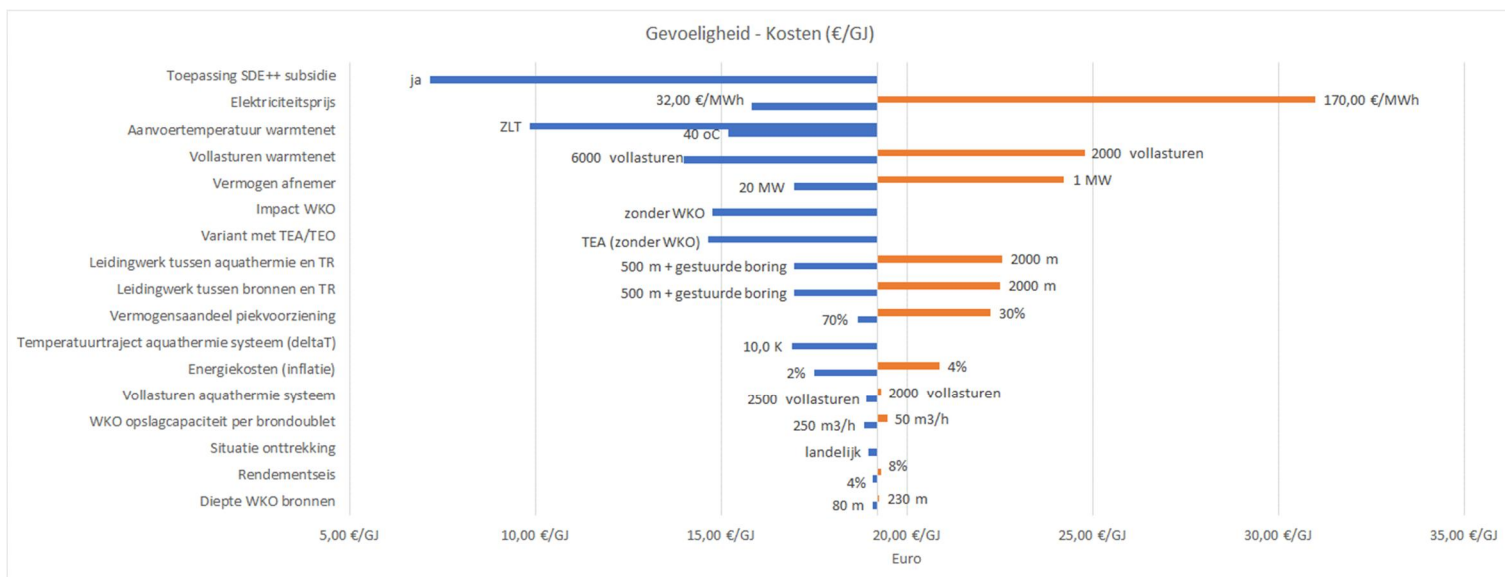
Tabel 2 Resultaten basisberekening fase 1

Projectwaarde	Eenheid	Basisvariant
TCO over 30 jaar	€	34.180.000
Kosten per GJ	€/GJ	19
CO ₂ -emissie	ton CO ₂ per jaar	500

3.3 Resultaten

3.3.1 Gevoeligheidsanalyse

De laatste stap van fase 1 was het vergelijken van de basisvariant met de andere varianten om zo de meest invloedrijke parameters op financieel gebied te bepalen. De varianten kunnen onderling vergeleken worden op basis van de kosten per GJ. Het resultaat is een tornadoplot, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3 | Resultaten gevoeligheidsanalyse in tornadoplot. Legenda: Oranje = hogere waarde t.o.v. basisberekening, blauw = lagere waarde t.o.v. basisberekening.

De meest invloedrijke parameters (bovenin Figuur 3.3) zijn volgens de gevoeligheidsanalyse de toepassing van SDE++ subsidie, elektriciteitsstarieven, aanvoertemperatuur warmtenet, vollasturen

warmtenet, vermogen warmtenet en impact WKO. Deze invloedrijke parameters vormen het uitgangspunt voor het vaststellen van de uit te werken varianten in fase 2.

3.3.2 Beschouwing fase 1

Uit de gesprekken met de begeleidingscommissie over fase 1 zijn een aantal belangrijke beslissingen naar voren gekomen voor fase 2. Zo is besloten om twee parameters buiten beschouwing te laten en drie parameters niet meer te gebruiken als inputwaarde.

Een toelichting bij de gemaakte keuzes:

1. *SDE++ subsidie*

De SDE++ subsidie zorgt voor extra inkomsten bij duurzame energieprojecten. In fase 1 zijn eerst deze inkomsten meegenomen door de operationele kosten te verminderen met de inkomsten vanuit de SDE++ subsidie. Het is ontzettend lastig in te schatten of een duurzaam project een SDE++ subsidie toegekend wat de hoogte van dit bedrag is. Daarnaast is de toepassing van WKO momenteel een voorwaarde voor het verkrijgen van SDE++ subsidie, maar dit gaat mogelijk veranderen in de toekomst. Om de varianten eerlijk te kunnen vergelijken is er daarom voor gekozen om de SDE++ subsidie niet meer mee te nemen.

2. *Vollasturen aquathermiesysteem*

3. *Temperatuurtraject aquathermiesysteem*

4. *Vermogensaandeel piekvoorziening*

De gekozen parameters in fase 1 bestaan uit onafhankelijke en afhankelijke parameters. Afhankelijk houdt hierbij in dat de parameter gevoelig is voor wijziging van andere parameters. Voor de tweede fase van dit onderzoek is besloten om bovenstaande parameters (zie punt 3,4 en 5) niet meer hard in te voeren, maar te berekenen.

De afhankelijke parameter "vollasturen warmteafzet WP" is daarom tijdens fase 2 ingevuld als harde waarde. Vervolgens is de variant gekoppeld aan een JBDK, waardoor berekend kan worden welk energie- en vermogensaandeel de warmtepomp gaat leveren. Wat overblijft wordt vanzelfsprekend geleverd door de piekvoorziening en dit is in fase 2 dus een resultaat van de berekening. Hetzelfde geldt voor het benodigde aantal vollasturen en het temperatuurregime van het aquathermiesysteem.

5. *Jaarbelastingduurkromme*

In fase 1 van dit onderzoek hadden alle varianten dezelfde jaarbelastingduurkromme (JBDK), afkomstig van de adviesbureaus. Om de varianten in fase 2 zo realistisch mogelijk te maken is besloten om elke variant te koppelen aan een passende JBDK. Deze JBDK's zijn aangeleverd door de begeleidingscommissie.

6. *Variant met TEA/TEO*

In fase 2 wordt de benaming van parameter "variant met TEA/TEO" veranderd in "type watergang". Deze verandering zorgt ervoor dat er tussen de varianten onderscheid gemaakt kan worden tussen de types oppervlaktewater waarin het aquathermiesysteem zich bevindt. TEA wordt in hierbij aangeduid als effluent, ofwel gezuiverd afvalwater. TEA op basis van het influent (in de riolering) wordt verder niet meegenomen in de beschouwing

4 Fase 2: gedetailleerde kostenberekening

4.1 Onderzoeksmethode

Zoals in de inleiding omschreven hebben beleidsmakers in Nederland moeite om de kosten van een aquathermiesysteem inzichtelijk te maken. Om de beleidsmakers te helpen zijn er in de tweede fase van het WarmingUp 3C project een zevental voorbeeldberekeningen opgesteld. In dit hoofdstuk staat de volgende vraag centraal:

“Welke technische en financiële uitgangspunten krijgen de zeven geselecteerde varianten en wat is de bijbehorende kosten per geleverde GJ-warmte?”

Om de bovenstaande vraag te beantwoorden zijn een tweetal stappen doorlopen:

1. Opstellen varianten

Uit de eerste fase van dit onderzoek is naar voren gekomen welke parameters een grote en kleine invloed hebben op de kosten van een aquathermiesysteem. Tijdens het opstellen van de verschillende varianten is er alleen gedifferentieerd door het wijzigen van de meest invloedrijke parameters. De 8 meest invloedrijke parameters zijn in Tabel 3 licht oranje gemarkeerd. De niet gemarkeerde parameters (met weinig invloed) behouden in elk variant dezelfde waarde of worden berekend.

De uitgangspunten per variant zijn samen met de warmtebedrijven uit de begeleidingscommissie opgesteld. Belangrijke uitgangspunten tijdens het opstellen waren dat de varianten realistische waarden moesten bevatten en ieder variant een thema vertegenwoordigt. Door verschillende thema's te bedenken zijn een zevental varianten ontstaan die verschillen in grootte, locatie, type watergang en technische/financiële configuraties.

2. Opstellen gedetailleerde kostenberekening

Het opstellen van de gedetailleerde kostenberekeningen is met dezelfde berekenmethode gedaan als in fase 1. Wel is elke variant gekoppeld aan een passende JBKD en is een business case analyse uitgevoerd. De uiteindelijke output van de kostenberekening bestaat uit de volgende parameters:

- Investeringskosten: De kosten voor de aanschaf van een component
- Installatiekosten: De kosten voor het installeren van een component en de voorbereidingen die daarbij horen (manuren, vergunningen, etc.).
- Vaste onderhoudskosten
- Vaste operationele kosten
- Variabele operationele kosten
- Variabele onderhoudskosten, resulterend uit extra gebruik van een bepaalde component.

Investeringskosten en installatiekosten vormen samen de CAPEX. De vaste en variabele onderhoudskosten en operationele kosten vormen samen de OPEX.

Daarnaast zijn in de business case alle kasstromen (kosten en opbrengsten) gedurende de projectlooptijd verdisconteerd. De disconteringsvoet is het rekenpercentage dat gebruikt wordt om

toekomstige kasstromen contant te maken, om de contante waarde te bepalen. Vaak wordt deze waarde in de berekeningen ook aangeduid als rente of rendement. De hoogte van dit percentage is van veel factoren afhankelijk en kan fors verschillen. Een kleine wijziging in het percentage heeft over het algemeen grote financiële gevolgen. De disconteringsvoet waarbij de som van de contante waarden van de toekomstige opbrengsten gelijk is aan de som van de contante waarden van CAPEX en OPEX, heet de Internal Rate of Return (IRR). Dit rendementsbegrip geeft het rendement weer van een verzameling kasstromen verspreid over meerdere jaren. De disconteringsvoet, oftewel de rente waarmee contant wordt gemaakt, wordt vaak bepaald door de minimale rendementseis. Deze rendementseis wordt bepaald door de mate van risico die gelopen wordt. In dit geval is de rendementseis, en dus ook de disconteringsvoet, vastgesteld op 6,0%.

Het resultaat van de berekening is variabele kosten per GJ waarbij de som van de contante waarden van kosten en opbrengsten aan het eind van de projectlooptijd 0 is.

Aan het einde van dit hoofdstuk is inzichtelijk gemaakt welk GJ-tarief gehanteerd moet worden per variant om het gewenste projectrendement van 6,0% te bereiken bij een disconteringsvoet van 6,0%.

4.2 Gekozen varianten

In samenwerking tussen Techniplan, IF Technology, Ennatuurlijk en HVC-groep zijn, op basis van de gevoeligheidsanalyse uit fase 1 van het WarmingUp onderzoek, een zevental varianten opgesteld die in de tweede fase gedetailleerd worden doorgerekend. De zeven varianten met achterliggende variabelen zijn weergegeven in Tabel 3. Elke variant is gekoppeld aan een thema:

- Variant 1: basisvariant
- Variant 2: groot warmtenet basislast
- Variant 3: klein lokaal warmtenet
- Variant 4: thermische energie uit afvalwater (TEA)
- Variant 5: TEO-systeem gekoppeld aan open warmtenet
- Variant 6: TEO-systeem bij een grote rivier in een grote stad
- Variant 7: TEO-systeem aangesloten op een ZLT-net

Tabel 3 De zeven opgestelde varianten (Legenda: licht oranje = invloedrijke parameter uit gevoeligheidsanalyse fase 1).

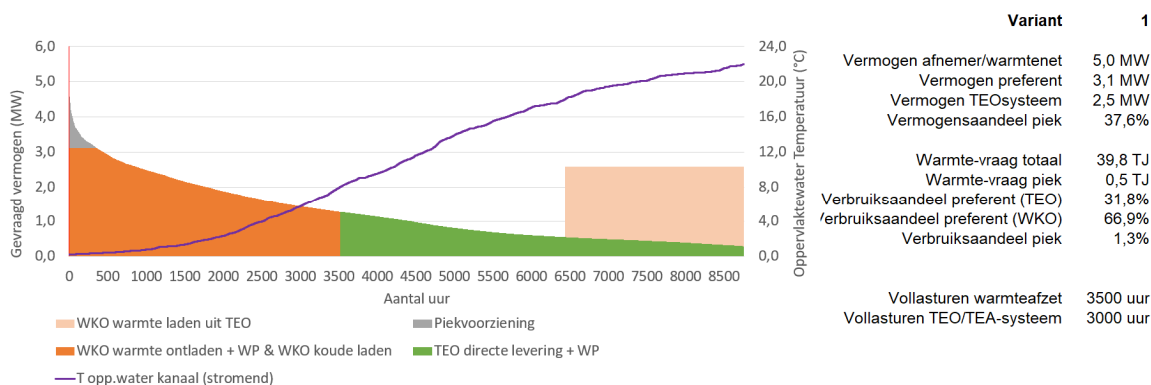
Parameters	1	2	3	4	5	6	7
Vermogen afnemer/warmtenet	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	5 MW	20 MW	2,3 MW
Vollasturen warmteafzet WP	3.500	6.000	2.000	3.500	6.000	3.500	1500
Vollasturen TEO/TEA-systeem	3000	5000	2800	3500	2500	3500	1300
Delta T van TEO-systeem	5,0 K	5,0 K	5,0 K	5,0 K	5,0 K	5,0 K	5,0 K
Vermogensaandeel piek	38%	71%	0%	38%	72%	29%	0%
Wel/geen warmte- en koudeopslag	Met WKO	Met WKO	Met WKO	Zonder WKO	Met WKO	Zonder WKO	Met WKO
WKO-opslagcapaciteit (per doublet)	90 m ³ /uur	200 m ³ /uur	90 m ³ /uur	-	90 m ³ /uur	-	90 m ³ /uur
Diepte WKO-bronnen	150 m	150 m	150 m	-	150 m	-	150 m
Leidingwerk tussen TEO/TR	500 m	GSB	250 m	1000 m	500 m	GSB	500 m
Leidingwerk tussen WKO/TR	500 m	GSB	250 m	-	500 m	GSB	500 m
Situatie onttrekking	Licht stedelijk	Landelijk	Licht stedelijk	Stedelijk	Landelijk	Stedelijk	Landelijk
Type watergang	Kanaal (stromend)	Grote rivier (stromend)	Sloten (stilstaand)	Effluent (stromend)	Vaart (stilstaand)	Grote rivier (stromend)	Plas (stilstaand)
Indexatie energiekosten	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Financiële rendementseis	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Maximale aanvoertemperatuur	70 °C	45 °C	70 °C	70 °C	70 °C	45 °C	ZLT

4.3 Omschrijving varianten

Belangrijk uitgangspunt bij het uitwerken van fase 2 was dat alle varianten realistisch zijn en toegepast kunnen worden in de praktijk. Uit de eerste fase van het WarmingUp onderzoek kwam naar voren dat enkele parameters veel invloed hebben op de kosten van een aquathermiesysteem en enkele weinig invloed. Voor de tweede fase van het WarmingUp onderzoek is besloten om de varianten voornamelijk te laten variëren op basis van de invloedrijke parameters. In Tabel 3 zijn alle parameters die veel invloed hebben op de kosten per geleverde GJ licht oranje gemarkeerd. In de onderstaande paragrafen wordt toegelicht voor welke combinatie variabelen is gekozen, en waarom de varianten interessant zijn om door te rekenen.

4.3.1 Variant 1

In de eerste fase van het WarmingUp onderzoek is een basisvariant opgesteld. Deze variant bevat veelvoorkomende parameters en is daarmee representatief voor een “gemiddeld” aquathermie systeem in Nederland. Net als in de eerste fase van het WarmingUp onderzoek zal de basisvariant functioneren als vergelijkingskader voor de andere varianten. De bijbehorende JBDK is weergegeven in Figuur 4.1. Onder de figuur is een toelichting van de JBDK gegeven.



Figuur 4.1 | Jaarbelasting durkromme variant 1.

De modus van het aquathermiesysteem kan gedurende het jaar ingedeeld worden in een aantal verschillende fases. Aan de hand van de JBDK, wat een gesorteerde geproduceerde vermogensvraag is, is hieronder beschreven welke fases dit zijn. De JBDK bestaat uit het grijze (piekvoorziening), oranje (WKO + WP) en groene (TEO + WP) vlak.

1. Piekvoorziening (grijs): Dit is de bovenste punt van de JBDK. Het doel van de piekvoorziening is een optimalisatie van het energieconcept en verlaging van de kosten. In overleg met de begeleidingscommissie is afgesproken om de piekvoorziening buiten de berekening van de kosten voor aquathermie te laten. Met als reden dat de kostenberekening zo zuiver mogelijk is. De piekvoorziening hoeft bij (open) warmtenetten niet per se onderdeel te zijn specifiek van het aquathermiesysteem. De piekvoorziening kan op verschillende manieren ingevuld worden, zoals elektrische ketel, biogas, gasketel, biomassa. In de SDE-systematiek valt de piekvoorziening ook buiten de demarcatie van het aquathermiesysteem.
2. WKO + WP/ ontladen (oranje): Gedurende de koudste periode van het jaar wordt de warmte geleverd vanuit het WKO-systeem en opgewekt met een warmtepomp (oftewel preferente opwekker) tot het bruikbare temperatuurniveau. In het algemeen valt deze fase samen met het hoogst geproduceerde vermogen (linkeras van de JBDK). Dit komt omdat in de winter het oppervlaktewater, uitzonderingen daargelaten, te koud is voor een efficiënt werkend systeem. De hoogte van de vermogensvraag (3,1 MW) is in dit geval bepaald op basis van de

gewenste vollasturen van het duurzame systeem (= 3.500 uur). Het aantal vollasturen correspondeert met het aantal vollasturen uit de SDE++ voor de variant "Aquathermie – Thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), geen basislast". De SDE++ is een dusdanig belangrijk opbrengst dat het voordelig is om een aquathermiesysteem hierop te dimensioneren. Dit correspondeert met ca. 3,1 MW voor het vermogen van de warmtepomp (preferent vermogen). De lengte van de periode hangt af van het moment dat de temperatuur van het oppervlaktewater hoog genoeg is om de warmte direct te kunnen leveren vanuit het oppervlaktewater. In deze specifieke variant is dit vanaf een watertemperatuur van 8 °C. De watertemperatuur is weergegeven met de paarse lijn en de rechter verticale as. Deze temperatuur is mogelijk vanwege de aanwezigheid van een groot kanaal met stroming, waarvoor in het kader vergunningverlening koudelozingen geen specifieke vergunningseisen qua lozingstemperatuur gesteld worden.

3. TEO + WP (groen): Vanaf een oppervlaktewatertemperatuur van 8 °C treedt het TEO-systeem in werking en gaat direct warmte leveren aan de warmtepomp. De warmtepomp wekt de warmte op tot een bruikbaar temperatuurniveau. Deze fase wordt weergegeven door middel van het groene vlak.
4. WKO laden (beige): Dit is geen onderdeel van de JBDK, wel een onderdeel van de modus van het aquathermiesysteem. De fase van WKO-laden start op het moment dat het oppervlaktewater warm genoeg is om de warme bron van de WKO te kunnen laden. Dit is aangenomen vanaf een temperatuur van 15 °C. Deze temperatuur moet altijd hoger zijn (minimaal 1 °C) dan de temperatuur van de warme bron op dat moment. De oppervlakte van het beige vlak is ongeveer gelijk aan 2/3 van de oppervlakte van het oranje deel. Het oranje deel bestaat namelijk uit ca. 2/3 warmte uit WKO en 1/3 deel warmte uit elektriciteit op basis van een SCOP van 3. Vanuit juridisch oogpunt moet de WKO in balans zijn. Oftewel warmte laden en ontladen zijn gelijk aan elkaar.
5. Temperatuur oppervlaktewater (paars): Alle 7 de varianten zijn gekoppeld aan een type watergang. Vanuit Deltares is voor elke watergang een temperatuurprofiel aangeleverd die gekoppeld is aan de variant. Deze profielen zijn gebaseerd op de volgende wateren:
 - kanaal (stromend): Wilhelminakanaal;
 - grote rivier (stromend): Waal;
 - sloten: Afkomstig uit database Techniplan/IF Technology;
 - vaart (stilstaand): Merwedekanaal Utrecht;
 - plas (stilstaand): Zegerplas;
 - effluent: dit jaarprofiel is niet aangeleverd. Variant 4 is gekoppeld aan watertype sloten.

Aan de rechterkant van de afbeelding zijn de uitgangspunten weergegeven waarop de jaarbelastingduurkromme is gebaseerd. Hierbij een korte toelichting hoe de gegevens uit de afbeelding herleid kunnen worden:

- Vermogen warmtenet: de piekvoorziening en warmtepompen samen leveren op het koudste moment van het jaar 5 MW. Dit is het geval tussen uur nul en één.
- Vermogen preferent: met preferentie wordt het geleverde vermogen vanuit de warmtepompen bedoeld. Op het koudste moment in het jaar (tussen uur nul en één) leveren de warmtepompen 3,1 MW, zie hoogste punt van het oranje vlak.
- Vermogen TEO-systeem: het TEO-systeem levert midden in de zomer het meeste vermogen. Op dit moment wordt er namelijk direct warmte geleverd aan de warmtepompen en aan het WKO-systeem. Het TEO-vermogen is in de afbeeldingen te herleiden uit het beige vlak.
- Variant 4 & 6 bevatten geen WKO-systeem dat geladen moet worden en hebben dus geen beige vlak. In deze varianten wordt het maximale vermogen geleverd tussen uur nul en één.

Houd er rekening mee dat het vermogen van het TEO-systeem is berekend zonder tussenkomst van een warmtepomp. Dit verklaart waarom het geleverde preferent vermogen hoger ligt dan het geleverde vermogen van het TEO-systeem.

- Vermogensaandeel piek: het grijze vlak vertegenwoordigt de inbreng van de piekvoorziening. Tussen uur nul en één levert het pieksysteem maximaal vermogen.
- Warmtevraag totaal: het oppervlak van de totale JBDK vormt de totale energievraag.
- Warmtevraag piek: het oppervlak van het grijze vlak.
- Verbruikersaandeel TEO: het groene oppervlak.
- Verbruikersaandeel WKO: het oranje oppervlak.
- Verbruikersaandeel piek: het grijze oppervlak.
- Vollastructuren warmteafzet: Warmtelevering preferent / vermogen preferent.
- Vollastructuren TEO/TEA-systeem: warmtelevering preferent * $((COP - 1) / COP)$ / vermogen TEO-systeem.

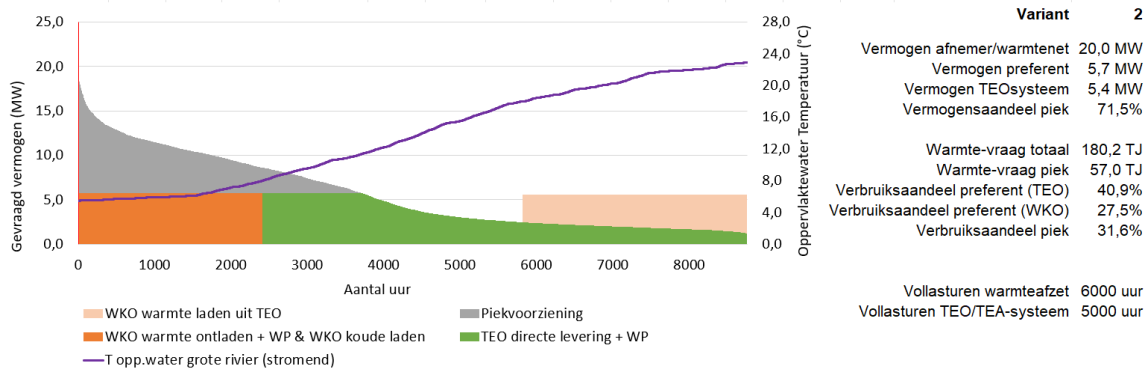
In de overige varianten is de JBDK op dezelfde manier opgebouwd.

4.3.2 Variant 2 & 3

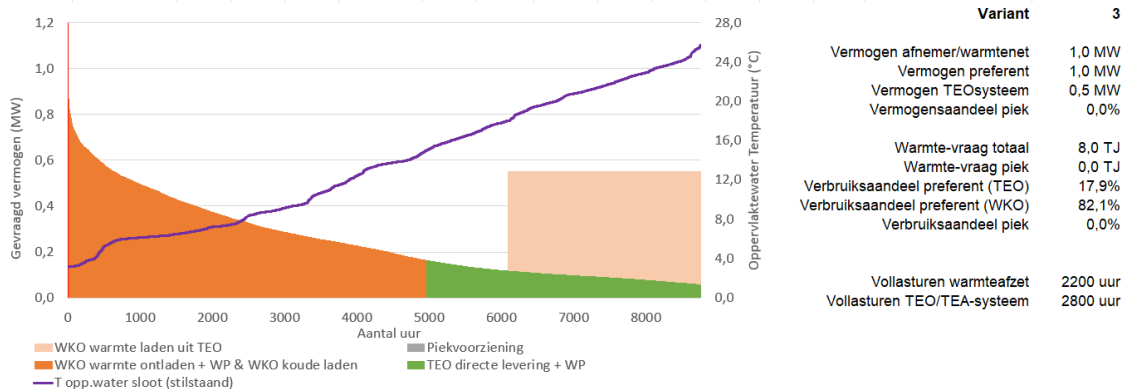
Het eindresultaat van de eerste fase was een gevoeligheidsanalyse in de vorm van een tornadoplot. Dit maakte inzichtelijk welke parameters een grote invloed hebben op de kosten en welke parameters weinig impact hebben. De resultaten van fase 1 zijn gebruikt om variant 2 en 3 te bepalen. Deze varianten behandelen namelijk wat een TEO-systeem kost in het meest ideale geval, en wat het kost in een minder ideale situatie. De kostenberekening van deze twee varianten creëert een bandbreedte, waarmee inzichtelijk wordt gemaakt wat een (relatief) duur en goedkoop TEO-systeem kost. De kosten zijn in dit geval in euro's per geleverde GJ.

Variant 2 vertegenwoordigt een gunstige variant, waarin de prijs per GJ laag is. Dit kan bereikt worden door gebruik te maken van schaalvoordelen en de warmtepomp zo veel mogelijk vollastructuren te laten draaien. Daarom is in variant 2 gekozen voor een afnemer met een vermogen van 20 MW. Het TEO-systeem en WKO-systeem leveren energie aan de warmtepompcentrale die de basislast van het warmtenet levert. In deze variant wordt ervan uitgegaan dat de warmtepomp 6.000 vollastructuren draait, wat resulteert in lage kosten per geleverde GJ. Een voorbeeld van een dergelijk systeem kan een groot collectief warmtenet zijn waarop verschillende warmtebronnen invoeden. Op deze manier is de warmtevraag dusdanig groot, dat de warmtepomp grotendeels in de basislast warmte kan leveren aan het warmtenet. Het laatste uitgangspunt is dat de kosten voor het benodigde leidingwerk laag blijven. De aanvoertemperatuur van het warmtenet is 45 °C, waardoor de warmtepompen een hoog rendement (COP) halen. Belangrijk aandachtspunt bij 45 °C is dat dit temperatuur alleen geschikt is voor ruimteverwarming. Voor warm tapwater bereiding is een extra opwaardering nodig.

Variant 3 zoomt juist in op een ongunstige variant, waarin de prijs per GJ hoog is. Daarvoor wordt uitgegaan van een klein lokaal warmtenet met weinig schaalvoordelen. In deze variant zijn de TEO- en WKO-systemen gekoppeld aan een relatief klein warmtenet van 1 MW en draait de warmtepomp slechts 2.000 vollastructuren. Hoe lager het aantal vollastructuren, hoe hoger de investeringen in bijv. de warmtepomp zijn relatief gezien. Dit komt doordat het aantal vollastructuren wordt berekend door de energie te delen door het vermogen. Dus in andere woorden hoe lager het aantal vollastructuren, hoe groter het vermogen (hogere kosten) is t.o.v. de afgezette energie aan het warmtenet (lagere opbrengsten). De aanvoertemperatuur van het net ligt op 70 °C, waardoor veel warmteverliezen plaatsvinden en het rendement van de warmtepompen laag zijn. De bijbehorende JBDK's zijn weergegeven in Figuur 4.2 en Figuur 4.3.



Figuur 4.2 | Jaarbelasting duirkromme variant 2.

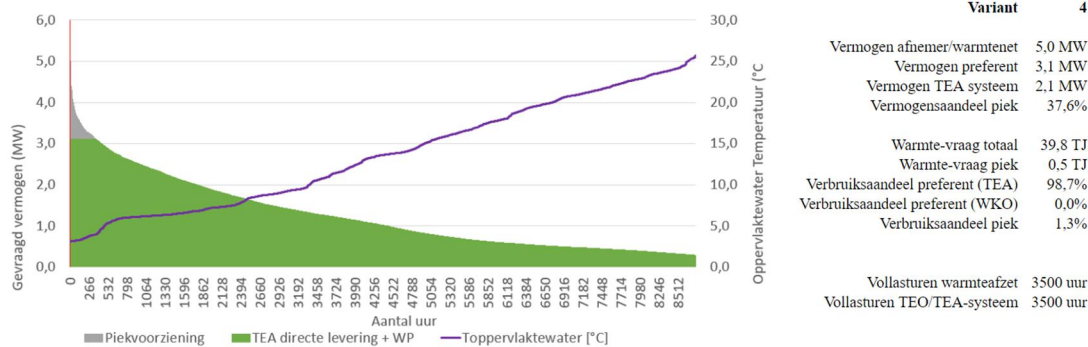


Figuur 4.3 | Jaarbelasting duirkromme variant 3.

4.3.3 Variant 4

Variant 4 onderscheidt zich van de andere varianten door gebruik te maken thermische energie uit afvalwater (TEA). Om de kosten van een TEA-systeem goed te kunnen vergelijken met de kosten van een TEO-systeem, zijn de meeste parameters uit de basisvariant overgenomen, met uitzondering van de parameters "impact WKO" en "leidingwerk tussen TEA/TR". Het TEA-systeem levert gedurende het hele jaar warmte aan de warmtepompcentrale, waardoor een WKO-systeem niet nodig is. Vergeleken met de basisvariant zal het benodigde leidingwerk toenemen. De achterliggende gedachte hierachter is dat grote effluentleidingen met een hoge potentie vaak aan de rand liggen van woonwijken. Hierdoor moet leidingtracé over grote afstanden aangelegd worden.

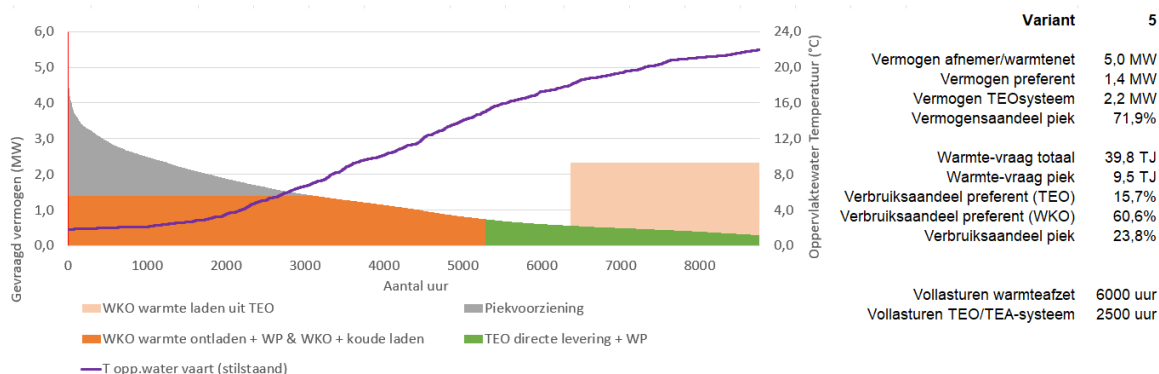
Voor de rest gelden dezelfde uitgangspunten als in de basisvariant. Zo is het duurzame systeem aangesloten op een warmtenet van 5 MW en draait de warmtepomp 3.500 vollasturen. Ook in dit concept is de aanvoertemperatuur in het net 70 °C. De bijbehorende JBK is weergegeven in Figuur 4.4. Disclaimer: het achterliggende temperatuurprofiel van het effluent systeem is gebaseerd op temperatuurprofiel van een sloot, zie overeenkomst met variant 3.



Figuur 4.4 | Jaarbelasting duurkromme variant 4.

4.3.4 Variant 5

Om een zo'n representatief mogelijk beeld te verkrijgen van de mogelijke configuraties met aquathermie is het belangrijk om varianten door te rekenen die direct toegepast kunnen worden in de praktijk. Daarom zijn de varianten 5 tot en met 7 opgesteld specifiek voor potentiële locaties van TEO-projecten in Nederland. Variant 5 vertegenwoordigt een TEO-project waarbij het duurzame systeem levert aan een open warmtenet. Een open warmtenet wordt hierbij gedefinieerd als een net waarop meerdere energiebronnen zijn aangesloten. Het TEO-systeem is gelegen aan een klein waterlichaam, zoals een plas, meer of kanaal. Aangezien het oppervlaktewater gedurende de wintermaanden sterk afkoelt, is een combinatie met WKO nodig. De warmtepomp levert de basislast en streeft naar 6.000 vollasturen op jaarbasis. Het warmtenet, waar het duurzame systeem op aangesloten zit, heeft een aanvoertemperatuur van 70 °C en heeft een vermogensvraag van max 5 MW. Dit zijn omgerekend circa 2.500 woningen. De bijbehorende JBDK is weergegeven in Figuur 4.5.

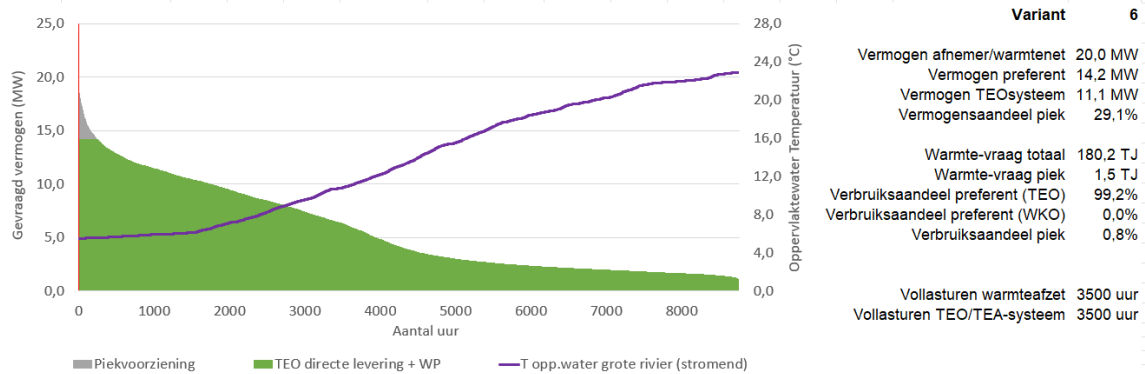


Figuur 4.5 | Jaarbelasting duurkromme variant 5.

4.3.5 Variant 6

In variant 6 wordt gekeken naar een TEO-project aan een grote rivier in een grote stad. Het TEO-systeem wordt gerealiseerd in een rivier, waaruit jaarrond warmte kan worden onttrokken. Het TEO-systeem is aangesloten op een 20 MW warmtenet. Mogelijke locaties zijn bijvoorbeeld Rotterdam (rivier: Nieuwe Maas), Amsterdam (rivier: IJ) en Utrecht (kanaal: Amsterdam-Rijnkanaal). Doordat het TEO-systeem gedurende het hele jaar levert, is een WKO niet nodig. De warmtepomp levert in deze variant de basislast met als streven 3.500 vollasturen op jaarbasis. Ander uitgangspunt in deze variant is dat de aanvoertemperatuur van het warmtenet 45 °C is (vergelijkbaar met variant 2). De leidingkosten zijn per meter hoog, aangezien het project zich midden in een grote stad bevindt. Het aantal vollasturen van het TEO-systeem ligt in variant 6 hoger dan bij de andere varianten. Dit met als reden dat het TEO-systeem jaarrond energie levert aan de warmtepomp.

Waarom is het interessant om deze variant door te rekenen: Zowel in oost als in west Nederland zijn veel steden gelegen aan een grote rivier. Dat maakt deze variant in heel Nederland toepasbaar. De bijbehorende JBDK is weergegeven in Figuur 4.6.

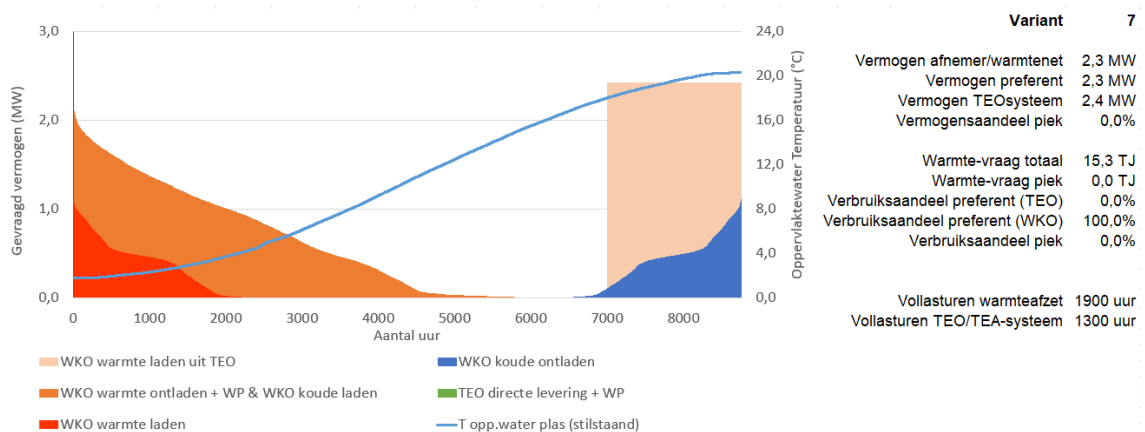


Figuur 4.6 | Jaarbelasting durkromme variant 6.

4.3.6 Variant 7

De laatste variant heeft betrekking op een zeer lage temperatuur (ZLT) net, waarmee de afnemers van warmte en koude worden voorzien. Als voorbeeld wordt gewerkt met een nieuwbouwwijk waar voornamelijk vrijstaande woningen en rijtjeswoningen worden gerealiseerd. De woningen worden gedurende de zomermaanden direct van koude voorzien uit het TEO-systeem. In de wintermaanden levert het WKO-systeem de benodigde warmte. De bijbehorende JBDK is weergegeven in Figuur 4.7.

De demarcatie van het systeem is vergelijkbaar met de overige zes varianten. Het gaat om warmtelevering aan een warmtenet en alle systemen die daaraan bijdragen. Het verschil met de andere zes varianten zit hem in die systemen, omdat het warmtenet in dit geval een ZLT-net is, ligt er binnen de demarcatie geen warmtepomp. Het kental dat voortkomt uit deze analyse is dus een kental voor het aquathermiesysteem t/m invoeding op een warmtenet. Dat geldt voor alle varianten. Voor een integrale analyse kan dit kental gebruikt worden samen met een kental voor kosten van het warmtenet en een kental voor kosten van woningaanpassingen. In dit specifieke geval van variant 7 betekent dat er meer kosten bij de woningaanpassing liggen, omdat daar een individuele warmtepomp geplaatst moet worden voor opwekking van de warmte. De gebruiker van de kentallen moet hiervan bewust zijn.



Figuur 4.7 | Jaarbelasting durkromme variant 7.

De modus van een ZLT-aquathermiesysteem kan vergelijkbaar met de basisvariant gedurende het jaar ingedeeld worden in een aantal verschillende fases. Aan de hand van de JBDK, wat een gesorteerde geproduceerde vermogensvraag is, is hieronder beschreven welke fases dit zijn. De JBDK bestaat uit het blauwe (WKO laden/koude), beige (WKO laden/TEO), oranje (WKO + WP /ontladen) en groene (TEO + WP) vlak.

1. WKO laden/koude (blauw): Dit is het rechter gedeelte van de JBDK en vertegenwoordigt de koude levering aan het warmtenet. De koudevraag wordt met de WKO (koude bron) geleverd. Het koude water absorbeert warmte bij de afnemers en stroomt vervolgens opgewarmd terug naar de warme WKO-bron. Met andere woorden: de warme bron wordt geladen in deze periode.
2. WKO + WP/ ontladen (oranje): Gedurende de koudste periode van het jaar wordt de warmte geleverd vanuit het WKO-systeem. In het algemeen valt deze fase samen met het hoogst geproduceerde vermogen (linkerkant van de JBDK). Dit komt omdat in de winter het oppervlaktewater, uitzonderingen daargelaten, te koud is voor een efficiënt werkend systeem. De hoogte van de vermogensvraag is in dit geval gelijk aan het piekvermogen van het warmtenet. Dit correspondeert met ca. 2,3 MW. De lengte van de periode hangt af van het moment dat de temperatuur van het oppervlaktewater hoog genoeg is om de warmte te kunnen leveren vanuit het oppervlaktewater. In deze specifieke variant is dit vanaf een watertemperatuur van 15 °C. De watertemperatuur is weergegeven met de paarse lijn en de rechter verticale as.
3. TEO + WP (groen): Vanaf een oppervlaktewatertemperatuur van 15 °C treedt het TEO-systeem in werking en gaat direct warmte leveren aan de warmtepomp. De warmtepomp wekt de warmte op tot een bruikbaar temperatuurniveau. Deze fase wordt weergegeven door middel van het groene vlak.
4. WKO laden (beige): Dit is geen onderdeel van de JBDK, wel een onderdeel van de modus van het aquathermiesysteem. De fase van WKO-laden start op het moment dat het oppervlaktewater warm genoeg is om de warme bron van de WKO te kunnen laden. Dit is aangenomen vanaf een temperatuur van 15 °C. Deze temperatuur moet altijd hoger zijn (minimaal 1 °C) dan de temperatuur van de warme bron op dat moment.

4.4 Resultaten

In Tabel 4 en Tabel 5 zijn de belangrijkste resultaten uit fase 2 samengevat weergegeven voor alle 7 varianten. De volledige achterliggende gegevens en berekeningen zijn te vinden in de bijbehorende spreadsheet. In paragraaf 4.5 zijn de resultaten op hoofdlijnen geïnterpreteerd in een korte beschouwing.

Tabel 4 Resultaten fase 2 – totaal.

	1 (basis)	2	3	4	5	6	7
CAPEX [€]	€ 6.400.000	€ 12.200.000	€ 2.400.000	€ 5.400.000	€ 4.200.000	€ 20.600.000	€ 2.500.000
Investeringskosten [€]	€ 4.600.000	€ 8.600.000	€ 1.700.000	€ 3.900.000	€ 3.000.000	€ 14.500.000	€ 1.800.000
Installatiekosten [€]	€ 1.900.000	€ 3.600.000	€ 700.000	€ 1.600.000	€ 1.300.000	€ 6.100.000	€ 700.000
Herinvesteringskosten na 15 jaar [€]	€ 2.112.000	€ 4.058.000	€ 768.000	€ 1.996.000	€ 1.134.000	€ 8.924.000	€ 250.000
OPEX [€/jr.]	€ 1.200.000	€ 2.700.000	€ 300.000	€ 1.100.000	€ 900.000	€ 3.600.000	€ 200.000
Vaste operationele kosten [€/jr.]	€ 160.000	€ 340.000	€ 50.000	€ 140.000	€ 150.000	€ 460.000	€ 60.000
Vaste onderhoudskosten [€/jr.]	€ 160.000	€ 310.000	€ 60.000	€ 130.000	€ 110.000	€ 540.000	€ 60.000
Variabele operationele kosten [€/jr.]	€ 880.000	€ 2.050.000	€ 180.000	€ 800.000	€ 690.000	€ 2.660.000	€ 80.000
TCO 30 jaar - BuCa [€]	€ 44.512.000	€ 97.258.000	€ 12.168.000	€ 40.396.000	€ 32.334.000	€ 137.524.000	€ 8.750.000
CO ₂ -emissie [kg/jr.]	400.000	900.000	100.000	300.000	300.000	900.000	30.000

Tabel 5 Resultaten fase 2 – verhoudingsgewijs.

	1 (basis)	2	3	4	5	6	7
CAPEX [€/MW]	€ 1.300.000	€ 600.000	€ 2.400.000	€ 1.100.000	€ 900.000	€ 1.000.000	€ 1.100.000
Investeringskosten [€/MW]	€ 920.000	€ 430.000	€ 1.700.000	€ 780.000	€ 600.000	€ 730.000	€ 790.000
Installatiekosten [€/MW]	€ 380.000	€ 180.000	€ 700.000	€ 320.000	€ 260.000	€ 310.000	€ 310.000
OPEX [€/GJ]	30,1 €/GJ	15,0 €/GJ	37,7 €/GJ	27,6 €/GJ	22,6 €/GJ	20,0 €/GJ	13,0 €/GJ
Vaste operationele kosten [% van CAPEX]	2,5%	2,8%	2,1%	2,5%	3,5%	2,2%	2,4%
Vaste onderhoudskosten [% van CAPEX]	2,5%	2,5%	2,5%	2,4%	2,6%	2,6%	2,4%
Variabele operationele kosten [€/GJ]	22,1 €/GJ	11,4 €/GJ	22,6 €/GJ	20,1 €/GJ	17,3 €/GJ	14,8 €/GJ	5,2 €/GJ
Kostprijs warmte per elektriciteitsprijs scenario [€/GJ]							
Scenario 1	23,4 €/GJ	15,2 €/GJ	37,2 €/GJ	22,8 €/GJ	20,9 €/GJ	18,1 €/GJ	16,3 €/GJ
Scenario 2	26,6 €/GJ	17,7 €/GJ	40,5 €/GJ	25,4 €/GJ	24,1 €/GJ	19,8 €/GJ	17,0 €/GJ
Scenario 3	27,7 €/GJ	18,5 €/GJ	41,5 €/GJ	26,2 €/GJ	25,2 €/GJ	20,4 €/GJ	17,3 €/GJ
Kostprijs warmte + koude per elektriciteitsprijs scenario [€/GJ]							
Scenario 1							11,5 €/GJ
Scenario 2							12,0 €/GJ
Scenario 3							12,1 €/GJ
CO ₂ -emissie TEO+WKO [kg/GJ]	8,9 kg /GJ	6,8 kg /GJ	8,9 kg /GJ	7,2 kg /GJ	8,9 kg /GJ	4,8 kg /GJ	1,9 kg /GJ

4.5 Beschouwing op resultaten

Het doel van dit onderzoek was om een gedetailleerde kostenberekening van aquathermiesystemen te maken die beleidsmakers helpt in de keuze en toepassing van aquathermie. De resultaten zijn een gevolg van de belangrijkste randvoorwaarden en uitgangspunten beschreven in dit rapport en de overige uitgangspunten die te vinden zijn in de bijbehorende spreadsheet. In deze paragraaf zijn de belangrijkste verschillen tussen varianten en andere opvallende resultaten aanvullend beschouwd. Zoals in paragraaf 4.3.1 omschreven bevat de basisvariant veelvoorkomende parameters, waarmee het representatief is voor een “gemiddeld” aquathermiesysteem. In deze beschouwing dient de basisvariant dan ook als vergelijkingskader voor de overige varianten.

Variante 2: Deze variant stelt een groot systeem op een groot open warmtenet bij een grote rivier voor. Met een kostprijs van €15,2 per GJ (bij elektriciteitsprijs scenario 1) heeft variante 2 de laagste kostprijs. De lage kostprijs is grofweg door drie factoren te verklaren. Allereerst de schaalgrootte. Grote systemen profiteren van economy of scale, waarmee de investeringskosten per MW laag blijven. De tweede reden is het relatief hoge aantal vollasturen van de warmtepompcentrale. Een hoog aantal WP-vollasturen houdt in dat het opgestelde warmtepompvermogen relatief laag blijft en er goedkopere piekvoorzieningen worden ingezet om het resterende vermogen te leveren. Simpel gezegd wordt er heel constant warmte geleverd, wat voordelig is voor de kosten. De derde reden voor de lage kostprijs is de aanvoertemperatuur van 45 °C. In variante 2 worden lage temperatuur warmtepompen neergezet die in vergelijking met de basisvariant (70 °C) lagere investeringskosten hebben. Daarnaast draait de warmtepompcentrale met een hogere SCOP dan in de basisvariant het geval is. Dit resulteert in een lager elektriciteitsverbruik. Hierdoor zijn er lagere elektriciteitskosten en minder CO₂-uitstoot per geproduceerde GJ.

N.B. Doordat in deze variante de opwekinstallatie tot 45 °C gaat, is er in sommige gevallen nog naverwarming nodig voor ruimteverwarming en/of warm tapwater. Houd hierbij rekening dat eventuele opwekinstallaties achter de demarcatie (bijv. in de woningen) ook nog voor een extra investering zorgen, elektriciteit verbruiken en CO₂-uitstoot veroorzaken.

Variante 3: Deze variante symboliseert een klein lokaal MT-warmtenet, waarbij de warmtepomp slechts 2.000 vollasturen draait. Uit de financiële analyse blijkt dat zowel de investeringskosten als de operationele kosten relatief hoog liggen. Voor de hoge investeringskosten zijn grofweg twee redenen. Zo kan een klein warmtenet minder gebruik maken van schaalvoordelen, wat relatief hoge prijzen per MW oplevert. Daarnaast wordt in variante 3 alle warmte geleverd met warmtepompen op 70 °C en geen gebruik gemaakt van relatief goedkopere piekvoorzieningen (bijv. een gasketel). Warmtepompen hebben ten opzichte van piekvoorzieningen zoals gas- en elektrische ketels een hogere aanschafprijs (€/kW), wat de kostprijs per MW doet verhogen. De hogere operationele kosten worden voornamelijk veroorzaakt door de kleine schaal van het systeem. De onderhoudskosten van een klein systeem zijn namelijk naar verhouding duurder dan het onderhoud van een groot systeem.

N.B. In dit systeem wordt warmte met een temperatuur van 70 °C geproduceerd. Dit zorgt er voor dat er geen naverwarming nodig is. Hierdoor is er geen aanvullend elektriciteitsverbruik nodig en de daarmee gepaard gaande extra kosten voor installaties en elektriciteitsverbruik en CO₂-uitstoot.

Variante 4: In variante 4 wordt de warmtepompcentrale direct aangesloten op een TEA-systeem, waar jaarrond direct warmte uit geleverd kan worden, omdat de temperatuur in de winter hoger is dan oppervlaktewater. Hierdoor is geen WKO-systeem benodigd. Dit verklaart de lagere kostprijs per

MW in vergelijking met de basisvariant. De operationele kosten van de basisvariant en variant 4 zijn grotendeels gelijk. Variant 4 heeft iets minder kosten, omdat er geen onderhoudskosten zijn voor het WKO-systeem. Al met al maakt het dat deze variant een iets lagere kostprijs heeft dan de basisvariant.

N.B. In dit systeem wordt warmte met een temperatuur van 70 °C geproduceerd. Dit zorgt er voor dat er geen naverwarming nodig is. Hierdoor is er geen aanvullend elektriciteitsverbruik nodig en de daarmee gepaard gaande extra kosten voor installaties en elektriciteitsverbruik en CO₂-uitstoot.

Variante 5: Deze variant vertegenwoordigt een TEO-systeem waarbij het duurzame systeem levert aan een open warmtenet. Op het aantal vollasturen (6.000) van de warmtepompcentrale na heeft variant 5 dezelfde variabelen als de basisvariant. De lagere kostprijs per MW wordt dan ook logischerwijs veroorzaakt door het aantal vollasturen. Dit kan als volgt worden verklaard: in variant 5 is minder warmtepompvermogen nodig dan in de basisvariant, aangezien het aantal vollasturen hoger ligt bij een gelijke vermogens- en energievraag. Minder vermogen opstellen betekent lagere investeringskosten en operationele kosten. De CO₂-uitstoot is vergelijkbaar met de basisvariant.

N.B. In dit systeem wordt warmte met een temperatuur van 70 °C geproduceerd. Dit zorgt er voor dat er geen naverwarming nodig is. Hierdoor is er geen aanvullend elektriciteitsverbruik nodig en de daarmee gepaard gaande extra kosten voor installaties en elektriciteitsverbruik en CO₂-uitstoot.

Variante 6: In variant 6 wordt gekeken naar een TEO-systeem aan een grote rivier in een duurzame grote stad (LT-warmtenet). De warmtepompcentrale voorziet een warmtenet van 20 MW, waarmee grote schaalvoordelen behaald worden. Doordat het een grote rivier betreft is de aanname dat het TEO-systeem jaarrond direct warmte levert aan de WP-centrale. Een WKO-systeem is dan ook niet nodig in deze variant. De bovenstaande variabelen in combinatie met het uitgangspunt dat er 45 °C geleverd kan worden, resulteert in een lage kostprijs per MW. Ook de operationele kosten per GJ zijn relatief laag door de grootte van het systeem en de productie van lage temperatuur warmte (45 °C). Door deze relatief lage aanvoertemperatuur is de CO₂-uitstoot significant lager dan in de basisvariant.

N.B. Doordat in deze variant de opwekinstallatie tot 45 °C gaat, is er in sommige gevallen nog naverwarming nodig voor ruimteverwarming en/of warm tapwater. Houd hierbij rekening dat eventuele opwekinstallaties achter de demarcatie (bijv. in de woningen) ook nog elektriciteit verbruiken en CO₂-uitstoot veroorzaken.

Variante 7: Deze variant gaat uit van een ZLT-net, waarbij er warmte en koude op brontemperatuur wordt geleverd aan de afnemers. Variant 7 is wezenlijk anders dan de overige varianten. In vergelijking met de bovenstaande varianten bevat variant 7 namelijk **geen** warmtepompcentrale. In deze variant vindt alle warmteproductie namelijk op gebouwniveau plaats doormiddel van individuele warmtepompinstallaties. Als alleen wordt gekeken naar de kostprijs van warmtelevering dan scoort variant 7 gemiddeld. De investeringskosten liggen laag, maar daar staat tegenover dat er relatief weinig GJ's geleverd worden. Dit wordt veroorzaakt doordat in deze variant ook de pieklevering met het aquathermiesysteem geleverd moet worden. Hoewel de warmtepomp buiten de demarcatie valt, werkt dit wel door in het WKO- en aquathermiesysteem. Een systeem als variant 7 kun je eigenlijk niet beschouwen als een apart warmtesysteem. Daarom moet ook de levering van koude worden meegenomen. In de financiële analyse is weergegeven dat de kosten per GJ dan sterk afnemen. De investeringskosten en operationele kosten blijven immers nagenoeg gelijk terwijl het aantal geleverde GJ's toeneemt. De CO₂-uitstoot van het aquathermiesysteem is laag in vergelijking

met de basisvariant. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de elektriciteit verbruikende warmtepomp in variant 7 buiten de demarcatie valt.

N.B. Doordat in deze variant de opwekinstallatie buiten de demarcatie valt, is er in alle gevallen nog na-verwarming nodig voor ruimteverwarming en/of warm tapwater. Houd hierbij rekening dat eventuele opwekinstallaties achter de demarcatie (bijv. in de woningen) ook nog elektriciteit verbruiken en CO₂-uitstoot veroorzaken.

Samenvatting extra kostenposten:

- In varianten 2, 6 en 7 is de aanvoertemperatuur in het warmtenet lager dan 70 °C. Zo krijgt het warmtenet in varianten 2 en 6 een aanvoertemperatuur van 45 °C en krijgt variant 7 een zeer lage temperatuurnet (circa 8 – 15 °C). In deze varianten bevindt een gedeelte of de volledige (warmte)opwekinstallatie zich achter de demarcatie van dit onderzoek (na de centrale warmtepomp). Dit betekent dat de varianten 2, 6 en 7 extra investerings- en operationele kosten bevatten die op dit moment niet zijn meegenomen in de berekende kosten van het aquathermiesysteem.
- Houd er daarnaast ook rekening mee dat de piekvoorzieningen zoals gas- en e-ketels niet zijn meegenomen in de kosten van de warmtepompcentrale.

Extra CO₂ uitstoot:

- Zoals hierboven omschreven vallen bij sommige varianten de opwekinstallaties buiten de demarcatie. Dit betekent dat ook een (groot) gedeelte van de CO₂-uitstoot niet is meegenomen in de berekeningen. Voor een goed vergelijk tussen de varianten is het dan ook van belang om ook deze extra CO₂-uitstoot inzichtelijk te maken.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusie

In het voorliggende rapport zijn 7 voorbeeldberekeningen gegeven voor aquathermiesystemen, waarmee een realistische inschatting kan worden gemaakt van de kosten per geleverde GJ-warmte en de uitstoot van CO₂. In algemene zin geven deze kostenberekeningen inzage in de opbouw van de kosten voor een aquathermiesysteem en welke factoren invloed hebben op de kostprijs van aquathermie. Uit dit onderzoek zijn onderstaande conclusies naar voren gekomen.

Conclusies voor een gedetailleerde kostenberekening van aquathermie:

- In de huidige studie is een kostenberekening gemaakt zonder SDE++ mee te nemen in de kostprijs. Mocht de SDE++ subsidie worden meegenomen dan nemen de kosten per GJ af. In de praktijk kunnen de waarden dan ook flink verschillen met de resultaten uit dit onderzoek.
- De gehanteerde elektriciteitsprijs heeft een grote impact op de kostprijs van aquathermiesystemen. Op het moment dat de warmtebron aquathermie met andere warmtebronnen vergeleken wordt is het dan ook van belang dat de methode van elektriciteitsprijsbepaling vergelijkbaar is. Als dit niet het geval is, kunnen de warmtebronnen **niet** goed met elkaar vergeleken worden.
- De gehanteerde CO₂-emissie factor heeft een grote impact op de resultaten. Indien de resultaten uit dit onderzoek vergeleken worden met andere warmtebronnen is het noodzakelijk dat dezelfde factor wordt aangehouden voor het elektriciteitsverbruik van de elektrische installaties.

Conclusie op basis van resultaten:

- Schaalgrootte en vollasturen van het aquathermiesysteem spelen een belangrijke rol in de kostprijs van aquathermiesystemen. In het algemeen lijkt aquathermie financieel het meest kansrijk in gebieden met veel warmteafnemers, waarbij de warmtepompcentrale alleen de basislast levert.
- Een warmtebron die jaarrond warmte kan leveren zonder gebruik te maken van een opslagsysteem resulteert in een lagere kostprijs. Het is daarom financieel aantrekkelijk om een aquathermiesysteem te realiseren nabij grote oppervlaktewateren of effluentleidingen.
- De aanvoertemperatuur van het warmtenet heeft een grote invloed op de CO₂-uitstoot van het systeem. Hoe meer warmte decentraal wordt opgewekt, hoe duurzamer het systeem wordt. Houd er wel rekening mee dat bij variant 2, 6 & 7 opwekinstallaties (gedeeltelijk) buiten de demarcatie vallen. De daadwerkelijke CO₂-uitstoot in deze varianten ligt dus hoger dan de resultaten in dit rapport!
- Tijdens het onderzoek zijn de kosten van aquathermiesystemen doorgerekend met verschillende aanvoertemperaturen in het warmtenet, namelijk 70 °C, 45 °C en ZLT. Bij meerdere varianten bevindt een gedeelte van de opwekinstallaties zich daarmee achter de demarcatie. Dit betekent dat de varianten extra kosten bevatten die op dit moment nog niet zijn meegenomen in de berekende kosten van het aquathermiesysteem. De kostprijs van de varianten met verschillende aanvoertemperaturen kunnen hierdoor niet één op één met elkaar vergeleken worden.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van de bevindingen in dit rapport worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- De kostenberekeningen uit deze studie visualiseren in heldere principeschema's en/of infographics met de spreadsheet als rekenkundige module. Voor beleidsmakers is aquathermie nog steeds een onbekend terrein. Veel onderzoeken, informatie, presentatie gaan al snel te diep in de techniek. Door gebruikers de controle te geven over het systeem met simpele visualisaties krijgt men inzicht welke mogelijkheden er zijn en welke factoren belangrijk zijn. Dit kan plaatsvinden met een nieuwe begeleidingscommissie bestaande uit gebruikers, waarbij de focus meer licht op gebruiksgemak en toepassing, dan op techniek.
- De kostenberekeningen zijn gemaakt op basis van denkbeeldige varianten gebaseerd op de werkelijkheid. Een goede vervolgstap zou daarom zijn het toetsen en valideren van de methodiek, technische uitgangspunten en kostenberekening uit dit model op een concreet bestaand project. Het wordt aanbevolen om met warmtebedrijven in gesprek te gaan of zij daaraan willen meewerken en onder welke voorwaarden.
- Het is in de praktijk vaak lastig om kostenberekeningen voor aquathermiesystemen uit deze studie te vergelijken met andere alternatieven voor duurzame warmte, zoals bijvoorbeeld geothermie en biomassa. Hiervoor zouden de kostenberekeningen, met achterliggende technische en financiële uitgangspunten, op dezelfde manier en met dezelfde waardes opgezet moeten worden voor de alternatieven.
- TEA is nu als één standaardvariant meegenomen. Met de begeleidingscommissie is vastgesteld dat dit voor dit onderzoek representatief is. Het doel is nu vooral een vergelijk met TEO van een realistische variant met TEA. Maar het wordt aanbevolen om specifiek voor TEA ook naar meer varianten te kijken, zodat ook de spreiding van TEA inzichtelijk wordt. Het temperatuurprofiel bij de TEA-variant is gebaseerd op oppervlaktewater. Een kwalitatieve verbetering is om bij TEA met TEA temperatuurprofielen te werken.
- Voor de kostenberekening van de variant met een ZLT-net is in deze studie een andere methodiek gebruikt dan voor de andere varianten. Deze variant kan hierdoor niet goed vergeleken worden met de andere varianten. Om dit inzichtelijk te maken wordt aanbevolen aparte kostenberekeningen voor ZLT-netten maken met verschillende varianten.
- Het doel van dit onderzoek was een gedetailleerde kostenberekening van een aquathermiesysteem, daarnaast moesten deze kosten kunnen worden gebruikt in de ECW business case template warmte. Hiervoor zijn deze kostprijsberekening zeer bruikbaar. Echter voor het vergelijk van de verschillende varianten aquathermie zou een integrale benadering zeer meer lenen, waarbij zowel kosten van het warmtenet als kosten van opwekinstallaties in woningen worden meegenomen.
- In dit onderzoek zijn 7 varianten berekend. De kostprijs berekening geeft vooral inzicht in de hoogte en spreiding van de kostprijs van aquathermie. Elk aquathermiesysteem is uniek en vergt een maatwerk berekening en oplossing. De berekeningen moeten ook vooral in die context geplaatst worden. De kostprijs leent zich goed voor gebruik in een eenvoudige haalbaarheidstoets of quickscan van aquathermiesystemen. Voor een business case berekening leent de methode van berekening zich erg goed, maar de absolute getallen (kengetallen) kunnen per situatie verschillen. Wij adviseren om deze berekening altijd door een gespecialiseerd adviesbureau te laten uitvoeren of controleren.