



Kansen voor warmte- koudenetten

Mogelijkheden voor koudelevering
met aquathermiesystemen met wko



CE Delft

Committed to the Environment

WARMINGUP
Innovatief Duurzaam Warmtecollectief

Kansen voor warmte-koudenetten

Mogelijkheden voor koudelevering met aquathermiesystemen met wko

Dit rapport is geschreven door:
Sinan Senel en Katja Kruit

Delft, CE Delft, mei 2023

Publicatienummer: 23.220429.067

Koeling / Koudevraag / Koeling met wko / Aquathermie

Opdrachtgever: Deltares
Uw kenmerk: 11205153-002

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Sinan Senel (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
	1.1 Aanleiding	5
	1.2 Doel en onderzoeksvragen	5
	1.3 Leeswijzer	5
2	Ontwikkeling van de warmte- en koudevraag	6
	2.1 Ontwikkeling graaddagen in klimaatscenario's	6
	2.2 Ontwikkeling warmte- en koudevraag in woningen en utiliteit	7
	2.3 Andere factoren die invloed hebben op de koudevraag	9
	2.4 Toename in gebruik van airco's	10
3	Koelnetconfiguraties met wko en aquathermie	12
	3.1 Beschrijving configuraties	12
	3.2 Bronnet (tweepijps) met passieve koeling en actieve verwarming	13
	3.3 Lagetemperatuurnet (tweepijps) met actieve koeling en passieve verwarming	14
	3.4 Gescheiden (vierpijps-) warmte- en koudenet	15
4	Kostenanalyse	17
	4.1 Selectie van configuraties voor de kostenanalyse	17
	4.2 Basisvariant en uitgangspunten	18
	4.3 Configuraties met koeling	20
	4.4 Resultaten	22
5	Conclusies en aanbevelingen	28
	5.1 Conclusies	28
	5.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	29
6	Literatuur	30
A	Bijlage	31
	Kostenkentallen	31



Samenvatting

De gemiddelde temperatuur van de aarde neemt toe, vooral door menselijke invloeden. Dat heeft grote gevolgen, zoals klimaatverandering. De temperatuurstijging moet in 2050 tot ruim onder 2°C, en zo mogelijk 1,5°C behouden worden om de gevolgen te minimaliseren. Ook in Nederland moet de uitstoot van broeikasgassen drastisch worden verlaagd. Maar zelfs als dit doel wordt bereikt, zorgt de opwarming van de aarde ervoor dat in Nederland de koudevraag van gebouwen toeneemt. Volgens schattingen van het KNMI zullen de koeldagen tot 2050 in het beste geval met minimaal 33% en in het slechtste geval met 107% toenemen. We moeten dus manieren vinden om onze gebouwen op een duurzame manier te koelen.

In deze studie onderzoeken we de impact van de opwarming van de aarde op de koudevraag van de gebouwde omgeving in Nederland de komende jaren. Ook brengen wij de kosten van koeling in kaart door aantal warmte- en koudenet configuraties met wko te vergelijken met koeling met airco's.

Verhouding warmte- en koudevraag verandert

Eerst hebben we een schatting gemaakt van de toename van de koelvraag in de woningen en utiliteitsgebouwen tot 2050 op basis van de scenario's van het KNMI. Door de klimaatverandering zal de verhouding van warmte- en koudevraag in gebouwen sterk veranderen de komende jaren, voornamelijk in de utiliteitsgebouwen. Volgens onze schatting is de koudevraag¹ van de gebouwde omgeving in Nederland nu circa 30% van de warmtevraag en kan dit oplopen tot circa 80% tot 2050. In de utiliteitsgebouwen kan de koelvraag zelfs groter zijn dan de warmtevraag in 2050.

Voor het invullen van deze koudevraag zijn verschillende systemen mogelijk. Als de warmtevraag van een woonwijk wordt ingevuld met een wko-systeem, bijvoorbeeld met een aquathermiebron, is er ook een koudebel beschikbaar om mee te koelen. In deze studie vergelijken wij de kosten van het koelen van woningen door gebruik te maken van deze koudebel met de kosten van het koelen met een airco.

Kostenvergelijking van verschillende configuraties voor warmte- en koudenetten

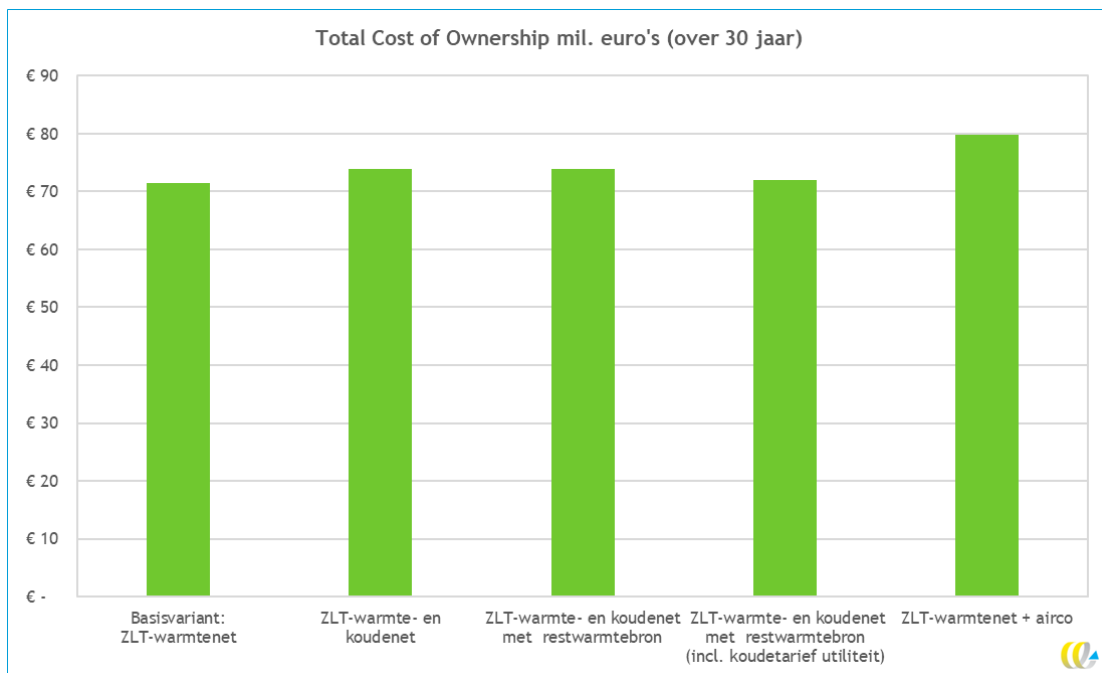
Om de impact van koeling op een wijknet te analyseren, vergelijken we de businesscase (CAPEX, OPEX en Total Cost of Ownership) van verschillende systemen die gebruikmaken van een zeerlagetemperatuur- (ZLT) bronnet in combinatie met wko en aquathermie voor een nieuwbouwwijk van circa 1.000 woningen. Hieruit blijkt dat het koelen met een warmte-koudenet lagere kosten heeft ten opzichte van airco's. Als er naast aquathermie ook rest-warmte van utiliteit als bron wordt gebruikt en hiervoor een koudetarief wordt gerekend, is de businesscase het gunstigst.

¹ Met de koudevraag wordt de functionele vraag naar koeling bedoeld. Dus op het moment dat de temperatuur in de woning boven een gewenste temperatuur bereikt, ontstaat deze vraag.



In Figuur 1 is te zien dat de Total Cost of Ownership (TCO) van de varianten zeer dicht bij elkaar ligt. De TCO van de varianten met koeling is iets hoger dan van de basisvariant, namelijk een warmtenet zonder koeling. Als er een koudetarief voor utiliteit verrekend wordt, zijn de meerkosten het laagst. De variant met airco's komt het duurst uit over 30 jaar.

Figuur 1 - Total Cost of Ownership (TCO) over 30 jaar (miljoen €) van vijf varianten



1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Aquathermie is één van de technieken die een belangrijke rol kan gaan spelen bij de verduurzaming van de gebouwde omgeving. De toepassing van aquathermie in woonwijken is tot nu toe gefocust op warmtelevering, maar wanneer een warmte-koudeopslag (wko) wordt gebruikt, is er ook een koudebel beschikbaar als ‘restproduct’ van de warmtelevering. Het uitnutten van deze beschikbare koude zou meerwaarde kunnen bieden voor het verduurzamen van de warmte- en koudevoorziening.

Daarnaast speelt de koudevraag een rol bij nieuwbouw. Om te voorzien in deze koudevraag kan de toepassing van zo’n koudebel interessant zijn. Onder andere bij Almere Pampus, een grootschalige nieuwbouwlocatie, heeft Deltares de kansen voor gecombineerde koude- en warmtelevering vanuit aquathermie in combinatie met een wko onderzocht. Hierbij is echter maar één variant met koeling onderzocht.

In deze context vraagt Deltares zich af wat de toegevoegde waarde van koudelevering bij warmte- en koudenetten is en hoe deze kansen kan bieden voor wijken zoals Almere Pampus.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

Met dit onderzoek wilt Deltares bewustwording creëren over de meerwaarde van koeling via warmte-/koudenetten op basis van aquathermie en een wko. Het is bedoeld als een verkennende studie, waarin wij de kansen voor koeling met wko in kaart brengen.

Hiervoor beantwoorden wij de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe evolueert de koudevraag van de gebouwde omgeving in Nederland in de komende 30 jaar? Hoe verhoudt deze zich in de toekomst ten opzichte van de warmtevraag? In welke mate groeien warmte- en koudevraag naar elkaar toe?
- Hoe ziet een wijk-wko-net met koeling eruit?
- Wat zijn de kosten van koude uit een wko? Hoe is dit vergeleken met elektrisch koelen?

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 brengen wij de ontwikkeling van warmtevraag en koudevraag in de gebouwde omgeving in Nederland in beeld met betrekking tot de klimaatverandering en andere factoren. Hoofdstuk 3 bevat de beschrijving van mogelijke koelingconfiguraties via een warmte- en koudenet in combinatie met wko en aquathermie. Daarna volgt Hoofdstuk 4, waarin wij de kostenvergelijking van vijf varianten toelichten met de resultaten in CAPEX, OPEX en Total Cost of Ownership. Het laatste hoofdstuk, Hoofdstuk 5, geeft conclusies van deze studie met aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoeken.

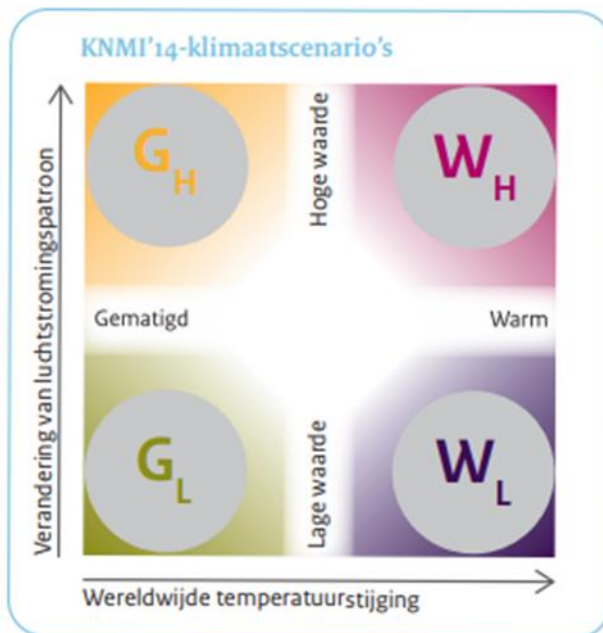
2 Ontwikkeling van de warmte- en koudevraag

Door klimaatverandering zal de gemiddelde buitentemperatuur in Nederland stijgen. Dat betekent ook dat de jaarlijkse warmtevraag naar verwachting zal afnemen, terwijl de koelvraag naar verwachting zal toenemen. Ook door andere factoren, zoals betere isolatie, neemt de warmtevraag af. In dit hoofdstuk brengen we deze ontwikkeling in kaart.

2.1 Ontwikkeling graaddagen in klimaatscenario's

Om het effect van de klimaatverandering te kwantificeren, heeft het KNMI vier klimaat-scenario's gemaakt en een voorspelling van een mogelijk klimaat voor Nederland. De laatste scenario's zijn van 2014 (KNMI, 2014) en in oktober 2023 verschijnen de nieuwe scenario's.

Figuur 2 - Vier klimaatscenario's van KNMI



Bron: (KNMI, 2014).

De vier klimaatscenario's van het KNMI zijn berekend op basis van twee waarden voor de wereldwijde temperatuurstijging: 'Gematigd' en 'Warm', en twee mogelijke veranderingen van het luchtstromingspatroon: 'Lage waarde' en 'Hoge waarde'.

Ten opzichte van de graaddagen die gemeten zijn in 2020, is de trend van stijgingen duidelijk te zien. In het warmste scenario van het KNMI, neemt het aantal graaddagen² voor

² Graaddagen: som van de afwijkingen ten opzichte van 18°C voor alle dagen met een gemiddelde temperatuur van minder dan 18°C.

verwarming richting 2050 af met ongeveer 20% (KNMI, 2014). In tegenstelling tot de graaddagen wordt het aantal koeldagen³ verdubbeld (KNMI, 2017) richting 2050, zoals opgenomen in Tabel 2.

Tabel 1 - Aantal graaddagen tot en met 2050

Jaar en Scenario	Aantal graaddagen	Ontwikkeling t.o.v. 2020
2020, gemeten	2.250	100%
2050, Scenario GL	2.050	91%
2050, Scenario GH	1.970	88%
2050, Scenario WL	1.840	82%
2050, Scenario WH	1.780	79%

Tabel 2 - Aantal koeldagen tot en met 2030

Jaar en Scenario	Aantal koeldagen	Ontwikkeling t.o.v. 2020
2020, gemeten	150	100%
2050, Scenario GL	200	133%
2050, Scenario GH	225	150%
2050, Scenario WL	260	173%
2050, Scenario WH	310	207%

De afname van graaddagen betekent dat de warmtevraag in de gebouwde omgeving naar verwachting met meer dan 20% zal dalen in 2050 ten opzichte van 2020, terwijl de koudevraag naar verwachting zal verdubbelen in 2050 ten opzichte van 2020, met dezelfde trend van koeldagen.

2.2 Ontwikkeling warmte- en koudevraag in woningen en utiliteit

Op basis van deze voorspellingen brengen wij hierna de ontwikkeling van de warmte- en koudevraag in Nederland kwantitatief in beeld, door gebruik te maken van het CEGOIA-model⁴.

Voor woningen en utiliteitsgebouwen berekenen wij de ontwikkeling van de warmte- en koudevraag apart, om het verschil tussen de verhoudingen in woningen en utiliteitsgebouwen te laten zien. Ons uitgangspunt is de totale huidige warmte- en koudevraag van beide bouwtypen, maar dan voor het geval dat de gebouwen geïsoleerd worden voor lage-temperatuur- (LT)-verwarming als basisscenario. Vervolgens schatten wij de warmte- en koudevraag in 2050 door gebruik te maken van de verhoudingen van de huidige graad- en koeldagen en die in 2050.

In Tabel 3 en Figuur 3 wordt de ontwikkeling weergegeven van de totale warmte- en koudevraag van woningen in Nederland. Zoals te zien is in het huidige scenario met isolatie-

³ Koeldagen: som van de afwijkingen ten opzichte van 17°C voor alle dagen met een gemiddelde temperatuur van hoger dan 17°C.

⁴ CEGOIA is een rekenmodel, ontwikkeld door CE Delft. Het berekent de nationale kosten van duurzame warmte-opties over de hele keten: productie, distributie, besparing en consumptie. De berekeningen worden gedaan op buurtniveau, waarbij het model de vele kenmerken van elke buurt meeneemt. Meer info: www.ce.nl/method/cegoia/

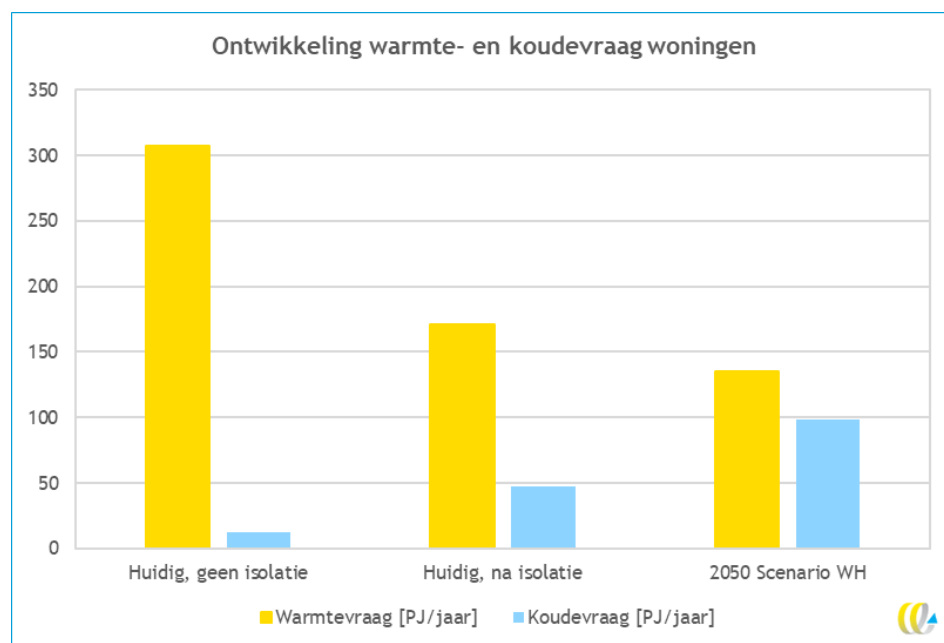


maatregelen, is de koudevraag minder dan 30% van de warmtevraag, terwijl dit in 2050 volgens het warmste scenario van het KNMI boven de 70% zal zijn.

Tabel 3 - Vier scenario's voor de ontwikkeling van warmte- en koudevraag in woningen, ten opzichte van de huidige situatie na het isoleren van woningen

Jaar en Scenario	Totaal warmtevraag woningen (PJ/jaar)	Totaal koudevraag woningen (PJ/jaar)
Huidig jaar, geen isolatie	307	12
Huidig jaar, na isolatie (CEGOIA)	171	48
2050, Scenario GL	155	63
2050, Scenario GH	149	71
2050, Scenario WL	140	82
2050, Scenario WH	135	98

Figuur 3 - De huidige warmte- en koudevraag in woningen, de vraag na het isoleren van woningen en de situatie in 2050, volgens het warmste KNMI-scenario

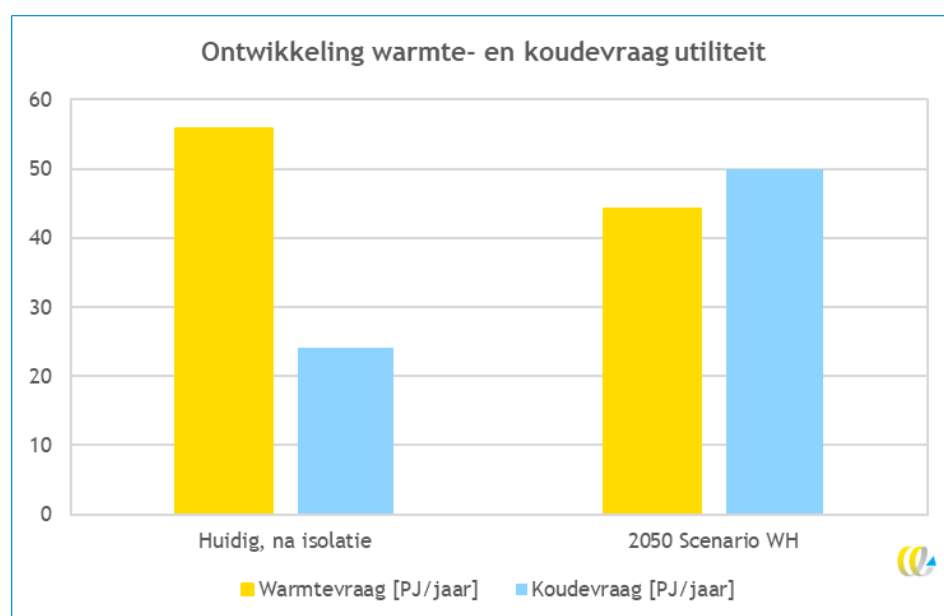


Bij utiliteitsgebouwen zien wij dat de impact van de toenemende koudevraag sterker is dan de koelbehoefte in woningen. Als utiliteitsgebouwen geïsoleerd zijn naar het geschikte niveau voor laagtemperatuurverwarming, op basis van de kengetallen van het Vesta MAIS-model (PBL, 2021), wordt de koudevraag 40% van de warmtevraag in het huidige klimaat. Zoals weergegeven in Tabel 4 en Figuur 4 wordt de koudevraag in het warmste scenario van KNMI hoger dan de warmtevraag in utiliteitsgebouwen. Bij deze berekening hebben wij de impact van isolatie op de koelvraag in utiliteitsgebouwen niet meegenomen, wegens gebrek aan uitsluitsel hierover in de literatuur.

Tabel 4 - Vier scenario's voor de ontwikkeling van warmte- en koudevraag in utiliteitsgebouwen, ten opzichte van de huidige situatie na isolatie

Jaar en Scenario	Totaal warmtevraag utiliteit (PJ/jaar)	Totaal koudevraag utiliteit (PJ/jaar)
Huidig, geen isolatie	100	24
Huidig, na isolatie (CEGOIA)	56	24
2050, Scenario GL	51	32
2050, Scenario GH	49	36
2050, Scenario WL	46	42
2050, Scenario WH	44	50

Figuur 4 - De huidige warmte- en koudevraag in utiliteitsgebouwen na isolatie van de gebouwen, en de situatie in 2050, volgens het warmste KNMI-scenario



2.3 Andere factoren die invloed hebben op de koudevraag

Er zijn meerdere aspecten die impact hebben op de toenemende koudevraag:

- verstedelijking (Urban Heat Island Effect);
- bevolkingsgroei;
- gewenning aan gekoelde ruimtes;
- vergrijzing;
- strengere eisen voor gebouwen.

Verstedelijking speelt een belangrijke rol in de toename van de koudevraag in stedelijke gebieden. Maar er is geen literatuur beschikbaar om de impact van verstedelijking op de koudevraag kwantitatief in beeld te brengen in Nederland. Het rapport van W/E Adviseurs geeft aan dat het effect van temperatuurstijging door klimaatverandering in de stad mogelijk twee keer zo hoog kan zijn als op het platteland (W/E Adviseurs, 2018).

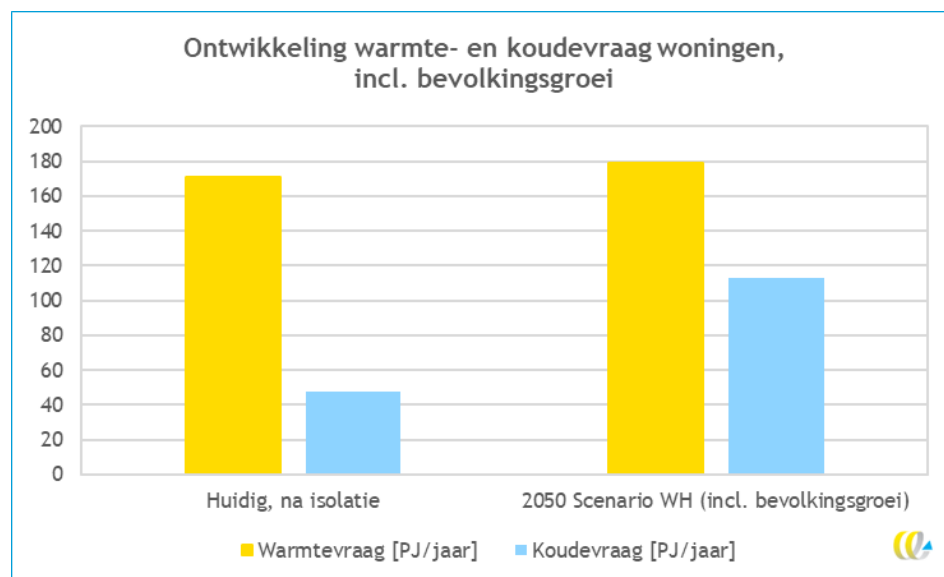
In de toekomst wordt de behoefte aan gekoelde ruimtes nog hoger door vergrijzing van de Nederlandse bevolking, wat leidt tot strengere eisen, zowel van de gebruikers als van de regelgeving aan het gebouwontwerp, tegen het risico op temperatuuroverschrijding.

Niet al deze aspecten zijn goed te kwantificeren. Wel kunnen we de impact van bevolkingsgroei op de koelbehoefte in de woningen meenemen. Volgens de Regionale bevolkings- en huishoudensprognose neemt het aantal huishoudens toe tot 9,25 miljoen in 2050 (PBL, 2022). Samen met de klimaatverandering veroorzaakt dit een toename van 235% in de koelbehoefte van woningen in 2050, ten opzichte van de huidige koudevraag na het isoleren van de woningen. De impact is weergegeven in Tabel 5 en Figuur 5. Het is noodzakelijk om hieraan toe te voegen dat de koelvraag zelfs hoger zal zijn dan de cijfers in deze eenvoudige analyse, door de nieuwbouwwoningen, ongeveer 800.000 tot 2050, die betere isolatienormen zullen hebben.

Tabel 5 - Het effect van bevolkingsgroei en de klimaatverandering op de koudevraag in Nederland in 2050

Jaar en Scenario	Totaal warmtevraag woningen (PJ/jaar)	Totaal koudevraag woningen (PJ/jaar)	Aantal huishoudens (miljoen)
Huidig, na isolatie (CEGOIA)	171	48	8,03
2050, Scenario WH (inclusief bevolkingsgroei)	179	113	9,25

Figuur 5 - Het effect van enkel bevolkingsgroei in de warmte- en koudevraag in woningen in 2050, volgens het warmste KNMI-scenario



2.4 Toename in gebruik van airco's

Om in de toenemende koelvraag te kunnen voorzien, is momenteel compressiekoeling (oftewel airco's) de populairste technische oplossing in Nederland. Volgens de KEV 2022 is in Nederland 14% van de woningen voorzien van een airco (mobiel en vast). Naar verwach-

ting neemt het bezit van airco's toe tot 38% in 2030, waardoor het elektriciteitsverbruik van airco's zal stijgen van 1 PJ in 2020 naar ruim 4 PJ in 2030.

Wij hebben dezelfde trend als in KEV 2022 (PBL, 2022) doorgetrokken naar 2050 en zien dat in 2050 meer dan 60% van de woningen in het bezit zal zijn van een airco. Dit is een forse stijging van meer dan 4,5 miljoen units in minder dan 30 jaar tijd. Dit correspondeert met bijna 25% van de koelbehoefte van de woningen in 2050 in het warmste scenario. Dit is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 - Inzet airco's in woningen in Nederland in 2021, 2030 en 2050

Inzet airco's	Woningen koeling (PJ)	Bezit woningen (%)*	Totaal aantal airco's	Aantal huishoudens (miljoen)
2021	3	14%	1.117.800	8,04
2030	12	33%	2.851.900	8,66
2050	24	62%	5.761.000	9,25

* Inclusief mobiele airco's.



3 Koelnetconfiguraties met wko en aquathermie

In dit hoofdstuk beschrijven wij mogelijke koelnetconfiguraties op hoofdlijnen, onder twee categorieën: 1) een gesloten (tweepijps-) bronnet en 2) een gescheiden (vierpijps-) warmte- en koudenet.

3.1 Beschrijving configuraties

Een gesloten bronnet is een warmte- en koudenet dat dezelfde temperatuur heeft als de bron, vandaar de term 'bronnet'. Voor zowel warmte- als koudelevering worden dezelfde twee leidingen gebruikt, namelijk één aanvoer- en één retourleiding. Dus de leverings-temperaturen van verwarming en koeling zijn van belang voor dit soort netconfiguraties.

Een gescheiden warmte- en koudenet bevat in principe twee afzonderlijke netten: een koudenet en een warmtenet. In deze configuratie zijn de verwarming en koeling volledig gescheiden en daarvoor worden twee aanvoer- en twee retourleidingen aangelegd. De leveringstemperaturen zijn dus volledig flexibel en onafhankelijk van elkaar.

De warmte- en koudenetconfiguraties mogen gekoppeld worden aan diverse aquathermiebronnen, zoals thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), of uit afvalwater (TEA), of uit drinkwater (TED). Voor koeling is TEO de meest geschikte bron, omdat de temperatuur het laagst is en omdat het op veel plaatsen in Nederland beschikbaar is. In deze studie beschouwen wij de thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) als de aquathermiebron. De warmte of koude van de bron kan direct gebruikt worden voor koeling of verwarming, of opgeslagen worden in een thermische opslag.

In alle configuraties in dit onderzoek zijn de bronnen gekoppeld aan een warmte-koudeopslag (wko). Wko is een manier om warmte of koude op te slaan in de bodem.

De aquathermiebronnen kunnen worden toegepast zowel voor het laden van de wko-bron als voor directe warmte- en koudelevering. In deze studie wordt de aquathermiebron benut enkel voor de regeneratie van de warme bron van het wko-systeem. De onttrokken warmte van de bron wordt opgeslagen in de bodem tussen 0 en 250 meter diepte.

In deze studie bestuderen wij wko-netten met een aquathermiebron. Wko-netten zijn lage-temperatuurwarmtenetten en kunnen zowel warmte als koude leveren. Afhankelijk van de afgifte- en brontemperatuur wordt bepaald of er behoefte is aan een opwaarderingsysteem zoals een warmtepomp. De configuratie zonder een opwaarderingsysteem voor koeling, noemen wij een *passief systeem*, en de configuratie mét een opwaarderingsysteem voor koeling een *actief systeem*.

Tabel 7 laat de mogelijke configuraties zien. Terwijl hybride configuraties mogelijk zijn voor het realiseren van wko-netten, focussen wij ons in deze studie op de drie mogelijkheden die representatief zijn voor warmte- en koudenetten. In de volgende hoofdstukken beschrijven wij deze configuraties in detail.



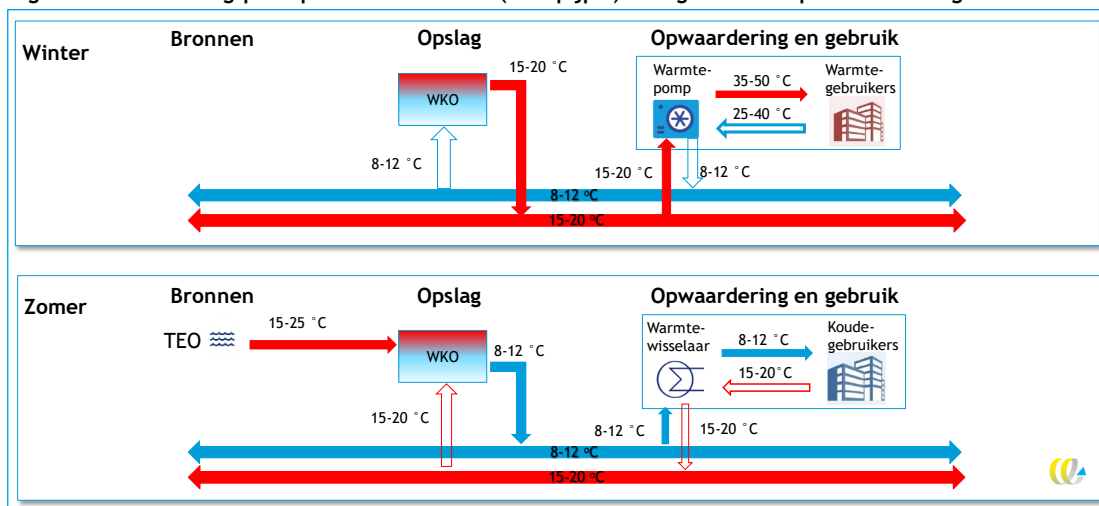
Tabel 7 - Kenmerken van verschillende warmte- en koudenetconfiguraties

Configuratie	Temperatuurniveau aanvoer- en retourleidingen	Opwaarderings-systeem	Opslag	Mogelijke bronnen	Dekkings-percentage koelvraag
Bronnet (tweepijps) met passieve koeling	– Aanvoer 8-12°C – Retour < 20°C	Geen (passief koelen)	Wko	Restwarmte, TEO, TED	– 100% koudenet
Bronnet (tweepijps) met actieve koeling	– Aanvoer 35-45°C – Retour 20-25°C	Actief koelen - individuele warmtepompen	Open wko	Restwarmte, TEO, TED	– 60-80% warmte- en koudenet – 20-40%, inclusief warmtepompen
Gescheiden net (vierpijps) met actieve koeling en verwarming	– Aanvoer 8-12°C – Retour 15-20°C – Aanvoer 35-45°C – Retour 25-35°C	Actief koelen - collectieve warmtepomp	Wko	Warmtegebruikers, TEO, TED	– 100% warmte- en koudenet (inclusief warmtepomp-installatie)

3.2 Bronnet (tweepijps) met passieve koeling en actieve verwarming

Deze configuratie is een bronnet waarmee de koude van de bron direct gebruikt wordt voor koeling van de gebouwen op een geschikt temperatuurniveau (8-12°C). Omdat de retour van de koeling aan de warme leiding wordt geleverd en vanwege een tweepijpsconfiguratie, wordt de temperatuur van de warme leiding bepaald door de retourtemperatuur van de koeling. Dus vanwege de te lage temperatuur van de warme leiding (< 20°C) voor verwarming, wordt een opwaarderingsysteem, met name individuele warmtepompen, ingezet bij elk gebouw.

Figuur 6 - Het werkingsprincipe van de bronnet- (tweepijps-) configuratie met passieve koeling



Zoals weergeven in Figuur 6, wordt de restwarmte van de koudegebruikers, zoals utiliteitsgebouwen, geleverd op een te laag temperatuurniveau en is het dus niet mogelijk om de gebouwen te verwarmen zonder een opwaarderingsysteem. Hierdoor worden individuele

warmtepompen toegepast bij elk gebouw. Om dezelfde reden kunnen verwarming en koeling niet tegelijkertijd worden geleverd met deze configuratie. Tabel 8 geeft de kenmerken van deze variant weer.

Tabel 8 - Kenmerken van de bronnet- (tweepijps-) configuratie met passieve koeling

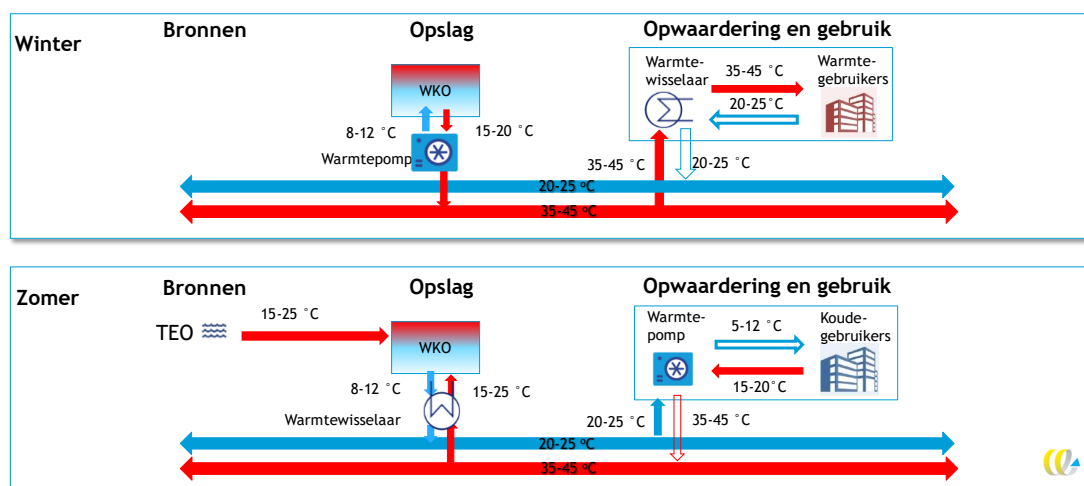
Configuratie	Temperatuurniveau aanvoer- en retourleidingen	Opwaarderings-systeem	Opslag	Mogelijke bronnen	Dekkingspercentage koelvraag
Bronnet (tweepijps) met passieve koeling	– Aanvoer 8-12°C – Retour < 20°C	Geen (passief koelen)	Wko	Restwarmte, TEO, TED	– 100% koudenet

Deze configuratie biedt de mogelijkheid om zowel de warmte van koudegebruikers als de koude van warmtegebruikers decentraal uit te wisselen. Dus warmtegebruikers en de aquathermiebron leveren de koude aan de koudeopslag van de wko in de winterperiode, terwijl koudegebruikers en de aquathermiebron in de zomer warmte leveren aan de warmteopslag van de wko.

3.3 Lagetemperatuurnet (tweepijps) met actieve koeling en passieve verwarming

Deze configuratie is een lagetemperatuurnet, waarmee de koude op een hogere temperatuur (20-25°C) geleverd wordt ten opzichte van de eerste configuratie. De koude wordt dus niet direct gebruikt voor koeling van de gebouwen, maar via een opwaarderingsysteem, namelijk individuele warmtepompen. De temperatuur van de warme leiding is geschikt voor direct gebruik in de gebouwen (35-45°C), maar voor warm tapwater is er behoefte aan een opwaarderingsysteem. Tabel 9 geeft de kenmerken weer van deze variant.

Figuur 7 - Het werkingsprincipe van de lagetemperatuurnet- (tweepijps-) configuratie met actieve koeling



Figuur 7 geeft het werkingsprincipe weer van het lagetemperatuurnet met actieve koeling. Zoals weergegeven in het werkingsprincipe, leveren de individuele warmtepompen de koude aan de gebruikers, terwijl de warmte teruggelieferd wordt aan de wko via de warme

leiding, op een temperatuur tussen 15-20°C door middel van een warmtewisselaar. In de winterperiode wordt de koude van warmtepompen geleverd aan de wko via de koude leiding, met een temperatuur tussen 8-12°C.

Net als in de eerste variant is decentrale energie-uitwisseling mogelijk tussen warmte- en koudegebruikers. De werking van de wko blijft hetzelfde. Dus de koude van de warmtegebruikers en die van de aquathermiebron is geleverd aan de koudeopslag in de winterperiode, terwijl koudegebruikers en de aquathermiebron in de zomer warmte leveren aan de warmteopslag. In Tabel 9 zijn de kenmerken van zo'n configuratie samengevat.

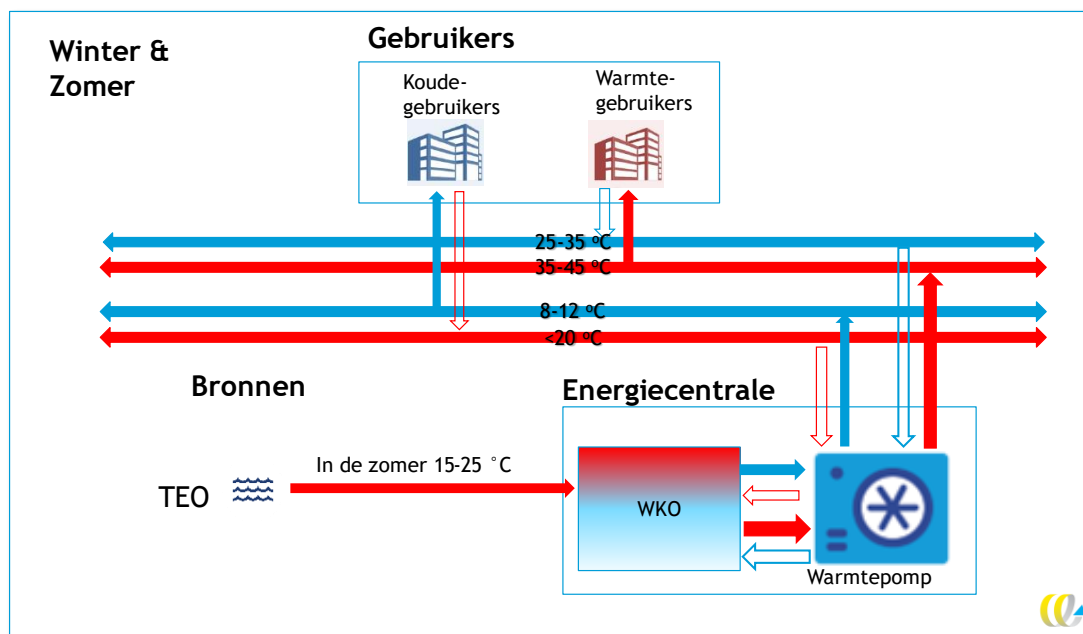
Tabel 9 - Kenmerken van de bronnet- (tweepijps-) configuratie met actieve koeling

Configuratie	Temperatuurniveau aanvoer- en retourleidingen	Opwaarderings-systeem	Opslag	Mogelijke bronnen	Dekkingspercentage koelvraag
Bronnet (tweepijps) met actieve koeling	– Aanvoer 35-45°C – Retour 20-25°C	Actief koelen - individuele warmtepompen	Open wko	Restwarmte, TEO, TED	– 60-80% warmte- en koudenet – 20-40%, inclusief warmtepompen

3.4 Gescheiden (vierpijps-) warmte- en koudenet

Een vierpijpsysteem is interessant wanneer het plaatsen van individuele warmtepompen niet gewenst is. De centrale warmtepompinstallatie, die gekoppeld is aan de wko, wekt gelijktijdig warmte en koude op en regelt de energie-uitwisseling tussen warmte- en koudegebruikers. Figuur 8 laat het werkingsprincipe van zo'n gescheiden net zien.

Figuur 8 - Het werkingsprincipe van de gescheiden (vierpijps-) warmte- en koudenet



Met een vierpijpsysteem worden de koelings- en verwarmingsleidingen volledig gescheiden, waardoor veel flexibiliteit ontstaat voor de temperatuurregeling voor koeling en verwarming. Een centrale warmtepompinstallatie is direct gekoppeld aan de wko en alle verwarming en koeling wordt voorzien door de warmtepomp. Als de warmtepomp koude opwekt, levert het warmte terug in de wko op een temperatuur van 18-24°C. Tabel 10 geeft de kenmerken van zo'n gescheiden warmte- en koudenet.

Tabel 10 - Kenmerken van een gescheiden (vierpijps-) warmte- en koudenet

Configuratie	Temperatuurniveau aanvoer- en retourleidingen	Opwaarderings-systeem	Opslag	Mogelijke bronnen	Dekkingspercentage koelvraag
Gescheiden net (vierpijps) met actieve koeling en verwarming	<ul style="list-style-type: none"> – Aanvoer 8-12°C – Retour < 20°C – Aanvoer 35-45°C – Retour 25-35°C 	Actief koelen - collectieve warmtepomp	Wko	Warmtegebruikers, TEO, TED	– 100% warmte- en koudenet (inclusief warmtepomp-installatie)

4 Kostenanalyse

In dit hoofdstuk voeren we een kostenanalyse uit van een selectie van de bovengenoemde configuraties, met betrekking tot de extra kosten om koeling te realiseren vanuit een warmtenet. Dit doen we op basis van een bestaande businesscase van een warmtenet van het WarmingUP-project (WarmingUp, 2022), dat nader wordt toegelicht.

4.1 Selectie van configuraties voor de kostenanalyse

De selectie van configuraties bestaat uit een basisvariant, twee configuraties met warmte- en koudenet en een configuratie met airco's in de woningen:

0. Basisvariant: ZLT-warmtenet, enkel voor verwarming van woningen.
1. ZLT-warmte- en koudenet voor zowel verwarming als koeling van woningen.
2. ZLT-warmte- en koudenet voor zowel verwarming als koeling van woningen met utiliteit als restwarmtebron:
 - a zonder koudetarief (opbrengsten) bij utiliteit;
 - b met koudetarief (opbrengsten) bij utiliteit.
3. ZLT-warmtenet, enkel voor verwarming van woningen in combinatie met individuele airco's voor koeling in de woningen.

De basisvariant die in dit hoofdstuk verder wordt toegelicht, is een zeerlagetemperatuur-warmtenet dat de woningen enkel van warmte voorziet.

De tweede variant is een tweepijpszeerlagetemperatuurbronnnet met wko en aquathermiebron (TEO), zowel voor het verwarmen als het koelen van woningen. Koeling is direct voorzien vanuit de wko-bron, zonder opwaardering, namelijk door een passieve koelingsconfiguratie.

De derde variant is ook een tweepijpszeerlagetemperatuurbronnnet met wko en een aquathermiebron (TEO) voor het verwarmen en koelen van woningen. Koeling is direct voorzien vanuit de wko-bron, zonder opwaardering. De warme bron van de wko wordt 50% gegeneereerd met de warmte die geogst wordt bij het koelen van utiliteitsgebouwen, en de aquathermiebron regelt de rest zelf. In dit geval functioneren de utiliteitsgebouwen als restwarmtebron in de warmtevoorziening, en wij nemen aan dat de utiliteitsgebouwen zelf een wko-systeem hebben, dat ongebalanceerd is vanwege de netto koudevraag.

In de kostenberekening maken wij twee subvarianten van de derde variant met restwarmte uit utiliteitsgebouwen. In beide subvarianten worden de uitkoppelkosten van utiliteitsgebouwen meegenomen, terwijl in één subvariant ook de baten voor het opleveren van de restwarmte worden meegerekend.

De laatste variant is de basisvariant gecombineerd met individuele airco's voor de koeling van woningen.

De belangrijkste kenmerken van alle varianten zijn gegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - De kenmerken van de varianten voor de kostenanalyse

Variant	Toelichting	Warmte- en koudebron	Extra kosten t.o.v. basisvariant*
Basisvariant ZLT-warmtenet	Bronnet enkel voor verwarming van woningen, geen koeling	Wko en TEO, enkel voor de regeneratie van warmteopslag	–
ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet	Bronnet voor zowel verwarming als koeling van woningen	Wko en TEO, enkel voor de regeneratie van warmteopslag	Collectieve voorzieningen voor koeling
ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet met utiliteit als restwarmtebron	Bronnet voor zowel verwarming als koeling van woningen	Wko en TEO, in combinatie met de restwarmte van utiliteitsgebouwen voor de regeneratie van warmteopslag	Collectieve voorzieningen voor koeling en uitkoppelkosten van utiliteitsgebouwen
ZLT-warmtenet + airco	Bronnet enkel voor verwarming van woningen, koeling door middel van airco's in de woningen	Wko en TEO, enkel voor de regeneratie van warmteopslag	Individuele airco's in de woningen

* In de configuraties met koeling is er sprake van ook minderkosten, door de kleinere dimensionering van het aquathermiesysteem.

De kostenanalyse is in twee delen uitgevoerd, namelijk 1) over de systeemkosten en 2) over de gebouwkosten, oftewel respectievelijk de kosten die relevant zijn voor de warmte- en koudebedrijven en de huishoudens. De kosten van de warmte- en koudeleveranciers voor het investeren in de warmte- en koudenetten zijn gebaseerd op het eerder genoemde WarmingUP-project, terwijl de kosten voor de huishoudens zijn gebaseerd op de gegevens van zowel CE Delft als de literatuur.

Alle varianten, zoals samengevat in Tabel 11, zijn vergeleken met een variant met airco's, waarvoor geen aanpassingen aan de woningen nodig zijn. De vergelijking is gebaseerd op CAPEX-, OPEX-kosten en ook de Total Cost of Ownership over 30 jaar.

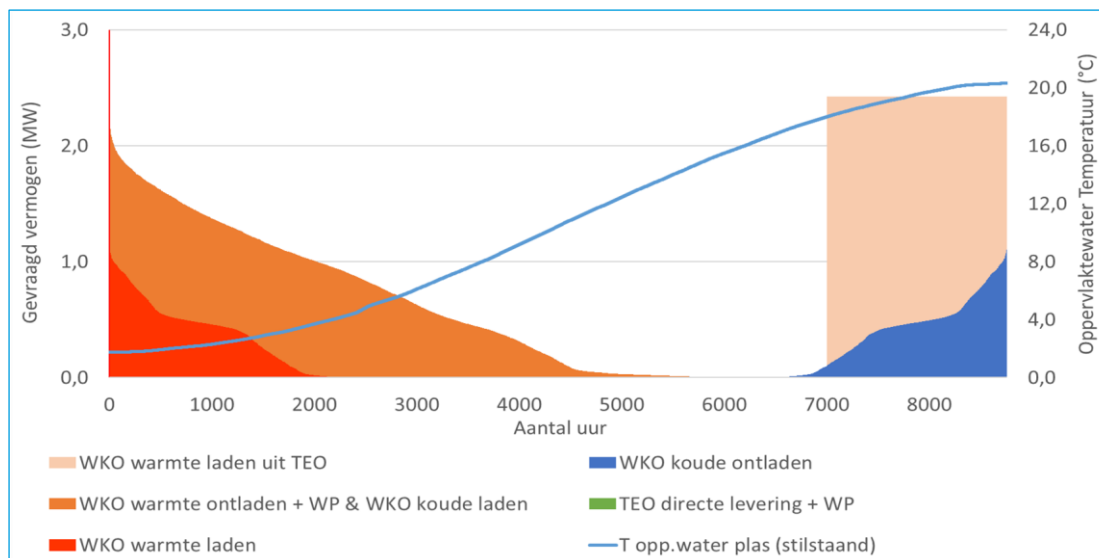
4.2 Basisvariant en uitgangspunten

De basisvariant is een zeerlagetemperatuurwarmtenet waarmee de woningen van warmte worden voorzien. Het is gebaseerd op een variant van het variantenonderzoek in het WarmingUP-project, namelijk Variant 7. Deze variant wordt toegepast in een nieuwbouwwijk waar voornamelijk vrijstaande woningen en rijtjeswoningen worden gerealiseerd.

In de periode waarin er warmtevraag is bij de woningen, wordt de warmte volledig geleverd vanuit het wko-systeem, het oranje gedeelte van de jaarbelasting durkromme (JBDK) in Figuur 9. Er zijn dus geen collectieve piekvoorzieningen voor warmtelevering. In de woningen zijn er individuele warmtepompen geplaatst om de warmte op zeerlagetemperatuurniveau, namelijk minder dan 20°C, op te waarden naar lagetemperatuurniveau, namelijk minimaal 35°C, voor het verwarmen van de woningen.

In deze variant wordt geen directe warmte geleverd vanuit de aquathermiebron, maar wordt de warmte enkel gebruikt voor het laden van de wko-warmtebron, met andere woorden: het regenereren van de wko-warmtebron (beige gedeelte van de JBDK).

Figuur 9 - Jaarbelasting duerkromme basisvariant



Bron: (WarmingUP, 2022).

Volgens het rapport van de WarmingUP-studie (WarmingUp, 2022), zijn de woningen ook voorzien van koeling met wko, zoals te zien is in het rechtergedeelte (blauw) van de bijbehorende jaarbelasting duerkromme (JBDK) in Figuur 9. Tegelijkertijd wordt de warmtebron geladen door de warmte die geabsorbeerd is bij de afnemers, zoals weergegeven in het linkergedeelte (rood) van de JBDK.

Naar verwachting wordt de aquathermiebron kleiner gedimensioneerd wanneer de wko-warmtebron geladen wordt met de warmte van koudeverbruikers. Daarvoor gebruiken wij de volgende formule:

$$Capaciteit\ Aquathermie\ systeem = \frac{Warmtevraag \times \frac{COP - 1}{COP} - Koudevraag}{Vollasturen\ aquathermie}$$

De berekeningen van het WarmingUP-project houden echter geen rekening met de invloed van koeling op de capaciteit van het aquathermie-systeem, namelijk de koudevraag bij de bovenstaande formule. Op basis van dit uitgangspunt nemen wij de kenmerken en de berekeningen van warmtelevering over in onze studie, inclusief de capaciteit van het aquathermie-systeem. De technische kenmerken van de basisvariant zijn samengevat in Tabel 12.

Tabel 12 - Kenmerken basisvariant op basis van Variant 7 bij het WarmingUP-project

Kenmerken	Basisvariant
Vermogen afnemer/warmtenet	2,3 MW
Vermogen preferent	2,3 MW
Vermogen TEO-systeem	2,4 MW
Vermogensaandeel piek	0,0%
Warmtevraag totaal	15,3 TJ
Warmtevraag piek	0,0 TJ

Kenmerken	Basisvariant
Verbruiksaandeel preferent (TEO)	0,0%
Verbruiksaandeel preferent (wko)	100%
Verbruiksaandeel piek	0,0%
Vollasturen warmteafzet	1.900 uur
Vollasturen TEO/TEA-systeem	1.300 uur

Bron: (WarmingUp, 2022).

De kostenanalyse bij het WarmingUP-project gaat om warmtelevering aan een warmtenet en alle systemen die daaraan bijdragen. De demarcatie van het aquathermiesysteem loopt dus tot en met de technische ruimte, en de kosten voor het warmtenet en woningaanpassingen voor lagetemperatuurverwarming worden niet meegenomen in de berekeningen.

In onze analyse hebben wij deze demarcatie weggehaald om een volledig beeld te krijgen van de kosten voor koeling met warmte- en koudenetten met wko. We hebben dus de meerkosten voor de woningaanpassingen meegerekend, bijvoorbeeld de individuele warmtepompen die geplaatst moeten worden in woningen voor het opwaarderen van de warmte vanuit het wko-systeem. Daarnaast worden de kosten voor het aanleggen van een warmtenet meegerekend. Dat hebben we gedaan op basis van de gegevens van het aquathermieleidingstracé zoals bepaald in het WarminUP-project.

Om de meerkosten te kunnen berekenen, hebben we het aantal woningen en ook het type woningen bij de basisvariant bepaald, wat niet gespecificeerd is in het rapport van de WarmingUP-studie. Volgens Deltares is Variant 7 gebaseerd op het bestaande zeerlagetemperatuurwarmtenet in Blaricum, dat 933 woningen van warmte voorziet. Wij nemen aan dat de wijk voornamelijk uit rijtjeswoningen bestaat.

De kosten voor woningaanpassingen zijn gebaseerd op een nieuwbouwruiwoning. Om in bestaande bouw te kunnen koelen, zijn echter additionele aanpassingen nodig in het afgiftesysteem en de leidingen van het cv-systeem. Wij zijn uitgegaan van een aantal kengetallen die berekend zijn door Merosch voor het CEGOIA-model van CE Delft (Merosch, 2020), over een isolatiepakket dat geschikt is voor zeerlagetemperatuurverwarming. Wat betreft het woningtype, hebben wij dit berekend voor een rijwoning met een bouwjaar na 2006. Alle relevante kostengetallen zijn aangegeven in Bijlage A van dit rapport.

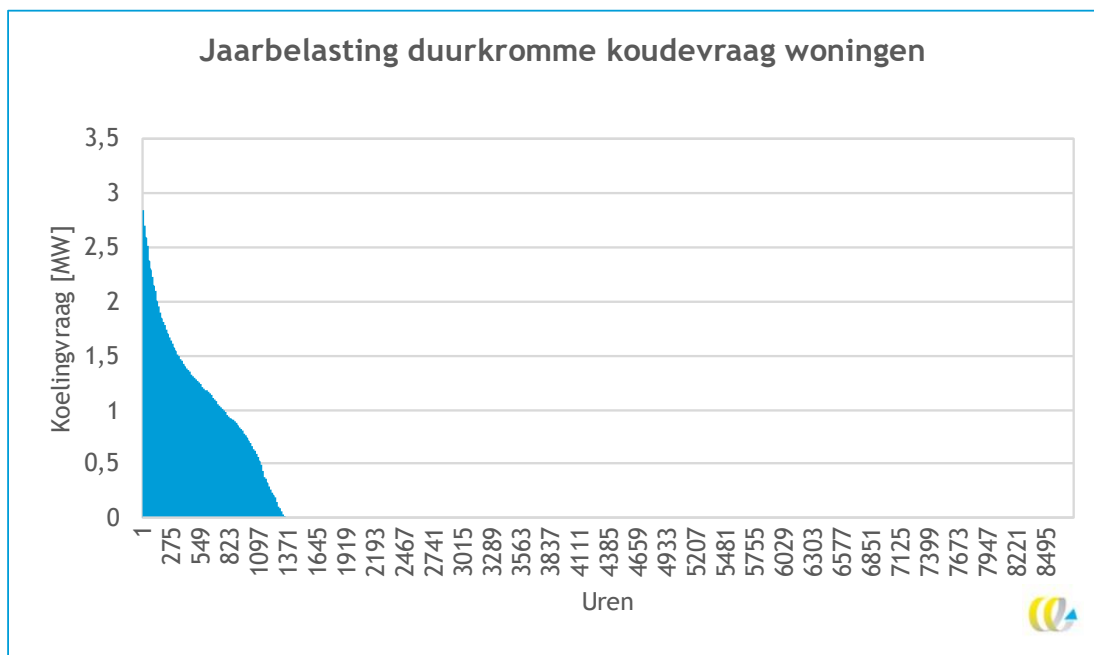
Tot slot hebben wij de energieprijisprognose voor de komende 30 jaar overgenomen van de analyse van het WarmingUP-project voor consistentie.

4.3 Configuraties met koeling

Voor de configuraties met koeling vanuit de wko hebben wij de capaciteit van het aquathermiesysteem bepaald op basis van de formule zoals aangegeven in Paragraaf 4.2. Hierdoor wordt de invloed van koeling op het systeem dimensionerend. Het koelingsprofiel en de pieklasten zijn berekend door middel van een jaarbelasting durkromme, zoals weergegeven in Figuur 10, specifiek voor de koelvraag in woningen. Hiervoor gebruiken we de warmteprofielgenerator van TNO⁵. Op basis hiervan worden zowel de investerings- als exploitatiekosten berekend.

⁵ Zie www.warmteprofielgenerator.nl

Figuur 10 - Jaarbelasting duerkromme voor de koudevraag van 933 woningen



De technische kenmerken van deze koelconfiguraties zijn berekend door middel van een aangepast Excelmodel, dat gebouwd is op basis van de gedetailleerde berekeningen van het WarmingUP-project. Deze kenmerken zijn samengevat in Tabel 13. De belangrijkste variatie zit in het vermogen van het aquathermiesysteem, dat kleiner wordt vanwege de koeling van woningen en de restwarmte uit de utiliteitsgebouwen voor de regeneratie van de warmtebron van wko.

Wij nemen aan dat de restwarmtelevering van de utiliteitsgebouwen 50% van het laden van de wko-bron dekt.

Tabel 13 - Technische kenmerken van koelconfiguraties ten opzichte van de basisvariant

Kenmerken	Basisvariant	ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet voor woningen	ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet met utiliteit als restwarmtebron
Vermogen afnemer/warmtenet	2,3 MW	2,3 MW	2,3 MW
Vermogen preferent	2,3 MW	2,3 MW	2,3 MW
Vermogen TEO-systeem	2,4 MW	1,3 MW	0,6 MW
Vermogensaandeel piek	0,0%	0,0%	0,0%
Warmtevraag totaal	15,3 TJ	15,3 TJ	15,3 TJ
Warmtevraag piek	0,0 TJ	0,0 TJ	0,0 TJ
Verbruiksaandeel preferent (TEO)	0,0%	0,0%	0,0%
Verbruiksaandeel preferent (wko)	100,0%	100,0%	100,0%
Verbruiksaandeel piek	0,0%	0,0%	0,0%
Vollasturen warmteafzet	1.900 uur	1900 uur	1.900 uur

Kenmerken	Basisvariant	ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet voor woningen	ZLT- (tweepijps-) warmte- en koudenet met utiliteit als restwarmtebron
Vollasturen TEO/TEA-systeem	1.300 uur	1300 uur	1.300 uur
Vermogen - totaal koeling	N.v.t.	3,2 MW	3,2 MW
Vermogen - wko-koeling	N.v.t.	3,2 MW	3,2 MW
Koudevraag - totaal	N.v.t.	5,5 TJ	5,5 TJ
Koudevraag - wko	N.v.t.	5,5 TJ	5,5 TJ
Vollasturen wko voor koudelevering	N.v.t.	485	485

Alle configuraties met de koudelevering vanuit een wko zijn uiteindelijk vergeleken met een variant met airco's voor de koudevoorziening. Gezien de populariteit van airco's voor huishoudens, is de inzet van airco's de sterkste concurrent van de aansluiting aan warmte- en koudenetten. Daarom is een kostenvergelijking met airco's van belang. Voor deze berekening zijn wij ervan uitgegaan dat er geen woningaanpassingen nodig zullen zijn voor het installeren van een airco. Daarom hebben wij alleen de kosten van het aanschaffen en het installeren van een (vaste) airco meegerekend. Daarnaast worden de energiekosten ook berekend met een gemiddeld elektriciteitsgebruik van een airco, van 400 kWh per jaar (W/E Adviseurs, 2018).

4.4 Resultaten

In dit hoofdstuk laten we de resultaten van onze economische analyse zien voor de vier varianten van koelconfiguraties ten opzichte van de basisvariant (een zeerlagetemperatuur-warmtenet). De resultaten worden gepresenteerd in drie delen:

1. Totale CAPEX voor de bron, wko, distributie en woningaanpassingen.
2. Totale OPEX voor de bron, wko, distributie en woningaanpassingen.
3. Total Costs of Ownership (TCO) voor de totale kosten over 30 jaar.

In alle analyses geven wij ook de meer- of minderkosten aan van de koudelevering ten opzichte van de basisvariant met enkel warmtelevering.

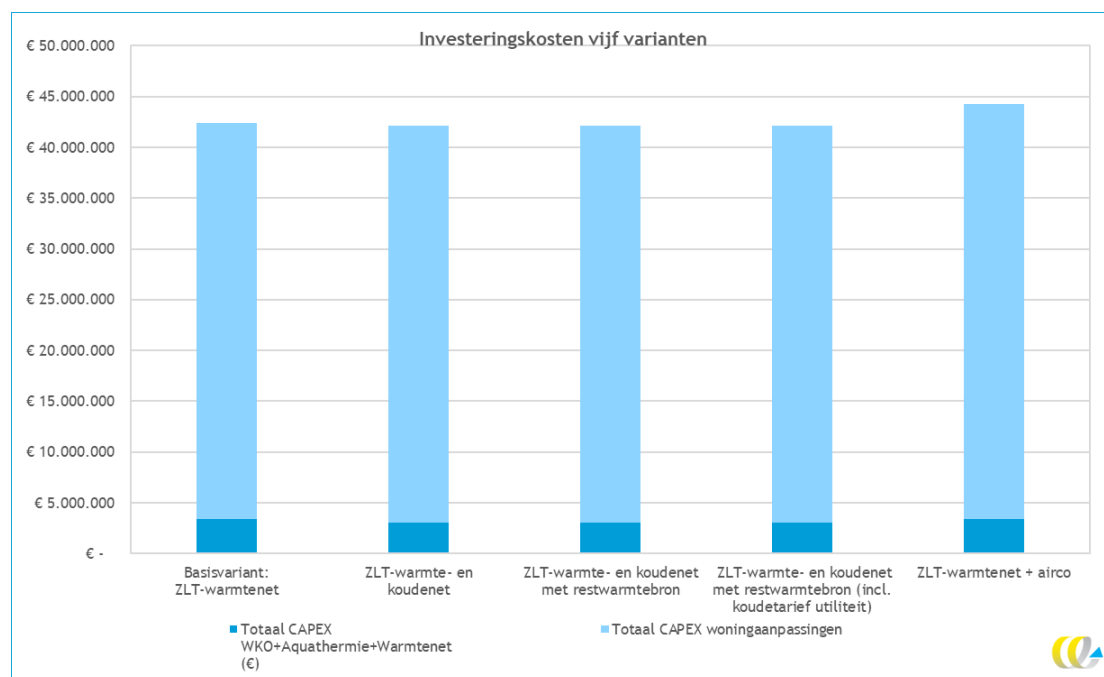
4.4.1 CAPEX

De totale investeringskosten (CAPEX) zijn berekend op basis van de kengetallen van het WarmingUP-project met de volgende aannames:

- In alle varianten zijn warmte- en koudenetten gekoppeld aan een leidingwerk met dezelfde kenmerken. Het leidingwerk is aangelegd tussen de wko-bronnen, de aquathermiebron en de technische ruimte.
- Het warmtenetleidingstracé tussen het wko-systeem en de gebruiker is berekend met dezelfde kenmerken en kengetallen zoals die van het aquathermieleidingstracé.
- Bij alle configuraties zijn wij ervan uitgegaan dat er aanpassingen nodig zijn in de woningen voor de lagetemperatuurverwarming door een nieuwe afgiftesysteem te plaatsen en isolatiemaatregelen te nemen in alle 933 woningen.
- Individuele warmtepompen zijn ook berekend in het deel van de investeringskosten voor woningaanpassingen.
- Uitkoppelkosten voor de restwarmte van de utiliteit worden meegenomen als onderdeel van de kosten voor het wko-systeem, in twee varianten waarin de wko-bron deels geladen wordt door de utiliteitsgebouwen.

De investeringskosten van alle varianten liggen dichtbij elkaar, zoals weergegeven in Figuur 11. Per woning liggen de investeringskosten voor alle voorzieningen en aanpassingen tussen € 40K en € 50K. Het zeer kleine verschil tussen de varianten met koeling en de basisvariant wordt veroorzaakt door de kleinere dimensionering van de aquathermiebron voor de varianten waarin de wko-bron deels ingevuld wordt met de warmte van de bel, zowel in woningen als in de utiliteitsgebouwen. De hoogste investeringskosten zijn voor de variant met airco's.

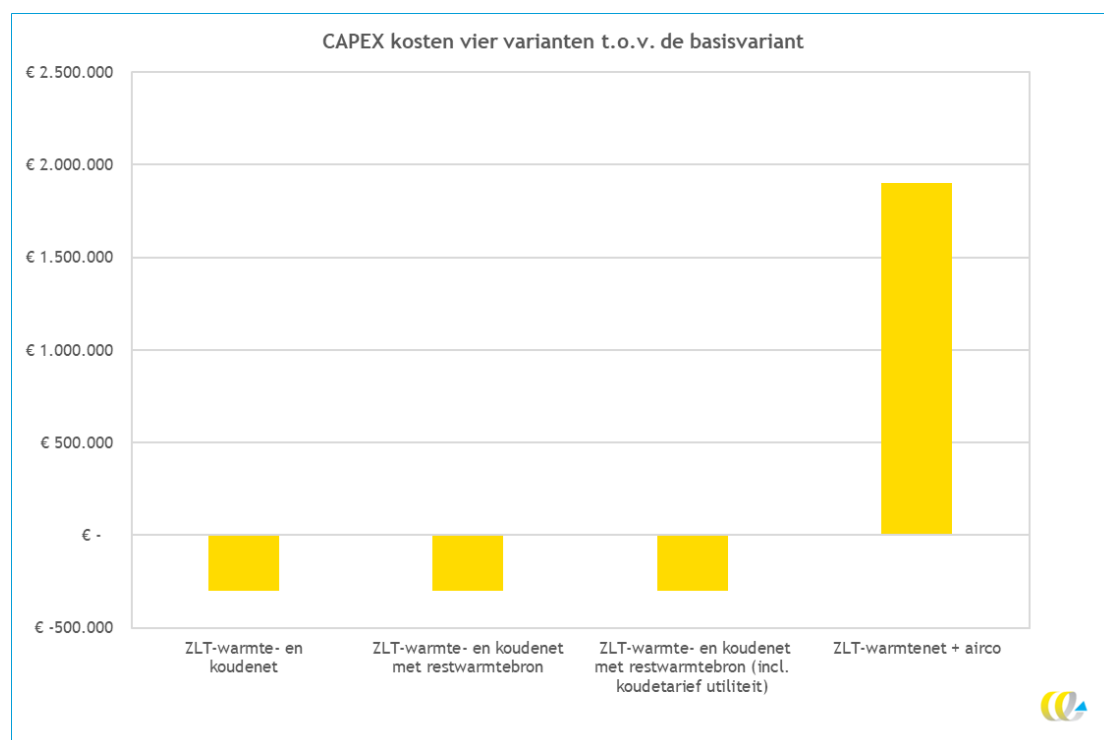
Figuur 11 - CAPEX-investeringskosten (in euro's) van vijf varianten



De drie varianten met koeling via het warmte-/koudenet hebben dezelfde investeringskosten, circa € 300.000 minder dan de basisvariant. De varianten met de restwarmte uit utiliteitsgebouwen hebben dezelfde kosten als de variant zonder de restwarmtebron. Want de minderkosten van de aquathermiebron voor de varianten met de restwarmte vanuit de utiliteitsgebouwen zijn gecompenseerd door de uitkoppelkosten van de restwarmtebron die meegerekend zijn in de kosten van wko-bron.

De meer- of minderkosten ten opzichte van de basisvariant zijn weergegeven in Figuur 12.

Figuur 12 - Additionele investeringskosten voor koeling van vier varianten ten opzichte van de basisvariant, namelijk zeerlagetemperatuurwarmtenet zonder koeling



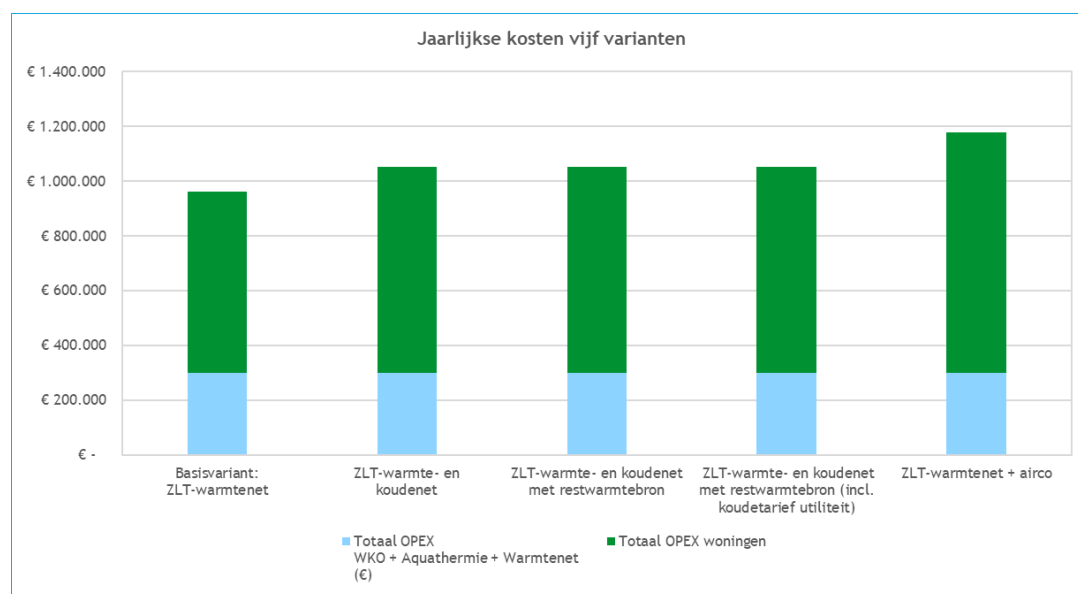
4.4.2 OPEX

De totale jaarlijkse kosten houden rekening met de onderhouds- en energiekosten van zowel het leidingtracé van wko, TEO en de WP-centrale als de aanpassingen in de woningen, met name de aircos en de warmtepompen. Hieronder volgen de aannames voor de OPEX-berekeningen:

- Elektriciteitsprijs voor de collectieve voorzieningen (bijvoorbeeld distributiepompen van de leidingtracés) en individuele voorzieningen (bijvoorbeeld warmtepompen in de woningen) wordt berekend met dezelfde elektriciteitsprijs zoals opgenomen in het WarmingUP-project.
- Warmte- en koudeprijzen zijn gelijkgetrokken en gebaseerd op de prijzen zoals opgenomen in het WarmingUP-project.
- Het warmtenetleidingtracé tussen het wko-systeem en de gebruiker is berekend met dezelfde kenmerken en kengetallen zoals die van het aquathermieleidingtracé. Alleen draaien de distributiepompen langer om de woningen te voorzien van koude uit de wko-bron.
- Voor het afgiftesysteem met betrekking tot de koeling in de woningen worden geen extra investeringskosten meegerekend ten opzichte van de woningaanpassingen voor de laagtemperatuurverwarming in de basisvariant.
- Extra kosten voor de restwarmtelevering, namelijk het restwarmtetarief, vanuit de utiliteitsgebouwen worden meegenomen als onderdeel van de OPEX-kosten van de bronnen in het voordeel van de warmte- en koudeleverancier. Dus het warmtebedrijf investeert in de uitkoppelkosten van de utiliteitsgebouwen, en de utiliteitsgebouwen betalen een tarief voor het leveren van de restwarmte, waarmee hun eigen wko-systeem wordt gebalanceerd.

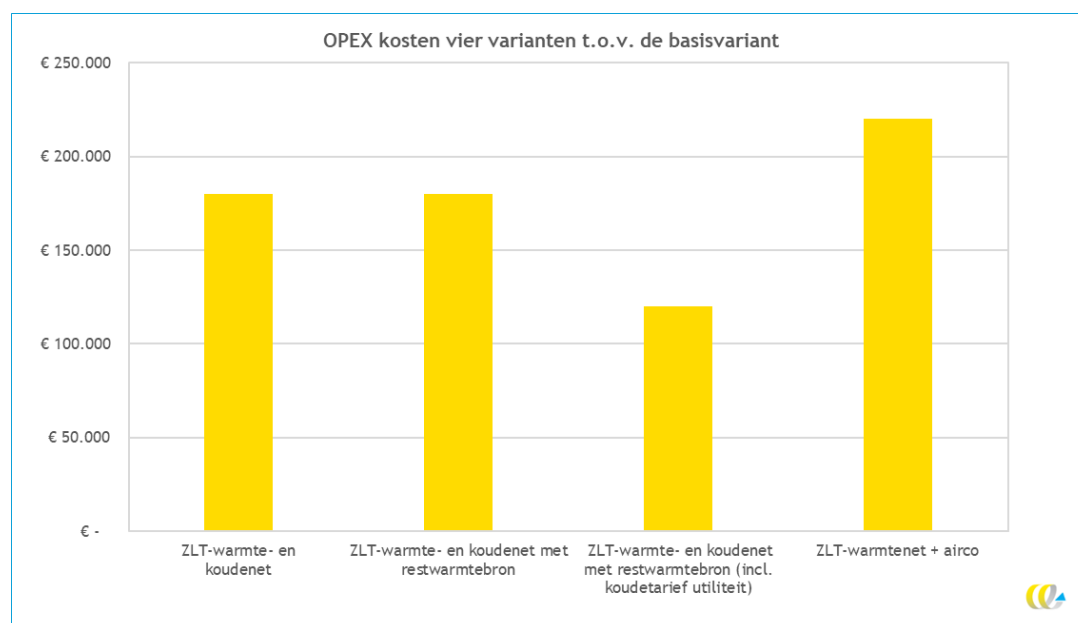
Zoals weergeven in Figuur 13, zijn de jaarlijkse kosten het hoogst voor de variant met airco's in de woningen. De koudenetconfiguraties hebben ook hogere jaarlijkse kosten ten opzichte van de basisvariant, vanwege de kosten van de koudelevering. Per woning zijn de jaarlijkse kosten dan ongeveer € 1.500.

Figuur 13 - OPEX - Jaarlijkse kosten (in euro's) voor vijf varianten



Figuur 14 laat de extra jaarlijkse kosten zien voor koeling in vier varianten ten opzichte van de basisvariant.

Figuur 14 - Additionele jaarlijkse kosten voor koeling van vier varianten ten opzichte van de basisvariant, namelijk zeerlagetemperatuurwarmtenet zonder koeling



4.4.3 Total Cost of Ownership (TCO) over 30 jaar

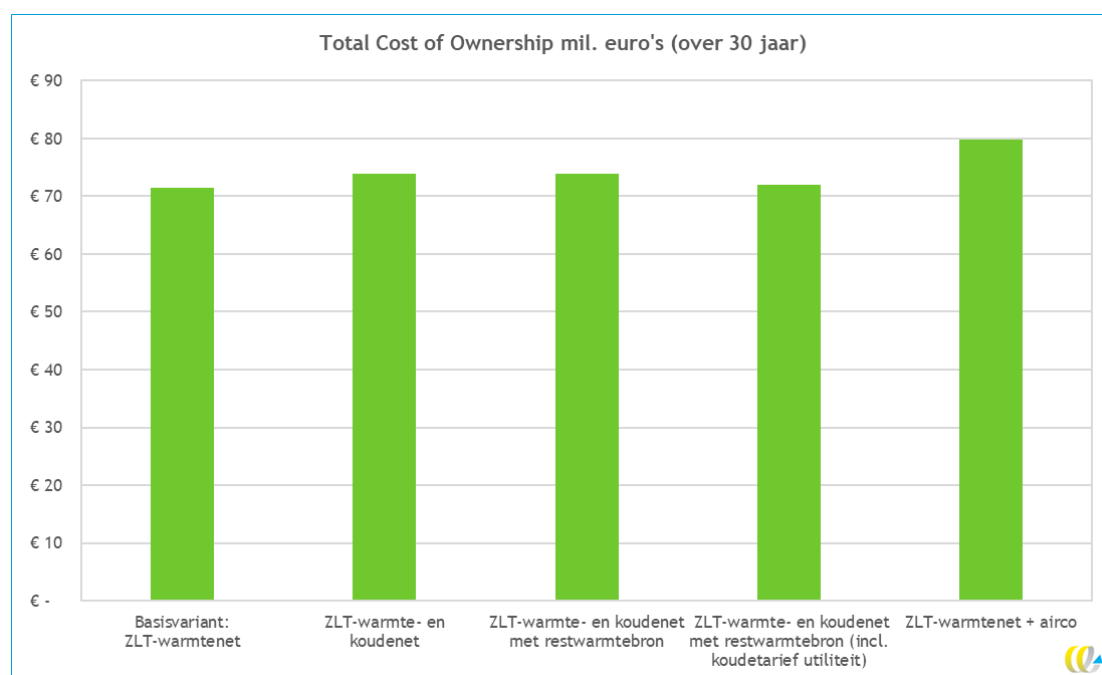
Total Cost of Ownership bevat alle investeringskosten van de configuraties, inclusief de jaarlijkse kosten over 30 jaar. Naast de CAPEX en OPEX berekenen wij ook de kosten voor restwarmtelevering over 30 jaar mee. Dit is echter een voorspelling en hier komen de energieprijsscenario's in beeld. Omwille van de consistentie met het WarminUP-project, hebben we in onze analyse een stabiele energieprijs voor de komende 30 jaar gebruikt, zoals berekend in de basisvariant.

In Figuur 15 zien we duidelijk dat de kosten voor de variant met airco's de hoogste zijn over 30 jaar. Dit heeft te maken met zowel de investeringskosten als de jaarlijkse kosten in de woningen. Aan de andere kant zien wij geen voordeel van het leveren van de restwarmte vanuit utiliteitsgebouwen als deze niet afgerekend is met een restwarmtetarief.

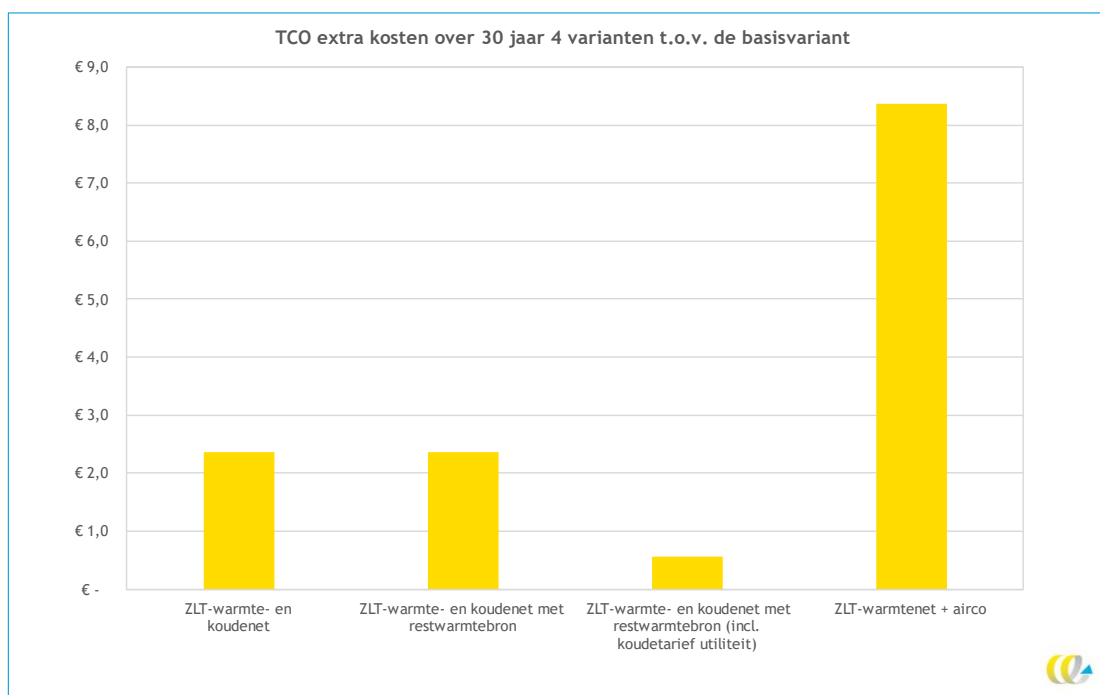
Gezien de extra kosten over 30 jaar in Figuur 16, blijkt onder de koudenetopties de configuratie met de restwarmte uit de utiliteitsgebouwen, waarbij met een restwarmtetarief gerekend is, de beste optie te zijn.

Zoals weergegeven in Figuur 17, zijn de kosten per GJ geleverde warmte en koude voordeliger bij alle varianten met koudelevering vanuit de wko-bron, terwijl de kostprijs de hoogste is van de variant met airco's.

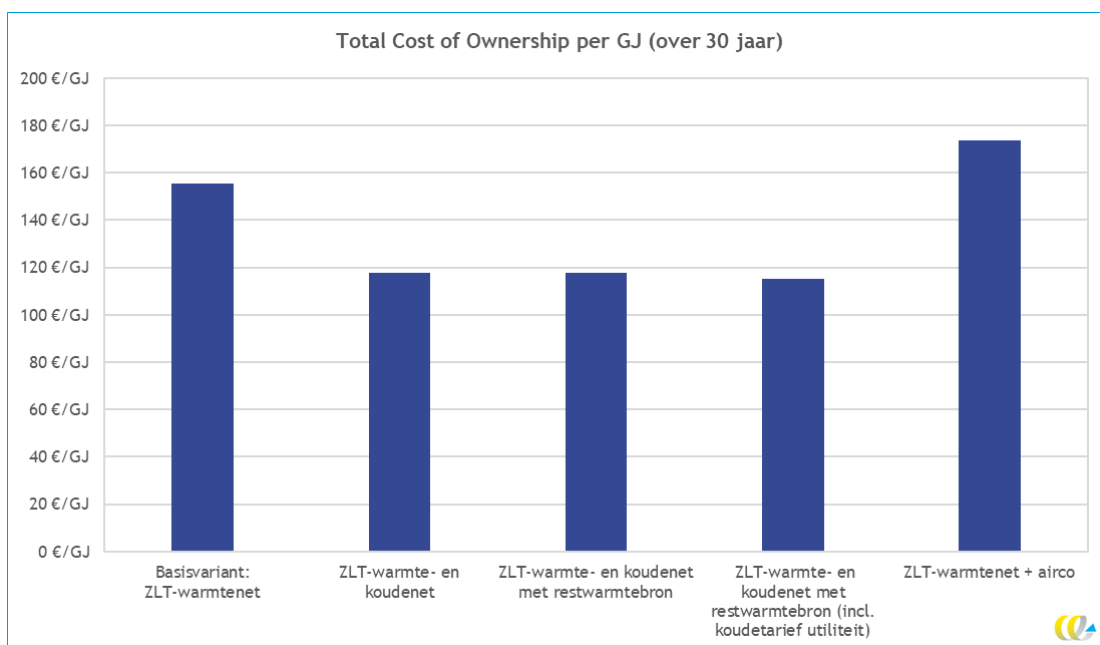
Figuur 15 - Total Cost of Ownership (TCO) over 30 jaar (miljoen €) van vijf varianten



Figuur 16 - Extra kosten over 30 jaar voor koeling van vier varianten ten opzichte van de basisvariant, namelijk zeerlagetemperatuurwarmtenet



Figuur 17 - Total Cost of Ownership (TCO) over 30 jaar (miljoen €) per GJ geleverde warmte en koude van vijf varianten



5 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie maken we inzichtelijk hoe de behoefte aan koeling door onder andere klimaatverandering toeneemt en wat de meerwaarde is van koeling via warmte- en koude-netten. De focus ligt hierbij op warmte-koudenetten met aquathermie en een wko.

5.1 Conclusies

Ontwikkeling koudevraag

- Door klimaatverandering, maar ook door andere factoren, zal de verhouding van warmte- en koudevraag in gebouwen de komende jaren sterk veranderen. In woningen zal de warmte- en koudevraag dichter bij elkaar komen liggen. Dit biedt meer mogelijkheden voor seizoenopslagsystemen die naast warmte ook koude kunnen leveren.
- In utiliteitsgebouwen zal in 2050 de koudevraag gemiddeld mogelijk boven de warmtevraag uitkomen. Er ontbreekt literatuur over de koeling van utiliteitsgebouwen, waardoor wij de impact van utiliteitsgebouwen op het warmtenet en de koudevraag niet volledig kunnen kwantificeren.

Vergelijking van configuraties voor koudelevering

- Bij een zeerlagetemperatuurwarmtenet zijn verschillende opties voor koeling mogelijk: zowel via het bronnet (waarbij restwarmte van utiliteit als extra bron gebruikt kan worden) als via airco's.
- De Total Cost of Ownership over 30 jaar van de opties met koudelevering zijn allemaal iets hoger dan een bronnet zonder koudelevering. De optie met airco's heeft de hoogste TCO: ongeveer 10% hoger dan bij koudelevering vanuit het bronnet.
- Als deze TCO over 30 jaar wordt gedeeld door de geleverde hoeveelheid warmte en koude, zijn de kosten van alle configuraties met koeling via een warmte- en koudenet ongeveer 30% lager ten opzichte van de kosten van koeling met airco's. Het waarderen van de geleverde GJ koude is dus belangrijk voor de businesscase van een systeem.
- Bijvoorbeeld: het inzetten van de restwarmtebron van utiliteitsgebouwen wordt in de bekeken cases financieel alleen interessant als een koudetarief verrekend wordt bij de utiliteitsgebouwen.
- Als de toekomstige koelvraag toeneemt zoals verwacht, wordt de businesscase voor koudenetconfiguraties met wko interessanter, omdat er minder additionele warmte nodig is om de wko-bron te balanceren. Daarmee kunnen kosten bespaard worden.
- Er moet rekening mee worden gehouden dat deze analyse uitgevoerd is voor een nieuwbouwwijk. Voor bestaande gebouwen zouden de aanpassingen voor zeerlagetemperatuurverwarming veel meer kosten en zou de TCO hoger uitkomen voor alle onderzochte configuraties. Om in bestaande bouw te kunnen koelen, zijn additionele aanpassingen nodig in het afgiftesysteem en de leidingen van het cv-systeem.

5.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Wij bevelen aan om in vervolgonderzoek de volgende aspecten te bestuderen:

- Om het beeld van koelbehoefte volledig in beeld te kunnen brengen, is verder onderzoek naar de impact van volgende aspecten op de koelbehoefte in gebouwen noodzakelijk:
 - verstedelijking (Urban Heat Island Effect);
 - bevolkingsgroei;
 - gewenning aan gekoelde ruimtes;
 - vergrijzing;
 - strengere eisen voor gebouwen.
- Diepgaande analyse van de koelbehoefte in utiliteitsgebouwen.
- De door TNO ontwikkelde en in onze analyse gebruikte profielen zijn een resultaat van statische analyses door vereenvoudigde modellen. Koelingsprofielen kunnen worden verifieerd en verbeterd met dynamische en realistischere modellen van gebouwen/gebieden.
- Voor het bepalen van de warmte- en koudevraag spelen ook andere factoren mee, zoals de milieu-impact van airco's op het vergroten van de hittestress in de stedelijke gebieden (het Urban Island effect). Dit vraagt een bredere en multidisciplinaire aanpak voor het in beeld brengen van de koelingsbehoefte in Nederland.

6 Literatuur

KNMI, 2014. *KNMI'14: klimaatscenario's voor Nederland*.

KNMI, 2017. *Klimaatbericht: Aantal koeldagen neemt sterk toe*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) 26 juli 2017 <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/aantal-koeldagen-neemt-sterk-toe>.

Merosch, 2020. *Isolatiepakketten ten behoeve van CEGOIA model*.

PBL, 2021. *Functioneel Ontwerp Vesta MAIS 5.0*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2022. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

W/E Adviseurs, 2018. *Ontwikkeling van koudevraag van woningen*, Utrecht; Eindhoven: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

WarmingUp, 2022. *Gedetailleerde kostenberekening aquathermie*.

A Bijlage

Kostenkentalen

Investeringskosten in €/m ² voor isolatiemaatregelen naar LT-niveau + nieuwbouw (30 kWh/m ²)						
Woningtype	T/m 1945	1946-1991	1992-2005	2006-huidig	Peiljaar	Bron
Vrijstaande woningen	503	611	317	64,5	2020	
Twee-onder-één-kap	332	451	300	50	2020	
Rij	304	379	252	53	2020	
Gestapelde woningen	341	371	244	67	2020	

Investeringskosten in €/m ² voor isolatiemaatregelen naar LT-niveau + NOM ready (50 kWh/m ²)						
Woningtype	T/m 1945	1946-1991	1992-2005	2006-huidig	Peiljaar	Bron
Vrijstaande woningen	357,5	263,5	175,5	26	2020	
Twee-onder-één-kap	277	189,5	161,5	26	2020	
Rij	252	182,5	136	26,5	2020	
Gestapelde woningen	261	151	121,5	28,5	2020	

Betreft	Specificatie	Waarde excl. btw	Waarde incl. btw	Eenheid	Prijs- peiljaar	Bron
Bodemwarmtepomp	Investering	15.527	18.788	€/woning	2021	CE Delft 2022 Installaties Vesta MAIS
Bodemwarmtepomp	Onderhoud	1%	188	%/jaar		CE Delft 2022 Installaties Vesta MAIS
Bodemwarmtepomp	Afschrijvings- termijn	15		jaar		CE Delft 2022 Installaties Vesta MAIS
Luchtwarmtepomp	Rendement KD	300		%		CE Delft 2022 Installaties Vesta MAIS
Luchtwarmtepomp	Aandeel volume basislast	40		%		CE Delft 2022 Installaties Vesta MAIS
LT-verwarming	Installatiekosten		35	€/m ²	2020	Isolatiepakketten t.b.v. CEGOIA-model
Kosten platenwisselaar (100 m ³ /h)	Installatiekosten		21.000	€		WarmingUP, 2021, Aquathermie configuraties
Uitkoppelingskosten	Voor restwarmte		250	€/kW		Aanname CEGOIA-model
Restwarmtelevering	Voor restwarmte		10	€/GJ		Aanname Deltares
Aansluiting warmtenet gestapeld (BAK)	Aansluitkosten		4.066	€/woning	2020	CE Delft 210191 Factsheet ORT warmtenetten
Aansluiting warmtenet grondgebonden (BAK)	Aansluitkosten		8.006	€/woning	2020	CE Delft 210191 Factsheet ORT warmtenetten
Gestapeld: bouwkundige kosten voor herstel tuin, sparingen en mantelbuizen	Investering		2.200	€/woning	2021	CE Delft 210347 Vesta MAIS update warmtenetten
Grondgebonden: bouwkundige kosten voor herstel tuin, sparingen en mantelbuizen	Investering		2.900	€/woning	2021	CE Delft 210347 Vesta MAIS update warmtenetten
Gestapeld: installatietechnische en bouwkundige in pandige distributiekosten	Investering		1.450	€/woning	2021	CE Delft 210347 Vesta MAIS update warmtenetten
Grondgebonden: installatietechnische en bouwkundige in pandige distributiekosten	Investering		2.450	€/woning	2021	CE Delft 210347 Vesta MAIS update warmtenetten
Onderstation	Investering		127	€/kW	2021	CE Delft 210347 Vesta MAIS update warmtenetten