

## Technisch Handboek Koele Warmtenetten

D1.1 & D1.3



Toelichting:	Dit rapport is onderdeel van het KoWaNet project, dat werd uitgevoerd tussen 1 januari 2018 en 31 december 2020. Voor een totaaloverzicht zie <a href="http://www.KoWaNet.nl">www.KoWaNet.nl</a>
Consortium partners:	EnergyGO (pervoerder), TU Delft, faculteit Bouwkunde (Werkpakketleider WP1) Stichting Stadslab Buiksloterham Mijnwater BV, vertegenwoordigd door Tri-Es Consultancy BV
Rapportnummer:	Deliverable D1.1 & D1.3
Datum:	Maart 2021
Versie:	1.1
Auteurs:	Sabine Jansen (TU Delft - faculteit Bouwkunde) René Verhoeven (Tri-Es BV) Marcel Elswijk (EnergyGO)
Met bijdragen van:	Bart Roossien (EnergyGO) Herman Eijdemans ( Tri-Es BV) Leo Gommans, Saleh Mohammadi en Paula van den Brom (TU Delft - faculteit Bouwkunde)
Contact:	<a href="http://www.KoWaNet.nl">www.KoWaNet.nl</a>
Acknowledgement:	Uitvoering met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken (TEUE117033)
Foto voorpagina:	Maankwartier, Heerlen, ontworpen door Michel Huisman 50.000m <sup>2</sup> wonen en utiliteit, verwarmd en gekoeld met MijnWater 5 <sup>e</sup> generatie warmtenet (KoWaNet). (foto: Sabine Jansen)
Illustraties:	Tenzij anders vermeld, zijn alle illustraties in dit document gemaakt door de TUDelft, op basis van de samenwerking met de consortiumpartners.



# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	4
Inleiding .....	7
1 Definities & begrippen .....	8
1.1 Indeling van warmtenetten in generaties.....	8
1.2 Definitie van een 5 <sup>e</sup> generatie ofwel 'koel warmtenet' .....	9
1.3 Definitie temperatuurniveaus van warmtenetten .....	10
1.4 Overige definities en begrippen .....	12
1.4.1 Keten energielevering: netto behoefte, finaal gebruik, primair gebruik ..	12
1.4.2 Lokaal energiesysteem.....	13
1.4.3 Uitwisseling .....	13
1.4.4 Exergie .....	13
2 Verkenning van configuraties o.b.v. temperatuurniveaus .....	15
2.1 Inleiding.....	15
2.2 Temperatuurniveaus.....	15
2.2.1 Temperatuur van de vraag: benodigde afgifte temperatuur .....	15
2.2.2 Temperatuur van (rest)warmtebronnen.....	17
2.2.3 Temperatuur verschil tussen warme en koude leiding.....	18
2.3 Bekende configuratie opties per temperatuurniveau.....	19
2.3.1 Direct (passief) koelen en actief verwarmen   2-pijps.....	19
2.3.2 Actief koelen en direct (passief) verwarmen   2-pijps.....	21
2.3.3 Actief koelen en actief verwarmen   2-pijps .....	22
2.3.4 Direct (passief) en actief koelen en verwarmen   3 pijps.....	23
2.3.5 Passief koelen en passief verwarmen   4-pijps .....	24
2.4 Discussie en conclusies m.b.t temperatuurniveaus.....	24
3 Beschrijving KoWaNet Concept .....	26
3.1 Basis KoWaNet configuratie .....	26
3.1.1 Inleiding en toelichting .....	26
3.1.2 Eigenschappen .....	26
3.1.3 Flexibiliteit met een slimme warmtepomp regeling.....	27
3.1.4 De regeling van het totaalsysteem.....	29
3.1.5 Schaalniveaus .....	29
3.1.6 De decentrale energiecentrale en keuze voor de locatie.....	30
3.2 Vereenvoudigde KoWaNet varianten .....	32
3.2.1 Vereenvoudiging 1: ZLT net (<30°C) .....	32
3.2.2 Vereenvoudiging 2: omgevingstemperatuur (~12°C) .....	33
3.3 Vergelijking met warmtenetten op hogere temperatuur.....	33
3.3.1 Opwaarderen van (Z)LT bronnen met een collectieve warmtepomp .....	34
3.3.2 Voor- en nadelen van KoWaNetten versus hogere temperatuur warmtenetten met centrale opwekking.....	36
3.4 Samenvatting technische beschrijving KoWaNet.....	38
4 Stappenplan.....	39
4.1 Overzicht .....	39
4.2 Stap 1: Verzamelen projectinformatie .....	40
4.2.1 Voorbeeld projectinformatie .....	41
4.3 Stap 2: Warmte- en koudebehoefte, piekvermogen en warmtebalans .....	42
4.3.1 Inschatten warmte- en koudevraag en piekvermogen .....	42
4.3.2 Benodigde afgifte temperatuur .....	43

4.3.3	Warmtebalans en uitwisseling .....	44
4.3.4	Voorbeeld van een balans van warmte- en koudevraag .....	44
4.4	Stap 3: Potentieel warmte- en koude-aanbod .....	45
4.4.1	Voorbeeld van een inventarisatie van energiepotenties.....	46
4.5	Stap 4: Samenstellen van potentiële technische configuraties .....	47
4.5.1	Geografische weergave .....	47
4.5.2	Schematische ruimtelijke weergave .....	47
4.5.3	Principe schema's KoWaNet varianten .....	48
4.5.4	Mogelijke andere varianten op basis van (Z)LT bronnen .....	49
4.5.5	Voorbeeld 1: schematische weergave Mijnwater .....	50
4.5.6	Voorbeeld 2: project met voornamelijk decentrale ZLT warmtebronnen.	52
4.6	Stap 5: Schetsontwerp grofweg dimensioneren .....	53
4.6.1	Benodigde capaciteit van het warmtenet .....	53
4.6.2	Tracé ontwerp .....	54
4.6.3	Leidingdiameters en leidinglengtes .....	55
4.6.4	Decentrale, bi-directionele pompen.....	55
4.7	Stap 6: Inschatten energieprestatie.....	56
4.7.1	Overzicht.....	56
4.8	Stap 7: Keuze systeem en uitwerking .....	58
5	Bijlagen: Kentallen & achtergrondinformatie.....	59
5.1	Kentallen netto warmte- en koudebehoefte en piekvermogen .....	59
5.1.1	Kentallen woningen .....	59
5.1.2	Achtergrondinformatie t.b.v. methode inschatting kentallen woningen ..	61
5.1.3	Kentallen utiliteit.....	64
5.2	Energiepotenties zon en water (aquathermie) .....	65
5.2.1	PV panelen .....	65
5.2.2	Zonnecollectoren .....	65
5.2.3	PVT panelen.....	67
5.2.4	TEO: Thermische energie uit oppervlaktewater.....	68
5.2.5	TEA-1: Thermische energie uit Rioolwater-zuiveringsinstallaties (RWZI) 69	
5.2.6	TEA-2: Thermische energie uit rioolwater via rioolbuizen en riolgemalen..	70
5.2.7	TED: Thermische energie uit drinkwater .....	70
5.3	Thermische energie uit koeling.....	70
5.3.1	Thermische energie uit koeling van datacenters .....	70
5.3.2	Thermische energie uit productkoeling in supermarkten .....	71
5.4	Inschatting systeem energieprestaties .....	72
5.4.1	Toelichting systeemoverzicht KoWaNet 'systeem energieprestatie' tool..	72
5.4.2	Inschatting warmtepomp efficiënties (COP's) .....	72
5.4.3	Vereenvoudigde inschatting leidingdiameters .....	78
5.4.4	Distributieverliezen warmtenetten .....	79
5.4.5	Stilstandsverliezen boilers .....	83
5.4.6	Pompenenergie.....	84
5.5	Overige bijlagen.....	85
5.5.1	Indeling temperatuurniveaus warmtenetten volgens ECW.....	85
6	Literatuur .....	86



# Inleiding

Voor duurzame en aardgasvrije warmtelevering in de gebouwde omgeving zijn er verschillende alternatieven. Een 'Koel WarmteNet' (KoWaNet of energie uitwisselnet) is een oplossing waarbij zowel warmte als koude wordt geleverd via een 'koel' warmtenet, een thermisch net met een (zeer) lage temperatuur. Hierbij is gelijktijdige levering van koeling en verwarming mogelijk aan de aangesloten gebouwen, waardoor in feite warmte wordt 'uitgewisseld': De warmtevragers leveren 'koude' terug aan het net, die weer door vragers van koude, zoals bijvoorbeeld een datacenter of supermarkt, ingezet wordt voor koeling. Zij leveren op hun beurt weer warmte terug. Deze uitwisseling, in combinatie met opslagtechnieken, minimaliseert de behoefte aan externe benodigde energie, zowel warmte als elektriciteit. Een koel warmtenet kan worden (bij)gevoed met laagtemperatuurbronnen zoals zonnewarmte (bijvoorbeeld zonnecollectoren of PVT), aquathermie (i.c.m. opslag), en (ondiepe) geothermie.

Koele warmtenetten gaan uit van de volgende ontwerpprincipes:

- Maximale uitwisseling in het netwerk van warmtevraag (=koudeaanbod) en koudevraag (=warmteaanbod)
- Gebruik van laagwaardige duurzame bronnen voor de laagwaardige vraag
- Het decentraal produceren van de gewenste temperatuur, aan het einde van de keten en wanneer het nodig is
- Integrale benadering van de verschillende energie domeinen warmte, koude en elektriciteit
- Gebruik van lokale duurzame bronnen

Het TKI project KoWaNet heeft voor degene die koele warmtenetten wil initiëren en uiteindelijk wil beheren aanvullende technische, financiële en organisatorische informatie samengesteld.

Dit document beschrijft de resultaten van werkpakket 1: Het technisch ontwerp. Het beschrijft ook de overwegingen en varianten die zijn verkend om tot de gewenste eigenschappen voor een KoWaNet te komen.

Hoofdstuk 1 geeft een overzicht van de relevante definities en begrippen. Hoofdstuk 2 inventariseert en verkent de mogelijke configuraties o.b.v. benodigde afgiftetemperatuur en temperatuurniveaus van het warmtenet. Dit hoofdstuk vormt de basis voor de eigenschappen voor het KoWaNet concept, dat wordt beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft een stappenplan om voor een bepaald gebied een geschikte configuratie te ontwikkelen, uitgaande van uitwisseling en gebruik van lokale bronnen. Tot slot zijn in hoofdstuk 5 verschillende kentallen, achtergronden en richtlijnen voor het inschatten van energieprestaties te vinden.

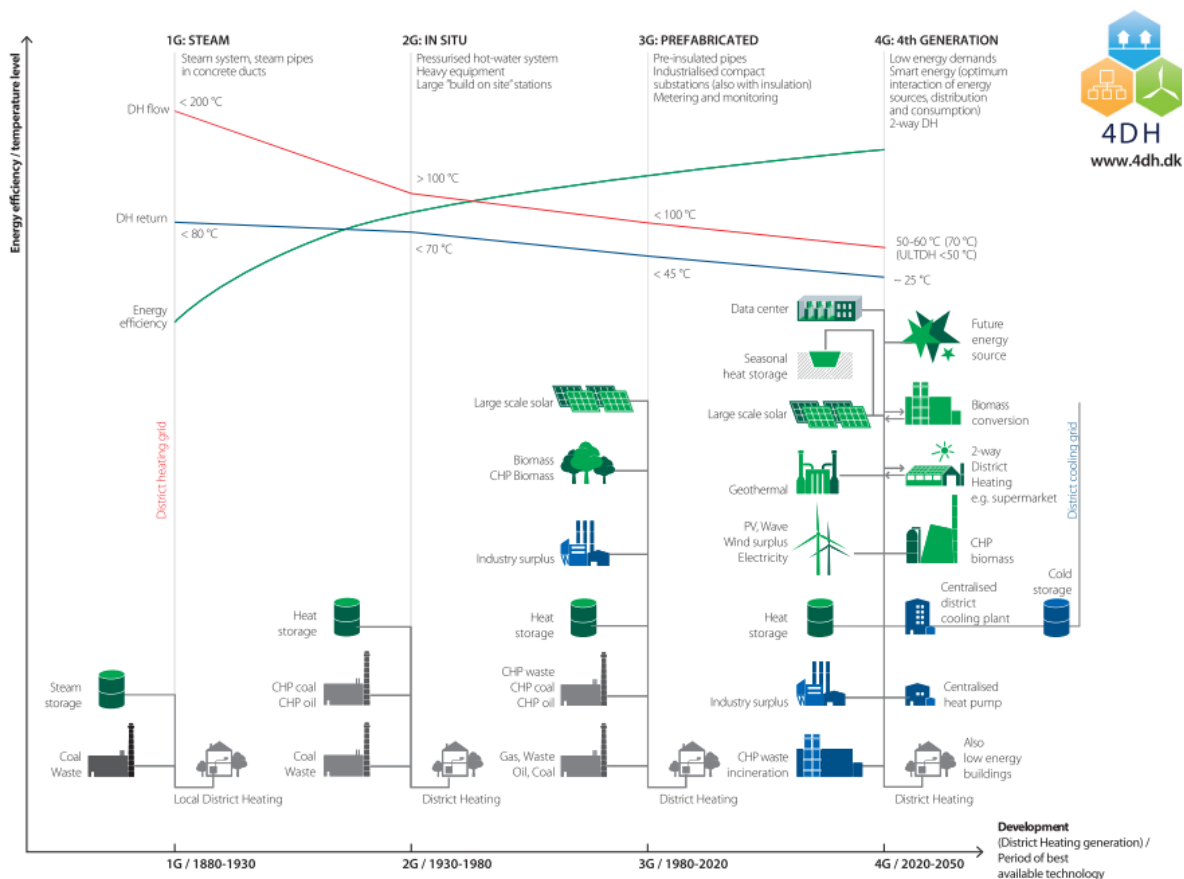
Bij dit handboek horen enkele Excel tools, die online via [www.kowanet.nl](http://www.kowanet.nl) beschikbaar zijn. In het stappenplan van Hoofdstuk 4 wordt naar deze tools verwezen.

# 1 Definities & begrippen

## 1.1 Indeling van warmtenetten in generaties

Traditioneel leveren warmtenetten hoge temperatuur warmte of zelfs stoom. In de publicatie "4th Generation District Heating (4GDH)" van Lund et al. (2014) worden verschillende 'generaties' warmtelevering besproken, waarbij zowel de temperatuur van de warmtenetten als de bronnen een rol spelen.

Zoals te zien is in Figuur 1 eindigt het overzicht van Lund et al. bij een 4<sup>e</sup> generatie warmtenet, waarbij temperaturen onder 70 °C worden genoemd en waarbij in de visie van Lund ook sprake is van uitwisseling, gebruik van lagere temperaturen en decentrale warmtebronnen. De 4<sup>e</sup> generatie warmtenetten zijn er echter nog primair gebaseerd op centrale warmteopwekking en levering van MT warmte, waaraan met name grootschalige decentrale MT-restwarmte wordt toegevoegd, zoals warmte van afvalverbrandingscentrales of geothermie. Tevens werken 4<sup>e</sup> generatienetwerken met een apart koudenet indien van toepassing. Er is geen sprake van uitwisseling van retour warmte en koude op LT niveau.



Figuur 1: Ontwikkeling van generaties warmtenetten in de afgelopen jaren (Lund et al. 2018)

Meest recent zijn de ontwikkelingen van 5<sup>e</sup> generatie warmte/koude-netwerken (5GDHC) (Boesten et al. 2019), waarbij het gelijktijdig leveren van koude en warmte en het uitwisselen van (rest-) warmte en koude een basisuitgangspunt is. Een groot verschil



tussen een 4<sup>e</sup> en 5<sup>e</sup> generatie warmtenet is dat bij een 4<sup>e</sup> generatie warmtenet de warmte centraal wordt opgewaardeerd tot de benodigde temperatuur, terwijl bij een 5<sup>e</sup> generatie er sprake is van decentrale opwekking bij de gebruiker. Hierdoor kan bij een 5<sup>e</sup> generatie warmtenet de retour warmte en koude worden uitgewisseld op een ZLT niveau, en kunnen ook alle bronnen vanaf dit temperatuurniveau worden benut. Dit is ook goed beschreven in Boesten et al. (2019): 'the network is balanced over the year, with warm flows from cooling supply and cold return flows from heating supply covering as much of the demand as possible. Any residual heat demand is supplied using renewable sources'.

## 1.2 Definitie van een 5<sup>e</sup> generatie ofwel 'koel warmtenet'

De definitie van een 5GDHC komt overeenkomt met de definitie van een KoWaNet. Een KoWaNet is dus een 5<sup>e</sup> generatie warmte/koudenet.

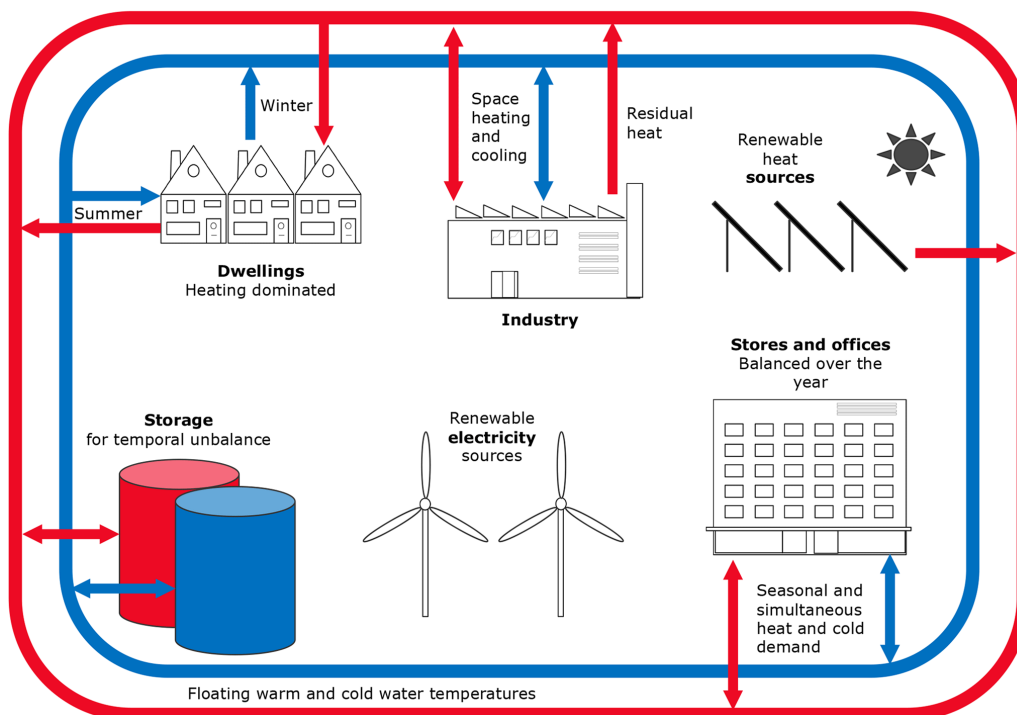
Een 'KoWaNet' (koel warmtenet) is een bi-directioneel 2-pijps thermisch netwerk met temperaturen < 50 °C, vaak grotendeels onder de 30 °C. Met deze netten kan tegelijk gekoeld en verwarmd worden, waardoor maximale uitwisseling tussen teruggeleverde koude en warmte van verschillende gebouwfuncties plaats vindt.

Anders dan bij een traditioneel warmtenet, heeft het 'KoWaNet' geen gedefinieerde toevoer- en een retourleiding, maar een gedefinieerde warme en koude leiding, waarbij zowel de warme als de koude leiding van het net als toevoer of retour kan worden gebruikt, afhankelijk van de vraag. Aan deze warme en koude leidingen zijn decentrale energiecentrales gekoppeld, die de temperatuur naar het juiste niveau opwaarden.

Bij een KoWaNet wordt warmte en koude maximaal uitgewisseld: De warmtevragers leveren 'koude' terug aan het net, die weer door vragers van koude, zoals bijvoorbeeld een datacenter of supermarkt, ingezet wordt voor koeling. Zij leveren op hun beurt weer warmte terug. Deze uitwisseling, in combinatie met opslagtechnieken, minimaliseert de behoefte aan externe benodigde energie, zowel warmte als elektriciteit. Een koel warmtenet kan worden (bij)gevoed met lage temperatuur restwarmte of met lagetemperatuurbronnen zoals zonnewarmte (bijvoorbeeld zonnecollectoren of PVT), aquathermie (i.c.m. opslag), en (ondiepe) geothermie.

In Figuur 2 is een schematische weergave van een 5<sup>e</sup> generatie netwerk (5GDHC) weergegeven. In deze figuur geldt: Bij gelijktijdige koel- en warmtevraag van een gebouw of aansluiting, zal de energiecentrale van dit gebouw zorgen voor de uitwisseling tussen koude- retour en warmtevraag binnen het gebouw; er is dus altijd sprake van netto warmte- óf koudelevering door het netwerk aan de decentrale energiecentrale.

De in deze definitie beschreven eigenschappen worden toegelicht in hoofdstuk 3.



Figuur 2: Representatie van een 5e generatie netwerk (5GDHC), (Boesten et al. 2019).

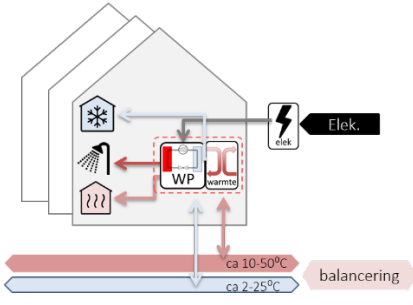
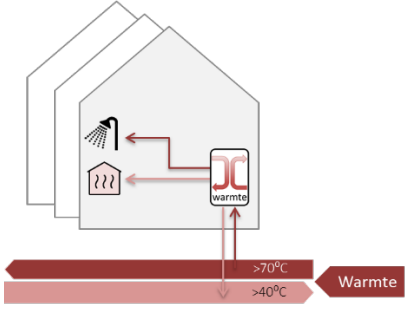
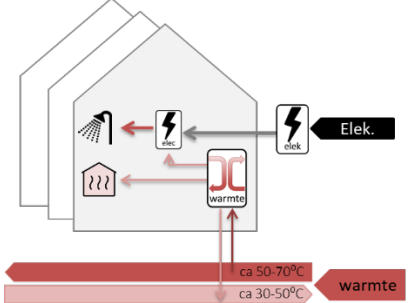
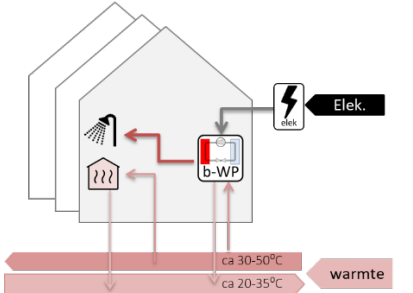
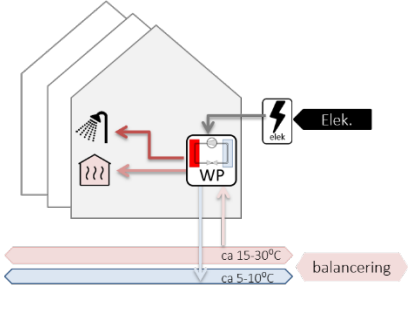
### 1.3 Definitie temperatuurniveaus van warmtenetten

Vaak wordt gesproken over 'Hoge Temperatuur (HT), Midden Temperatuur (MT), Lage Temperatuur (LT) en Zeer Lage Temperatuur (ZLT)' warmtenetten. Deze temperatuurcategorieën komen niet één op één overeen met de warmtenet generaties zoals hiervoor beschreven, omdat er binnen een generatie warmtenetten nog een grote spreiding van temperatuurniveaus mogelijk is. Daarnaast bedoelen verschillende stakeholders of auteurs vaak verschillende temperaturen met bovenstaande namen.

Ook internationaal worden verschillende indelingen voor de genoemde categorieën beschreven, zoals bijvoorbeeld binnen de IEA annex 47 'Heat Pumps in District Heating and Cooling systems' (Geyer et al., 2019). Bij deze indeling wordt een onderscheid gemaakt tussen 'low' (<math><80^{\circ}\text{C}</math>), 'very low' (<math><60^{\circ}\text{C}</math>), 'ultra low' (<math><45^{\circ}\text{C}</math>) en thermal grids (<math><28^{\circ}\text{C}</math>).

De in Nederland inmiddels gangbare definities<sup>1</sup> voor temperatuurniveaus zijn ingedeeld op basis van de vraag of met de geleverde temperatuur direct ruimteverwarming en/of tapwater kan worden geleverd of dat hier een aanvullende voorziening zoals bijvoorbeeld een (booster) warmtepomp nodig is. Binnen KoWaNet is gekozen aan te sluiten bij de in Nederland gangbare definities. In Figuur 3 is een overzicht van deze indeling getoond. Het KoWaNet schema is hier aan toegevoegd; dit wordt verder toegelicht in de komende hoofdstukken.

<sup>1</sup> Deze definities worden o.a. gehanteerd door het Expertise Centrum Warmte ([www.expertisecentrumwarmte.nl](http://www.expertisecentrumwarmte.nl)) en de Topsector energie ([www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmtenetten](http://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmtenetten))

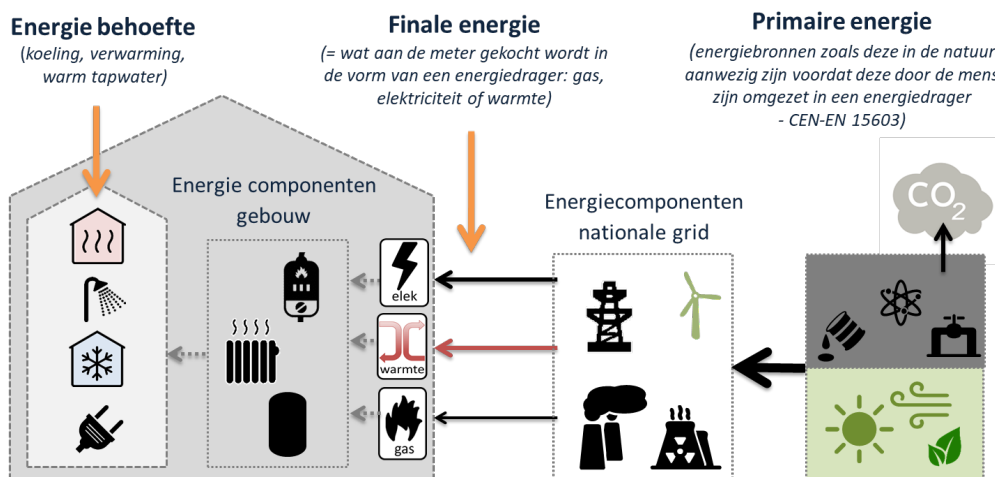
<b>KoWaNet</b>		<p>Warme leiding ca 10-50°C Koude leiding ca 2-25°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bidirectioneel warmtenet</li> <li>- Flexibele temperatuur in de leidingen. De juiste temperatuur wordt verkregen door decentrale energiecentrales met warmtepomp(en).</li> </ul>
<b>HT warmtenet (Hoge Temperatuur)</b>		<p>Warme leiding &gt; ca 75°C Koude leiding &gt; ca 40°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zowel ruimteverwarming als tapwater wordt direct uit het net geleverd</li> <li>- Ook mogelijk bij matig tot slecht geïsoleerde woningen.</li> </ul>
<b>MT warmtenet (Midden Temperatuur)</b>		<p>Warme leiding ca 55-75°C Koude leiding ca 30-50°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruimteverwarming wordt direct uit het net geleverd</li> <li>- Bij temperaturen &lt; 65°C naverwarming van tapwater nodig, bijvoorbeeld met E-booster.</li> <li>- Mogelijk bij matig geïsoleerde woningenge isolatie nodig</li> </ul>
<b>LT warmtenet (Lage Temperatuur)</b>		<p>Warme leiding ca 30-55°C Koude leiding ca 20-35°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruimteverwarming wordt direct uit het net geleverd</li> <li>- Extra oplossing voor tapwater nodig (bijv. booster warmtepomp)</li> <li>- LT afgiftesysteem</li> <li>- Goed tot zeer goed geïsoleerde woningen</li> </ul>
<b>ZLT net (Zeer-Lage Temperatuur) of bronnet</b>		<p>Warme leiding ca 15-30°C Koude leiding ca 5-15°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geen directe warmtelevering; Zowel ruimteverwarming als tapwater met een warmtepomp op gebouwniveau</li> <li>- Passieve koeling mogelijk</li> <li>- LT afgiftesysteem, mede afhankelijk van de isolatiegraad van de woningen</li> </ul>

Figuur 3: Definitie temperatuurniveaus warmtenetten zoals gangbaar in Nederland. De gehanteerde temperatuurgrenzen kunnen iets afwijken maar de functionele indeling is gelijk. Het KoWaNet schema is hier aan toegevoegd; dit is verder toegelicht in dit handboek, met name in Hst 3.

## 1.4 Overige definities en begrippen

### 1.4.1 Keten energielevering: netto behoefte, finaal gebruik, primair gebruik

De keten voor de energielevering in de gebouwde omgeving is opgesplitst in verschillende niveaus: energiebehoefte (netto energievraag), finale energie en primaire energie. Deze energieketen is weergegeven in Figuur 4. Wanneer het energieverbruik van een bepaald gebouw of wijk wordt genoemd, dan is het noodzakelijk te benoemen over welke categorie energie het gaat: energiebehoefte, finale energie of primaire energie.



Figuur 4: Keten energielevering: netto energievraag, finale- en primaire energie

De energiebehoefte voor verwarming of koeling wordt in de Europese norm voor energieprestaties van gebouwen (EN / ISO 13790 2008) gedefinieerd als 'the heat to be delivered to, or extracted from, a conditioned space to maintain the intended temperature conditions during a given period of time'. De netto behoefte aan warmte en koude hangt dus af van de gebouwkenmerken (o.a. isolatie), de gebruikers (gewenste binnentemperatuur en hoeveelheid ventilatie), en het klimaat.

De netto energiebehoefte is niet afhankelijk van de gekozen installatie (bijvoorbeeld een ketel of een warmtepomp). Wanneer verschillende energiesystemen worden vergeleken, is het dus belangrijk te beginnen met de netto warmte- en koudebehoefte, omdat dit alleen van de woningen- en gebruikerskenmerken afhangt en niet van de installatie.

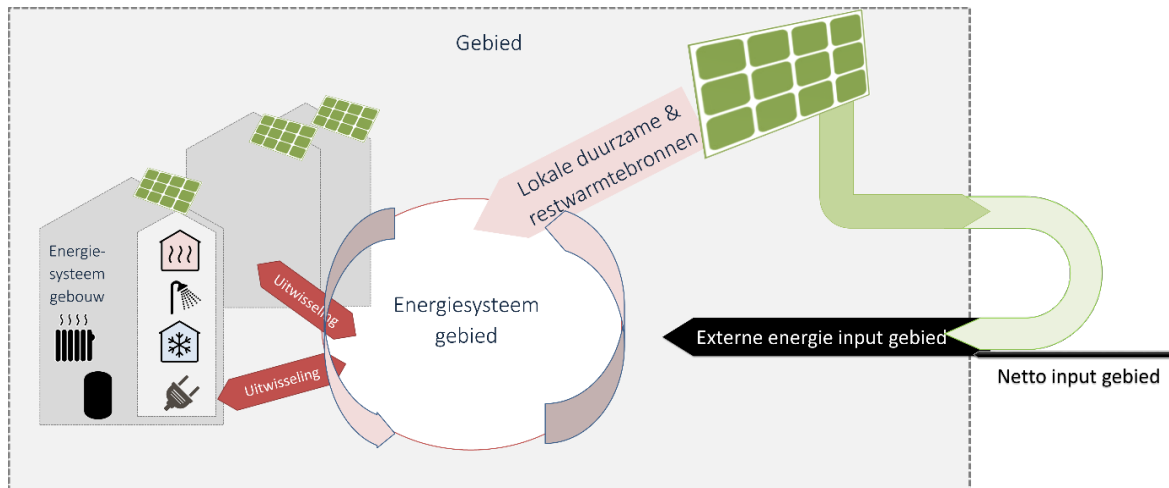
Finale energie ofwel 'energie op de meter' is de energie in de vorm van een energiedrager (gas, elektriciteit of warmte) die gebruikt wordt aan de verbruikerszijde van de meter; het wordt door Eurostat gedefinieerd als 'de energie die door eindgebruikers wordt verbruikt', waarbij eindgebruikers bijvoorbeeld huishoudens zijn.

Primaire energie is energie die niet aan een conversie- of transformatieproces is onderworpen. Dit is energie zoals die in te natuur aanwezig is, zoals zon, wind, en ook aardgas en olie. De primaire energie bevat in principe zowel fossiele als hernieuwbare bronnen. In sommige gevallen wordt echter alleen naar de fossiele primaire energie gekeken. Ten behoeve van de BENG indicatoren (BENG 2) wordt bijvoorbeeld alleen naar de fossiele primaire energie gekeken<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels/nieuwbouw/energieprestatie-beng/beng-gebouwtype/beng-criteria/beng-2-primair-fossiel>

### 1.4.2 Lokaal energiesysteem

In de huidige gecentraliseerde energiesystemen wordt de finale energie geleverd aan de gebouwen, en deze wordt opgewekt op nationale schaal. Bij traditionele warmtenetten is er vaak sprake van een grootschalige centrale bron in een gebied, zoals de restwarmte of aftapwarmte van een elektriciteitscentrale. Bij koele warmtenetten is er echter vaak sprake van een lokaal systeem met kleinschaliger bronnen en met lokale uitwisseling. Hierdoor is er minimale energie input van buiten het gebied nodig.



Figuur 5: lokaal energiesysteem met uitwisseling en lokale bronnen

### 1.4.3 Uitwisseling

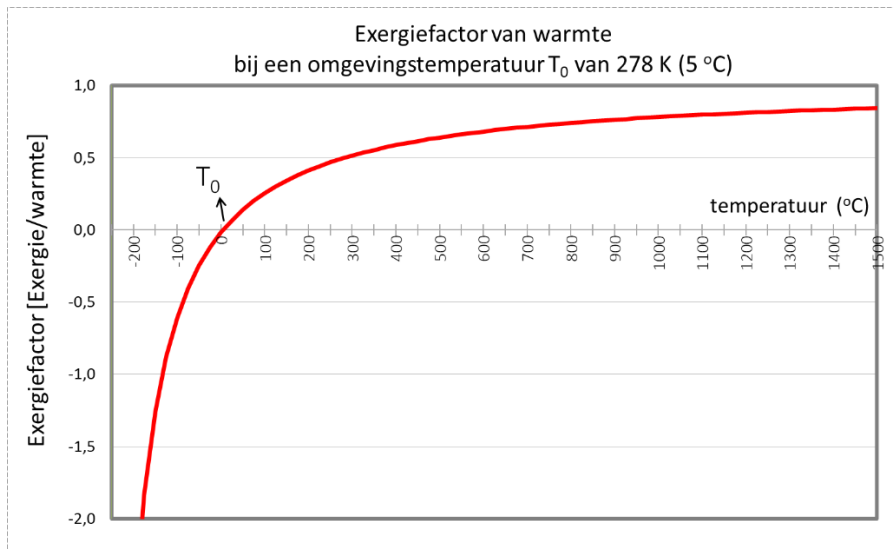
Een warmtevraag is een koude-aanbod, en andersom. In principe is een warmte- en koudebehoefte tegen elkaar weg te strepen. Vaak is de tussenkomst van een warmtepomp wel noodzakelijk, omdat de warmte die wordt geproduceerd bij het leveren van koude niet vanzelf op de juiste temperatuur beschikbaar is. Maar zodra de warmte die wordt geproduceerd bij het leveren van koude wordt benut (en andersom: de koude wordt benut die ontstaat bij het leveren van warmte), wordt gesproken over uitwisseling.

De mate van uitwisseling is een belangrijke graadmeter. Als in een gebouw of cluster gebouwen een hoge mate van directe uitwisseling is, betekent dit dat er weinig externe warmte of koude toegevoegd hoeft te worden.

### 1.4.4 Exergie

Exergie is de potentie van een bepaalde vorm van energie om arbeid te verrichten. Het wordt ook wel omschreven als 'de kwaliteit van energie'. Terwijl energie nooit verloren gaat (1<sup>e</sup> hoofdwet van de thermodynamica), gaat bij elke energie omzetting wel exergie verloren (2<sup>e</sup> hoofdwet).

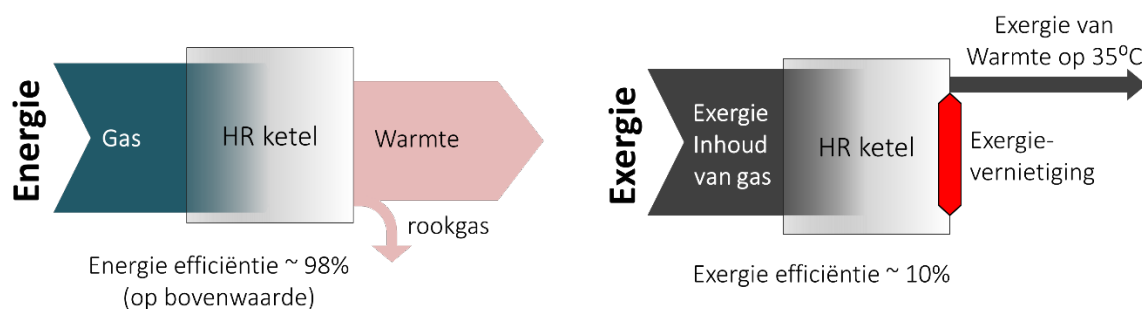
De exergiefactor van een energievorm is gedefinieerd als de exergie-inhoud van de energie (dus: het potentieel om arbeid te verrichten met deze energie) gedeeld door de energie inhoud:  $\text{Exergiefactor} = \text{exergie/energie}$ . De exergiefactor van warmte hangt af van de temperatuur van de warmte én de temperatuur van de omgeving. Dit is weergegeven in Figuur 6. De exergiefactor van brandstoffen is ongeveer 1, en de exergiefactor van elektriciteit is precies 1: elektriciteit kan theoretisch volledig in arbeid worden omgezet. Bronnen met een lage exergiefactor worden ook wel 'laagwaardige energiebronnen' genoemd, en bronnen met een hoge exergiefactor 'hoogwaardige energiebronnen'.



Figuur 6: Exergiefactor van warmte (en koude) bij een omgevingstemperatuur van 5°C. (Voor een toelichting over de exergie van koude zie Jansen en Woudstra, 2010.)

Warmtebronnen met temperaturen ver boven of ver onder de omgevingstemperatuur hebben meer exergie dan warmtebronnen met een temperatuur dichtbij de omgevingstemperatuur. De warmte- en koudevraag in de gebouwde omgeving heeft dus een zeer lage exergiefactor. Dit betekent ook dat er in principe weinig hoogwaardige energie voor nodig is om deze te produceren.

Het mengen van verschillende temperaturen (kwaliteiten) of het verlagen van de kwaliteit ofwel het (potentiële) temperatuurniveau (bijv. van gasverbranding op 1.600°C naar ruimteverwarming van 20°C, of bij een warmtewisselaar met een grote  $\Delta T$ ) gaat dus altijd gepaard met exergievernietiging. In onderstaande figuur is schematisch de energie en exergie efficiëntie van een ketel weergegeven, waarbij ervan wordt uitgegaan dat de geleverde warmte op 35°C nodig is. (Bij een afgiftesysteem op een hogere temperatuur vindt er dus nog exergievernietiging plaats tussen het afgiftesysteem en de uiteindelijke benodigde warmte m.b.t. de binnentemperatuur).



Figuur 7: Schematische weergave van de energie en exergie efficiëntie van een ketel.

Een KoWaNet is er op gericht de beschikbare temperaturen altijd zo goed mogelijk te benutten en de gevraagde temperaturen te leveren. Hierdoor wordt zo min mogelijk exergie vernietigd, waardoor er een minimale hoeveelheid hoogwaardige bronnen nodig is om het gewenste comfort te leveren.

Voor meer informatie over exergie voor energiesystemen in de gebouwde omgeving zie bijvoorbeeld (Jansen, 2013) en (Schmidt et al., 2019).

## 2 Verkenning van configuraties o.b.v. temperatuurniveaus

### 2.1 Inleiding

De basis voor koele warmtenetten is het uitwisselen van de retour warmte en koude tussen gebouwen/gebruikers en het optimaal benutten van lokale lagetemperatuurbronnen. Elk gebouw is zowel een consument, als ook een producent van bruikbare warmte en koude, ofwel een prosumant. Aangevuld met thermische opslag op verschillende schaalniveaus en slimme regelingen (intelligentie) kan de uitwisseling tussen gebouwen en de benutting van lokale bronnen worden gemaximaliseerd, waardoor de benodigde input van (hoogwaardige) energie van buiten het gebied wordt geminimaliseerd.

In dit hoofdstuk is een verkenning beschreven naar de mogelijke configuraties (d.w.z. een combinatie van componenten waarmee de warmte- en koelbehoefte geleverd kan worden). Deze hebben met name betrekking op de volgende variabelen:

- Het temperatuurniveau van de leidingen
- De benodigde afgiftetemperatuur
- Het aantal leidingen (2-pijps, 3-pijps of 4-pijps)

De keuze voor een bepaald temperatuurniveau van een leidingnetwerk hangt af van de benodigde afgiftetemperatuur om de warmte- en koudevraag te kunnen leveren, en van de temperatuur van de beschikbare bronnen. De benodigde afgiftetemperatuur en de temperatuur van (rest)warmtebronnen worden in Hoofdstuk 4 en 5 in meer detail besproken. In dit hoofdstuk zijn de basismogelijkheden vergeleken.

### 2.2 Temperatuurniveaus

De temperatuur van de leidingen in relatie tot de afgiftetemperatuur van de warmte- en koudevraag en de temperaturen van het warmte- en koude-aanbod bepaalt:

- of directe levering koeling of verwarming mogelijk is, of dat dit actief met een warmtepomp moet gebeuren
- in het geval van aanvullende bronnen zoals oppervlaktewater of restwarmte: of de beschikbare warmte of koude van een bron direct aan het net geleverd kan worden, of dat de temperatuur van de bron via een warmtepomp moet worden opgewaardeerd.

In deze paragraaf wordt daarom nader ingegaan op het temperatuurniveau van de vraag en het temperatuurniveau van het aanbod.

#### 2.2.1 Temperatuur van de vraag: benodigde afgifte temperatuur

De benodigde warmte of koude kan op verschillende manieren aan een ruimte worden afgegeven, te weten via:

- Vloerverwarming
- (LT-) radiatoren of convectoren
- het voorverwarmen of -koelen van (ventilatie-) lucht.

De benodigde afgiftetemperatuur is afhankelijk van:

- het benodigde netto verwarmings- of koelvermogen voor de ruimte

- het vermogen van een bepaald type afgiftesysteem (bijvoorbeeld radiator of vloerverwarming) bij een gegeven afgiftetemperatuur en ruimtetemperatuur

Het benodigde verwarmingsvermogen hangt af van het warmteverlies van een gebouw of ruimte, dat met name bepaald wordt door de isolatieniveau, luchtdichtheid en het ventilatiesysteem. De benodigde afgiftetemperatuur hangt weer af van het benodigde vermogen én van het type afgiftesysteem.

Een warmtenet kan op twee manieren gebruikt worden om de gewenste koeling of verwarming te leveren:

- direct ('passief')
- actief (met een warmtepomp).

In onderstaande tabellen is ter indicatie aangegeven bij welke temperaturen in de leidingen direct koelen en verwarmen van de gebouwen mogelijk is en wanneer het opwaarderen van de warmte met een warmtepomp nodig is. Ook wordt een indicatie gegeven van de resulterende temperatuur van de retourstroom.

Tabel 1: mogelijkheden voor direct of actief koelen of verwarmen, bij verschillende temperaturen

Mogelijkheden koelen	T koude leiding	Verwachte T retour
Directe koeling ('passief') vanuit het net (volledige koeling)	< 10 °C	< 20 °C
Directe koeling ('passief') vanuit het net (topkoeling)	10 - 18 °C	18 - 24 °C
Actief koelen met warmtepomp (efficiënt)	18 - 25 °C	24 - 35 °C
Actief koelen met warmtepomp (minder efficiënt)	25 - 40 °C	35 - 50 °C

Mogelijkheden verwarmen	T warme leiding	Verwachte T retour
<u>Actief verwarmen met een warmtepomp – redelijk efficiënt gebruik</u> , waarbij het net als bron wordt gebruikt	5-15 °C	> 3°C
Actief verwarmen met een warmtepomp – zeer efficiënt gebruik, waarbij het net als bron wordt gebruikt	15 - 30 °C	8 - 20 °C
<u>Directe ruimteverwarming ('passief')</u> vanuit het net aan woningen met <u>vloerverwarming</u> of een of LBK met ZLT warmtebatterij	> 30 °C	> 23 °C
<u>Directe ruimteverwarming ('passief')</u> vanuit het net aan woningen met <u>ZLT radiatoren</u> of een LBK met ZLT warmtebatterij	> 45 °C	> 35 °C
<u>Directe ruimteverwarming ('passief')</u> vanuit het net aan woningen met <u>MT radiatoren</u> of een LBK met MT warmtebatterij	> 55 °C	> 40 °C
Directe ruimteverwarming (passief) vanuit het net aan woningen met <u>HT radiatoren</u> of een LBK met HT warmtebatterij	> 70 °C	> 45 °C

\* LBK= luchtbehandelingskast

Zoals eerder genoemd, levert elke koudevraag tegelijk een warmte-aanbod, en andersom: De retourwarmte tijdens koeling kan gebruikt worden als de aanvoer voor verwarming, en andersom.



## Flexibiliteit en regelbaarheid van de retourtemperaturen

Voor het optimaal benutten van de retourwarmte of -koude gelden de volgende aandachtspunten:

- De temperatuur van de aanvoer en de manier waarop deze benut wordt (direct of actief d.m.v. een warmtepomp), bepaalt de temperatuur van de retourstroom.
- Met direct ('passief') koelen en verwarmen heb je de temperatuur van de retourstroom niet goed in de hand.
- Met actief koelen en verwarmen met een (LT-) warmtepomp is een hoge mate van flexibiliteit en stuurbaarheid van de temperatuur van de retourstroom mogelijk. Het temperatuurverschil over de condensor van de warmtepomp kan tot 20 K zijn en over de verdampers 10 K; als een groter temperatuurverschil nodig is kunnen warmtepompen in cascade gebruikt worden. Bij een warmtepomp in koelmodus kan de temperatuur van de retourstroom worden geregeld tot een temperatuur van 50 tot 60 °C en in verwarmingsmodus tot een temperatuur van 3 tot 4 °C (zonder gebruik van glycol in het netwerk). Het gebruik van een warmtepomp bij de afnemer van een ZLT, LT of koel warmtenet leidt daarmee tot een hoge mate van flexibiliteit in de optredende temperaturen in het warmtenet of 'thermische grid'. (Zie ook 2.2.3)

Voor tapwater moet in de meeste gevallen actief worden verwarmd, behalve bij traditionele warmtenetten (MT of HT volgens de definitie zoals besproken in §1.3).

### 2.2.2 Temperatuur van (rest)warmtebronnen

Er zijn verschillende te benutten warmte- of koudebronnen met verschillende temperaturen. Deze zijn kort weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 2: mogelijke warmte- of koudebronnen en bijbehorend temperatuurniveau

Bron	Temperatuur	Toelichting
Aquathermie		
TEO (thermische energie uit oppervlaktewater)	2 – 24 °C	Afhankelijk van het seizoen
TEA (thermische energie uit afvalwater)	8 – 25 °C	Afhankelijk van het seizoen en de manier en locatie waar de warmte wordt teruggewonnen
TED (thermische energie uit drinkwater)	10 – 18 °C	
Zonthermie		
Vacuüm collectoren	60 – 90 °C	Bij zonthermie geldt: hoe hoger de gewenste output temperatuur, hoe lager het aantal vollasturen en (jaarlijkse) opbrengst in GJ of kWh. Zie verder Hst 4 en de bijlagen.
Vlakke plaat collectoren	40 – 60 °C	
PVT	15 – 40 °C	
PVT + warmtewisselaar	-10 – 30 °C	
Lucht		
Buitenlucht	-10 – 30 °C	Afhankelijk van het seizoen
Afgezogen lucht uit garages/ metro e.d.	15 – 30 °C	Afhankelijk van het seizoen
Restwarmte van industrie		
Zeer verschillende mogelijkheden	20 – 90 °C	Afhankelijk van de industrie
Datacenters	20 – 40 °C	Afhankelijk van de koelmethode

In Hoofdstuk 4 en 5 wordt verder ingegaan op de temperatuur van restwarmte- en koudebronnen.

### 2.2.3 Temperatuur verschil tussen warme en koude leiding

Het temperatuurverschil ( $\Delta T$ ) tussen de warme en de koude leiding heeft een directe invloed op het thermische vermogen van het netwerk, d.w.z. de hoeveelheid thermische energie die per tijdseenheid wordt overgedragen. Hoe kleiner het temperatuurverschil, hoe lager het vermogen.

Zoals beschreven in paragraaf 2.2.1 wordt de retourtemperatuur van het verwarmen of koelen in een gebouw bepaald door de manier waarop gekoeld of verwarmd wordt: direct ('passief') of actief (met een warmtepomp).

Bij passief verwarmen of koelen is de retourtemperatuur niet helemaal te controleren en het temperatuurverschil meestal beperkt. Met het gebruik van een warmtepomp kan op de retourtemperatuur gestuurd worden en kan het temperatuurverschil worden verhoogd. De efficiëntie van een warmtepomp gaat echter omlaag bij een groter temperatuurverschil (hogere retourtemperatuur in geval van koeling of lagere retourtemperatuur in geval van verwarmen). Dus hier geldt een optimum tussen meer pompenergie en een lager vermogen van het netwerk versus meer elektriciteit voor de warmtepomp en een hoger vermogen van het netwerk. In de ontwerpfase is het belangrijk om na te gaan wat de maximale  $\Delta T$  mag zijn ter bepaling van het (thermische) piekvermogen en of dit niet kortstondig hoger mag zijn. Meest is immers de piekvraag beperkt tot een paar honderd uur per jaar.

Als richtlijn kan worden gehanteerd dat de  $\Delta T$  tussen warme- en koude leiding bij passieve koeling tussen de 3 en 7 K ligt (gesloten bron of WKO), en bij gebruik van een warmtepomp optimaal tussen 5 - 12 K bij basislast zowel voor de condensorzijde (koudebedrijf warmtepomp; afvoer warmte naar netwerk) als verdamperzijde (warmtebedrijf warmtepomp; warmte onttrekken aan netwerk). Tijdens pieklast kan de  $\Delta T$  worden verhoogd, eventueel door warmtepompen in cascade toe te passen.

De temperatuurverschillen bij koele warmtenetten zijn kleiner dan bij traditionele hoge temperatuur warmtenetten. Dat betekent dat voor eenzelfde vermogen een groter debiet (l/s) nodig is en grotere diameters. Aan de andere kant wordt bij gebruik van een warmtepomp tijdens warmtebedrijf het net als bron gebruikt, waardoor iets lagere vermogens nodig zijn. Verder is er ook sprake van verduurzamings-/renovatiemaatregelen, wat ook leidt tot kleinere vermogens dan bij traditionele directe HT-verwarming. Tevens is er sprake van gebruik van lokale bronnen, decentrale opwek en uitwisseling, waardoor de afstand/weerstand tussen bron en gebruiker lager is. Dit wordt verder besproken in deliverable 1.2.

## 2.3 Bekende configuratie opties per temperatuurniveau

De (gekozen) temperatuurniveaus in het koude warmtenet bepalen of het mogelijk is om passief te verwarmen of koelen en/of additionele actieve verwarming of koeling nodig is.

Op basis van de indicatieve temperaturen voor direct (passief) of actief verwarmen en koelen kunnen een aantal typische temperatuurniveaus voor warmtenetten worden onderscheiden:

- 1) Direct koelen (passief) en actief verwarmen
  - 2-pijpssysteem
  - T warme leiding  $< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding  $8 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2) Actief koelen en direct (passief) verwarmen
  - 2-pijpssysteem
  - T warme leiding  $35 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding = T warme leiding *minus* 10 K
- 3) Actief koelen en actief verwarmen
  - 2-pijpssysteem
  - T warme leiding  $20 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding  $12 - 17\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4) Direct (passief) en actief koelen en verwarmen
  - 3-pijpssysteem
  - T warme leiding  $30 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding  $12 - 17\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - T gezamenlijke retour leiding  $20 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 5) Direct koelen en verwarmen
  - 4-pijpssysteem; hierbij zijn warmtelevering en in het net gescheiden; er kan wel eventueel centraal worden uitgewisseld.
  - Warmtelevering: T warme leiding  $> \text{ca } 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding = T warme leiding *minus* 10 K
  - Koudelevering: T warme leiding  $< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding  $8 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Deze varianten worden hier onder verder toegelicht. In een flexibel systeem is een combinatie en/of afwisseling van de bovenstaande varianten ook mogelijk. Deze afwisseling wordt toegepast in een koel warmtenet zoals verder wordt besproken in Hoofdstuk 3.2.2.

### 2.3.1 Direct (passief) koelen en actief verwarmen | 2-pijps

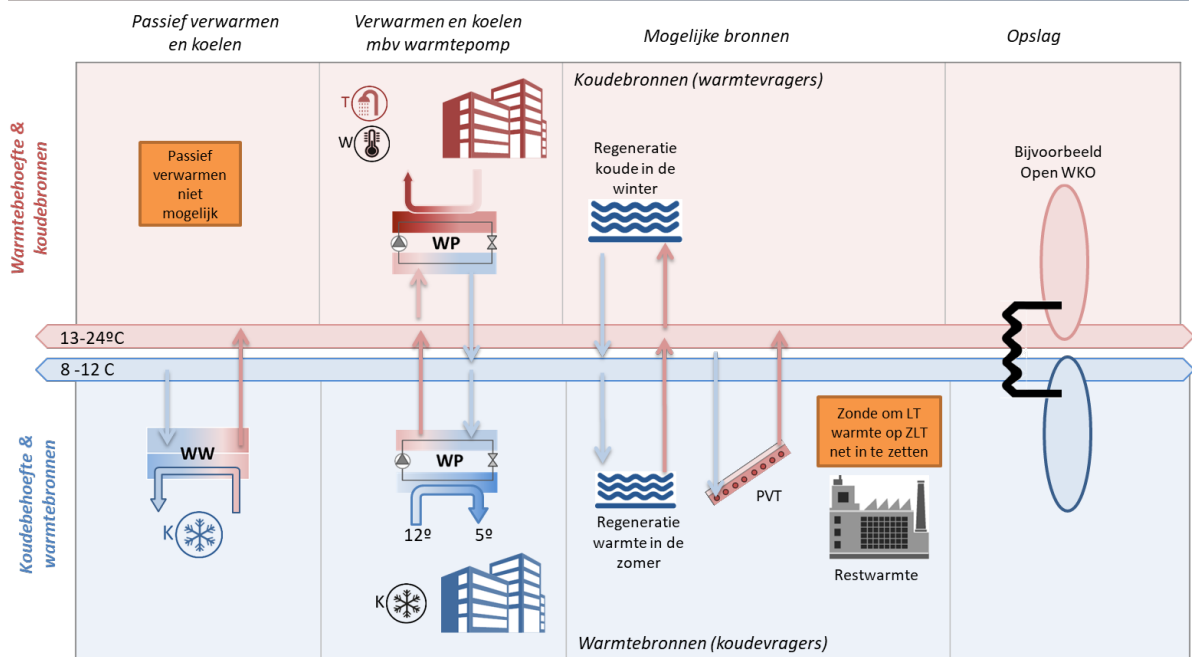
Direct koelen en actief verwarmen is mogelijk met een 2-pijps systeem waarbij:

- T warme leiding  $< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  | T koele leiding  $8 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dit type warmtenet lijkt het meest op de (reeds bestaande) bronnetten met een open WKO als opslag. Het bronnet kan direct worden gebruikt voor koeling, waarbij de retour van de koeling aan de warme leiding wordt geleverd. De temperatuur van de warme leiding wordt dus (deels) bepaald door de retourtemperatuur van de koeling. Passieve verwarming is hierdoor niet mogelijk; de temperatuur is hiervoor te laag.

Dit systeem is schematisch weergegeven in Figuur 8.

## Direct (passief) koelen en actief verwarmen



Figuur 8: Warmtenet met temperaturen waarbij direct (passief) koelen en actief verwarmen mogelijk is.

Naast het uitwisselen van de warmte- en koudevraag, zijn de volgende warmte- en koudebronnen invoedbaar (Zie ook Tabel 2):

- Datacenters en overige ZLT warmtebronnen
- Lagetemperatuur zonthermie
- Bronnen op omgevingstemperatuur, zoals:
  - Oppervlaktewater (TEO) (warmte in de zomer, koude in de winter)
  - Buitenlucht (eveneens warmte in de zomer, koude in de winter)

Warmtebronnen met een hogere temperatuur zijn mogelijk. In principe mag de temperatuur van de warme leiding ook omhoog. Door de passieve koeling waarvan de retour ook op de warme leiding terecht komt, vermengt de hogere temperatuur restwarmte echter met een lagere temperatuur. Hierdoor kan het temperatuurniveau van de warme bron dus niet optimaal benut worden (exergievernietiging). Daarnaast moeten de warmtepompen voor verwarming dan zo worden ontworpen en ingesteld dat de retour op de koude leiding onder een maximaal te bepalen temperatuur blijft zodat directe (passieve) koeling gewaarborgd is. Indien er een significante hoeveelheid warmte op hogere temperatuur beschikbaar is (aanbod > vraag), is het temperatuurniveau dat uitgaat van passief koelen niet optimaal. In dat geval is het aan te bevelen om actief te koelen en direct (passief) te verwarmen (configuratie beschreven onder 2.3.2, de volgende paragraaf).

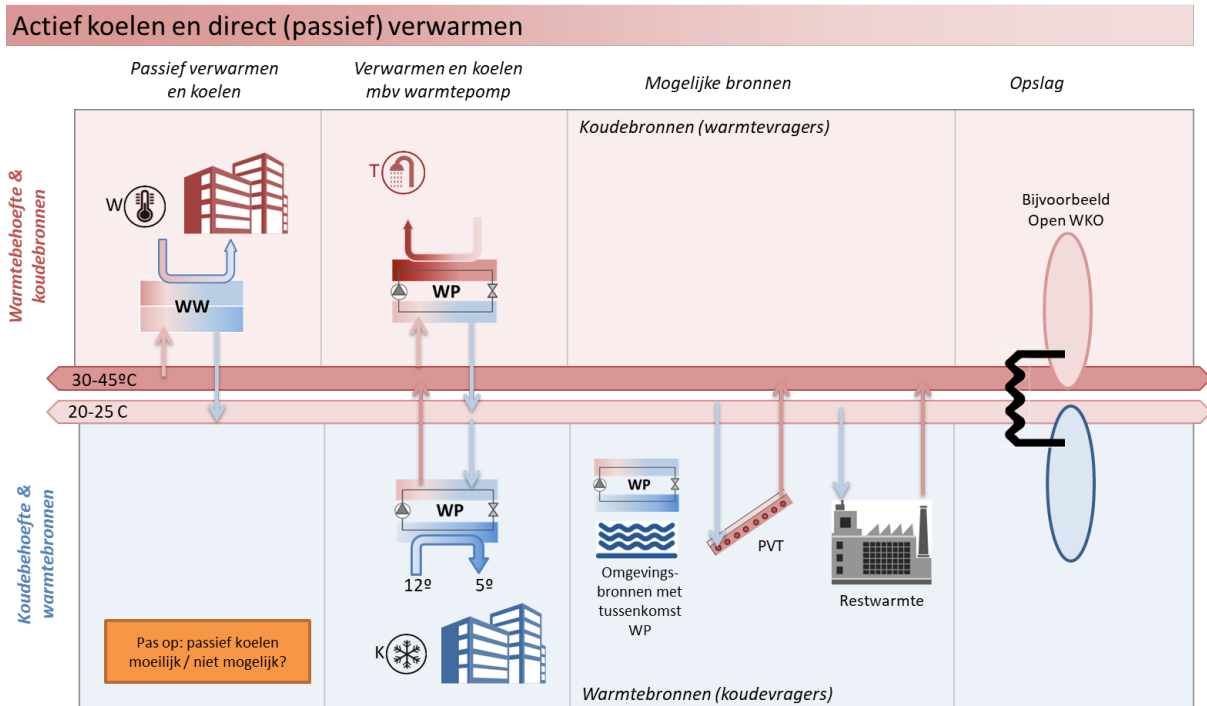
### 2.3.2 Actief koelen en direct (passief) verwarmen | 2-pijps

Actief koelen en direct (passief) verwarmen is mogelijk als de warme leiding een hogere temperatuur heeft dan het afgiftesysteem in de woning. Deze configuratie kan van toepassing zijn als er een dominante warmtebron in het netwerk is aangesloten. In dat geval zal er actief gekoeld moeten worden. Voorwaarde is dat er een warmteafgifte-systeem op lage temperatuur wordt toegepast (ca. 30°C bij vloerverwarming, ca. 45°C bij LT radiatoren). Bij een hogere temperatuur in de warme leiding wordt de temperatuur in de koude leiding te hoog om de warmtepomp voor koeling nog voldoende efficiënt te laten werken. Is de koudevraag gering, dan kan een lage efficiëntie voor koeling integraal overigens toch de beste keuze zijn.

Eventuele gebouwen die een hogere temperatuur nodig hebben, kunnen alsnog de temperatuur boosten met een warmtepomp. Voor tapwater is meestal een (booster) warmtepomp nodig.

Direct (passief) verwarmen en actief koelen is mogelijk bij de volgende temperaturniveaus:

- $T_{\text{warme leiding}} \text{ ca. } 30 - 45 \text{ } ^\circ\text{C} \mid T_{\text{koude leiding}} = T_{\text{warme leiding}} \text{ minus } 5 \text{ tot } 10\text{K}$



Figuur 9: Temperaturniveaus waarbij actief gekoeld en direct verwarmd wordt.

Voordelen:

- Mogelijkheid om restwarmtebronnen op deze temperatuur nuttig in te zetten voor directe ruimteverwarming ofwel passieve warmtelevering.
- Geen warmtepompen nodig voor ruimteverwarming in de woningen/gebouwen bij een afgiftetemperatuur < de warme leiding; voor hogere afgiftetemperaturen kan alsnog een warmtepomp worden ingezet. Deze heeft dan een zeer hoge COP.

Nadelen:

- Koelen kost elektriciteit, dus als er veel koelvraag is, is dit systeem niet optimaal. In dat geval is het mogelijk beter de nadruk te leggen op directe (passieve) koeling en

actieve verwarming (zie 2.3.1). De keuze direct koelen of verwarmen kan ook seizoensafhankelijk gekozen worden. Dit is een optimalisatievraagstuk dat is op te lossen door een intelligente controller en/of door een "slimme" stooklijn voor de warmte en koude leiding. Dat vereist wel een warmtepompinstallatie bij elke verbruiker, waarmee het ontwerp gelijk wordt aan de het ontwerp voor actief koelen en verwarmen (zie 2.3.3).

- Warmtebronnen (koude vragers) op een lager temperatuurniveau moeten eerst worden opgewaardeerd om mengen van verschillende temperaturen te voorkomen (exergievernietiging ofwel het niet maximaal benutten van de hoogst beschikbare temperatuur).

### 2.3.3 [Actief koelen en actief verwarmen | 2-pijps](#)

Er kan ook worden gekozen voor een 2-pijps systeem waarbij actief gekoeld en verwarmd kan worden. Door zowel actief te kunnen koelen als te verwarmen, zijn er minder strenge 'eisen' aan het temperatuurniveau van beide leidingen. De warmtepomp is namelijk in staat om van verschillende aanbod temperaturen de juiste gewenste temperatuur voor het afgiftesysteem in het gebouw te produceren. Daarnaast regelt de warmtepomp op de gewenste retourtemperatuur. Dit resulteert in een groter temperatuurverschil tussen koude en warme leiding, waardoor het vermogen van het net bij een gegeven debiet (en dus gegeven diameters) veel groter is en de dekking van de investeringskosten voor het netwerk aanzienlijk wordt verbeterd.

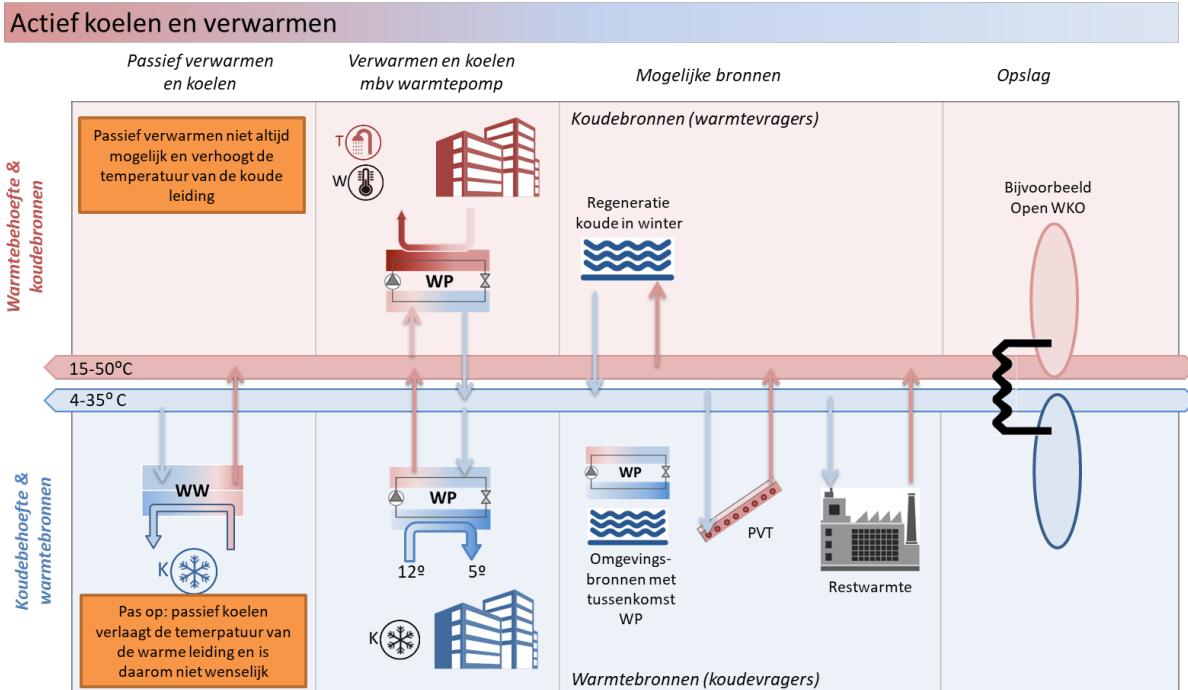
De grenzen waarbinnen de temperaturen mogen fluctueren worden bepaald door de eigenschappen van de toegepaste warmtepompen en het ontwerp van het warmtenet.

Voor warmtepompen gelden minimale en maximale temperaturen voor de aanvoer en retour over zowel condensor als verdamper. De minimale retourtemperatuur aan verdamperzijde is ca. 4 °C en de maximale retourtemperatuur aan condensorzijde is ca. 65 °C. De maximale aanvoertemperatuur aan verdamperzijde ligt afhankelijk van het type warmtepomp meestal tussen de 25 en 35 °C, maar door een temperatuur regeling op de netwerk TSA en/of een mengregeling over de verdamper is een hoger temperatuur altijd te corrigeren. Hetzelfde geldt voor de condensorzijde, waarbij een te lage aanvoertemperatuur kan worden verhoogd.

Wat het warmtenet betreft geldt dat bij temperaturen > 50 graden in de warmteleiding expansiebochten nodig zijn die het netwerk extra duur maken. Dit leidt tot de volgende bandbreedte in de temperatuurniveaus van warmte en koude leiding bij actief koelen en verwarmen:

- $T_{\text{warme leiding}} \text{ ca. } 15 - 50 \text{ } ^\circ\text{C} \mid T_{\text{koude leiding}} = \text{ca. } 4 - 35 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dit systeem is schematisch weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: Warmtenet met temperaturen voor actieve koeling en verwarming.

### 2.3.4 Direct (passief) en actief koelen en verwarmen | 3 pijps

Met een 3-pijps warmtenet kan een groter temperatuurverschil tussen de warme en koude leiding worden gerealiseerd, zonder dat dit temperatuurverschil door decentrale warmtepompen overbrugd hoeft te worden. In dit systeem maken koeling en verwarming gebruik van dezelfde retourleiding. Het streven is dus dat de retourtemperaturen ongeveer gelijk zijn. Door het grotere temperatuurverschil tussen warme en koude leiding kan zowel passief gekoeld als passief verwarmd worden. Actief koelen en verwarming is ook mogelijk als een lagere of hogere temperatuur nodig is dan beschikbaar in de leidingen.

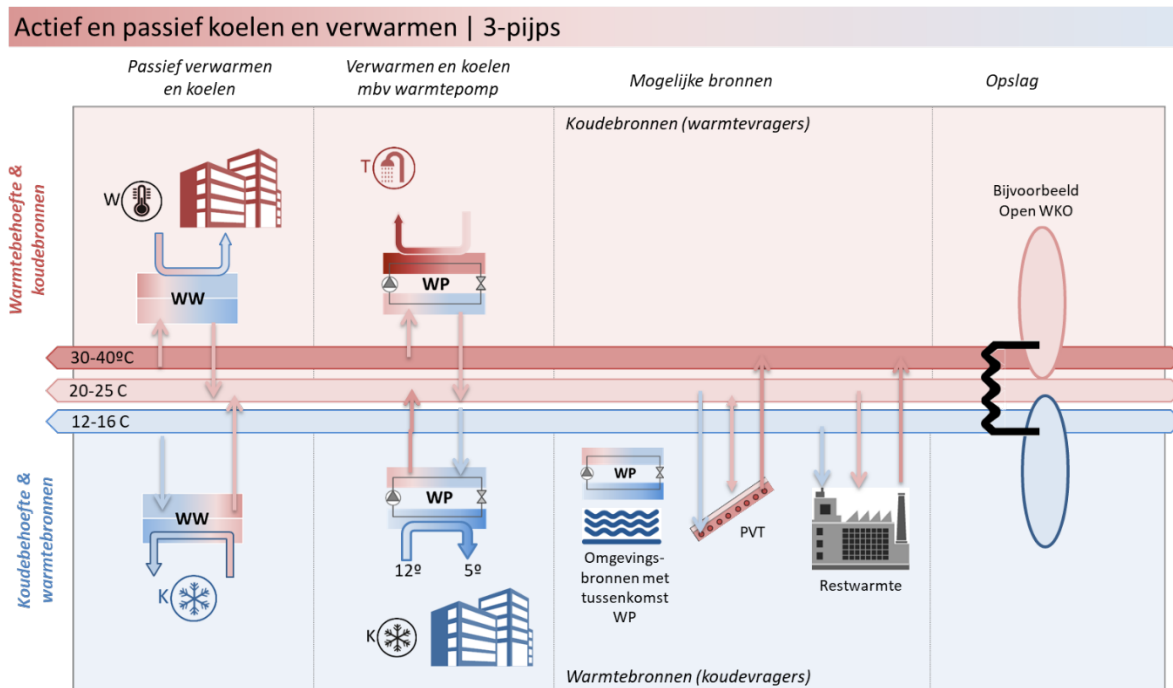
Vooraf met passief koelen en verwarmen is het lastig goed op de retourtemperatuur te sturen. Zodra deze temperaturen te ver uit elkaar liggen, wordt exergie vernietigd omdat temperaturen gemengd worden. Er wordt dan in feite zowel koude als warmte weg gegooid, waardoor een deel van de beoogde winst verloren gaat.

Door de keuze voor passief koelen en verwarmen en het streven naar een gelijke retourtemperatuur is de bandbreedte voor de mogelijke temperaturen eigenlijk kleiner dan bij een 2-pijps systeem dat volledig uitgaat van actief koelen en verwarmen (zie 2.3.3). Zodra wordt uitgegaan van actief koelen en verwarmen is de middelste leiding in feite niet meer nodig, omdat al voldoende op de retourtemperatuur gestuurd kan worden. Daarnaast is een 3-pijps systeem significant duurder dan een 2-pijps systeem en hydraulisch complexer. In verband met de beperkte toegevoegde waarde en risico's t.o.v. een 2-pijpsysteem is een 3-pijpssysteem integraal gezien meestal niet de meest optimale oplossing.

Als passief koelen en verwarmen mogelijk moet zijn, en menging in de retourleiding moet worden geminimaliseerd, leidt dit tot de volgende temperaturniveaus:

- T warme leiding 30 – 40 °C | T koele leiding 12 - 17° C
- T gezamenlijke retour leiding 20 -25 °C

Het 3-pijpssysteem is weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Temperatuurniveaus waarbij actief gekoeld en passief verwarmd wordt.

### 2.3.5 Passief koelen en passief verwarmen | 4-pijps

Zoals toegelicht aan het begin van paragraaf 2.3 is dit een significant ander type systeem. In feite is hier sprake van twee afzonderlijke netten: een koudenet en een warmtenet. De temperaturen zijn dus volledig flexibel en onafhankelijk van elkaar, en decentrale uitwisseling is hierbij niet mogelijk.

Het kan wel zinvol zijn om op gebouw- of wijk/sectorniveau een 4-pijps systeem aan te leggen, zodat niet bij alle individuele afnemers (bijvoorbeeld appartementen of kantoorruimtes) een warmtepomp geplaatst hoeft te worden. Er is dan een (decentrale) collectieve warmtepomp voorzien die gelijktijdig warmte en koude opwekt en tussen beide systemen energie uitwisselt. Deze warmtepomp zal de onbalans tussen warmte- en koudevraag in het gebouw of wijk/sector aanvullen door (netto) warmte of koude te onttrekken aan het 2-pijps uitwisselingsnetwerk dat de verschillende decentrale energiecentrales met elkaar verbindt. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 3.1.5 en 3.1.6.

## 2.4 Discussie en conclusies m.b.t. temperatuurniveaus

In de vorige paragraaf zijn verschillende mogelijke configuraties voor het benutten van uitwisseling en gebruik van lage temperatuur warmtebronnen getoond. Hieruit zijn de volgende lessen te trekken:

- Bij passief koelen en verwarmen is het moeilijk de temperatuur van de retourstroom te regelen. Hierdoor kan de temperatuur van de retourleiding niet gegarandeerd worden en is deze ook moeilijk benutbaar om deze zowel voor passieve koeling als ook passieve verwarming (dus zonder warmtepomp) in te zetten



- Bij passief koelen is het temperatuurverschil tussen koude en warme leiding 3 – 7 K. Bij passief verwarmen kan dat groter zijn 5 – 10 K en bij hogere afgiftetemperaturen nog meer.
- De retourtemperatuur is regelbaar door het toepassen van een warmtepomp voor zowel actief koelen als actief verwarmen.
- Hierdoor zijn er bij actief koelen en verwarmen minder strenge 'eisen' aan het temperatuurniveau van beide leidingen: De warmtepomp is namelijk in staat om van verschillende aanbod temperaturen de juiste gewenste temperatuur voor het afgiftesysteem in het gebouw te produceren, en daarbij de gewenste temperatuur van de retourstroom te realiseren.
- Het toepassen van een warmtepomp maakt de werking van het totaal dus minder afhankelijk van de exacte temperatuur in de leidingen, waardoor flexibeler met de temperatuur en daardoor met beschikbare bronnen omgegaan kan worden om de uitwisseling te optimaliseren en piekcapaciteit van het netwerk te sturen. Dit maakt maximale uitwisseling en benutting van de warmtebronnen en het netwerk mogelijk.

Op basis van bovengenoemde punten is het KoWaNet Concept tot stand gekomen, dat wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

# 3 Beschrijving KoWaNet Concept

## 3.1 Basis KoWaNet configuratie

### 3.1.1 Inleiding en toelichting

De basis KoWaNet configuratie is gebaseerd op maximale uitwisseling en benutting van alle beschikbare (rest-) warmtebronnen. Dat vereist een systeem waarbij de temperaturen in het systeem kunnen variëren al naar gelang de beschikbare bronnen en tegelijk de beschikbare temperaturen optimaal benut worden. Een netwerk met variërende temperaturen betekent dat de situaties zoals beschreven in paragraaf 2.3.1, 2.3.2 en 2.3.3 allemaal kunnen voorkomen in een KoWaNet, afhankelijk van de op dat moment beschikbare bronnen.

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.3, is er is gekozen voor een netwerktemperatuur tot maximaal 50 °C, omdat de aanleg van het net dan nog uitvoerbaar is zonder expansielussen. Daarnaast ligt het potentieel van onbenutte industriële afvalwarmte vooral bij temperaturen tussen 20 °C en 35 °C, met uitschieters tot 50 °C. De temperatuur van de warmtevraag bij goed geïsoleerde woningen ligt eveneens onder de 50 °C.

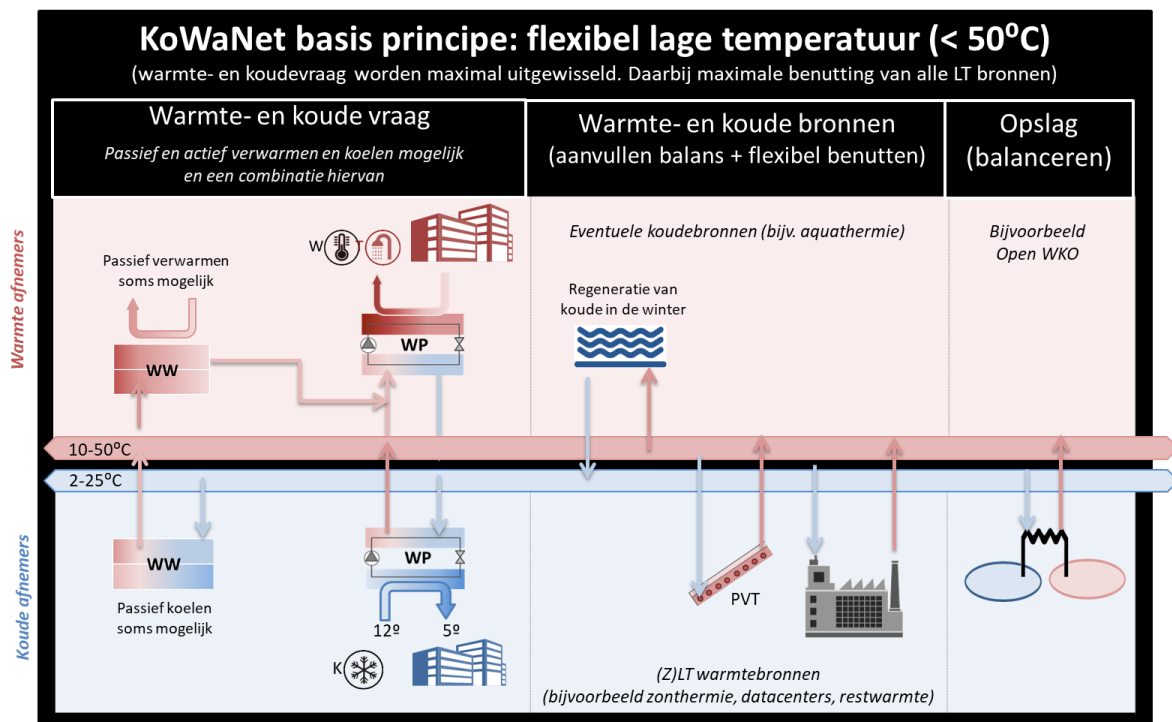
Als de temperatuur in het net kan variëren, is volledig passieve koeling en/of passieve verwarming geen basis uitgangspunt. De afhankelijkheid van de aanvoertemperatuur van het net kan worden opgeheven door bij elke klantaansluiting een warmtepomp te gebruiken. De warmtepomp levert de temperatuur - voor verwarming of koeling - die de klant nodig heeft, ongeacht de temperatuur in het uitwisselingsnetwerk.

Door de toepassing van deze decentrale warmtepompinstallatie kan met een 2-pijps netwerk gelijktijdig gekoeld en verwarmd worden. Tevens vindt in dit 'thermische smart grid' vanzelf uitwisseling/hergebruik plaats waarbij de retourstroom per definitie een bron van energie is geworden. Doordat de decentrale warmtepomp bij de afnemer is opgesteld kan deze op de retourtemperatuur sturen, zodat een minimale  $\Delta T$  kan worden aangehouden, de capaciteit van het netwerk gewaarborgd is, 'vervuiling' ofwel menging van temperaturen kan worden beperkt en efficiency verlies van de warmtepompen wordt geminimaliseerd.

### 3.1.2 Eigenschappen

- Een KoWaNet systeem gaat als basis uit van een 2-pijps basis infrastructuur met flexibele temperaturen < 50 °C, vaak grotendeels onder de 30°C.
- De temperaturen in de leidingen (kunnen) variëren in tijd, dag en seizoen.
- Aan deze warme en koude leidingen zijn decentrale energiecentrales gekoppeld, die de temperatuur naar het juiste niveau opwaarderen. Zowel passief als actief koelen en verwarmen is mogelijk, of een combinatie hiervan. Dit is verder toegelicht in de volgende paragraaf (3.1.3). De keuze is afhankelijk van de beschikbare temperatuur in het net.
- Het temperatuurverschil tussen de warme en koude leiding kan variëren, maar met een minimale  $\Delta T$ . Dit is een optimalisatie vraagstuk tijdens de ontwerpfase:
  - Als de  $\Delta T$  te laag wordt stijgt de pompenergie sterk, waardoor het overall optimaler is om de  $\Delta T$  door actieve opwekking bij de klantaansluiting (warmtepomp) te vergroten. Bij Mijwater ligt bijvoorbeeld de optimale energetische  $\Delta T$  tussen 10 en 15K.

- Extra thermisch vermogen kan worden verkregen door het temperatuurverschil in pieksituaties te vergroten, waarbij het (kleine) tijdelijke negatieve effect op de efficiëntie van de warmtepomp wordt geaccepteerd.
- Het KoWaNet levert maximale uitwisseling en benutting van bronnen op met verschillende temperatuurniveaus, waardoor de benodigde externe input van (hoogwaardige) energie wordt geminimaliseerd.
- Het KoWaNet basis principe is schematisch weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Schematische weergave van het KoWaNet basis principe: een 2-pijps systeem met flexibel lage temperatuur (<math>< 50^{\circ}\text{C}</math>) en warmtepompen bij de klantaansluitingen.

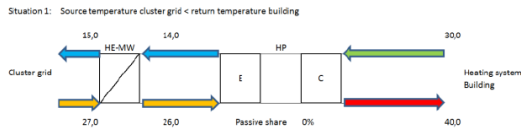
### 3.1.3 Flexibiliteit met een slimme warmtepomp regeling

Om de temperatuur in het net optimaal te kunnen benutten, moet deze zowel passief als actief kunnen worden gebruikt, of een combinatie hiervan. Mijnwater heeft concept ontwikkeld om de beschikbare warmte of koude uit het net aan de afnamekant zo veel mogelijk passief te gebruiken (Verhoeven et al. 2016). Dit concept bestaat uit een aantal schakelingen aan de verdamper en condensorzijde van de warmtepomp, waardoor warmte uit de warme leiding van het net deels of volledig passief kan worden benut, afhankelijk van de aanbodtemperatuur van het net en de retour temperatuur uit het gebouw. Hierdoor wordt de elektriciteitsbehoefte geminimaliseerd.

Er worden vier situaties onderscheiden. Deze zijn weergegeven in Figuur 13 en daar onder verder toegelicht:

Situation 1

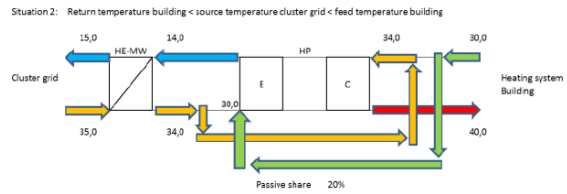
Normal temperature in the cluster grid based on the mine water. The return temperature from the building is lower than the supply temperature from the grid. No passive use is possible. The temperature has to be fully lifted by the heat pump (HP) from 26 to 40 °C. The COP of the energy station is about 6.5.



**Figure 6. Temp cluster grid < return temp building**

Situation 2

Temperature in the cluster grid is 35 °C, higher than the return temperature from the building.

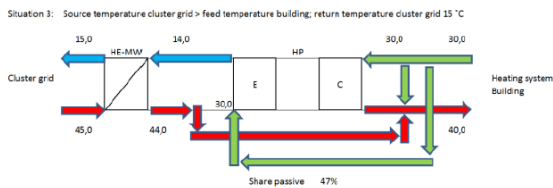


**Figure 7. Temp cluster grid > return temp building**

The difference in temperature can be used passively through a hydraulic switch of the supply flow from the cluster grid and return flow from the building as shown in the scheme in figure 7. The passive share is 20%. The COP of the energy station improves to 8.0.

Situation 3

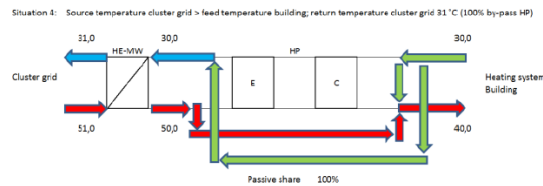
The supply temperature from the cluster grid is 45 °C, higher than the demanded temperature to the heating system of the building (40 °C). The required return temperature to the cluster grid is still 15 °C because of supply of heat from the mine water grid. The return flow from the building needs to be cooled down before being discharged to the cluster grid. The situation is the same as situation 2 only the passive share rises to 47%. The COP of the energy station improves to 11.7.



**Figure 8. Temp cluster grid > feed temp building; return temp cluster grid 15 °C**

Situation 4

In this situation no input of heat from the mine water grid is needed to supply the total heat demand in the cluster grid. Another heat source with a higher temperature, for example waste heat from industry or thermal solar heat, is available and a higher return temperature to the cluster grid is allowed. Then the heat pump installation can be fully by-passed with full passive use of the heat from the cluster grid. Then COP of the energy station is only determined by electricity consumption of the pumps for heat extraction out of the grid. It will rise up to 60 or more.



**Figure 9. Temp cluster grid > feed temp building; return temp cluster grid 30 °C**

Figuur 13: Weergave van de verschillende situaties die bij een slimme warmtepompregeling bij de afnemer plaats kunnen vinden, afhankelijk van de temperatuur van het aanbod en de temperatuur van de vraag (Verhoeven et al., 2016)

- Situatie 1: 100% actief verwarmen ofwel de basis bedrijfssituatie; De aanvoertemperatuur uit het net is lager dan de retourstroom uit het gebouw.
- Situatie 2: deels passief verwarmen; De aanvoertemperatuur uit het net is hoger dan de retourstroom uit het gebouw, maar lager dan de aanvoertemperatuur naar het gebouw; In deze situatie kan het wisselen van de retourstroom uit het gebouw en de aanvoer vanuit het net het temperatuurverschil passief worden gebruikt door de retourstroom uit het gebouw naar de inlaatzijde van de verdampers en de aanvoer vanuit het net naar de inlaatzijde van de condensator te leiden. De passieve warmte wordt toegevoegd aan de actief opgewekte warmte. Dat betekent dat niet de volledige retourstroom uit het gebouw wordt omgeleid. Een deel gaat ook zoals in situatie 1 naar de intrede zijde van de condensator. Hieraan wordt de actief opgewekte warmte toegevoegd.

- Situatie 3: deels passief verwarmen; situatie gelijk aan situatie 2, maar met dat verschil dat de aanvoertemperatuur uit het net hoger is dan de aanvoertemperatuur naar het gebouw. In deze situatie wordt de aanvoer vanuit het net naar de uitlaatzijde van de condensor ofwel de aanvoer naar het gebouw geleid. Het passief gebruik is hoger dan in situatie 2. De warmtepomp moet worden ingezet om de (lage) temperatuur in de koude leiding te garanderen voor de andere gebruikers en/of bronnen van het net; De retour uit het gebouw wordt derhalve net als bij situatie 2 deels naar de inlaatzijde van de verdampers geleid om verder uit te koelen. Een ander deel gaat naar de inlaatzijde van de condensor, waaraan de actief opgewekte warmte wordt toegevoegd.
- Situatie 4: volledig passieve verwarming. De temperatuur in het net is hoger of gelijk aan de aanvoertemperatuur naar het gebouw en de retourtemperatuur naar de koude leiding mag hoger zijn, waardoor uitkoeling van de retourstroom niet nodig is, bijvoorbeeld in het geval van een dominante restwarmte bron met hogere temperatuur in het net. Eventuele koelbehoefte elders moet dan actief worden geleverd.

Door het mogelijk maken van deze 4 situaties kan de beschikbare temperatuur uit het net maximaal worden benut en wordt de elektriciteitsbehoefte geminimaliseerd.

#### 3.1.4 [De regeling van het totaalsysteem](#)

Het beschreven systeem is in staat alle bronnen en afnemers slim met elkaar te verbinden, energie maximaal uit te wisselen en daarmee een minimale inzet van extern te leveren energie te realiseren. Dit systeem kan puur vraaggestuurd werken met vaste of dynamische stooklijnen voor het temperatuur regime op het net, of voorzien worden van een geavanceerde intelligente controller (zelflerend/adaptief/voorspellend). Een intelligente controller kan de temperatuurniveaus in het net en de werking van de decentrale warmtepompen sturen, op basis van monitoring of voorspelling van vraag-en aanbodprofielen. De control functie kan gericht zijn op balancering (optimalisatie, uitwisseling en CO<sub>2</sub>-reductie), piekafvlakking (optimale benutting van netwerk tijdens pieksituaties) en/of markt interactie (sturing op prijs aan de opbrengst en kosten kant), daarbij gebruik makend van slimme buffering op gebouw, netwerk en bron niveau.

Daarbij is de uitdaging te zorgen dat alle bronnen optimaal worden benut afhankelijk van de mogelijkheden (tijd en plaats afhankelijk). Zo kunnen er in een gebied meerdere bronnen van verschillende kwaliteit aanwezig zijn, bijvoorbeeld industriële restwarmte op 50 °C en een datacenter op 35 °C. Daarbij kan het een keuze zijn om de kwaliteiten te mengen (gebeurt vanzelf) met bijbehorend exergie/performance verlies, of om de LT-bron tijdelijk op te waarderen naar een hoger temperatuur niveau, of de HT-bron alleen op gezette tijden te benutten, door deze tijdelijk te bufferen.

#### 3.1.5 [Schaalniveaus](#)

Bij warmtelevering via een warmtenet zijn verschillende schaalniveaus te onderscheiden; dit geldt ook voor een KoWaNet. Voor het KoWaNet project zijn de volgende schaalniveaus onderscheiden, in lijn met de indeling zoals die bij Mijwater gebeurt:

- Woning/unit (eindgebruiker): Dit kan een appartement, grondgebonden woning of utiliteit-eenheid zijn. Belangrijk is dat hier het temperatuurniveau nodig is dat door de afgiftesystemen (radiator en vloerverwarming) en voor tapwater nodig is. Op dit niveau kan zich een combi warmtepomp (verwarmen/koelen/tapwater) of een booster warmtepomp (tapwater) bevinden.

- **Gebouw(en)/sector:** Dit betreft een aantal eindgebruikers bij elkaar aangesloten op een decentrale (collectieve) warmtepomp installatie.
- **Wijk(en)cluster:** Dit betreft een afgebakend gebied met meerdere gebouwen/wijken/sectoren met decentrale energie centrales, aangesloten op een gezamenlijk clusternet.
- **Gebied/ backbone:** Dit is de grootste schaal van een energiesysteem, waar meerdere clusters aan elkaar gekoppeld kunnen worden via een backbone, eventueel verbonden met of opslag of bronnen (zoals mijnwater) op gebiedsniveau.

De schaalniveaus zijn weergegeven in onderstaande figuur:



*Figuur 14: Indeling van het energiesysteem naar schaalniveaus*

Op verschillende schaalniveaus kan voor verschillende temperatuurniveaus gekozen worden; dit wordt nader toegelicht in de volgende paragraaf.

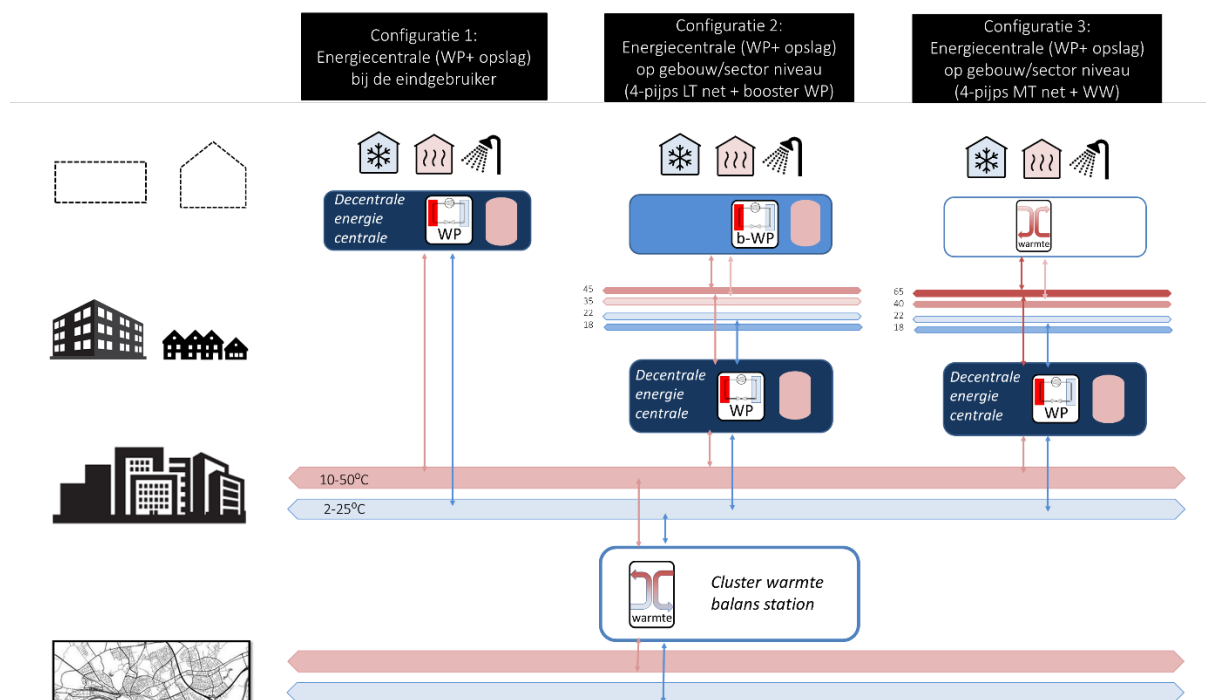
### 3.1.6 De decentrale energiecentrale en keuze voor de locatie

Een KoWaNet systeem gaat als basis uit van een 2-pijps basis infrastructuur met flexibele temperaturen  $< 50$  °C. Aan deze warme en koude leidingen zijn decentrale energiecentrales gekoppeld, die de temperatuur naar het juiste niveau opwaarderen. De decentrale energiecentrales bestaan uit één of meerdere warmtepompen, schakelvaten, uitwisselstation met het netwerk, distributiepompen, en (decentrale) procesbesturing, eventueel verbonden met een intelligente controller en aanvullende thermische opslag.

De decentrale energiecentrale kan zich bevinden op eindgebruiker niveau of op gebouw, straat of sectorniveau. Daarnaast kan bij een energiecentrale op gebouw/sector niveau worden gekozen voor verschillende temperatuurniveaus van het distributienet. In Figuur 15 zijn de volgende drie mogelijkheden weergegeven:

- **Configuratie 1:** energiecentrale (WP + opslag + controller) bij de woning/ eindgebruiker. Dit is bijvoorbeeld van toepassing bij grondgebonden woningen, waarbij de combi-warmtepomp zowel ruimteverwarming, koeling als tapwater produceert.

- Configuratie 2: Energiecentrale (WP + opslag + controller) op gebouwniveau. In dit geval is uitgegaan van een 4-pijps net op gebouwniveau, zodat bij de eindgebruiker de warmte of koude direct benut kan worden. De warmte is op LT niveau (35 - 50 °C), wat betekent dat bij goed geïsoleerde woningen de ruimteverwarming direct kan worden geleverd, maar een booster warmtepomp op eindgebruiker niveau nodig is voor de productie van tapwater.
- Configuratie 3: Energiecentrale (WP + opslag + controller) op gebouwniveau, op basis van een 4-pijps distributienet op gebouwniveau, met MT/HT warmte (> ca 65 °C) in de warme leidingen. Dit betekent dat zowel ruimteverwarming als tapwater direct van het gebouwnet kan worden geleverd. Vanuit energetisch oogpunt heeft dit niet de voorkeur.



Figuur 15: verschillende mogelijkheden voor het plaatsen van de decentrale energiecentrale

Er zijn verschillende overwegingen bij de keuze voor de locatie van de decentrale energiecentrale. Ten eerste geldt het principe: hoe dichterbij de eindgebruiker, hoe efficiënter het systeem, omdat de temperatuur dan precies kan worden afgestemd op de uiteindelijke benodigde temperatuur, en distributieverliezen voor warmte worden geminimaliseerd. Er kunnen echter redenen zijn om de decentrale energiecentrale op gebouw, of sectorniveau of soms zelfs op clusterniveau te plaatsen. Een belangrijke reden is het ruimtegebruik van warmtepompen op eindgebruiker niveau; dit kan een reden zijn om vooral in meergezinswoningen of multifunctionele gebouwen te kiezen voor een collectieve oplossing. Een andere belangrijke reden zijn de kosten: soms zijn de kosten voor een collectieve oplossing lager, omdat door gelijktijdigheid een lager vermogen geïnstalleerd benodigd wordt en een collectieve installatie vanaf een bepaalde schaalgrootte goedkoper is. Tot slot kunnen er ook energetische voordelen zijn aan een collectieve oplossing: de COP van een collectieve warmtepomp is mogelijk hoger, en de stilstandsverliezen en kosten van opslag zijn relatief kleiner bij grotere opslagvaten. Het is dus een nader uit te werken ontwerpkeuze waar de decentrale energiecentrale het beste geplaatst kan worden.

## 3.2 Vereenvoudigde KoWaNet varianten

De basis KoWaNet variant gaat uit van flexibele temperaturen tot 50 °C in het netwerk om de beschikbare bronnen te kunnen benutten. In sommige gevallen wanneer het gebied beperkt is, zijn er minder verschillende bronnen beschikbaar. In dat geval kan een vereenvoudigd systeem mogelijk zijn. Het is dan raadzaam om eerst te kijken of er gebieden kunnen worden gedefinieerd die het mogelijk maken alle restwarmte te benutten en te optimaliseren zoals beschreven in het basisprincipe.

Voor kleinere gebieden met beperktere bronnen zijn de volgende vereenvoudigde varianten mogelijk:

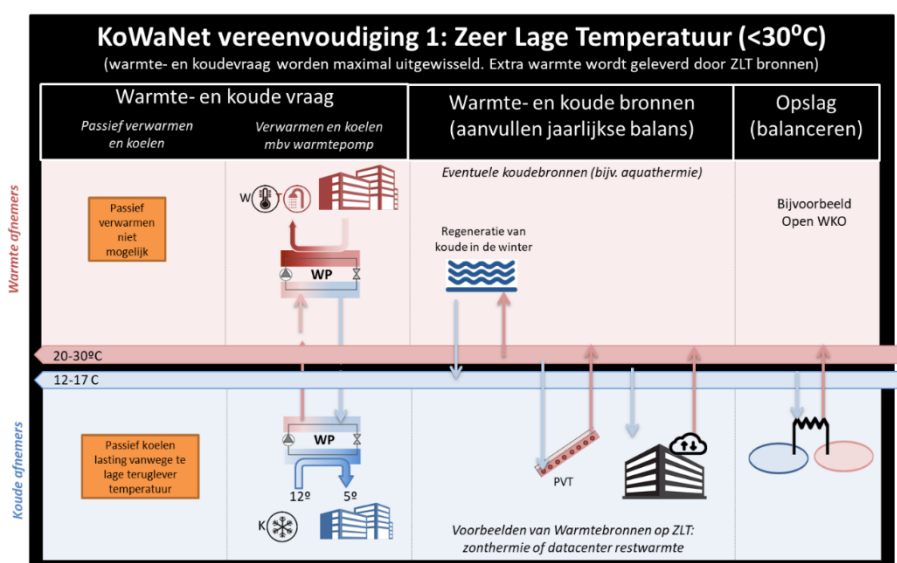
- Vereenvoudiging 1: ZLT (met temperaturen < 30 °C)
  - Wanneer alleen warmtebronnen < 30 °C beschikbaar zijn
  - Actief koelen en verwarmen, met een warme leiding < 30 °C
- Vereenvoudiging 2: Net op omgevingstemperatuur (vergelijkbaar met een WKO net).
  - Wanneer alleen bronnen op omgevingstemperatuur beschikbaar zijn, vaak in combinatie met een Warmte Koude Opslag (WKO) en regeneratie.
  - passief koelen en actief verwarmen

### 3.2.1 Vereenvoudiging 1: ZLT net (<30°C)

Indien in een bepaald gebied alleen bronnen beschikbaar zijn tot ca 20 – 35 °C en de warmtevraag dominant is, kan het systeem worden ontworpen op temperaturen tot ca 30 °C. In dit geval zal er altijd actief verwarmd worden en is een speciale regeling in de warmtepomp zoals getoond in

Figuur 13 niet van toepassing. Passief koelen is in principe wel mogelijk, maar dit 'vervuilt' mogelijk de temperatuur van de warme leiding, doordat de retour van de koeling niet voldoende hoge temperatuur levert. Indien er zeer weinig koeling is, kan dat worden geaccepteerd. Indien er een significante koelvraag is, kan beter worden gekozen voor actieve koeling, zodat de warmtepomp de juiste retourtemperatuur kan garanderen.

Deze vereenvoudigde variant is weergegeven in Figuur 16.

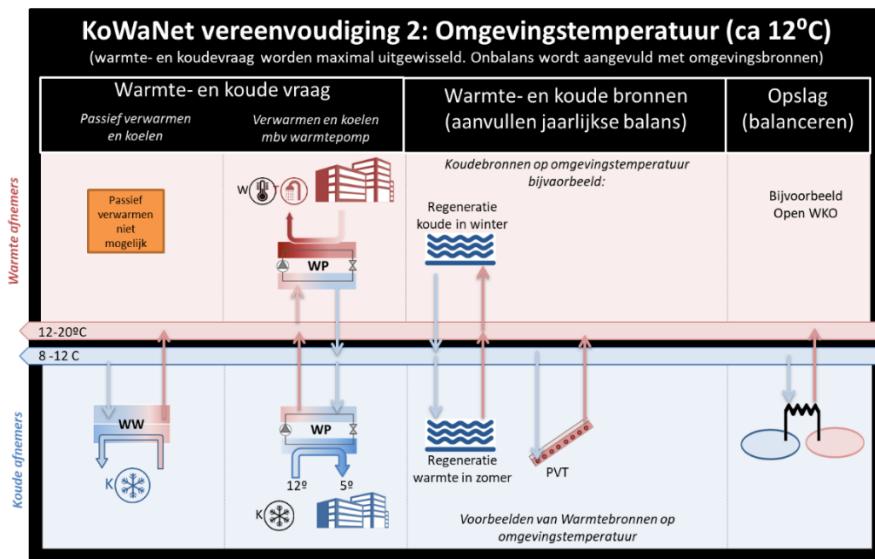


Figuur 16: Schematische weergave van KoWaNet vereenvoudiging 1: ZLT (< 30 °C)



### 3.2.2 Vereenvoudiging 2: omgevingstemperatuur (~12°C)

Een tweede vereenvoudiging is toepasbaar voor gebieden met ongeveer een gelijke koel- en de warmtevraag en gebieden waar geen warmtebronnen zijn anders dan warmtebronnen op omgevingstemperatuur (zoals buitenlucht en oppervlaktewater). Dit type draait op omgevings- en bodemtemperaturen, dus rond de 12 °C (~ 8 – 16 °C) en is vergelijkbaar met een WKO systeem, waarbij het net fungeert als bron voor een warmtepomp voor de warmtelevering. Het net levert de koeling direct. Vereenvoudiging 2 is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 17: Schematische weergave vereenvoudiging 2: net op omgevingstemperatuur.

### 3.3 Vergelijking met warmtenetten op hogere temperatuur

In paragraaf 1.3 en Figuur 3 zijn de verschillende temperaturniveaus voor warmtenetten getoond. Deze types (excl. KoWaNet type) zijn kort herhaald in onderstaande tabel:

Tabel 3: Samenvatting temperaturniveaus warmtenetten

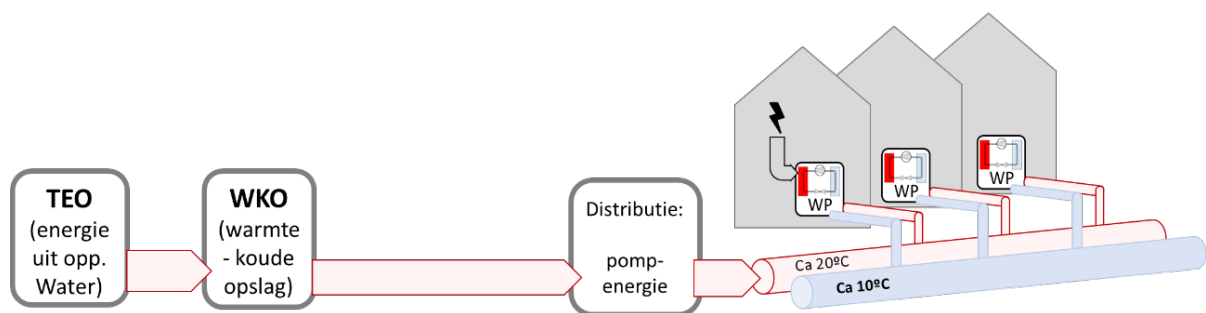
Schema	T	Ruimteverwarming	Tapwater	Koeling
	Aanvoer > 75 °C Retour > 40 °C	Meestal direct; afhankelijk van isolatieniveau en afgiftesysteem	Direct via warmtewisselaar/afleverzet	extra voorziening voor koeling nodig indien gewenst.
	Aanvoer 55 – 75 °C Retour 30 – 50 °C	Directe warmtelevering voor redelijk tot goed geïsoleerde woningen	Eventueel legionella preventie nodig	extra voorziening voor koeling nodig, indien gewenst
	Aanvoer 30 – 55 °C Retour 20 – 35 °C	Alleen voldoende in goed geïsoleerde woningen met een LT afgifte systeem	Booster warmtepomp en boiler vat nodig	Eventueel koeling met warmtepomp mogelijk
	Warme leiding < 30 °C Koude leiding < 15 °C	Warmtepomp nodig voor leveren ruimteverwarming	Warmtepomp en boiler vat nodig voor tapwater	Directe koeling vanuit het warmtenet mogelijk.

De temperatuur in het net kan geleverd worden door verschillende bronnen. Sommige bronnen produceren direct hoge- of midden temperatuur, zoals (verbranding van) brandstoffen en sommige industriële restwarmte. Het is ook mogelijk om op basis van (Z)LT bronnen een warmtenet op hogere temperaturen te voeden. In dat geval is een centrale warmtepomp nodig om de gewenste temperatuur te realiseren. In de volgende paragraaf worden verschillende opties getoond voor het opwaarderen van een (Z)LT bron.

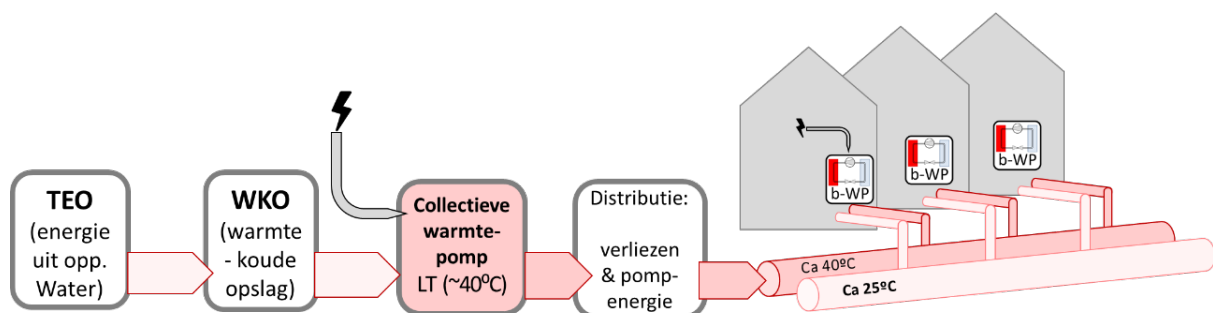
### 3.3.1 Opwaarderen van (Z)LT bronnen met een collectieve warmtepomp

In onderstaande schema's is uitgegaan van de beschikbaarheid van Thermische Energie uit Oppervlakte water (TEO). In combinatie met een WKO kan deze energie worden benut in de winter. Met een collectieve warmtepomp kan deze warmte worden opgewaardeerd tot de gewenste temperatuur in het net. In onderstaande schema's zijn vier opties getoond:

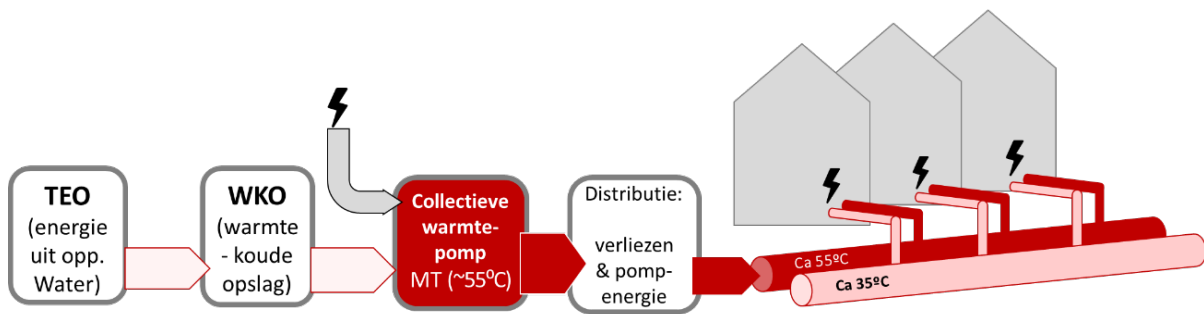
- Figuur 18: Direct gebruik van een ZLT bron in een ZLT/bronnet
- Figuur 19: Opwaarderen tot een LT temperatuurniveau (ca 30-55 °C)
- Figuur 20: Opwaarderen tot een MT temperatuurniveau waarmee niet direct tapwater kan worden geproduceerd (ca 55 °C)
- Figuur 21: Opwaarderen tot een MT of HT temperatuurniveau waarmee zowel ruimteverwarming als tapwater direct kan worden geleverd (ca 70 °C).



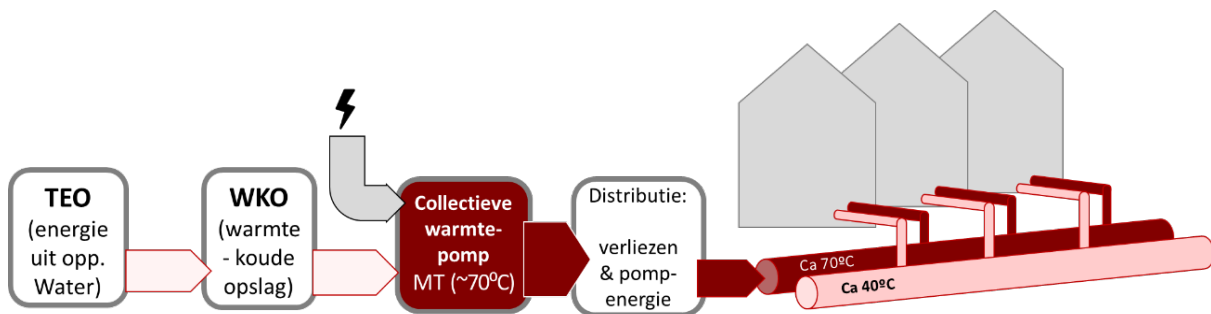
Figuur 18: gebruik van een ZLT warmtebron (TEO+WKO) voor een collectief ZLT/bronnet, met individuele warmtepompen voor ruimteverwarming en tapwater.



Figuur 19: gebruik van een ZLT warmtebron (TEO+WKO) om met een collectieve warmtepomp een LT warmtenet van 40° te voeden. Hierbij kan bij zeer goed geïsoleerde woningen direct ruimteverwarming geleverd worden, maar is een booster warmtepomp nodig voor tapwater.



Figuur 20: gebruik van een ZLT warmtebron (TEO+WKO) om met een collectieve warmtepomp een warmtenet van 55° te voeden. Hierbij kan bij goed geïsoleerde woningen direct ruimteverwarming geleverd worden, maar is een elektrische booster nodig voor tapwater.



Figuur 21: gebruik van een ZLT warmtebron (TEO+WKO) om met een collectieve warmtepomp een warmtenet van 70° te voeden. Hierbij kan bij redelijk geïsoleerde woningen direct ruimteverwarming én tapwater geleverd worden.

### Energiegebruik en energie efficiëntie:

Zoals in de figuren getoond is, gebruikt zowel de individuele als de collectieve warmtepomp elektriciteit. Een (grote) collectieve warmtepomp kan in principe een hogere COP hebben dan een kleine individuele warmtepomp, maar als deze een hogere temperatuur moet produceren vanwege het slechts geïsoleerde gebouw of vanwege de keus direct warmte voor tapwater te kunnen leveren, gaat de COP juist weer omlaag (zie Hoofdstuk 5 Kentallen en achtergrondinformatie). De individuele warmtepomp kan de warmte precies op het temperatuurniveau maken dat nodig is voor het betreffende gebouw, waardoor altijd de beste presentatie gehaald kan worden. Daarnaast heeft een netwerk met een collectieve opwek vanwege de hogere temperaturen vaak significant meer warmteverliezen (zie ook Hoofdstuk 5).

### Overweging: waar liggen de beschikbare bronnen?

Een andere overweging voor de keuze is de vraag welke (lokale) bronnen benut kunnen worden. Voor een centrale opwaardering met een collectieve warmtepomp is ook een (grootschalige) centrale ZLT warmtebron nodig. Bij meerdere kleine geografisch verspreide bronnen kunnen deze niet in het net benut worden als de temperatuur centraal is verhoogd, tenzij de temperatuur van deze bronnen ook decentraal wordt opgehoogd met een warmtepomp. Daarnaast moet voor sommige gebouwen een apart koelsysteem worden geïnstalleerd als de temperatuur in het warmtenet te hoog is om te koelen.

### 3.3.2 Voor- en nadelen van KoWaNetten versus hogere temperatuur warmtenetten met centrale opwekking

Traditionele warmtenetten werken met centrale opwekking en het distribueren van midden of hoge temperatuur warmte via het leidingnetwerk. Een KoWaNet daarentegen werkt altijd met een zo laag mogelijke netwerk temperatuur, in principe nooit hoger dan de beschikbare warmtebron, en het ophogen/verlagen van de temperatuur decentraal vindt plaats door warmtepompen bij de afnemer/klant, ofwel aan het einde van de warmteketen.

Door de decentrale opwekking op gebouw niveau is bij een KoWaNet gelijktijdig verwarming en koeling mogelijk met een 2-pijps netwerk. Bij een MT of HT net met centrale opwekking is een 4-pijps systeem nodig om eveneens koeling te kunnen leveren.

Decentraal ophogen/verlagen van de temperatuur levert meerdere efficiëntie voordelen:

- Het KoWaNet is vraag gedreven. Alleen de temperatuur die de eindgebruiker wenst, wordt geproduceerd. Het systeem is dus altijd op zijn efficiëntst.
- Door de lage temperatuur in het net zijn de warmteverliezen in een KoWaNet gering. Bij een MT/HT netwerk zijn de warmteverliezen veel hoger door de hoge temperatuur en circulatie van warm water, ook in de zomer voor de bereiding van warm tapwater.
- In veel gevallen wordt zowel de koude als de warme kant van de warmtepomp benut.
- Door de lage netwerktemperatuur kunnen alle decentrale warmte- en koudebronnen worden benut.
- Een KoWaNet heeft een zeer laag elektriciteitsgebruik en altijd de mogelijkheid tot koeling
- De overall efficiëntie van een KoWaNet is circa 2 keer zo hoog als van een MT/HT net op 70 °C, geproduceerd met een collectieve warmtepomp<sup>3</sup>.

Een nadeel van het KoWaNet systeem is de benodigde ruimte voor de decentrale energiecentrale per gebouw. Door dit collectief per gebouw of bouwblok te organiseren, kan hier verder geoptimaliseerd worden (zie ook paragraaf 3.1.6).

De investeringskosten voor de decentrale opwekking van een KoWaNet zijn vaak hoger dan bij een collectieve opwaardering tot een MT warmtenet, maar het energiegebruik (en daarmee ook vaak de energiekosten) zijn lager. Tevens is de CO<sub>2</sub>-reductie fors hoger, waarmee de duurzaamheidsdoelstellingen eerder gehaald worden, het elektriciteitsnetwerk wordt ontlast en minder compenserende duurzame elektriciteitsopwekking nodig is met bijbehorende gevolgen (meer windmolens op zee; zwaardere onbalans maatregelen; hoge gesocialiseerde kosten). Het ruimtebeslag kan een rol spelen, maar deze is door een wijkaanpak en opwekking buiten het pand op te lossen.

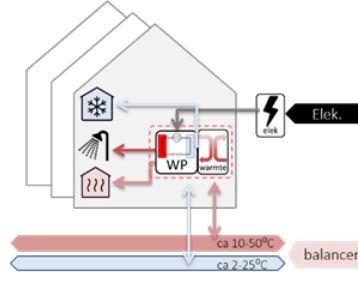
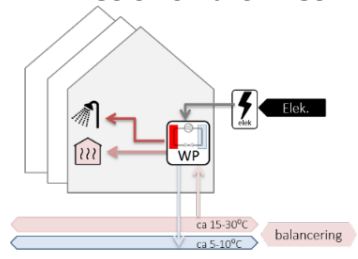
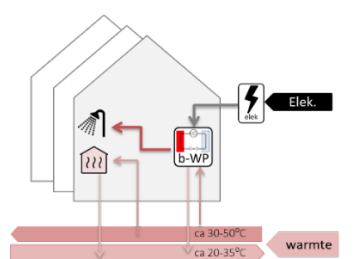
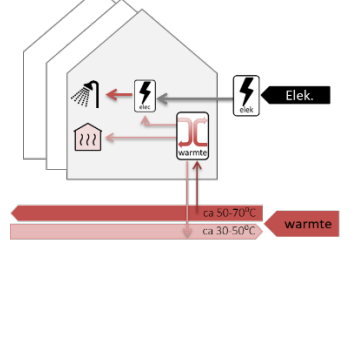
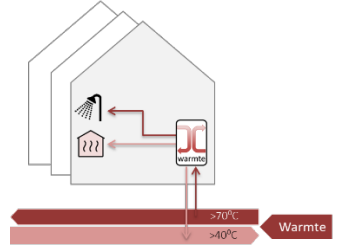
Vanuit oogpunt van energiezuinigheid is het altijd wenselijk om (Z)LT bronnen te benutten in een KoWaNet of (Z)LT net. Een KoWaNet biedt hierbij de meeste flexibiliteit om alle bronnen optimaal te benutten en de warmte en koude per gebouw of cluster op maat te leveren.

In onderstaande tabel is samengevat wat de voor- en nadelen van de verschillende temperatuurniveaus zijn en wanneer deze geschikt zijn om toe te passen.

---

<sup>3</sup> Dit een indicatie gebaseerd op een COP 6 voor een KoWaNet en COP 3,5 voor een MT/HT net met een collectieve WP die 70 °C warmte maakt, en 30% verliezen. (1.000 kWh/6=167 kWh<sub>e</sub>; 1.300 kWh/ 3,5= 370 kWh<sub>e</sub>). Als ook koeling wordt meegenomen, wordt het KoWaNet efficiënter en heeft de hogere temperatuur optie extra elektriciteit nodig.

Tabel 4: voor- en nadelen van verschillende temperaturniveaus warmtenetten

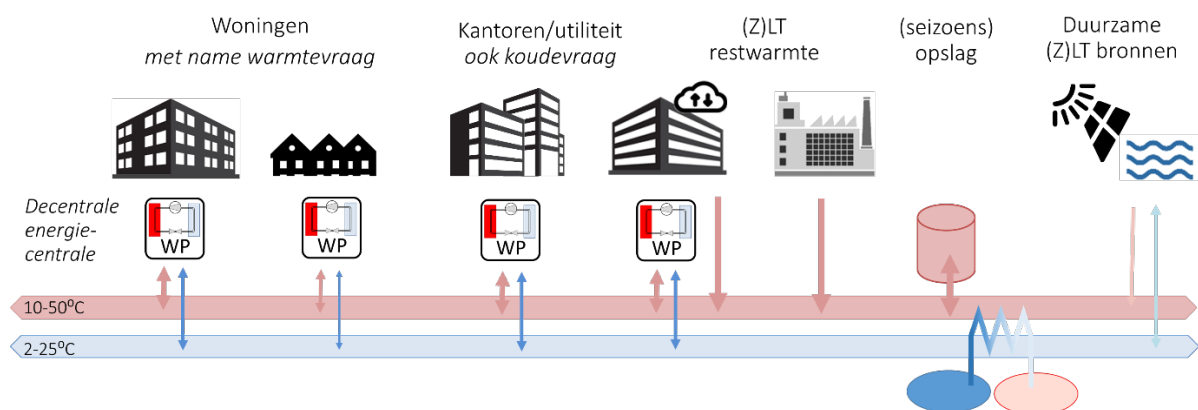
	<b>Toelichting eigenschappen</b>
<p><b>KoWaNet</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschikt om met een 2-pijps systeem gelijktijdig koeling en verwarming te leveren, door decentrale energiecentrales bij de afnemer, waar de temperatuur op maat wordt geproduceerd.</li> <li>- Het KoWaNet extra flexibel t.o.v. benutting van alle bronnen &lt; 50 °C en heeft een extra hoge efficiëntie van het totaalsysteem. Dit komt door de slimme combinatie van ZLT en LT net, waardoor het net zowel passief als actief (met warmtepompen) benut kan worden voor verwarming en koeling in de decentrale energiecentrales.</li> <li>- Nadelen: benodigde ruimte voor de warmtepomp en boiler per gebouw (gelijk aan nadelen ZLT net)</li> </ul>
<p><b>ZLT net of of bronnet</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschikt om koude en warmte te leveren, en daardoor koude-retour en warmtevraag uit te wisselen. Benutting van alle lokale ZLT bronnen &lt; 30 °C.</li> <li>- Door de individuele warmtepompen kan het optimale afgiftetemperatuur per gebouw worden bepaald. Feitelijk voor alle renovatie graden toepasbaar, maar bij voorkeur minimaal een goede basis isolatie, anders zijn gevraagde opwek en netwerkcapaciteit en bijbehorende investeringen hoog.</li> <li>- Nadelen: benodigde ruimte voor de warmtepomp en boiler per gebouw.</li> </ul>
<p><b>LT warmtenet</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschikt als er bronnen zijn op deze temperatuur, of de gebouwen geschikt zijn voor directe ruimteverwarming op dit temperaturniveau;</li> <li>- Afhankelijke van de temperatuur (30 – 50 °C) is vergaande isolatie nodig in combinatie met een LT afgiftesysteem / vloerverwarming</li> <li>- Nadelen: geen koeling vanuit het systeem; benodigde ruimte voor booster warmtepomp tapwater of andere tapwater oplossing</li> </ul>
<p><b>MT warmtenet</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschikt als lokale duurzame warmte beschikbaar is &gt; 50 °C;</li> <li>- Bij voorkeur bij een verwaarloosbare koelvraag, en als gebouwen afgifte temperatuur &gt;50°C nodig hebben.</li> <li>- Nadelen: Relatief veel warmteverliezen</li> </ul> <p>Opmerking: Bij een MT net ligt de temperatuur van de warme leiding volgens de nu gangbare definities tussen 50-70°C. Daarbinnen is dus nog een range aan benodigde eigenschappen van het systeem:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mate van isolatie afhankelijk van het temperaturniveau</li> <li>- Eventuele benodigde extra voorziening voor tapwater (elektrisch naverwarmen); indien &gt; 65 °C kan het tapwater worden geproduceerd met een eenvoudige afleverzet in de woning.</li> </ul>
<p><b>HT warmtenet</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mogelijke geschikt indien lokale duurzame warmte beschikbaar is bij temperaturen &gt; 70 °C, én het bestaande gebouwen betreft die moeilijk te isoleren zijn.</li> <li>- Tapwater kan worden geproduceerd met een eenvoudige afleverzet in de woning.</li> <li>- Grote warmteverliezen. Omdat de distributieverliezen in absolute zin niet veranderen, worden de distributieverliezen naar verhouding groter bij geïsoleerde gebouwen met een relatief lage warmtevraag.</li> </ul>

### 3.4 Samenvatting technische beschrijving KoWaNet

Een KoWaNet systeem gaat als basis uit van een 2-pijps infrastructuur met flexibele temperaturen  $< 50^{\circ}\text{C}$ , vaak grotendeels onder de  $30^{\circ}\text{C}$ . Aan deze warme en koude leidingen zijn decentrale energiecentrales gekoppeld, die de temperatuur naar het juiste niveau opwaarderen. De decentrale energiecentrales bestaan uit één of meerdere warmtepompen, schakelvaten, uitwisselstation met het netwerk, distributiepompen, en (decentrale) procesbesturing, eventueel verbonden met een intelligente controller en aanvullende thermische opslag. Een slimme warmtepompstelling maakt het mogelijk dat warmte en koude uit het 2-pijps basisnet zowel passief (via een warmtewisselaar) als actief (met een warmtepomp) kan worden benut, al naar gelang de beschikbare temperatuur in het net.

De decentrale energiecentrale kan zich bevinden op woning-, gebouw- of sector- (meerdere gebouwen) niveau. Deze energiecentrale zorgt voor de uitwisseling tussen koude- retour en warmtevraag binnen het gebouw; er is dus altijd sprake van netto warmte- óf koudelevering door het netwerk aan de decentrale energiecentrale. De energiecentrales wisselen warmte en koude uit via het 2-pijps basis netwerk: netto warmtevragers leveren 'koude' terug aan het net, en vice versa. Bij een KoWaNet is dus gelijktijdige levering van koeling en verwarming mogelijk aan de aangesloten gebouwen.

Indien warmte- en koudevraag niet in balans zijn, kan warmte of koude worden aangevuld met lokale (Z)LT restwarmte of duurzame (Z)LT bronnen. Ongelijktijdigheid van warmtevraag en -aanbod kan worden opgevangen met (seizoens)opslag.



Figuur 22: Schematische weergave van een KoWaNet ofwel 5<sup>e</sup> generatie warmtenet, waarbij de basis wordt gevormd door een 2-pijps net met flexibele temperaturen  $< 50^{\circ}\text{C}$ . De temperatuur wordt voor de aangesloten gebouwen naar het juiste niveau opgevoerd met decentrale energiecentrales.

Traditionele warmtenetten werken met centrale opwekking en het distribueren van midden ( $55\text{-}75^{\circ}\text{C}$ ) of hoge temperatuur ( $> 75^{\circ}\text{C}$ ) warmte via het leidingnetwerk. Een KoWaNet daarentegen werkt altijd met een zo laag mogelijke netwerk temperatuur, in principe nooit hoger dan de beschikbare warmtebron, en het ophogen/verlagen van de temperatuur vindt decentraal plaats door warmtepompen bij de afnemer, ofwel aan het einde van de warmteketen.

Een KoWaNet is hierdoor flexibeler en heeft een hogere energie-efficiëntie, omdat alle bronnen op de beschikbare temperaturen kunnen worden benut en de warmte en koude "op maat" geleverd kunnen worden aan de gebruiker.

## 4 Stappenplan

Om te komen tot een optimale configuratie en een eerste inschatting te maken van de energie-efficiënte is een stappenplan ontwikkeld. Hierbij zijn verschillende Excel tools beschikbaar om de inschatting van de energiebalans en energieprestatie te ondersteunen.

Paragraaf 4.1 geeft een overzicht van de stappen; de volgende paragrafen gaan dieper in op elke stap. De achtergronden van alle kentallen en berekeningen zijn te vinden in Hoofdstuk 5.

### 4.1 Overzicht

De volgende stappen leiden tot de ontwikkeling van één (of meerdere) mogelijke technische concepten en een keuze op basis van energieprestatie:

1. Verzamelen projectinformatie
2. Opstellen warmtebalans van de behoefte (warmte en koude) per jaar, per maand en bij voorkeur ook per uur.
  - a. Onderzoeken of een grotere of andere gebiedsgrens de uitwisseling tussen warmte- en koudevraag kan vergroten.
3. In kaart brengen van de mogelijke warmte- en koudebronnen per maand en per jaar, en van mogelijkheden voor thermische opslag
  - a. Onderzoeken of een grotere of andere gebiedsgrens de mogelijke benutting bronnen kan verhogen.
4. Samenstellen van potentiële technische configuraties
  - a. Geografische en/of schematisch ruimtelijke weergave van de vraag en de bronnen
  - b. Principe schema's KoWaNet varianten (waar wordt de temperatuur opgewaardeerd)
  - c. Mogelijke andere varianten o.b.v. (Z)LT bronnen
5. Schetsontwerp / technical engineering
  - a. Aansluitvermogen en gelijktijdigheid bepalen
  - b. Tracé ontwerp, leidinglengtes en leidingdiameters.
  - c. Eventuele keuze voor onderdelen (pompen, warmtepompen e.d.)
6. Inschatten energieprestatie van de potentiële configuraties
  - a. Op basis van warmteverliezen, COPs, pompenergie, e.d.
7. Keuze voor de uitwerking van een of meerdere configuraties, rekening houdend met de overige doelen (kosten, haalbaarheid, ruimtebeslag binnen en buiten de woning).

Met dit stappenplan kunnen ook energieconfiguraties worden ontwikkeld die niet tot de basis KoWaNet configuraties horen, en kan een vergelijking worden gemaakt ter referentie. Voor de uitvoering van het stappenplan zijn verschillende tools beschikbaar op de project website [www.kowanet.nl](http://www.kowanet.nl).

## 4.2 Stap 1: Verzamelen projectinformatie

Om een energieconcept te ontwikkelen moeten de relevante gegevens van een wijk of gebied beschikbaar zijn. De benodigde gegevens staan weergegeven in Tabel 5. Deze gegevens vormen de invoer voor de volgende stap, waar de energievraag en -potenties worden bepaald.

Tabel 5: benodigde projectgegevens - inventarisatie

<ul style="list-style-type: none"><li>De initiële gebiedsgrens</li></ul>	<p>Deze zijn in eerste instantie bepaald door de opgave. Het is echter aan te bevelen om ook buiten de bepaalde gebiedsgrens te kijken, en om de mogelijkheden van uitwisseling van warmte- en koudevraag én de benutting van alle beschikbare restwarmte (en soms ook -koude) optimaal te benutten. Dit is een iteratief proces.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>De gebouwen in het gebied</li></ul>	<p>Bij bestaande woningbouw is het van belang de aanwezige gebouwen goed in kaart te brengen, met de energie gerelateerde eigenschappen.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Gebouwtype</li><li>m<sup>2</sup> per type</li><li>bouwjaar en of isolatieniveau</li><li>Renovatieplannen en beoogd renovatieniveau</li></ul> <p>Deze gegevens kunnen bijvoorbeeld deels worden verkregen uit BAG gegevens of met behulp van GIS systemen als PICO/GEODAN, Tomahawk en de Startanalyse van het ECW t.b.v. Transitievisies Warmte.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>De beschikbare bronnen of locaties voor het plaatsen van duurzame energie opwekking</li></ul>	<p>De mogelijkheden of beschikbaarheid van volgende bronnen kan worden geïnventariseerd:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>ZON: beschikbaar oppervlak voor zonne-energie (PV panelen, collectoren of een combinatie hiervan / PVT)</li><li>WIND: beschikbare locaties voor windenergie</li><li>WKO: haalbaarheid/geschiktheid (DINO loket, wkotool.nl) en beschikbare locaties voor bronnen</li><li>Aquathermie: mogelijkheden voor het winnen van thermische energie uit oppervlakte water (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED) voor direct gebruik en regeneratie WKO.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Inventarisatie beschikbare restwarmte van (kleine) industrie</li></ul>	<p>Een inventarisatie kan worden gemaakt met behulp van BAG gegevens of de warmteatlas van RVO (<a href="http://www.warmteatlas.nl">www.warmteatlas.nl</a>), hoewel deze niet geheel up-to-date is.</p>



#### 4.2.1 Voorbeeld projectinformatie

Onderstaand is een voorbeeld getoond van de verzamelde projectinformatie m.b.t. de bestaande bebouwing. De gebouwen zijn opgesplitst per type, en het gemiddelde oppervlak per type is weergegeven. Deze data zijn verkregen uit BAG gegevens en google maps.

Tabel 6: Voorbeeld type gebouwen in een gebied, gegevens uit BAG.

Gebouwtipe	Sub-type	Dakoppervlak [m <sup>2</sup> ]	Aantal	t/m 1964	1965-1974	1975-1991	1992-2005	2006-2010	2011-2014	2015-2020
Appartementen		29.226	56	0	25	27	4	0	0	0
Grondgebonden woningen	Hoek (20%)	17.716	294	1	253	39	0	0	0	1
	Tussen (80%)	70.867	1.177	4	1011	156	1	0	0	5
kantoren		19.945	22	0	1	10	6	4	0	1
Lichte industrie		52.628	55	1	14	14	10	13	3	0
Winkels/supermarkt		11.207	1	0	1	0	0	0	0	0
School		1.574	2	0	2	0	0	0	0	0



Figuur 23: Voorbeeld van een overzicht van functies in een wijk volgens BAG gegevens. (Wijk Kerkelanden in Hilversum)

## 4.3 Stap 2: Warmte- en koudebehoefte, piekvermogen en warmtebalans

Stap 2 is het inschatten of bepalen van de netto warmte- en koudebehoefte<sup>4</sup> in het gebied en het benodigde piekvermogen. Vervolgens kan worden gekeken of de warmte- en koudevraag op jaarbasis, maandbasis en eventueel kortere tijdschaal in balans is.

Voor het inschatten van de warmte- en koudevraag en piekvermogen kan de KoWaNet Excel tool 'Vraag&Aanbod' worden gebruikt. Hiermee kan ook de warmtebalans per maand worden verkregen. De tabel met relevante kentallen is te vinden in de bijlagen 5.1.



### 4.3.1 Inschatten warmte- en koudevraag en piekvermogen

Voor het realiseren van een efficiënt warmtesysteem in het algemeen, en ook voor het realiseren van een koel warmtenet is het belangrijk dat de gebouwen goed geïsoleerd zijn. Bij veel bestaande woningen betekent dat dat energiebesparende maatregelen genomen moeten worden, zoals isoleren en/of het toepassen van warmteterugwinning op het ventilatiesysteem. In de praktijk betekent dat meestal isoleren tot minimaal ca. label B (bepaald op basis van de isolatiewaardes en excl. duurzame opwek), hoewel bij moeilijk te isoleren woningen ook gekozen kan worden het afgiftesysteem aan te passen om lagere temperaturen mogelijk te maken, en bij relatief nieuwere woningen mogelijk een beter label optimaal is. Deze maatregelen zorgen naast een reductie van de vraag ook voor een verlaging van het benodigde piekvermogen én verlaging van de benodigde afgifte temperatuur.

**In geval van renovatie moet dus een inschatting of voorspelling worden gedaan van de warmte- en koudevraag ná het nemen van de beoogde maatregelen.**

Voor het bepalen van het benodigde vermogen (per ruimte), wordt traditioneel (bij warmtelevering door aardgas) een statische warmteverliesberekening gemaakt, bijvoorbeeld conform ISSO 51. Een andere aanpak is het maken van een dynamische berekening. Een dynamische berekening kan de impact van 'slim opwarmen' meenemen: door het eerder aanzetten van de verwarming kan het benodigde vermogen aanzienlijk worden verminderd.

Voor het KoWaNet project is een set kentallen bepaald met de volgende gegevens:

- Netto warmte- en koudebehoefte voor verschillende gebouwfuncties en renovatieniveaus.
  - Op jaarbasis (kWh/m<sup>2</sup> per jaar)
  - Op maandbasis (kWh/m<sup>2</sup> per maand)<sup>5</sup>
- Benodigd thermisch piekvermogen per gebouwfunctie en renovatieniveau  
Het benodigd piekvermogen is bepaald op basis van een dynamische berekeningen, aangevuld met praktijkervaring.

---

<sup>4</sup> Zie §1.4.1 voor definitie en toelichting op de keten van energielevering warmte en koude.

<sup>5</sup> De kentallen op maandbasis zijn gebaseerd op enkele simulaties op uurbasis. Deze zijn toegelicht in Hst 5 en zijn ook te vinden in de KoWaNet Vraag&Aanbod Excel.

Deze set kentallen kan worden gebruikt om een eerste inschatting te maken van de benodigde hoeveelheid warmte of koude en het benodigde piekvermogen. De tabel met relevante kentallen is te vinden in de bijlagen, §5.1.

#### 4.3.2 Benodigde afgifte temperatuur

De benodigde afgiftemtemperatuur heeft een grote invloed op de prestatie van de warmtepomp en de manier waarop het koele warmtenet benut kan worden. Hoe lager de afgiftemtemperatuur, hoe hoger de prestatie van de warmtepomp en het systeem als geheel.

De benodigde afgiftemtemperatuur hangt af van het benodigde vermogen in een ruimte en het type afgiftesysteem. Veel afgiftesystemen hebben ook tabellen beschikbaar waarbij het vermogen bij verschillende afgiftemtemperaturen wordt gegeven. In onderstaande tabel is voor verschillende typen afgiftesystemen de bijbehorende ontwerp aanvoer en retourtemperaturen bij een binnentemperatuur van 20 °C weergegeven.

Tabel 7: afgiftemtemperaturen bij verschillende afgiftesystemen

Type afgiftesysteem	Ontwerp aanvoer/retour temperatuur	Vermogen
HT water radiator	75/65/20	Afhankelijk van model
HT lucht convector	75/65/20	Afhankelijk van model
LT radiator	45/35/20	Afhankelijk van model
LT convector	35/30/20	Afhankelijk van model
Vloerverwarming	35/30/20	Tot ca 80 W/m <sup>2</sup>

In de praktijk gelden bijvoorbeeld de volgende uitgangspunten:

- Basale renovatie label B (excl. duurzame opwek en zonder WTW):
  - 60 W/m<sup>2</sup>; aansluitvermogen
  - Temperatuur max: 65/55/20  
(bij goede kierdichting een eventueel aangepaste radiatoren: 50/40/20)
  - 0,25 GJ/m<sup>2</sup>; jaarverbruik (=70 kWh/m<sup>2</sup>)
- Vergaande renovatie label A++/Nieuwbouw BENG:
  - 30 W/m<sup>2</sup>; aansluitvermogen
  - Temperatuur max: 40/30/20 of iets lager in geval van volledig vloerverwarming
  - 0,12 GJ/m<sup>2</sup>; jaarverbruik (= 33 kWh/m<sup>2</sup>)
- Tapwater:
  - Booster warmtepomp 2,1 kW<sub>th</sub> met buffer 200 liter;
  - Tapwater verbruik 2,0 – 3,6 GJ/persoon; in praktijk lager (tegen min aan) dan vaak theoretisch aangenomen (tegen max aan).
  - Daarnaast verlies inpandig en uitpandig (netwerk) meenemen:  
Inpandig 0,4 W/m<sup>2</sup>.K; Uitpandig (DUO leiding) 0,2 W/m<sup>2</sup>.K
- Gelijktijdigheid ruimteverwarming < 70% bij meer dan 100 woningen; gelijktijdigheid tapwatervoorziening < 25% bij meer dan 100 woningen en sturing booster warmtepomp.

Wanneer een afgiftesysteem is ontworpen voor de oorspronkelijk situatie van een gebouw, heeft dit systeem na isolatie van dat gebouw een zekere overcapaciteit. De temperatuur van het systeem kan dan omlaag zonder verlies van comfort. Hoeveel precies hangt af van de isolatiegraad en het afgiftesysteem<sup>6</sup>.

Hoge afgifte temperaturen in combinatie met een hoog minimaal opwekvermogen zoals bij een CV-ketel zorgen voor een slechte regeling van de ruimte- en radiatortemperatuur, vooral na renovatie. CV-ketels zijn immers ontworpen voor het benodigd tapwatervermogen (vaak > 30 kW). Het grootste deel van de tijd draait de CV-ketel hierdoor start/stop omdat de feitelijke warmtevraag veel lager is dan het minimale vermogen van de ketel (> 25% max). Hierdoor is de gemiddelde temperatuur in de radiator over de tijd veel lager. Bij toepassing van warmtepompen met een veel lager (regelbaar) vermogen (4 - 10 kW) kan de warmtetoevoer constant en met een veel lagere temperatuur plaatsvinden. Voor het comfort is vooral de kierdichtheid een aandachtspunt. Bij een label B renovatie en een goede kierdichtheid, vooral in combinatie met een WTW geventileerd systeem, moet het verwarmen op lage temperatuur (< 50 °C) mogelijk zijn.

#### 4.3.3 [Warmtebalans en uitwisseling](#)

Zowel via warmtewisseling als met een warmtepomp wordt koude geproduceerd als warmte wordt geleverd, en andersom. Een warmtevraag is dus een koude-aanbod (verminderd met het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp), en andersom (plus elektriciteitsverbruik). (Zie ook §5.4.2 over de werking van warmtepompen).

Indien de koude- en warmtevraag op jaarbasis in balans zijn, hoeven in theorie weinig externe koude- of warmtebronnen te worden toegevoegd. Er is dan wel een behoefte aan (lange termijn / seizoens) opslag omdat de warmte- en koudevraag maar deels gelijktijdig plaatsvindt. Om de benodigde grootschalige en lange termijn opslag in te schatten kunnen de kentallen op maandbasis worden gebruikt. Voor een kleinere tijdschaal moeten meer gedetailleerde gegevens, bijvoorbeeld uurlijkse waarden, worden gebruikt.

Samenvattend:

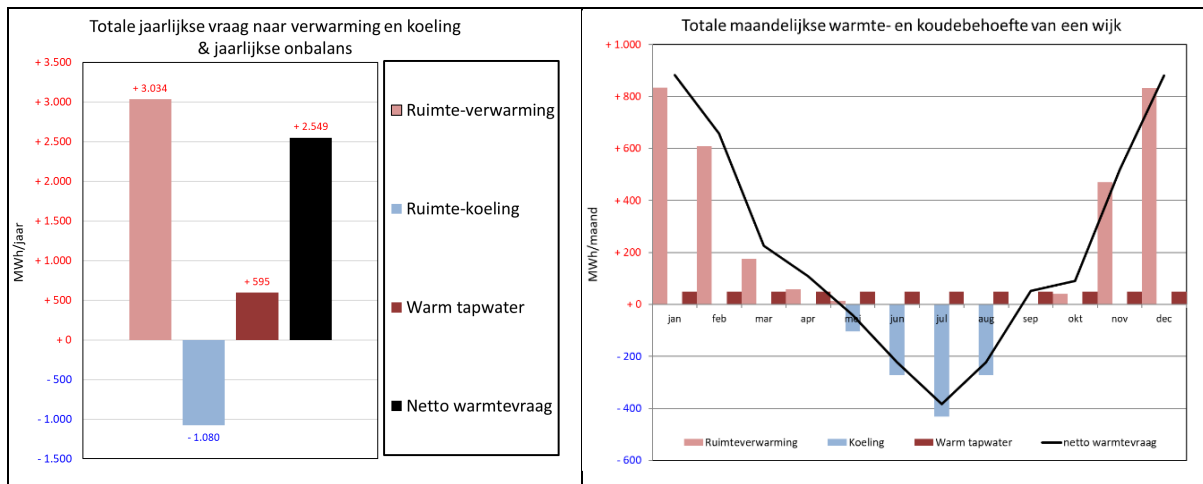
- De jaarlijkse balans geeft aan hoeveel uitwisseling op jaarbasis mogelijk is en of additionele bronnen nodig zijn;
- de maandelijkse balans geeft weer in hoeverre er lange termijn opslag nodig is;
- Daarnaast kan kortere termijn opslag nodig zijn voor piekafvlakking; hierbij moet bij de uitwerking rekening gehouden worden. Gebruik van uurlijkse waarde (of een kleinere tijdstap) heeft hier de voorkeur.

#### 4.3.4 [Voorbeeld van een balans van warmte- en koudevraag](#)

In de onderstaande figuren is de jaarlijkse en maandelijkse warmtebalans voor een gebied getoond. De zwarte lijn in de rechter figuur geeft de vereenvoudigde balans per maand weer: boven nul is een warmtevraag, onder nul betekent een koudevraag.

---

<sup>6</sup> In o.a. de afstudeerscriptie van Van der Drift (Drift, 2019) is onderzoek gedaan naar de relatie isolatiemaatregelen en benodigde afgifte temperatuur.



Figuur 24: jaarlijkse en maandelijkse warmte- en koudebehoefte. (Het elektriciteitsgebruik (van de warmtepomp) is hier nog niet in verwerkt.)

#### Toelichting:

- De jaarlijkse balans toont de totale jaarlijkse warmte- en koudevraag. Het elektriciteitsgebruik (van de warmtepomp) is hier nog niet in verwerkt, omdat dit nog niet bekend is. *Bij toepassing van een warmtepomp wordt de warmtevraag van het systeem lager, omdat het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp eveneens wordt omgezet in warmte.* Bij gebruik van een warmtepomp is er in de balans dus meer warmte beschikbaar dan de daadwerkelijke warmtevraag minus koelvraag.
- In dit voorbeeld is te zien dat er een significante onbalans is tussen warmte- en koudebehoefte. Dit betekent dat de onbalans moet worden aangevuld met duurzame (rest)warmtebronnen. Ook kan worden gekeken of een groter gebied kan leiden tot betere balans, bijvoorbeeld omdat er meer functies met een koudevraag in de omgeving te vinden zijn.
- Daarnaast blijkt dat er een duidelijke mismatch in de tijd is, wat lange termijn (thermische) opslag noodzakelijk maakt.

### 4.4 Stap 3: Potentieel warmte- en koude-aanbod

Indien de warmte- en koudevraag zoals bepaald in stap 2 niet in balans is, of als de mismatch in de tijd niet overbrugd kan worden door opslag, moet de onbalans worden aangevuld met duurzame (rest) warmtebronnen.

Ter verduidelijking: Een energiebehoefte (stap 2) is een behoefte die sowieso ingevuld moet worden, terwijl een energie-potentie (aanbod) alleen hoeft te worden benut als dit nodig is om de onbalans op te heffen. De bronnen die naar wens wel of niet kunnen worden ingezet, worden bij de 'energiepotenties' in kaart gebracht.

De volgende bronnen, eerder weergegeven in Tabel 2, kunnen worden geïnventariseerd:

- Aquathermie:
  - TEO (thermische energie uit oppervlaktewater)
  - TEA (thermische energie uit afvalwater)
  - TED (thermische energie uit drinkwater)

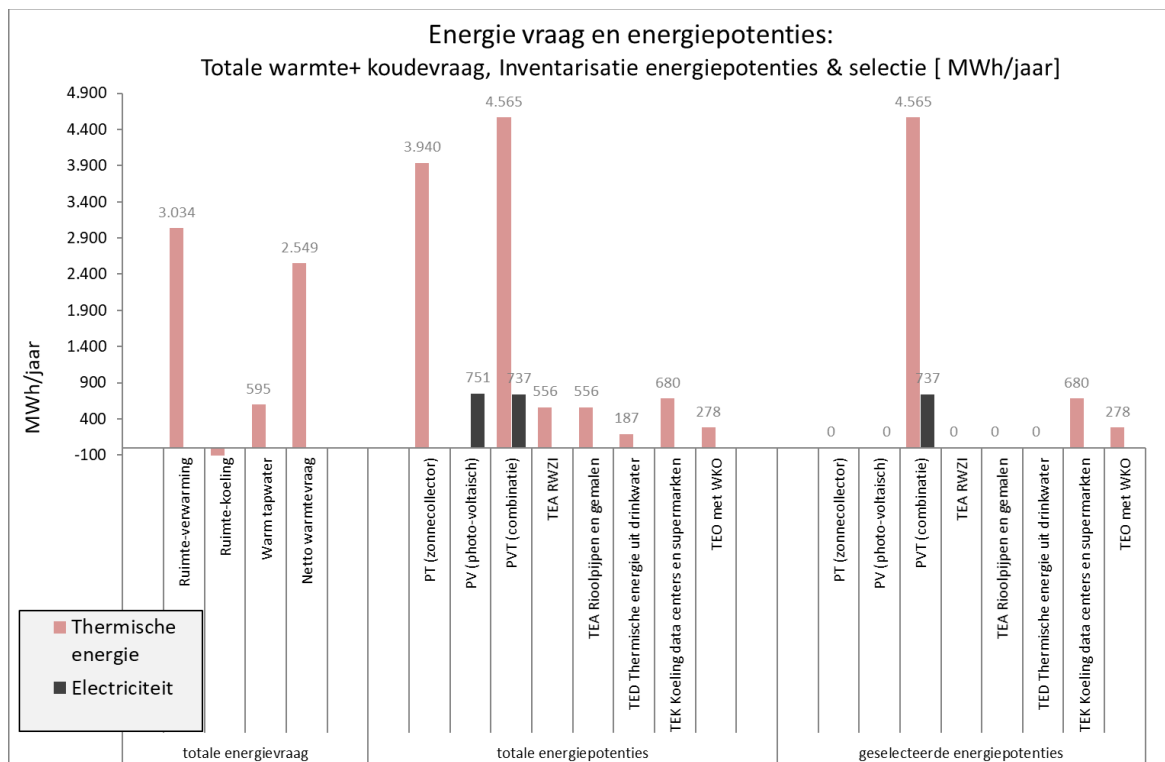
- Zonthermie:
  - Vacuüm collectoren
  - Vlakke plaat collectoren
  - PVT (combinatie van zon PV en zonnecollectoren)
  - PVT + warmtewisselaar
- Lucht:
  - buitenlucht of afgezogen binnenlucht
  - ondergrondse transport buizen, zoals metro.
  - dry-coolers
- Restwarmte van industrie

Met de KoWaNet Excel tool 'Vraag&Aanbod' kan van een groot aantal potentiële bronnen de warmte- of koudepotentie (aanbod) worden bepaald, op jaar- en maandbasis. De toelichting en achtergronden zijn beschreven in Hoofdstuk 5.



#### 4.4.1 Voorbeeld van een inventarisatie van energiepotenties

In onderstaande figuur is een overzicht weergegeven van de totale warmte en koudevraag en de totale beschikbare / potentiële energiebronnen en de (voor een bepaald project) geselecteerde bronnen. Met behulp van dit overzicht kan duidelijk worden gezien wat de netto warmtevraag is<sup>7</sup> en welke bronnen ingezet kunnen worden om deze netto warmtevraag te leveren, en of er voldoende bronnen beschikbaar zijn.



Figuur 25: voorbeeld overzicht van de totale energievraag van een wijk en potentiële aanbod duurzame warmte en elektriciteit.

<sup>7</sup> Dit is de totale warmtevraag minus totale koudevraag, waarbij geen rekening is gehouden met het feit dat de koudevraag meer warmte levert dan de koudevraag zelf, indien deze koude wordt geproduceerd met een warmtepomp.

Deze jaarlijkse waarden zijn natuurlijk slechts een eerste inschatting, en zoals eerder beschreven moet ook hier rekening worden gehouden met het feit dat de bronnen niet gelijktijdig beschikbaar zijn, mogelijk niet op de zelfde plaats als de vraag, en mogelijk niet meteen het juiste temperatuurniveau hebben. Dit moet worden opgelost door opslag, distributie en opwaardering van de temperatuur met een warmtepomp. Dit wordt ook nog besproken in de volgende paragraaf.

## 4.5 Stap 4: Samenstellen van potentiële technische configuraties

Een configuratie is een combinatie van energiecomponenten (o.a. leidingnet, thermische energieopslag, warmtepomp, decentrale energiecentrale zoals toegelicht in § 3.1.6), waarmee met de beschikbare bronnen aan de warmte- en koudevraag kan worden voldaan.

Er zijn verschillende mogelijke configuraties, zoals besproken in Hoofdstuk 2 en 3. De basis voor het bepalen van de mogelijke en meest geschikte configuraties zijn de warmte-koude balans (stap 2), en de beschikbare bronnen met bijbehorende temperatuurniveaus (stap 3). In stap 4 worden de configuraties ontwikkeld op basis van deze voorgaande stappen. Hierbij komen de volgende sub-stappen aan bod:

- 1) Het geografisch weergeven van de warmte- en koudevraag en de potentiële bronnen.
- 2) Optioneel: een schematisch ruimtelijke weergave van de vraag en de bronnen
- 3) Een plan maken voor de locaties voor de decentrale energiecentrales, waar de temperatuurverschillen worden overbrugd.
- 4) Principe schema's KoWaNet varianten (waar wordt de temperatuur opgevaardeerd met een decentrale energiecentrale)

Het gekozen schaalniveau voor de decentrale energiecentrale leidt tot verschillende configuraties. Deze schaalniveaus zijn eerder getoond en toegelicht in Figuur 14 en Figuur 15.

Om te bepalen wat een logische plek is voor de decentrale energiecentrale is het daarom zinvol om de locatie van de vraag én de bronnen zowel in de kaart (geografisch) als schematisch in schaalniveaus in te delen.

Op [www.kowanet.nl](http://www.kowanet.nl) is een hulpmiddel voor het maken van de ruimtelijke schema's beschikbaar.  
(powerpoint bestand 'KoWaNet figuren Ruimtelijke schema's')



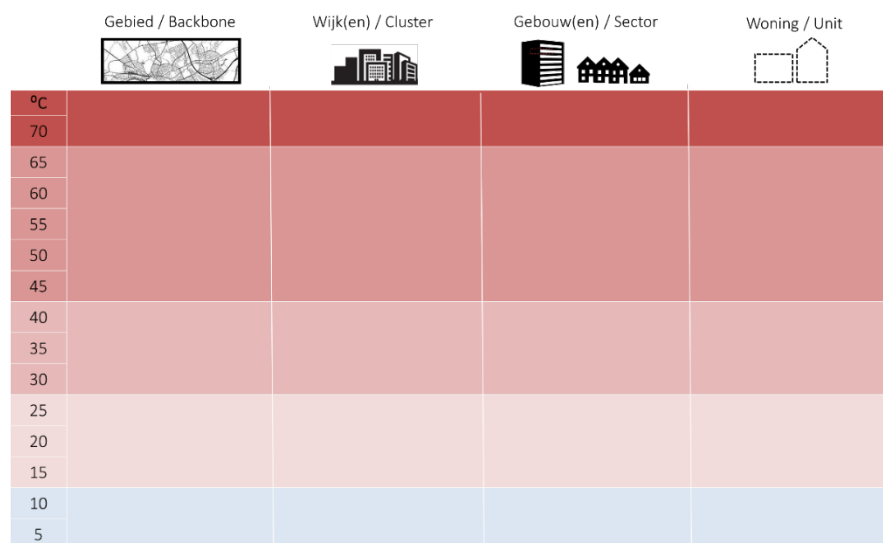
### 4.5.1 Geografische weergave

De warmte- en koudevraag en de potentiële bronnen kunnen in een kaart of plattegrond worden weergegeven. Dit kan als basis dienen voor de schematische ruimtelijke weergave en inzicht geven in een logische locatie voor decentrale energiecentrales.

### 4.5.2 Schematische ruimtelijke weergave

De in stap 2 en 3 vastgestelde warmte- en koudevraag en -aanbod kunnen ook in een ruimtelijk schema worden weergegeven. De warmte- en koudevraag bevindt zich vanzelfsprekend bij de eindgebruiker/prosument en is dus verspreid over het gebied. Ook kleinschalige bronnen zoals zonthermie kunnen verspreid over het gebied bij de

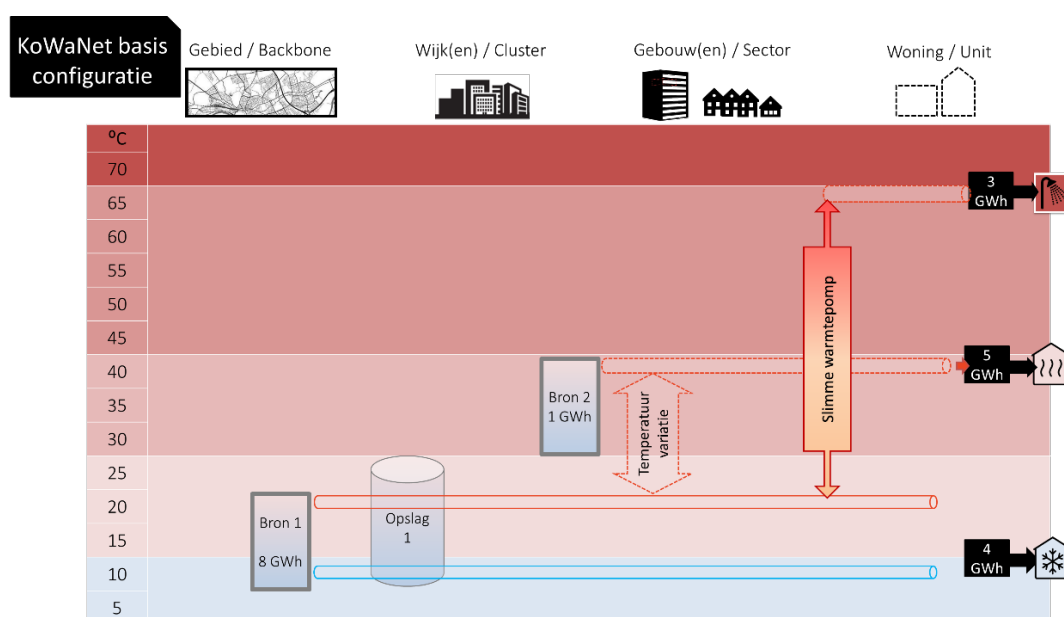
eindgebruiker beschikbaar zijn. Grootschalige bronnen die voor het hele gebied dienst kunnen doen worden op gebiedsniveau geplaatst. In Figuur 26 is een template voor het weergeven van vraag en aanbod getoond.



Figuur 26: schema voor ruimtelijke weergave vraag en aanbod.

#### 4.5.3 Principe schema's KoWaNet varianten

De tweede substap bepaalt de meest toepasselijke KoWaNet variant. Zoals toegelicht in Hoofdstuk 3 hangt dit grotendeels af van de temperatuur van de beschikbare bronnen. In het vereenvoudigde voorbeeld van Figuur 27 zijn er twee bronnen: bron 2 heeft een relatief hoge temperatuur beschikbaar (tussen 30 en 40°C); deze is echter niet voldoende is voor de gehele vraag. Dit betekent dat bron 1 (van lagere temperatuur) ook nodig is en dat met deze bronnen de basis KoWaNet configuratie gerealiseerd kan worden. De temperatuur kan op gebouw(en) niveau of woningniveau worden opgehoogd. Schematisch ziet dat er zo uit:



Figuur 27: schematische ruimtelijke weergave basis KoWaNet configuratie.



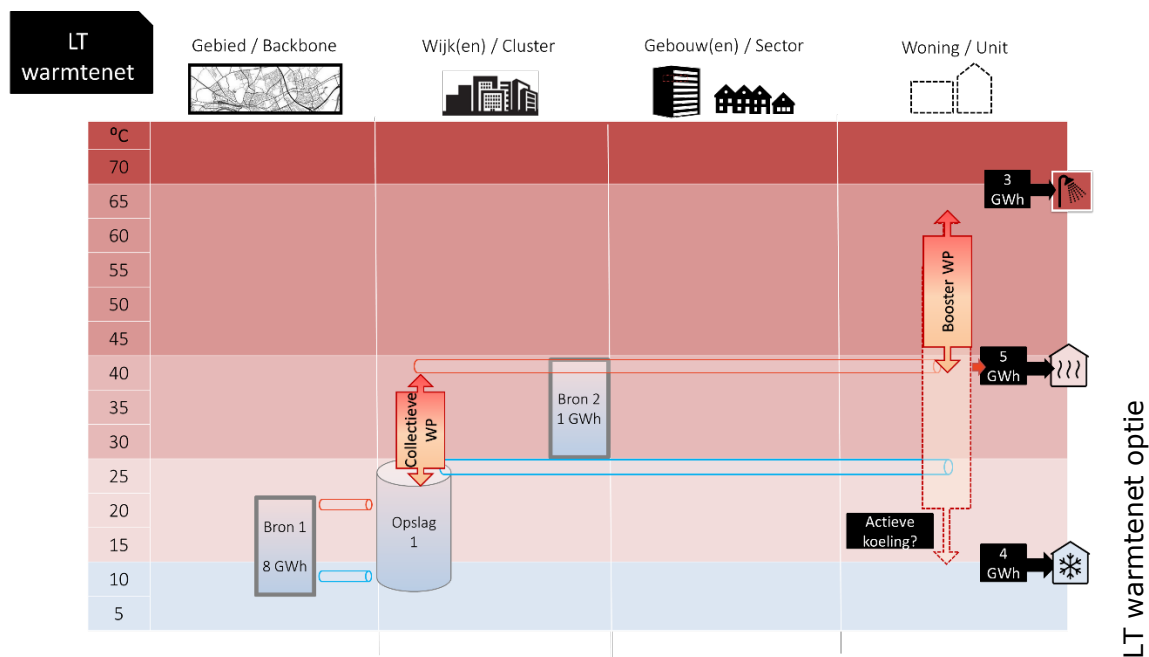
Bij de basis KoWaNet configuratie is een flexibele temperatuur in het net het uitgangspunt. De 'slimme warmtepomp' kan zowel warmte via de warmtepomp opwekken als passief een deel van het aanbod gebruiken, als de temperatuur daar hoog genoeg voor is. Dit is toegelicht in §3.1.3. Als bron 2 niet beschikbaar zou zijn - en er was al onderzocht of het vergroten van het gebied tot de mogelijkheden behoorde - dan zou de temperatuur flexibiliteit niet nodig zijn en kan een vereenvoudigd KoWaNet type worden uitgewerkt.

In plaats van een individuele warmtepomp op gebruiker niveau kan ook worden gekozen voor een collectieve warmtepomp op gebouw of sectorniveau voor ruimteverwarming, met een individuele boosterwarmtepomp voor HT-warmte (tapwater) op gebruiker niveau. Dit is verder toegelicht in paragraaf 3.1.5 en 3.1.6.

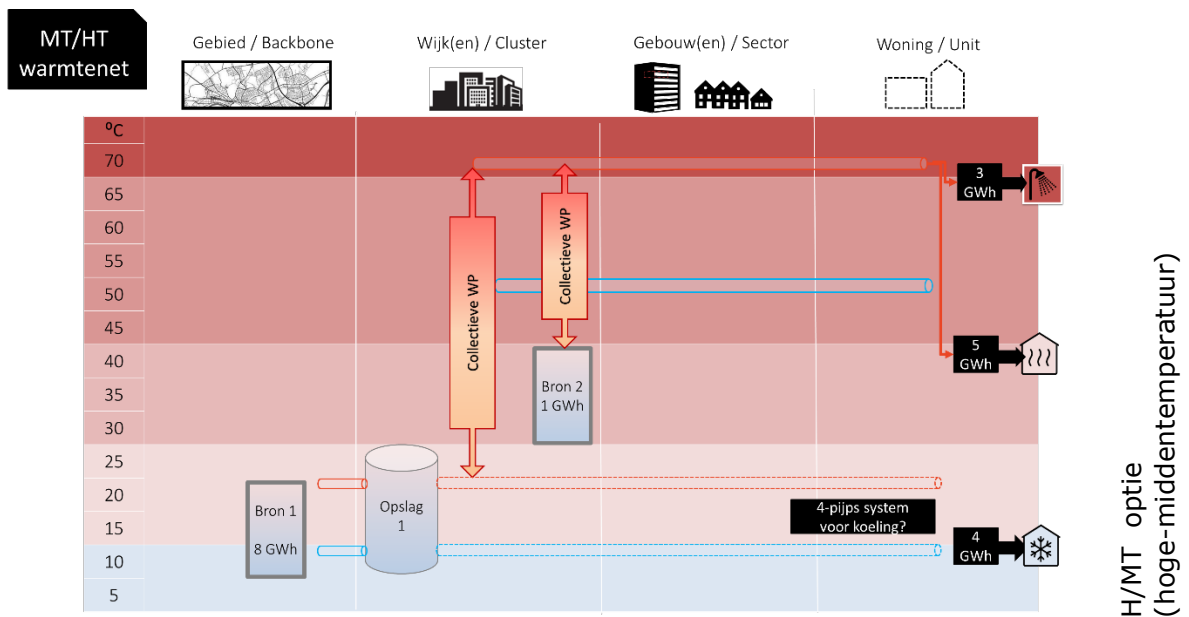
#### 4.5.4 Mogelijke andere varianten op basis van (Z)LT bronnen

Ter vergelijking kunnen op basis van de zelfde bronnen en hetzelfde schema (Figuur 26) ook LT, MT of HT oplossingen worden uitgewerkt, Zoals toegelicht in §3.3.1. Een voordeel is dat hierbij geen warmtepompen in individuele woningen of gebouwen nodig zijn. Een nadeel is dat door het eerder in de keten ophogen van de temperatuur collectieve warmtepompen nodig zijn die door de hogere temperatuur een lagere COP hebben. Daarnaast zijn er meer warmteverliezen en kan er niet met ditzelfde net gekoeld worden. (zie verder §3.3). Met behulp van de kentallen in §5.4 kan een inschatting van de energieprestatie worden gemaakt.

Een LT en een MT/ HT oplossing op basis van (Z)LT bronnen zijn schematisch weergegeven in de volgende figuren.



Figuur 28a: schematische ruimtelijke weergave van een LT warmtenet op basis van (zeer) lage temperatuur bronnen. In dit geval kan de booster warmtepomp ook voor koeling gebruikt worden, indien koeling gewenst is.

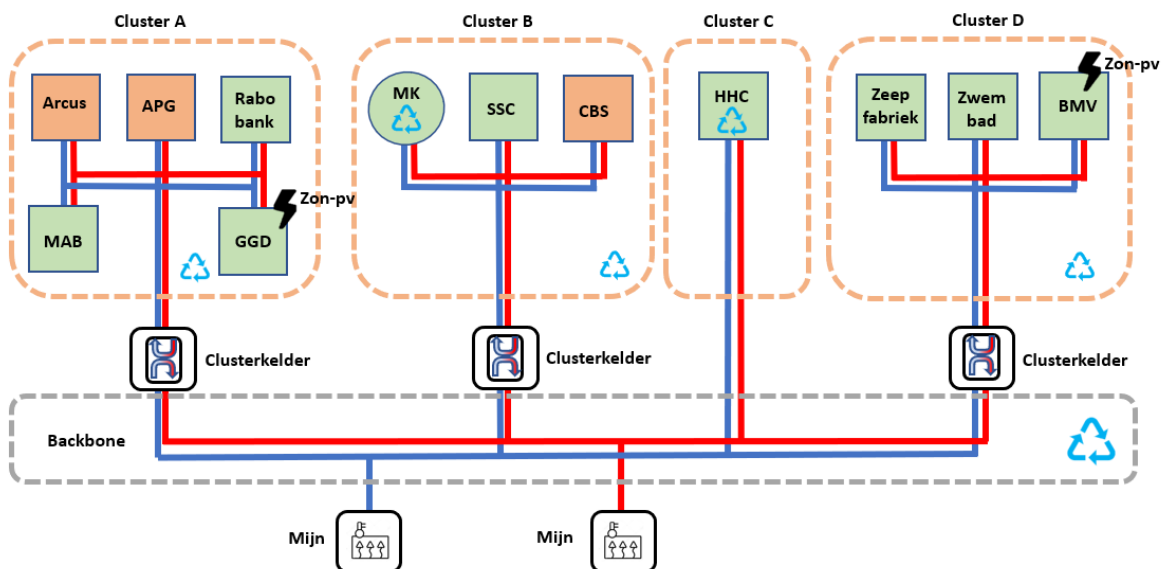


Figuur 28b: schematische ruimtelijke weergave van een MT/ HT warmtenet op basis van (zeer) lage temperatuur bronnen.

#### 4.5.5 Voorbeeld 1: schematische weergave Mijnwater

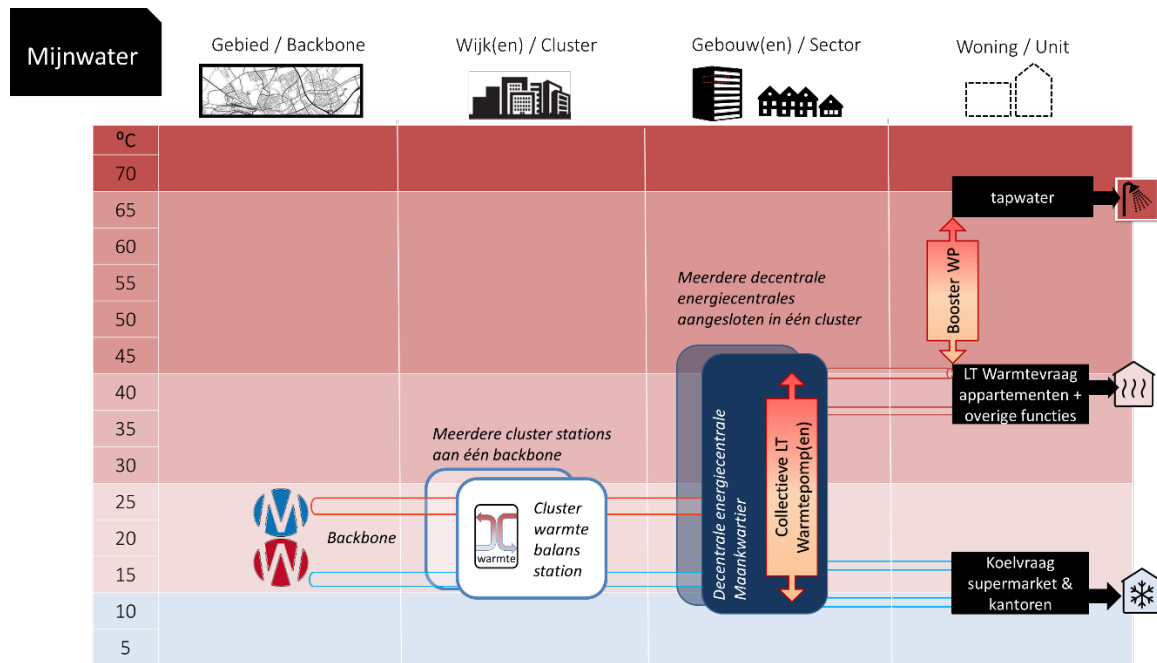
Bij de Mijnwater variant is op gebiedsniveau de Mijnwater backbone beschikbaar op temperaturen tot 28 °C. Met behulp van deze backbone worden 4 clusternetten gevoed. Tussen de backbone en een cluster bevindt zich een cluster balans station, ofwel clusterkelder, waar warmte wordt uitgewisseld met de backbone indien er binnen het cluster een onbalans is tussen warmte en koudevraag.

Binnen een cluster bevinden zich meerdere sectoren waarin een of meerdere gebouwen zijn aangesloten aan een decentrale energiecentrale. Dit is weergegeven in Figuur 29.



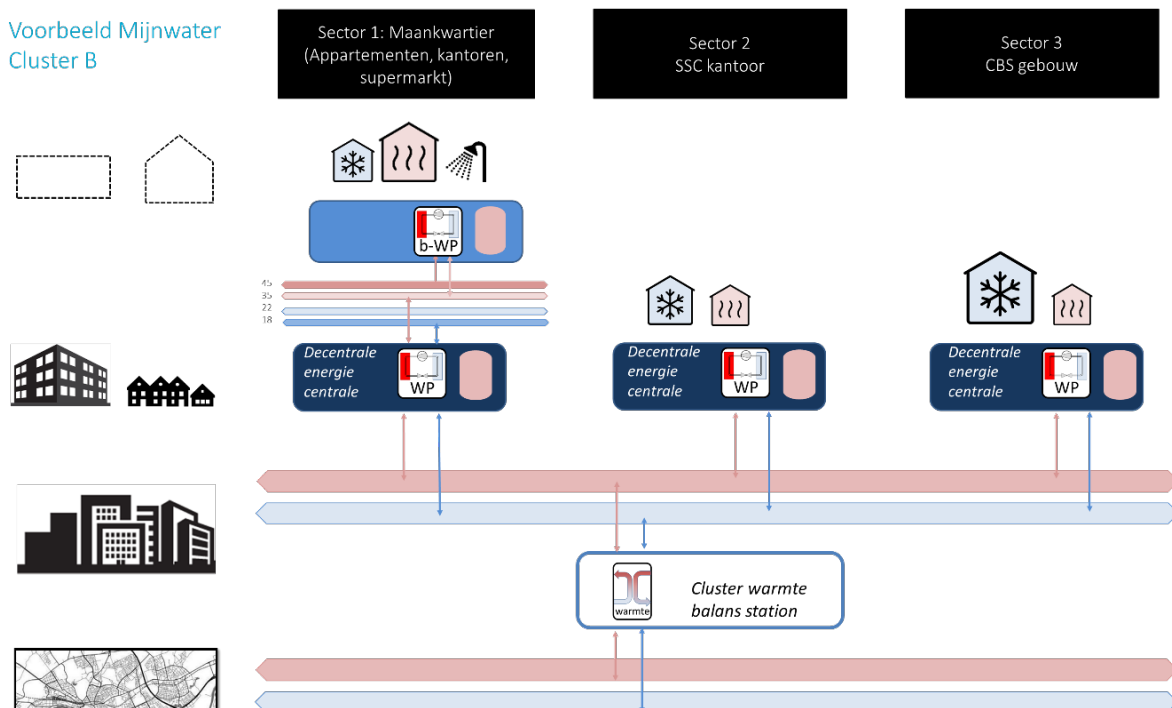
Figuur 29: Impressie energie-uitwisseling tussen gebouwen (vierkant), sectoren (cirkel) en clusters (groen = energiecentrale, eigendom van Mijnwater; oranje = energiecentrale, eigendom van een derde) – Illustratie EnergyGO

In de volgende figuren is het Mijnwater voorbeeld schematisch ruimtelijk weergegeven. Op sector niveau bevindt zich een WP-centrale die LT warmte produceert. Binnen de sector Maankwartier wordt op woning/unit niveau voor de appartementen tapwater geproduceerd met een booster WP.



Figuur 30: schematische ruimtelijke weergave Mijnwater concept, voor de sector Maankwartier

### Voorbeeld Mijnwater Cluster B

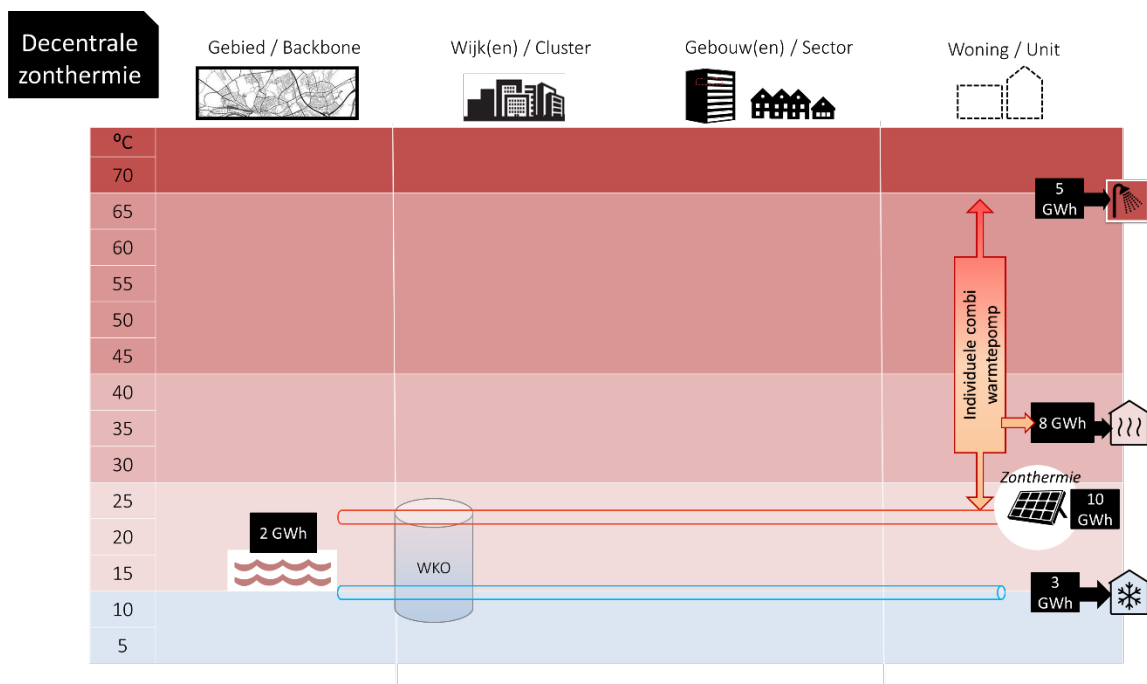


Figuur 31: Schematische weergave decentrale energiecentrales van de drie sectoren binnen Cluster B, Mijnwater concept.

#### 4.5.6 Voorbeeld 2: project met voornamelijk decentrale ZLT warmtebronnen

Het tweede voorbeeld is een fictief voorbeeld van een nieuwbouwproject waarbij de temperatuur voor het afgiftesysteem van de gebouwen 35 °C is. Daarbij zijn de mogelijke warmte- en koudebronnen: TEA (2 GWh/jaar) en zonthermie (10 GWh/jr). Bij zonthermie geldt: hoe hoger de gewenste temperatuur, hoe lager de potentiële opbrengst in GJ of kWh per m<sup>2</sup> per jaar. In dit voorbeeld is alleen voldoende warmte beschikbaar bij lagere temperaturen; namelijk 10 GWh (thermisch) per jaar bij een maximale collectortemperatuur tussen 15 en 30 °C. Daarnaast is in dit gebied de mogelijkheid voor Warmte Koude Opslag.

Omdat in dit voorbeeld de grootste warmtebron (zonthermie) decentraal beschikbaar is en een temperatuur lager dan ca 25 °C heeft, kan in dit geval alleen gekozen worden voor een warmtenet op een temperatuur lager dan 25°C, omdat deze bron anders niet benut kan worden. Collectief ophogen van de temperatuur is in dit geval dus geen optie. De vraag en bronnen en de decentrale opwaardering van de temperatuur op unit (woning) niveau zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 32: Voorbeeld van een gebied met beschikbare bronnen: TEA (Thermische energie uit afvalwater) en decentrale zonthermie. In een ander TKI project, 'deZONNET', is dit principe verder uitgewerkt. Zie ook [www.zonnewarmtenet.nl](http://www.zonnewarmtenet.nl).

## 4.6 Stap 5: Schetsontwerp grofweg dimensioneren

In deze stap worden de onderdelen van het systeem grofweg gedimensioneerd en op basis daarvan wordt een schetsontwerp gemaakt. Dit is nodig om zowel de energieprestatie als de kosten te kunnen inschatten.

### 4.6.1 Benodigde capaciteit van het warmtenet

De aansluitvermogens van de afnemers zijn al bepaald in stap 2. Voor het systeem als geheel moet vervolgens bepaald worden wat het maximale vermogen is dat door de leidingen gaat.

Ten eerste moet een inschatting te maken van de gelijktijdigheid van de afname. Deze is onder andere afhankelijk van het type en aantal afnemers in een gebied. Op wijkniveau zal niet iedereen tegelijk het maximale piekvermogen aan verwarming nodig hebben. Er kan worden gerekend met een gelijktijdigheidsfactor. Voor de gelijktijdigheidsfactor afhankelijk van het aantal woningen (zonder piek-reducerende maatregelen) wordt doorgaans gebruik gemaakt van de kentallen in Tabel 8, 'f' is hier de gelijktijdigheidsfactor.

Tabel 8: Gelijktijdigheidsfactoren voor ruimteverwarming (ISSO-publicatie 39: Energiecentrale met warmte- en koudeopslag).

n	f
1 - 5	1,00
6- 13	0,95
14 - 25	0,90
26- 40	0,85
41 - 60	0,80
61 - 85	0,75
86 - 115	0,70
116 - 155	0,65*
156 -205	0,60*
> 205	0,55*

\* LET OP: Goed geïsoleerde woningen hebben een veel vlakker profiel, waardoor de gelijktijdigheidsfactor minder daalt. Praktijkervaring leert dat de gelijktijdigheid hierdoor niet lager wordt dan 70%.

Ten tweede moet bij een KoWaNet rekening gehouden worden met eventuele gelijktijdige warmte- en koudevraag. Bij een traditioneel net wordt het vermogen van het net bepaald door het piekvermogen dat in de winter geleverd moet worden – rekening houdend met gelijktijdigheid, en de gewenste delta T tussen aanvoer en retour.

Als bij een KoWaNet er nog steeds sprake is van een piek winter situatie waarbij alle warmte uit een centrale seizoensopslag wordt geleverd, dan geldt dit principe ook hier.

Als er echter ook in de winter sprake is van uitwisseling door een gelijktijdige warmte- en koudevraag in het net, dan wordt het bepalen van het maximaal door het net te transporteren vermogen complexer. De meest optimale methode voor netontwerp is om voor elke individuele vrager of aanbieder een vraag/aanbodprofiel vast te stellen en deze in de tijd te modelleren. De thermische stromen in het netwerk worden dan zichtbaar, waarbij er voor elk segment bepaald kan worden wat de maximale capaciteit moet zijn.

Voor een vereenvoudigde aanpak kan worden uitgegaan van het piekvermogen op basis van de piek warmte- of piek koudevraag; de uitwisseling zal altijd leiden tot een lager benodigde capaciteit. Aanvullend zou hier een uitwisselingsfactor toegepast kunnen worden, bijvoorbeeld gebaseerd op een inschatting van het tegengesteld vermogen tijdens de piek (bijv. 20% reductie van het vermogen door lokale uitwisseling).

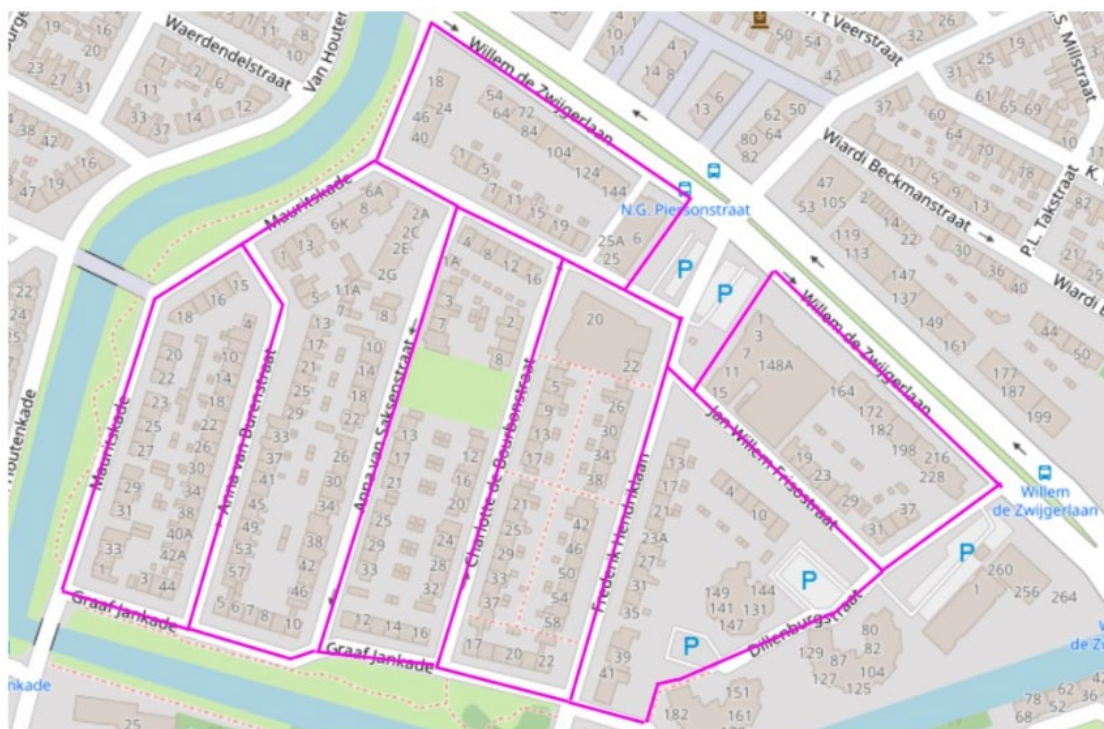
#### 4.6.2 Tracé ontwerp

Traditionele warmtenetten worden ontworpen in een boomstructuur, waarbij vanaf de hoofdbron meerdere takken richting de verschillende gebieden gaan. In de gebieden splitsen de takken zich verder op om zo elk gebouw aan te sluiten op het warmtenet. De richting van de stroming in de leidingen is helder (van "stam" naar "bladeren" en weer terug) en centrale pompen zorgen voor deze stroming.

Deze structuur is veel minder geschikt voor een uitwisselingsnetwerk waarbij elke aansluiting gelijktijdig een afnemer en leverancier van warmte of koude (prosumer) is. Het decentrale karakter betekent dat er geen "stam" meer is waar alle warmte- of koudevraag doorheen moet. De "stam" wordt alleen nog maar gebruikt voor uitwisseling tussen de verschillende gebieden. De "stam" kan daardoor veel kleiner zijn, tenzij in piek-winter of piek-zomer wel sprake is van centrale levering van warmte of koude (zie vorige paragraaf).

Doordat er zowel uitwisseling plaatsvindt van koude en warmte en dit gedeeltelijk seizoensafhankelijk is, zijn de richtingen van de stromingen in de pijpen niet vast. Een vertakkingstopologie (boomstructuur) kan dan tot capaciteits- en drukvalproblemen leiden.

Een betere topologie is het gebruik van 'ringen', waarbij tracés altijd gesloten zijn. Een bron/afnemer kan daardoor altijd via twee routes worden bereikt. Hierdoor is er meer capaciteit beschikbaar en is de drukval veel lager en neemt de bedrijfszekerheid toe. Het netwerk zal opgebouwd zijn uit ringen met vaste diameter afhankelijk van de maximale capaciteit in het betreffende gebied, waarbij stromen zich weerstandsafhankelijk verdelen.



Figuur 33: Voorbeeld van een gebied gesloten warmtenet circuits (bron: KoWaNet Deliverable 1.2 'Technical Design Framework').

### 4.6.3 Leidingdiameters en leidinglengtes

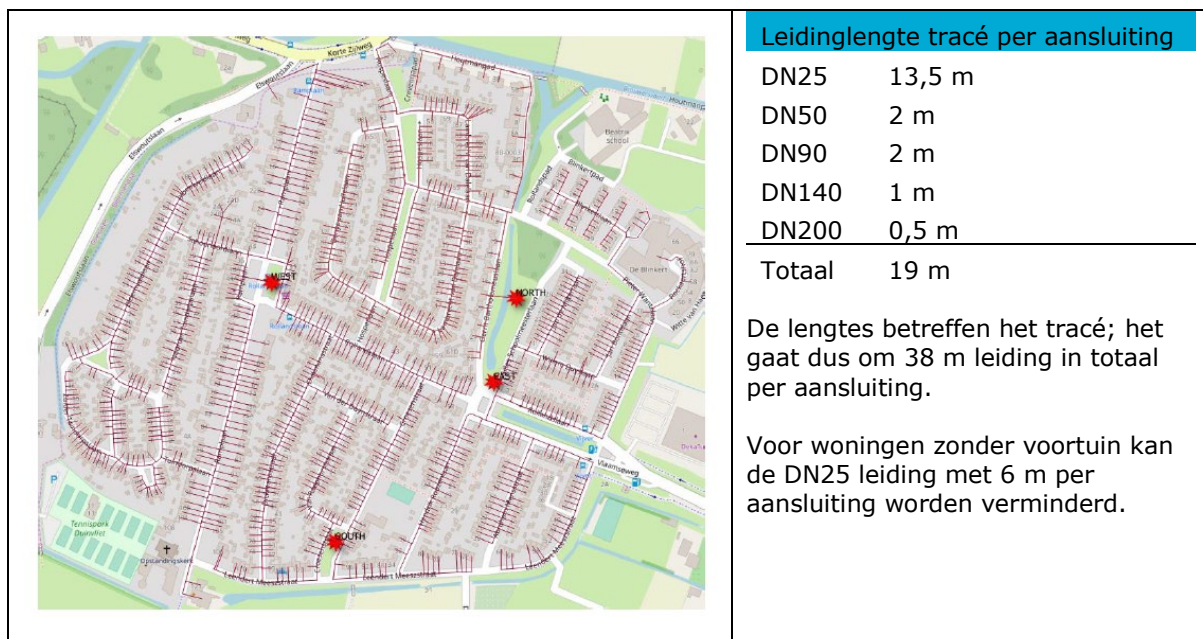
De leidingdiameters kunnen worden bepaald met speciale modellen. Hiervoor zijn dynamische/iteratieve calculatieprogramma's nodig zoals EPA-net of WANDA, waarbij op basis van de individuele vraag, gekozen leidingdiameter en drukknoppunten de flow per leiding weerstandsafhankelijk wordt berekend.

Op een (zeer) vereenvoudigde wijze kunnen de leidingdiameters ook worden ingeschat, op basis van benodigd vermogen, temperatuurverschil tussen aanvoer en retour, en maximale stroomsnelheid. Dit is nader toegelicht in Hoofdstuk 5.4.

De leidinglengtes en diameters per aansluiting hangen af van het vermogen en het type wijk, bijvoorbeeld of sprake is van laagbouw of hoogbouw en of er voortuinen of brede straten zijn. Voor twee typen wijk zijn de leidinglengtes gegeven als voorbeeld.

- Wijktype: Tuinwijk, bloemkoolwijk of vinexwijk (Rijtjeswoningen met voortuin)
- Wijktype: Volkswijk (rijtjeswoningen zonder voortuin)

Als voorbeeld is de wijk Ramplaankwartier (Haarlem) genomen. Voor die wijk een tracé ontwerp is gemaakt voor een zeer lage temperatuur warmtenet. Deze wijk heeft ca 1.200 aansluitingen; er is gerekend met een gemiddeld aansluitvermogen (na isolatie) van 6 tot 8 kW per aansluiting en een delta T tussen warme en koude leiding van 7K. In *Figuur 34* is het tracé voor deze voorbeeldwijk met rijtjeswoningen en voortuinen getoond, samen met de totale leidinglengtes per diameter.



Figuur 34: Leidinglengtes voor wijktype rijtjeswoningen met en zonder voortuin

### 4.6.4 Decentrale, bi-directionele pompen

Het principe van een uitwisselingsnetwerk is gebaseerd op de toepassing van decentrale energiecentrales die met elkaar warmte en koude uitwisselen via een 2-pijps netwerk. Dat vereist bij elke energiecentrale tevens een decentrale pompstelling om de tegengestelde vraag te kunnen overbruggen. Dit zijn vaak vrij zware pompen (opvoerhoogte tot 4 bar) die ook de weerstand van het transport over het netwerk naar het uitwisselstation (met een ander netwerk of backbone) of bron voor hun rekening moeten nemen. Voor een blok-

of wijkcentrale is dat geen punt. Voor individuele woningen zijn de pompafmetingen beperkt en kan dit alleen met een vrij beperkt uitwisselingsnetwerk (kleine ring) en grote leidingdiameters om de weerstand te beperken. Het is dan in sommige gevallen praktischer en voordeliger, mede vanwege de schaalgrootte, om te kiezen voor een wijkcentrale met distributie van de geproduceerde warmte en/of koude naar de individuele woningen met behulp van een centrale pompopstelling en een traditioneel vertakt 2-pijps (alleen verwarmen) of 4-pijps (verwarmen en koelen) distributienet en een eenvoudige afleverset in de woning voorzien van een drukverschilregeling. Dit moet per geval apart bekeken worden.

## 4.7 Stap 6: Inschatten energieprestatie

De energieprestatie van een collectieve energieoplossing voor een gebied met meerdere gebouwen kan worden bepaald met de EMG<sup>8</sup> methodiek. Deze kan ook worden gebruikt voor het verkrijgen van een gelijkwaardigheidsverklaring. De ervaring leert dat het moeilijk is om vooraf de uitwisselingswinsten en daarmee te behalen verbetering van de energieprestatie aan te tonen en onderbouwen. De gelijkwaardigheid wordt dan bepaald zonder uitwisseling ofwel conservatief.

Een definitieve energieberekening vereist dat veel gegevens al in detail bekend zijn. Voor een eerste inschatting en vergelijking kan een (sterk) vereenvoudigde berekening worden gebruikt. Voor deze inschatting moeten de efficiënties (o.a. COP's), verliezen en energiegebruik van alle componenten in het systeem bekend zijn of ingeschat worden. Het uiteindelijke doel is de totale energie-input (warmte, koude en elektriciteit) te bepalen die nodig is voor het leveren van de gewenste koeling en verwarming. Deze kan (deels) lokaal opgewekt worden.

### 4.7.1 Overzicht

De energieprestatie wordt ingeschat voor de componenten met een significante invloed op de totale energieprestatie. Dit betreft efficiënties van de opwekking (waaronder met name COP's van warmtepompen), pompenergie, warmteverliezen t.g.v. opslag (stilstandsverliezen) en t.g.v. distributie (distributieverliezen).

In Figuur 35 zijn de relevante energiecomponenten per schaalniveau weergegeven, voor het (vereenvoudigde) voorbeeld van één van de decentrale energiecentrales van het Mijwater systeem (te weten: het Maankwartier, zie ook paragraaf 4.5.5).

---

<sup>8</sup> Via norm NEN 7125 (Energieprestatienorm voor maatregelen op gebiedsniveau - EMG) is het mogelijk om de volgende waarden te bepalen voor de EPC-berekening:

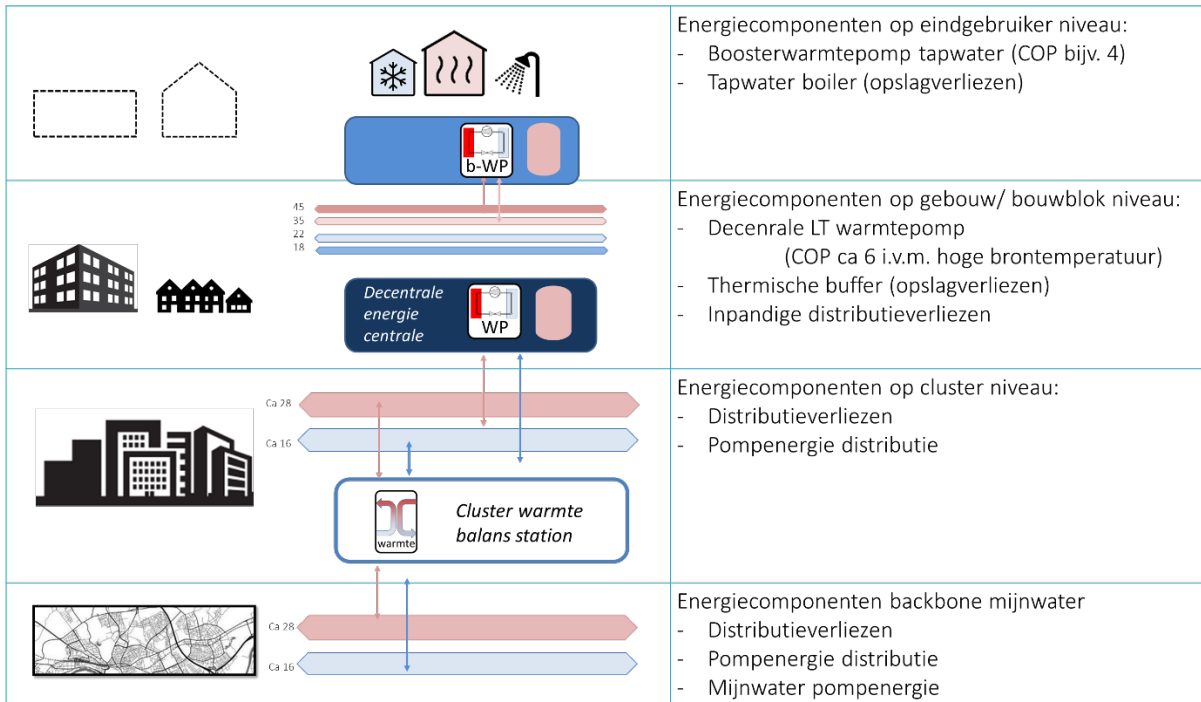
- equivalent opwekkingsrendement warmtenet (externe warmtelevering)
- equivalent opwekkingsrendement circulatiesysteem warm tapwater (externe warmtelevering)
- equivalent opwekkingsrendement collectief koudenet (externe koudelevering)
- elektriciteitsopwekking op gebiedsniveau (bijvoorbeeld windenergie, zonne-energie).

<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels/nieuwbouw/energieprestatie-epc/energiemaatregelen-op-gebiedsniveau-emg>.



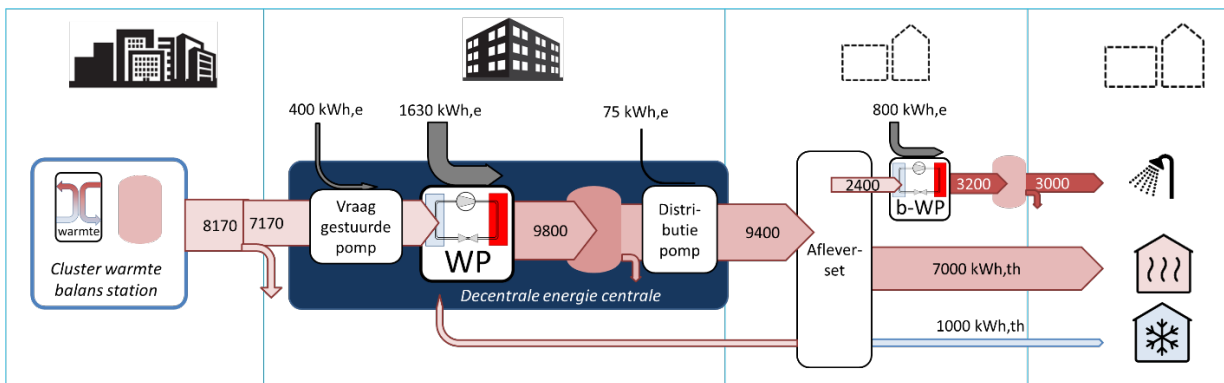
Voorbeeld Mijnwater

Sector Maankwartier  
(Appartementen, kantoren, supermarkt)



Figuur 35: overzicht van de relevante energiecomponenten t.b.v. inschatting totale energieprestatie.

De uiteindelijke energiestromen kunnen worden gevisualiseerd in een stroomschema, zoals bijvoorbeeld weergegeven in *Figuur 36*.



Figuur 36: schematische weergave energiestromen van een Koel Warmtenet met collectieve LT warmtepomp op gebouw niveau, en een booster WP bij de eindgebruiker t.b.v. tapwater (vergelijkbaar met het systeem zoals weergegeven in *Figuur 35*.)

De waarden van de energiestromen (warmte en benodigde elektriciteit) kunnen worden ingeschat door van alle componenten de efficiënties en de verliezen te in te schatten. Wanneer een warmtepomp tegelijkertijd warmte en koude levert, hoeft het elektriciteitsgebruik alleen bij de grootste vraag (warmte of koude) te worden meegenomen. Zoals aan het begin van paragraaf vermeld is de uitwisseling tussen verschillende energiecentrales moeilijk precies in te bepalen en wordt de prestatie dus vaak te conservatief ingeschat.

Om de energieprestatie van het gehele systeem te kunnen inschatten, zijn de efficiënties en verliezen van de volgende systemen nodig als input:

- Warmtepomp efficiënties
- Warmteverliezen distributie
- Warmteverliezen opslag
- Pompenergie

Enkele richtlijnen voor het inschatten van efficiënties en verliezen zijn te vinden in bijlage 5.4.

Voor het inschatten van de systeem energieprestatie kan de KoWaNet Excel tool 'SysteemEnergiePrestatie' worden gebruikt. In deze tool zijn ook indicatieve waarden voor efficiënties (COP's), pompenergie en verliezen beschikbaar.



## 4.8 Stap 7: Keuze systeem en uitwerking

De inschatting van de energieprestatie is van belang bij de keuze voor het verder uit te werken energiesysteem. Hierbij spelen uiteindelijk meer zaken een rol, zoals uitvoerbaarheid/ faseerbaarheid van de uitvoering/ kosten/ overlast. Het totale proces is beschreven in Deliverable 3.1 van het KoWaNet project.

## 5 Bijlagen: Kentallen & achtergrondinformatie

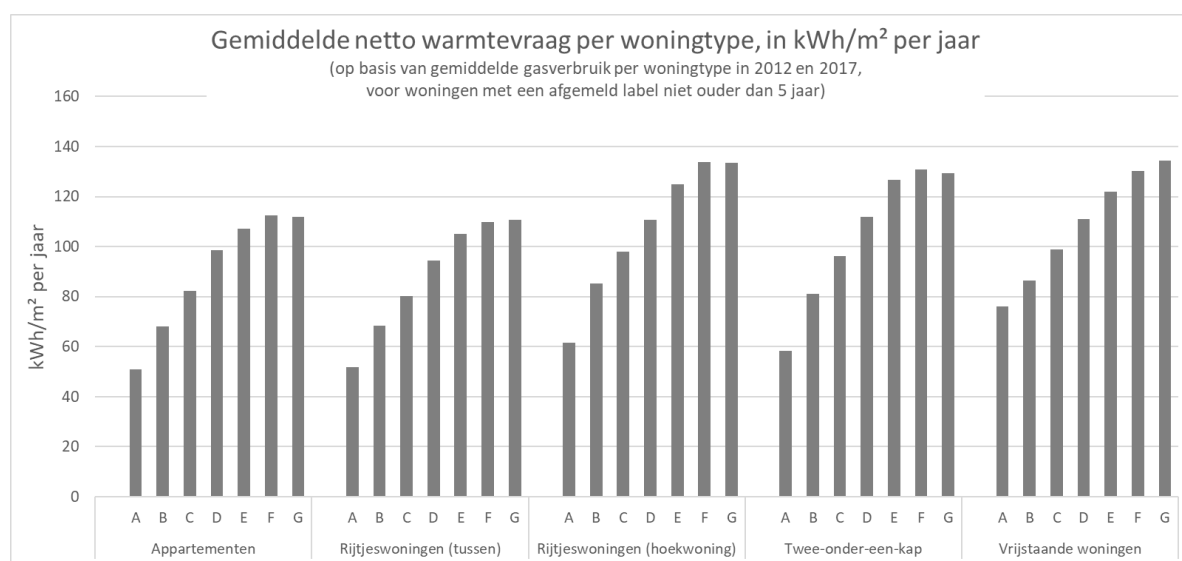
### 5.1 Kentallen netto warmte- en koudebehoefte en piekvermogen

De kentallen warmte- en koudevraag zijn op basis van de netto warmte- en koudevraag, volgens de definitie zoals beschreven in §1.4.1. Er zijn kentallen beschikbaar voor woningen en utiliteitsbouw. Hier onder worden de kentallen in tabellen weergegeven; verdere toelichting op de (bepaling van de) kentallen voor woningen is beschreven in de volgende paragraaf.

#### 5.1.1 Kentallen woningen

##### Warmtebehoefte

De kentallen voor de netto warmtevraag voor woningen zijn gebaseerd op het werkelijke gasgebruik in 2012 en 2017, per woningtype per energielabel. De resulterende kentallen in kWh/m<sup>2</sup> per jaar zijn weergegeven in onderstaande grafiek. In de daaropvolgende tabel staan de warmte- en koudevraag evenals een inschatting van het piekvermogen.



Figuur 37: Netto warmte- en koudevraag in kWh/m<sup>2</sup> per jaar voor verschillende woningtypen en labelklassen. Gebaseerd op gemeten gasverbruik in 2012 en 2017.

Voor zeer ambitieus gerenoveerde woningen (richting label A+, ofwel nieuwbouw-kwaliteit) kunnen nog lagere waarden aangenomen worden, tot ca 30 kWh/m<sup>2</sup> per jaar.

##### Koelbehoefte: verschil tussen piek-koeling en comfort koeling

De koelbehoefte in Tabel 9 gaat uit van een minimale koelbehoefte op piekmomenten, en gaat daarbij uit van nachtventilatie en redelijke zonwering.

Bij een KoWaNet systeem – waarbij koeling meestal wenselijk is vanwege de warmte-uitwisseling, kan meer gekoeld worden: ca 17 kWh/m<sup>2</sup>p jr voor label A woningen en 10 kWh/m<sup>2</sup>p jr voor label B woningen. Hierbij wordt met een beperkt vermogen meer constant gekoeld, om de woning niet te laten opwarmen.

Tabel 9: Netto warmte- en koudevraag in kWh/m<sup>2</sup> per jaar en inschatting piekvermogen, voor verschillende woningtypen en labelklassen.

Gebouwtipe	Energie-label	Netto warmte- vraag ruimte- verwarming	Netto warmtevraag voor tapwater (incl boiler en distr. verlies)	Netto koelbehoefte – ruimtekoeling *Zie opmerking	Piekvermogen ruimte- verwarming	Piekvermogen ruimtekoeling
		kWh/m <sup>2</sup> p jr	kWh/m <sup>2</sup> p jr	kWh/m <sup>2</sup> p jr	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
Appartementen	A	51	22	4,4	0,05	0,05
	B	68	22	3,2	0,06	0,05
	C	82	22	2,8	0,08	0,04
	D	99	22	2,1	0,09	0,03
	E	107	22	0,7	0,10	0,02
	F	112	22	0,7	0,10	0,01
	G	112	22	0,7	0,10	0,01
Rijteswoningen (tussen)	A	52	20	4,4	0,05	0,05
	B	68	20	3,2	0,07	0,05
	C	80	20	2,8	0,08	0,04
	D	95	20	2,1	0,09	0,03
	E	105	20	0,7	0,10	0,02
	F	110	20	0,7	0,10	0,01
	G	111	20	0,7	0,12	0,01
Rijteswoningen (hoekwoning)	A	62	20	4,4	0,06	0,05
	B	85	20	3,2	0,08	0,05
	C	98	20	2,8	0,09	0,04
	D	111	20	2,1	0,10	0,03
	E	125	20	0,7	0,12	0,02
	F	134	20	0,7	0,12	0,01
	G	134	20	0,7	0,13	0,01
Twee-onder-een-kap	A	58	19	4,4	0,07	0,05
	B	81	19	3,2	0,09	0,05
	C	96	19	2,8	0,10	0,04
	D	112	19	2,1	0,11	0,03
	E	127	19	0,7	0,12	0,02
	F	131	19	0,7	0,13	0,01
	G	129	19	0,7	0,13	0,01
Vrijstaande woningen	A	76	17	4,4	0,10	0,05
	B	86	17	3,2	0,10	0,05
	C	99	17	2,8	0,11	0,04
	D	111	17	2,1	0,12	0,03
	E	122	17	0,7	0,13	0,02
	F	130	17	0,7	0,14	0,01
	G	135	17	0,7	0,13	0,01

\* Opmerking: de in deze tabel opgenomen hoeveelheid koeling is berekend op basis van goede zonwering en nachtventilatie. Bij een KoWaNet systeem – waarbij koeling meestal wenselijk is vanwege de warmte-uitwisseling, kan meer gekoeld worden: ca 17 kWh/m<sup>2</sup>p jr voor label A woningen en 10 kWh/m<sup>2</sup>p jr voor label B woningen.

### 5.1.2 Achtergrondinformatie t.b.v. methode inschatting kentallen woningen

Een studie van Majcen (2016) heeft aangetoond dat het werkelijke gebruik vaak niet overeenstemt met het berekende gebruik. Vooral bij de slechte labels is het werkelijke verbruik veel lager, waardoor de energiebesparing te hoog wordt ingeschat als deze op basis van de berekende waarden met standaard verbruik (bijv. EPC berekeningen) worden bepaald.

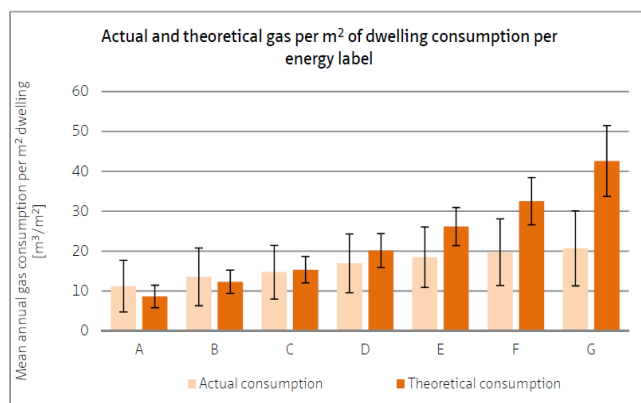


FIGURE 8 Actual and theoretical gas consumption per m<sup>2</sup> of dwelling area per label

Figuur 38: werkelijk versus theoretisch gasverbruik (Majcen, 2016)

Voor de kentallen van het KoWaNet project is de netto warmtevraag ingeschat op basis van het werkelijke energiegebruik van een grote groep woningen. Hiervoor is het werkelijke energiegebruik van 2012 en 2017 verkregen uit CBS gegevens. Onderstaand wordt verdere toelichting gegeven op de dataset en de omrekening.

De databases zijn eigendom van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Deze zijn onder voorwaarden beschikbaar voor statistisch en wetenschappelijk onderzoek.

In de Nederlandse landelijke energielabeldatabase staan alle geregistreerde energielabels van gebouwen in Nederland. De database bevat vier soorten energielabels:

- energielabels voor woningen vóór 1 januari 2015 (energielabels van woningen afgegeven voor januari 2015, die worden bepaald door een voorlopige methode van de huidige methode)
- vereenvoudigde energielabels van woningen (na januari 2015). Die energielabels kunnen online worden aangevraagd door de huiseigenaren ([www.energielabelvoorwoningen.nl](http://www.energielabelvoorwoningen.nl)). Een erkend deskundige controleert de aanvraag en registreert, na goedkeuring, het definitieve label in [ep-online.nl](http://ep-online.nl).
- Energie-Index woningen (na 2015) De Energie-Index woningen wordt bepaald door een geregistreerd energieadviseur met een BRL9500-01 certificaat. Het energielabel wordt automatisch geregistreerd wanneer de Energie-index wordt gegenereerd.
- energielabels voor utiliteitsgebouwen. Het label wordt bepaald door een geregistreerd energieadviseur met een BRL9500-03 of een BRL9500-06 certificaat.

De voor Tabel 9 gebruikte dataset bevat alleen woningen met een definitief label dat niet ouder is dan 5 jaar. Bij dit onderzoek wordt alleen rekening gehouden met het meest recente energielabel per gebouw. Behalve het energielabel bevat de database ook informatie over het vloeroppervlak van de individuele woningen. De energielabelgegevens

zijn gekoppeld aan de officiële Basisregistratie van adressen en gebouwen in Nederland (BAG-id). Hierdoor is het mogelijk om de energielabeldata te koppelen aan de energiedata van Nederlandse huishoudens uit de statistieken van Nederland op individueel woningniveau (Bron: CBS, Energieverbruik particuliere woningen).

#### Omrekenen van gasverbruik naar netto warmtevraag

- Als eerste stap is het gemiddelde gasverbruik per woningtype uitgesplitst naar gebruik voor ruimteverwarming, warm water en koken, op basis van referentiegegevens voor warm water en koken ontleend aan Nederlandse energiedata (BZK, 2016) (VEWIN, 2016). Er is 35 m<sup>3</sup>/jaar aangehouden voor koken en ca 340 m<sup>3</sup>/jaar voor warm tapwater voor een gemiddeld huishouden.
- Het gasverbruik voor warmwaterproductie is gecorrigeerd op basis van het aantal inwoners behorende bij het gemiddelde woningoppervlak, dat is berekend met formule  $7.22 \text{ t/m } 7.24$  van de NTA 8800.
- De Netto warmtevraag is bepaald door het gasverbruik voor ruimteverwarming om te rekenen naar kWh/jaar en te vermenigvuldigen met een verondersteld ketelrendement (op bovenwaarde). Hiervoor is 90% voor ruimteverwarming en 68% voor tapwaterbereiding aangenomen.

De netto warmtevraag is op dezelfde wijze ingeschat voor zowel 2012 als 2017. Beide jaren zijn gecorrigeerd voor graaddagen, waarbij een gemiddeld aantal graaddagen tussen 2009 en 2017 van 2390 is aangenomen. Ondanks deze correctie bleek er een groot verschil tussen 2012 en 2017, dat wij niet goed hebben kunnen verklaren. Het kan bijvoorbeeld komen doordat 2017 iets zonniger was (dit zit niet goed verwerkt in de graaddagen correctie), of doordat veel nieuwe ketels zijn aangeschaft, die geen invloed hebben op het label, maar wel op het gasverbruik. Ook het gehanteerde gasverbruik voor tapwater heeft invloed op de inschatting van de warmtevraag voor ruimteverwarming.

Omdat de KoWaNet Vraag en aanbod tool bedoeld is als eerste inschatting, is gekozen om als kentallen het gemiddelde tussen 2012 en 2017 op te nemen. Deze waarde moet dus echt als inschatting worden beschouwd in de fase van het schetsontwerp.

#### Inschatting maandprofielen

Voor het inschatten van de maandelijkse profielen is een aantal woningsimulaties gedaan, waarmee uurlijkse waarden zijn verkregen. Op basis daarvan zijn de maandelijkse profielen bepaald. Dit is gedaan voor 1 woningtype voor 3 isolatieniveaus. De simulaties zijn gedaan voor een Noord-Zuid en een Oost-West oriëntatie. Het gemiddelde hiervan is gebruikt voor de maandprofielen in die zijn gebruikt in de KoWaNet Vraag&Aanbod tool.

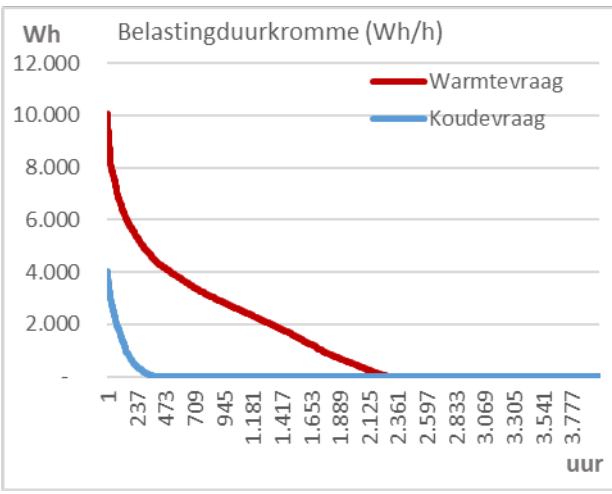
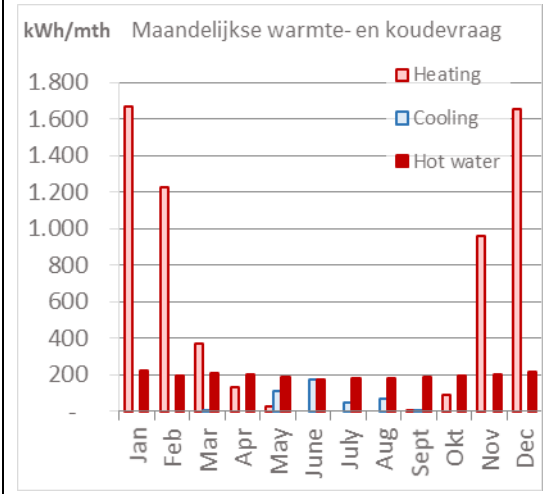
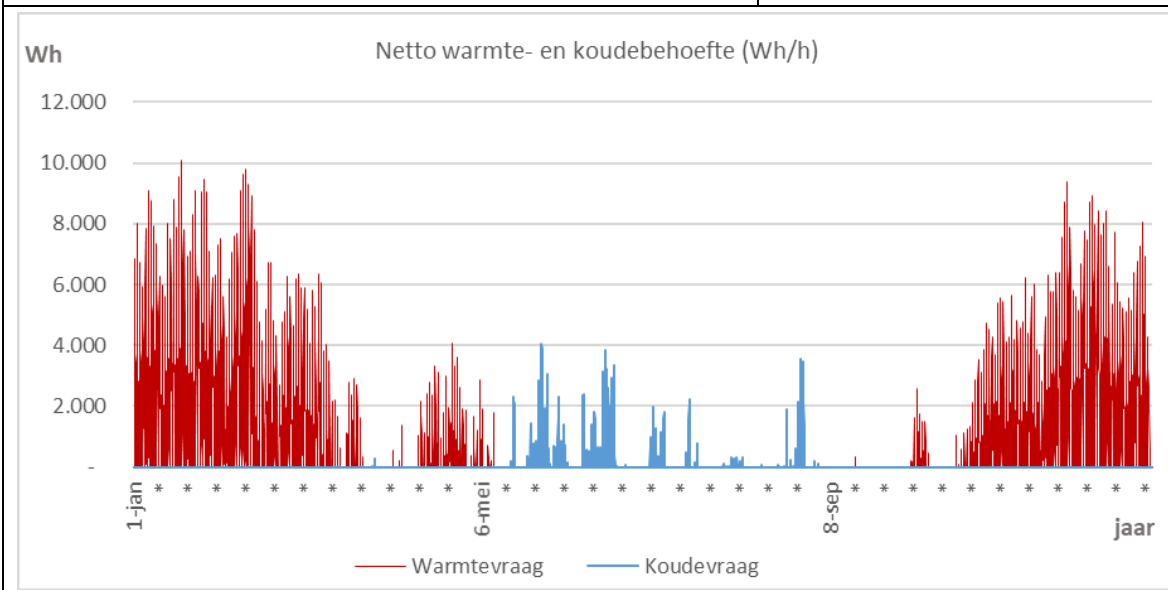
- De simulaties zijn uitgevoerd met het KNMI klimaatjaar van 2017 voor Schiphol.
- Deze aanpak is niet bedoeld als voorspellende en volledig gedetailleerde berekening voor alle woningtypen, maar is slechts bedoeld om een eerste inschatting van maandprofielen te kunnen maken.
- Op basis van de dynamische berekeningen is tevens een eerste idee van de benodigde aansluitvermogens verkregen Dit is gecheckt met praktijkgegevens van Mijnwater.
- De beschrijving van de woning is te vinden in de Excel Bijlage bij de V&A tool, evenals de volledige uurlijkse waarden van de 3 doorgerekende varianten (3 varianten x 2 oriëntaties). Als voorbeeld zijn hieronder de uurlijkse profielen, maandelijkse profielen en de belastingduurkromme weergegeven voor een rijtjeswoning met een redelijk isolatieniveau.

Figuur 39: Gegevens voorbeeldwoning en resultaten warmte-en koudevraag



Gebouwschil:	Rc-waarde m <sup>2</sup> K/W	U-waarde W/m <sup>2</sup> K
Geïsoleerde spouwmuur (5cm isolatie)	1,55	0,58
Geïsoleerde betonnen vloer (10cm isolatie)	2,77	0,34
Pui (5 cm isolatie)	1,39	0,64
Geïsoleerd dak (12 cm isolatie)	3,40	0,28
Nieuwe dakkapel (15 cm isolatie)	4,00	0,24
HR++ glas		1,24
Kozijn (15%)	8,17	

- Setpoint temperatuur (dagelijks):
- 00.00 - 08.00 > 16 °C
  - 08.00 - 22.00 > 20 °C
  - 22.00 - 00.00 > 16 °C
- Interne warmtelast: 24-uurs gemiddelde 6 W/m<sup>2</sup>
  - Ventilatievoud: 0,7/h



### 5.1.3 Kentalen utiliteit

De utiliteitsbouw wordt qua isolatieniveau ingedeeld in twee categorieën: bestaande en nieuwe (BENG) gebouwen. Voor nieuwe gebouwen zijn de referentiegetallen van verwarmings-, koelings- en warmwaterbehoeften overgenomen uit de BENG-norm (RVO, 2019). Voor bestaande gebouwen is de DGMR-dataset ("DGMR, Variantberekeningen voor eisen aan BENG," 2015) gebruikt.

Omdat het energieverbruik in utiliteitsgebouwen zeer sterk kan verschillen, kunnen deze waarden slechts als indicatie worden gebruikt. Een overzicht van de kentallen is getoond in onderstaande tabel:

Tabel 10: Netto warmte- en koudevraag in kWh/m<sup>2</sup> per jaar en inschatting piekvermogen, voor verschillende utiliteitsgebouwen per functie.

Categorie	Gebouw- type	Energie label	Netto warmte- vraag ruimtever- warming	Netto warmte- vraag voor tapwater	Netto koel- behoefte ruimte- koeling	Piek- vermogen warmte	Piek- vermoge n koeling
			kWh/m <sup>2</sup> p jr	kWh/m <sup>2</sup> p jr	kWh/m <sup>2</sup> pjr	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
Kantoren		bestaand	42	1	8	0,05	0,05
		nieuw	14	1	7	0,02	0,05
Gezond- heidszorg	Ziekenhuis	bestaand	202	1	-	0,22	0,05
		nieuw	9	1	36	0,01	0,05
	Medische praktijk	bestaand	150	1	-	0,17	0,05
		nieuw	24	1	10	0,03	0,05
Onderwijs	Basisschool	bestaand	131	1	-	0,15	0,05
		nieuw	26	1	6	0,03	0,05
	Voortgezet onderwijs	bestaand	114	1	-	0,13	0,05
		nieuw	29	1	12	0,03	0,05
	MBO/HBO/ Universiteit	bestaand	131	1	-	0,15	0,05
		nieuw	31	1	13	0,03	0,05
Winkelfunctie	Kleine winkels	bestaand	140	1	15	0,16	0,05
		nieuw	35	1	4	0,04	0,05
	Waren- huizen	bestaand	87	1	-	0,10	0,05
		nieuw	6	1	21	0,01	0,05
	Supermark- ten	bestaand	175	2	35	0,19	0,05
		nieuw	17	2	35	0,02	0,05
Horeca	Café/ Restaurant	bestaand	220	2	-	0,24	0,05
		nieuw	32	2	12	0,04	0,05
	Hotel	bestaand	219	2	-	0,24	0,05
		nieuw	14	2	4	0,02	0,05
Cultuur	Museum	bestaand	149	1	-	0,17	0,05
		nieuw	9	1	6	0,01	0,05
	Theater/Bio- scoop	bestaand	130	1	-	0,14	0,05
		nieuw	20	1	5	0,02	0,05
Sport	Gymzalen	bestaand	140	2	-	0,16	0,05
		nieuw	46	2	2	0,05	0,05
	Sporthallen	bestaand	140	13	31	0,16	0,05
		nieuw	18	13	16	0,02	0,05
	IJsbanen	bestaand					
		nieuw					
	Zwem- baden	bestaand	568	33	-	0,57	0,05
		nieuw	57	33	8	0,06	0,05



## 5.2 Energiepotenties zon en water (aquathermie)

Voor een totaaloverzicht van de energiepotenties moeten verschillende bronnen worden ingeschat. Omdat het over warmte (en koude) bronnen gaat betreft dit vooral zon, aquathermie en restwarmte. Elk van deze onderwerpen is een heel vakgebied op zichzelf. Het is dus onmogelijk om een volledig beeld te geven en een precieze bepalingsmethode op te schrijven in dit handboek. De volgende paragrafen zijn daarom bedoeld om een korte introductie te geven en een grove inschatting te kunnen maken. Daarnaast wordt verwezen naar relevante websites.

Zonne-energie kan worden omgezet in elektriciteit met behulp van PV panelen (photo-voltaïsche panelen, ook wel gewoon zonnepanelen genoemd), of in warmte met zonnecollectoren. Daarnaast zijn er combinatie panelen – PVT panelen, waarmee zowel warmte als elektriciteit kan worden opgewekt.

Bij aquathermie kan een onderscheid worden gemaakt tussen TEO (thermische energie uit oppervlaktewater), TEA (thermische energie uit afvalwater) en TED (thermische energie uit drinkwater). Voor aquathermie kan de meest up-to-date informatie worden gevonden op de website van het Netwerk Aquathermie ([www.aquathermie.nl](http://www.aquathermie.nl)) en de website <https://stowa.omgevingswarmte.nl>.

Met de KoWaNet Excel tool 'Vraag&Aanbod' kan van een groot aantal potentiële bronnen de warmte- of koudepotentie (aanbod) worden ingeschat, op jaar- en maandbasis.



### 5.2.1 PV panelen

De opbrengst van PV panelen hangt af van het type paneel en de oriëntatie. Moderne zonnepanelen hebben een rendement tussen ca 15 en 20%. Bij een jaarlijkse bezonning van ca 1.000 kWh/m<sup>2</sup> in het Nederlandse klimaat, leveren zonnepanelen dus tussen de 150 en 200 kWh/m<sup>2</sup> per jaar, bij de meest gunstige oriëntatie (Zuid, onder een hoek van 35°).

In de Vraag&Aanbod tool is een versimpelde aanname gedaan dat een rendement van 16% wordt gehaald. De totale opbrengst wordt uitgerekend aan de hand van de bezonning op een zuid georiënteerd oppervlak onder een hoek van 35°, wat voor 2017 neerkomt op ruim 1200 kWh/m<sup>2</sup> per jaar.

### 5.2.2 Zonnecollectoren

Er zijn veel verschillende typen zonnecollector in de markt. Een verdeling kan gemaakt worden als volgt:

- Vacuümbuis collectoren
- Vlakke plaat collectoren
- Ongeïsoleerde collectoren (zonder afdekkende glasplaat).  
(Een 'zonthermisch' dak is een dak met een geïntegreerd onafgedekte collector. Een zonthermische dak is wat betreft thermische opbrengst vergelijkbaar met dit type paneel. Er zijn verschillende soorten zonthermisch dak, waarbij de onderkant geïsoleerd is en de bovenkant niet. Voor verdere informatie over zonthermische daken zie Agentschap NL, 2013)

De opbrengst van een collector hangt af van de bezonning (en dus oriëntatie), de isolatiewaarde en de temperatuur van het medium in de collector. Hoe hoger de temperatuur, hoe groter de warmteverliezen naar de omgeving.

De thermische efficiëntie kan worden ingeschat met de volgende formule:

$$\eta = c_0 - c_1 \frac{T_m - T_a}{G} - c_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

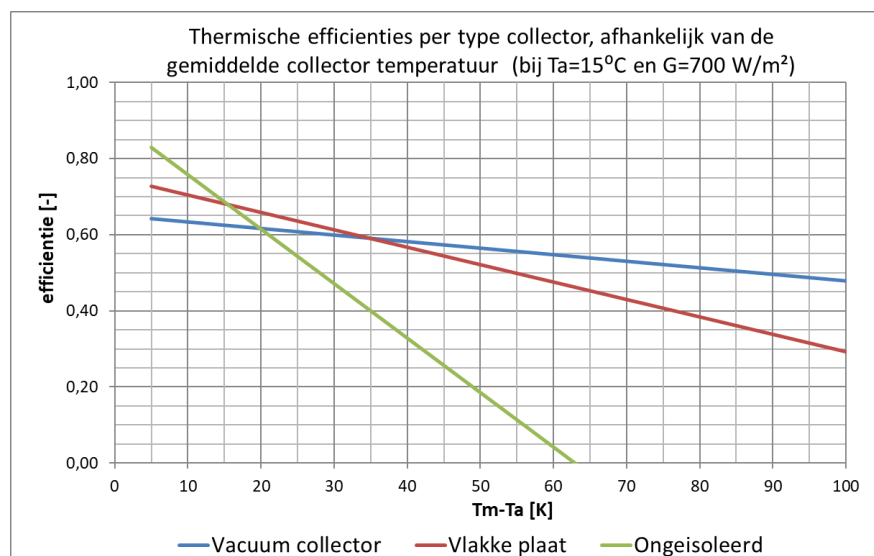
Met daarin de volgende parameters:

$\eta$	Thermische efficiëntie	%
$c_0$	Optische efficiëntie	%
$c_1$	1e orde warmte verlies coëfficiënt	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$c_2$	2e orde warmte verlies coëfficiënt	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )
$T_m - T_a$	Temperatuurverschil tussen (gemiddelde) collector en omgeving/ buitenlucht	K
$T_a$	Buitentemperatuur	°C
$G$ :	Bezonning op de collector	W/m <sup>2</sup>

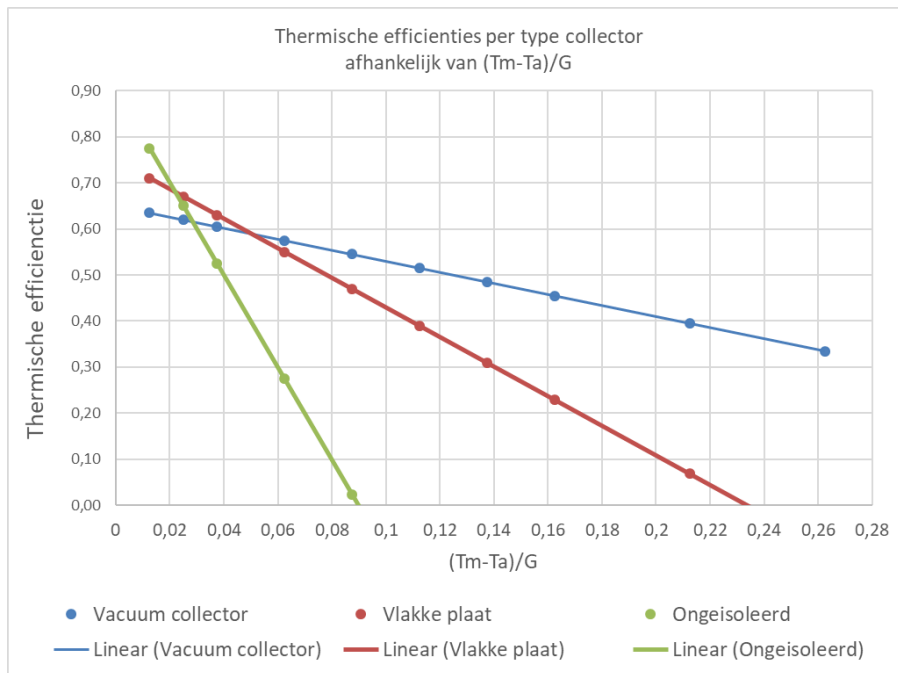
In principe kan met deze parameters voor elk moment van het jaar de efficiëntie en dus de opbrengst ingeschat worden. De eigenschappen van de verschillende collectoren zijn weergegeven in onderstaande tabel.

	Vacuümbuis collectoren	Vlakke plaat	Ongeïsoleerd
$c_0$	0,65	0,75	0,900
$c_1$	1,2	3,2	10,00
$c_2$	0,008	0,015	0,080

Ter indicatie is voor het drietal collectortypen voor bepaalde omstandigheden (een buitentemperatuur van 15 graden en bezonning (G-waarde) van 700 W/m<sup>2</sup>) de efficiëntie (aandeel bezonning dat wordt geogst) berekend en weergegeven in Figuur 40. Omdat te efficiëntie ook afhangt van G, is daarnaast ook de rendementscurve voor de gereduceerde temperatuur (DT/G) weergegeven in Figuur 41.



Figuur 40: Efficiëntie zonnecollectoren afhankelijk van gemiddelde temperatuur



Figuur 41: Efficiëntie zonnecollectoren afhankelijk van gemiddelde temperatuur/G

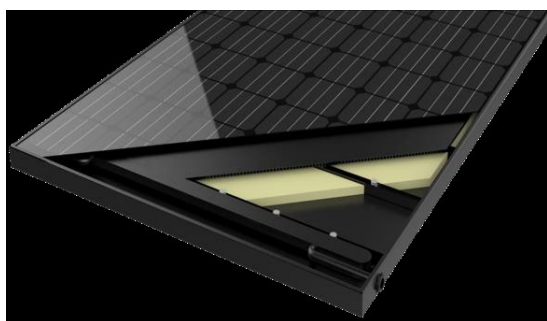
Op basis van deze formule kan voor verschillende temperaturen worden ingeschat wat de thermische opbrengst zal zijn. T.b.v. de KoWaNet 'Vraag&Aanbod' Tool is voor het klimaatjaar 2017 voor elk uur de efficiëntie bepaald, en daarmee de gewogen gemiddelde efficiëntie per maand. Op basis hiervan kan met deze exceltool voor verschillende collectortemperaturen de potentie van zonnecollectoren per maand worden ingeschat. Let op: deze opbrengst is het theoretisch haalbare opbrengst en deze houdt nog geen rekening met het feit dat als deze warmte niet wordt gebruikt of opgeslagen, deze verloren gaat.

### 5.2.3 PVT panelen

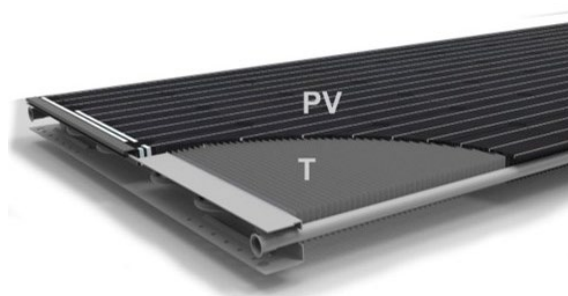
Een PVT paneel wekt zowel elektriciteit als warmte op, doordat er achter het PV paneel nog een collector geplaatst is. In principe zijn alle typen collectoren in theorie te combineren met een PV paneel. Er is een scala van mogelijk toepasbare PVT panelen op de markt. In Keizer et.al. (2017) zijn de verschillende typen PVT panelen uitgebreid beschreven. In grote lijnen kunnen 4 verschillende categorieën worden onderscheiden, waarvan de eerste drie qua thermische opbrengst gelijk zijn aan collectoren zonder PV toevoeging (zie vorige paragraaf):

- PVT panelen met vacuümbuis collectoren
- PVT module met glas afgedekt.
- PVT module met isolatie aan de achterkant en zonder glasafdekking: Een voorbeeld van dit type paneel is weergegeven in Figuur 42.
- PVT module zonder isolatie en zonder glasafdekking, met extra warmtewisselaar: Dit type PVT paneel is geschikt om warmte op temperaturen rond de omgevingstemperatuur op te wekken. Dit type wordt daarom toegepast om bronwarmte voor een warmtepomp of voor de regeneratie van WKO systemen. Het voordeel van dit type is dat ook de omgevingswarmte kan worden gebruikt. Ook op bewolkte dagen of nachten, zo lang de omgevingstemperatuur hoger is dan de temperatuur in de collector, kan warmte uit de omgeving worden gebruikt als bron voor de warmtepomp. Nadeel van dit type is dat de

modules veel warmte verliezen aan de achterkant doordat er geen isolatie is toegepast. Het is dus niet geschikt om hoge temperaturen op te wekken. Een voorbeeld is weergegeven in Figuur 43.



Figuur 42: PVT module met isolatie aan de onderkant, en zonder glasafdekking (voorbeeld van het merk DualSun Spring)



Figuur 43: PVT module met warmtewisselaar aan de achterkant en zonder glasafdekking, ook wel 'warmtepomppaneel' genoemd (ontwikkeld door Triple Solar).

Over het algemeen geldt logischerwijs dat hoe beter geïsoleerd, hoe beter een hoge temperatuur kan worden opgewekt zonder teveel warmteverliezen. Als echter ook het doel is omgevingswarmte te gebruiken, dan moet er minder geïsoleerd worden of zoals bij het laatste type, kan zelfs een warmtewisselaar worden toegevoegd.

Voor de elektriciteitsopwekking geldt: hoe hoger de temperatuur in het paneel, hoe lager het rendement van de elektriciteitsopwekking. Het is zelfs zo dat wanneer het paneel actief gekoeld wordt (bijvoorbeeld doordat een PVT wordt gebruikt om een WKO te regenereren, waardoor het in feite gekoeld wordt door de WKO), dat de elektriciteitsopbrengst dan iets hoger is dan bij een 'gewoon' PV paneel.

#### 5.2.4 TEO: Thermische energie uit oppervlaktewater

Er zijn verschillende manieren waarop meren, rivieren en zeeën kunnen worden gebruikt voor zowel verwarming als koeling. Koude en warmte wordt onttrokken via een warmtewisselaar en kan dan met een warmtepomp naar een hogere of lagere temperatuur gebracht worden. Als de koude uit het oppervlaktewater direct gebruikt wordt (niet over een warmtepomp), spreekt men van vrije koeling. Omdat oppervlaktewater in de zomer te warm is om direct mee te koelen wordt het meestal gecombineerd met Warmte-Koude-Opslag (WKO). Zo wordt warmte van de zomer opgeslagen om in de winter mee te verwarmen en koude van de winter opgeslagen om in de zomer mee te koelen. Oppervlaktewater wordt dus gebruikt om de bron te regenereren.



Figuur 44: onttrekken van warmte of koude uit oppervlaktewater met een warmtewisselaar.

De hoeveelheid warmte of koude die uit oppervlaktewater onttrokken kan worden hangt af van een aantal factoren zoals de mate dat het water opgewarmd of afgekoeld mag worden, het watervolume en de stroomsnelheid van het water. De stroomsnelheid is verschillend voor verschillende typen van oppervlaktewater. Voor zeeën is geen limiet voor het watervolume, terwijl het watervolume waaruit onttrokken kan worden bij rivieren groter is door de stroming. In meren en kanalen is bijna geen stroming waardoor minder warmte of koude te onttrekken is.

Het is moeilijk om te bepalen wat er te onttrekken is. Stowa, Syntraal en Deltares hebben een tool in ontwikkeling waarmee eenvoudig de potenties van afvalwater en oppervlaktewater af te lezen is. De eerste versie is beschikbaar op:

<https://stowa.omgevingswarmte.nl>

Via deze website kan voor alle gebieden in Nederland een inschatting worden gemaakt van de beschikbare warmte uit oppervlaktewater (TEO) en afvalwater. De waarde is uitgedrukt in Giga Joules per jaar (GJ/jaar). Een voorbeeld van de website is gegeven in Figuur 45. Meer informatie over de rekenregels die gebruikt zijn voor de bepaling van de potenties van oppervlaktewater in de STOWA-kaarten is te vinden via de link:

[https://stowa.omgevingswarmte.nl/upload/rekenregels\\_teo.pdf](https://stowa.omgevingswarmte.nl/upload/rekenregels_teo.pdf)



Figuur 45: Schermafbeelding van de STOWA-tool voor het centrum van Amsterdam waarmee het mogelijk is het potentieel aan energie uit oppervlaktewater te bepalen. Bron: <https://stowa.omgevingswarmte.nl/overzichtskaart#e5e9ea2b-d5bf-e811-a2c0-00155d010457>.

### 5.2.5 TEA-1: Thermische energie uit Rioolwater-zuiveringsinstallaties (RWZI)

De meeste installaties voor afvalwaterzuivering (RWZI's) bevinden zich vanwege hun functie in de buurt van bevolkte gebieden. RWZI-effluent heeft een verhoogde temperatuur in vergelijking met het oppervlaktewater waarin het uiteindelijk terecht komt. Dit maakt het daarom aantrekkelijk als bronmedium voor warmtepompen. De potentie aan warmte van zo'n RWZI is afhankelijk van een aantal factoren:

- Het debiet van het water dat de afvalwaterzuiveringsinstallatie verlaat
- De hoeveelheid energie die onttrokken wordt (temperatuurdaling).

Stowa heeft ook in kaart laten brengen hoeveel warmte onttrokken kan worden uit RWZI's in Nederland, al dan niet in combinatie met WKO.

### 5.2.6 [TEA-2: Thermische energie uit rioolwater via rioolbuizen en rioolgemalen](#)

Warmte uit rioolstelsels kan zowel onttrokken worden bij de rioolpijp zelf als bij de rioolgemalen met een warmtewisselaar. Om te voorkomen dat het zuiveringsproces bij de RWZI ontregeld wordt, is er bij de Stowa-kaarten van uit gegaan dat de temperatuur in het rioolstelsel in de winter niet meer dan 1 graad mag dalen. In de zomer mag het tot 5 graden dalen. De temperatuur van het rioolwater fluctueert gedurende het jaar en wordt mede beïnvloed door de hoeveelheid regen- en smeltwater dat via het riool wordt afgevoerd. Ook voor warmtepotenties van rioolpijpen en -gemalen is informatie uit de Stowa-kaarten te halen en geldt dat de bruikbare potentie groter is als het gecombineerd wordt met een WKO.

### 5.2.7 [TED: Thermische energie uit drinkwater](#)

Bij TED wordt gebruik gemaakt van warmte en koude uit drinkwater. Vanuit de drinkwaterleiding kan warmte of koude via een dubbelwandige warmtewisselaar worden overgedragen voor direct gebruik of opslag in de bodem in een WKO-systeem. Het drinkwater stroomt vervolgens weer het drinkwaterleidingnet in<sup>9</sup>. De afkoeling of opwarming van het drinkwater is beperkt. De temperatuur mag niet te laag worden zodat er bevriezingskans bestaat en niet te hoog om de kans op legionella te vergroten. Het gaat dus om enkele graden afkoeling of opwarming. Per graad afkoeling mag gerekend worden op 1,7 kWh thermische energie per m<sup>3</sup> drinkwater. TED wordt vooral toegepast waar grote hoeveelheden drinkwaterstromen zijn zoals bij pompstations voor drinkwater.

## 5.3 Thermische energie uit koeling

### 5.3.1 [Thermische energie uit koeling van datacenters](#)

Restwarmte van koelprocessen komt vaak vrij in de lucht door koeltorens, verdamping, natuurlijke trek of mechanische ventilatie. Het is ook mogelijk om deze warmte af te geven aan een vloeistof die kan worden gebruikt voor (lage temperatuur) verwarmingsdoeleinden of als bron voor een warmtepomp om op hogere temperaturen te verwarmen.

Voor datacenters die traditionele koelmachines gebruiken is het elektriciteitsgebruik voor koeling weinig seizoens-afhankelijk. De buitentemperatuur is nagenoeg niet van invloed voor de warmtelast in de datacenters. De opgestelde apparatuur die gekoeld moet worden heeft vermogens tot wel meer dan 1.000 Watt per m<sup>2</sup> vloeroppervlak. Dat is meer dan 8.000 kWh/m<sup>2</sup> per jaar aan elektriciteit dat in warmte wordt omgezet en weggekoeld moet worden. 90% van het elektriciteitsgebruik van datacenters komt in het gebouw weer vrij als warmte die afgevoerd wordt. Door het jaarlijks elektriciteitsgebruik te bepalen en in te voeren in de Kowanet V&A-tool, wordt de maandelijkse hoeveelheid restwarmte berekend. Deze is elke maand gelijk aan 1/12 deel van de jaarlijkse hoeveelheid.

Indien het elektriciteitsverbruik van het datacenter niet bekend is kan men een inschatting maken.

- 1) Inschatting op basis van literatuur (Afman et. al., 2014): Hoewel het gemiddelde koelvermogen voor datacenters 1 kW/m<sup>2</sup> vloeroppervlak is, is deze niet altijd volledig in gebruik. De gemiddelde bezettingsgraad en de mate van belasting zijn 50, resp. 45% (Afman, 2014). Door nu het opgestelde vermogen aan apparatuur per m<sup>2</sup> (1 kW/m<sup>2</sup>),

---

<sup>9</sup> <https://www.drinkwaterplatform.nl/aquathermie-warmte-uit-water/>

te vermenigvuldigen met de bezettingsgraad (50%) en de mate van belasting (45%) kan het elektriciteitsgebruik per m<sup>2</sup> vloeroppervlak berekend worden. Dit wordt dan  $1.000 \text{ Watt} \times 0,45 \times 0,50 = 225 \text{ Watt}$  per m<sup>2</sup> vloeroppervlak. Dat is  $24 \times 225 = 5,4 \text{ kWh}$  per dag en  $365 \times 5,4 = 1.971 \text{ kWh/jaar/m}^2$  vloeroppervlak.

- 2) Inschatting op basis van ervaringsgetallen vanuit het KoWaNet consortium: Bij moderne datacenters wordt vaak minder gekoeld, met bijvoorbeeld een gemiddeld koelvermogen van ca  $150 \text{ W/m}^2$ . Dat is  $24 \times 150 = 3,6 \text{ kWh}$  per dag en  $365 \times 3,6 = \text{ca } 1.300 \text{ kWh/jaar/m}^2$  vloeroppervlak

Indien het aantal m<sup>2</sup> vloeroppervlak bekend is, kan dit vermenigvuldigd worden met het jaarverbruik per m<sup>2</sup> en ingevoerd worden in de KoWaNet V&A-tool.

### 5.3.2 [Thermische energie uit productkoeling in supermarkten](#)

Het grootste deel van de elektriciteitsvraag van supermarkten wordt gebruikt voor productkoeling. Deze cijfers kunnen dus worden gebruikt om de restwarmteproductie in te schatten. Op dit moment wordt de restwarmte van de koeling in de meeste supermarkten afgegeven aan de buitenlucht.

Aangezien supermarkten zelden uit meerdere verdiepingen bestaan, zou de netto oppervlakte van de begane grond, afgeleid van de voetafdruk van het gebouw (of de gebouwen) die elke individuele supermarkt inneemt, een voldoende benadering moeten zijn. Het betreft dan de werkelijke supermarkt en niet kantoren, magazijnen en andere activa die door hetzelfde bedrijf worden beheerd.

Omdat de productkoeling opgesteld is in de winkelruimte waar de gemiddelde temperatuur continu rond 20°C ligt, zal de hoeveelheid koeling voor de producten zomer en winter ongeveer gelijk zijn. Tijdens de verschillende maanden van het jaar zal er dus weinig verschil zijn.

Het energiegebruik voor koeling verschilt sterk tussen verschillende supermarkten. In Sipma en Rietkerk (2016) wordt aangegeven dat het gemiddelde elektriciteitsgebruik in supermarkten  $254 \text{ kWh/m}^2$  per jaar is. Volgens Van den Bovenkamp (2016), wordt in supermarkten 88% van het elektriciteitsgebruik gebruikt voor productkoeling, en wordt deze koeling opgewekt met een gemiddelde COP van 3. Dat betekent dat  $223 \text{ kWh/m}^2$  per jaar voor koeling wordt gebruikt, en dat dit overeenkomt met een koelbehoefte van  $3 \times 223 = 670 \text{ kWh}$  per m<sup>2</sup> vloeroppervlak per jaar.

Het gebruik kan echter ook veel lager liggen. De supermarkt in het Maankwartier gebruikt slechts ca  $100 \text{ kWh/m}^2$  aan koeling per jaar (dit is direct de koelbehoefte en niet het elektriciteitsgebruik t.b.v. koeling; de koeling in het Maankwartier wordt vanuit het KoWaNet geleverd).

Het verdient dus aanbeveling een zo reëel mogelijke inschatting te doen van de koelvraag, bijvoorbeeld op basis van echt werkelijke elektriciteitsgebruik van een supermarkt. In de Kowanet V&A-tool. De jaarlijks vrijkomende hoeveelheid warmte wordt door 12 gedeeld en gelijkmatig over elke maand van het jaar verdeeld.

## 5.4 Inschatting systeem energieprestaties

### 5.4.1 Toelichting systeemoverzicht KoWaNet 'systeem energieprestatie' tool

De KoWaNet Excel tool 'KoWaNet tool energieprestatie' kan worden gebruikt om voor verschillende varianten de energiestromen te bepalen. Een schermafbeelding van het totaaloverzicht uit deze Excel tool is getoond in Figuur 46. Daarnaast heeft de Excel tool tabbladen met betrekking tot de onderdelen warmtepomp COP's, distributieverliezen, stilstandsverliezen en pompenergie. Deze geven geen nauwkeurige inschatting van elke mogelijke situatie, maar kunnen wel gebruikt worden als hulpmiddel bij een eerste inschatting.

Energie-input TOTAAL		GEBIED of CLUSTER							GEBOUW/BOUWBLOK							
		Cluster energie input		energiecomponenten op CLUSTER niveau					Gebouw /bouwblok energie input		energiecomponenten op GEBOUW/BOUWBLOK niveau					
ELEKTRICITEIT (+) of KOUDE (-)	WARMTE (+) of KOUDE (-)	ELEKTRICITEIT (+) of KOUDE (-)	WARMTE (+) of KOUDE (-)	elektriciteit tbv WP	pomp energie	COP (alleen Warmtew> vul in)	distributie verliezen	ELEKTRICITEIT (+) of KOUDE (-)	WARMTE (+) of KOUDE (-)	elektriciteit tbv WP	pomp energie	COP (alleen Warmtew> vul in WW)	distributie verliezen	stilstands verliezen opslag		
kWh_e/jr	kWh_th/jr	kWh_e/jr	kWh_th/jr	kWh_e/jr	kWh_e/jr	[ - ]	kWh_th/jr	kWh_e/jr	kWh_th/jr	kWh_e/jr	kWh_e/jr	[ - ]	kWh_th/jr	kWh_th/jr		
<b>Variant 1: KoWaNet LT</b>																
<b>collectieve LT</b>		<b>WP op gebouwniveau + booster WP</b>														
VERWARMING	1689	6920	169	6.920	-	169	WW	1000	V	1.520	5.920	1.480,0	40	5,0	200	200
TAPWATER	1349	1920	55	1.920	-	55	WW		W	494	1.920	480,0	14	5,0		
KOELING	50	-1000	29	-1.000	-	29	WW		K	21,4	-1.000	-	21	WW		
ELEKTRICITEIT	0								E							
<b>TOTAL</b>	<b>3.088</b>	<b>7.840</b>	253	7.840	-	253	0	1000		2.035	6.840	1.960,0	75	10	200	200

EINDGEBRUIKER		EINDGEBRUIKER							
Eindgebruiker energie input		energiecomponenten bij de EINDGEBRUIKER					Netto warmte- en koudebehoefte		
ELEKTRICITEIT (+) of KOUDE (-)	WARMTE (+) of KOUDE (-)	elektriciteit tbv WP	pomp energie	COP (alleen Warmtew> vul in WW)	stilstands verliezen opslag				
kWh_e/jr	kWh_th/jr	kWh_e/jr	kWh_e/jr	[ - ]	kWh_th/jr				
V	-	7.000	-	WW		Verwarming	kWh_th	7.000	
W	800	2.400	800		4,0	200	Tapwater	kWh_th	3.000
K	-	-1.000	-	WW			Koeling	kWh_th	1.000
E	-						Elektriciteit	kWh_e	
	800	8.400	800,0	0	4	200			

Figuur 46: schermafbeelding van de KoWaNet 'SysteemEnergiePrestatie' Exceltool. Op het tabblad 'systeemoverzicht' kunnen de efficiënties van alle componenten in de gehele keten van de warmtelevering worden ingevuld.

### 5.4.2 Inschatting warmtepomp efficiënties (COP's)

#### Overzicht

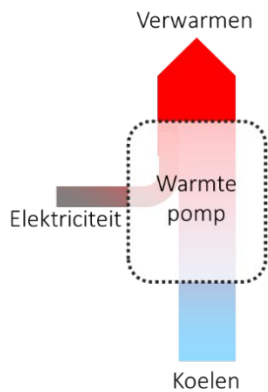
Een warmtepomp is een apparaat dat warmte opneemt uit een systeem op een lage temperatuur en afgeeft aan een systeem op een hogere temperatuur. Dit gaat niet vanzelf dus er is nog een extra input van energie nodig, meestal in de vorm van elektriciteit.

Doordat de warmte aan de koude kant wordt onttrokken en aan de warme kant wordt afgegeven, wordt er altijd gelijktijdig gekoeld en verwarmd, waarbij de geproduceerde warmte gelijk is aan de geproduceerde koude plus de input van elektriciteit. Vaak wordt echter maar één kant van de warmtepomp nuttig gebruikt voor levering van warmte en wordt de andere kant gebruikt als bron voor warmte of om warme af te geven (zgn. 'sink'). De opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 47.

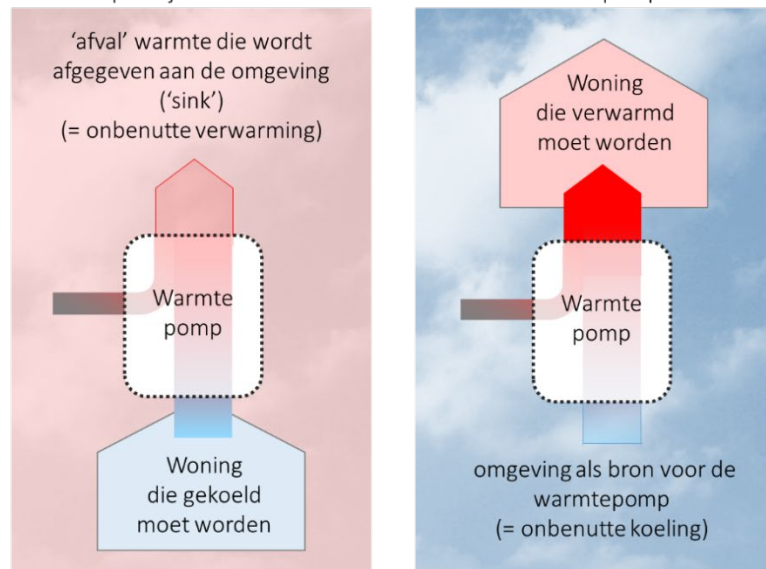


Bij een KoWaNet wordt door de uitwisseling gestreefd om zoveel mogelijk van beide kanten van een warmtepomp te benutten.

In principe produceert een warmtepomp altijd gelijktijdig koude en warmte:



In de praktijk wordt vaak maar één kant van de warmtepomp benut:



Figuur 47: Warmtepomp schema in drie situaties: algemeen - zowel koelen als verwarmen (links), alleen gebruikt voor koelen (midden) en alleen voor verwarmen (rechts).

De efficiëntie van een warmtepomp wordt de COP genoemd: de Coëfficiënt of Performance. De COP is als volgt gedefinieerd:

- COP (verwarming) = geproduceerde warmte / gebruikte elektriciteit
- COP (koeling) = geproduceerde koude / gebruikte elektriciteit

Bij de COP wordt de warmte die je aan de 'bron' (bv. omgeving) onttrekt of aan de sink (bv. omgeving) afgeeft niet meegeteld. De COP kan daardoor boven 100% uitkomen; bij verwarmen is dat altijd zo, en bij de gebruikelijke temperaturen in de gebouwde omgeving geldt dat ook voor koeling).

De COP is afhankelijk van de temperaturen aan de koude en de warme kant. Er zijn verschillende manieren om een COP te bepalen:

- Door het kiezen van een in de markt verkrijgbare warmtepomp die voldoet aan de eisen, en de COP voor de ontworpen temperaturen op te zoeken.
- Door een haalbare COP te bepalen op basis van de theorie. Dit wordt hier onder toelicht:

De theoretisch maximaal haalbare COP is de  $COP_{Carnot}$ , vernoemd naar de ontdekker ervan: Sadi Carnot. De  $COP_{Carnot}$  kan als volgt worden berekend:

$$COP_{Carnot}(\text{verwarming}) = \frac{T_{warm}}{T_{warm} - T_{koud}}$$

$$COP_{Carnot}(\text{koeling}) = \frac{T_{koud}}{T_{warm} - T_{koud}}$$

T in Kelvin!

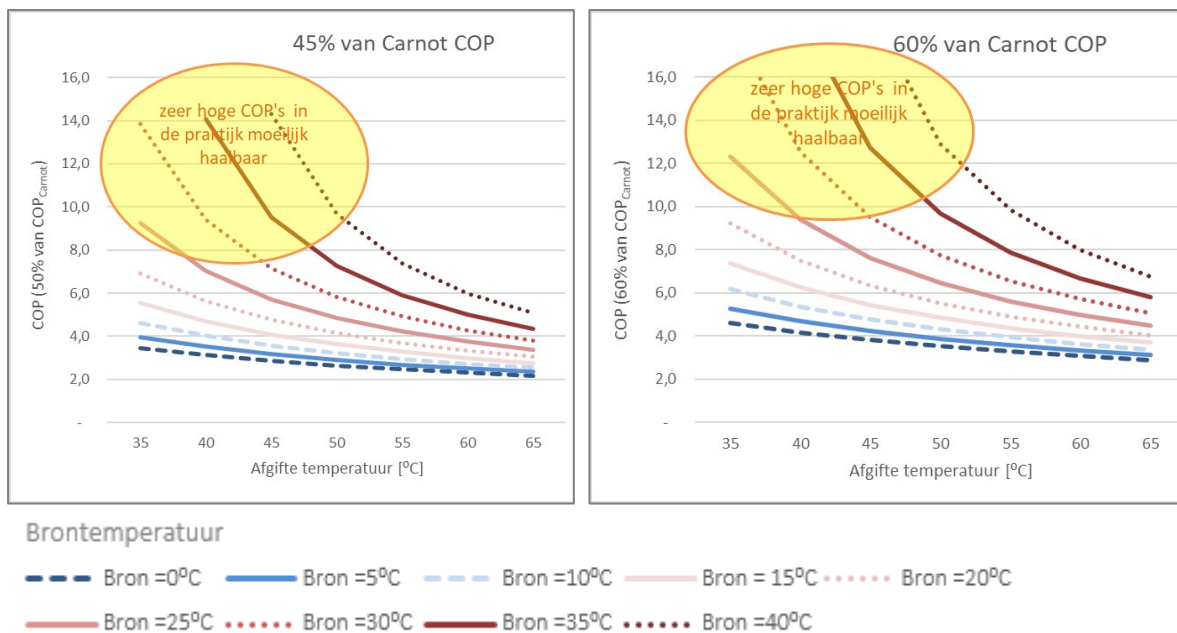
Deze formules gelden voor een ideale warmtepomp

In de praktijk kan de maximaal haalbare COP nooit gehaald worden, maar ligt deze tussen ca 40 en 50% van de  $COP_{Carnot}$ .

De COP voor verschillende temperatuursprongen is weergegeven in Figuur 48. Hierbij zijn twee versies gepresenteerd: met een rendement van 45% en 60% van Carnot, van toepassing bij respectievelijk kleinere (individuele) warmtepompen en grotere, collectieve warmtepompen.

Deze COP's kunnen worden gebruikt voor een eerste indicatie van de prestatie van een systeem als de daadwerkelijk gekozen warmtepomp (en de bijbehorende COP) nog niet bekend is.

Omdat de temperatuur van de afgifte en van de bron gedurende het jaar kan verschillen, wordt ook vaak een 'Seasonal Performance Factor' (SPF) gegeven. Dit is de gewogen gemiddelde COP over het hele jaar. Bij lucht/water warmtepompen met buitenlucht als bron hangt deze dus van het klimaat / de buitentemperatuur af.



Figuur 48: Warmtepomp COP's (voor verwarmen!) bij verschillende temperatuursprongen.

In de volgende sub-paragrafen wordt de achtergrond en COP berekening nader toegelicht.

### Achtergrond

- Bij een warmtepomp geldt altijd: Geproduceerde warmte = elektriciteit + input van koude. (Dit is volgens de 1e hoofdwet van de thermodynamica: de wet van behoud van energie)
- Dat betekent: De geproduceerde warmte is gelijk aan de input van elektriciteit PLUS de onttrokken koude (de 'geproduceerde' koude).
- Voor eenzelfde warmtepomp en gegeven temperaturniveaus geldt dus altijd: COP(warmte) = COP(koude) + 1. Voor warmte is de efficiëntie dus groter, als je uitgaat van dezelfde temperaturen!

Volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica hangt voor een ideale warmtepomp de verhouding tussen warmte (QH) en koude (QC) af van de temperaturen (in Kelvin), volgens:

$$\frac{QH}{TH} = \frac{QC}{TC} \quad \text{Dit geldt voor een ideale warmtepomp!}$$

(temperatuur in Kelvin!)

Deze formule is gebaseerd op het feit dat bij een ideale warmtepomp de hoeveelheid entropie die aan het koude systeem wordt onttrokken ( $Q_C/T_C$ ) gelijk is aan de entropie die aan het warme systeem wordt afgegeven ( $Q_H/T_H$ ). Dit is een thermodynamisch ideale situatie. In werkelijkheid zal er meer warmte worden afgegeven volgens:

$$\frac{Q_H}{T_H} > \frac{Q_C}{T_C} \quad \text{Dit geldt voor een werkelijke warmtepomp (temperatuur in Kelvin!)}$$

### Theoretisch maximale COP

Door de formules uit de eerste en de tweede hoofdwet te combineren kan de COP van een ideale warmtepomp (de  $COP_{Carnot}$ ) worden berekend, als volgt:

$$COP_{Carnot}(heating) = \frac{Q_H}{elek} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad \text{T in Kelvin!}$$

$$COP_{Carnot}(cooling) = \frac{Q_C}{elek} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad \text{Deze formules gelden voor een ideale warmtepomp}$$

### Berekende haalbare COP's bij verschillende temperatuursprongen

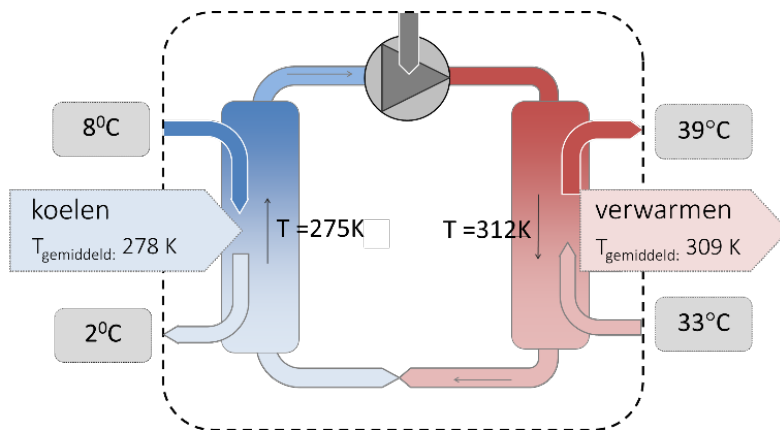
Een werkelijke COP kan om meerdere redenen nooit zo hoog zijn als de ideale COP. Een in de praktijk haalbare COP voor verwarming ligt meestal rond 40% tot 60% van de Carnot COP. Dit is een vuistregel om op een eenvoudige manier de verschillende verliezen mee te nemen. (De COP voor koeling volgt dan uit uit de eerste hoofdwet, volgens onderstaand bijvoorbeeld: De ideale COP van een warmtepomp tussen  $T_H=330K$  en  $T_C=300 K$  is  $330/30 = 11$ . De werkelijke COP is dan circa 5,5. De COP voor koelen tussen deze twee temperaturen is dus  $5,5-1=4,5$ )

De verliezen in een warmtepomp die ervoor zorgen dat de ideale COP niet wordt gehaald bestaan uit:

- De benodigde temperatuurverschillen in de warmtewisselaars
- De compressor efficiëntie
- Het smoorventiel

Door de benodigde temperatuurverschillen in de warmtewisselaars tussen het koudemiddel (dat door de warmtepomp stroomt) en de externe warmte of koude bron waar warmte aan wordt afgegeven of wordt onttrokken is het interne temperatuurverschil in de warmtepomp groter dan het temperatuurverschil tussen bron en doel (zie Figuur 49). Dit gaat bij een klein temperatuurverschil tussen bron en doel een grote rol spelen. Daardoor kunnen warmtepompen met een kleine temperatuursprong op een gegeven moment geen hogere COP's halen (of is dit in elk geval erg moeilijk), ook al zou het theoretisch mogelijk zijn.

Daarnaast heeft het de efficiëntie ook te maken met het optimale werkgebied van het koelmiddel in combi met de compressor. Als de  $\Delta T$  te klein is heeft de compressor te weinig weerstand en ontstaan er verliezen in de compressor en/of het smoorventiel grijpt in.



Figuur 49: Schematisch warmtepomp proces, met daarin aangegeven het verschil tussen de temperatuursprong tussen bron en afgifte, en de inwendige temperatuursprong van de warmtepomp.

Vanwege de hierboven beschreven redenen is voor de berekeningen van de maximaal haalbare COP 6 Kelvin opgeteld bij het temperatuurverschil tussen bron en afgiftesysteem. Dit is een  $\Delta T$  van 3K over beide warmtewisselaars. Dit geeft voor warmtepompen met kleine temperatuursprongen een reëler beeld dan wanneer deze extra interne  $\Delta T$  niet wordt meegenomen. De resulterende COP's zijn weergegeven in tabellen 11 t/m 13.

Tabel 11:  $COP_{Carnot}$ , voor verschillende temperatuursprongen

COP Carnot										
Extra DT	6	Afgifte [°C]	30	35	40	45	50	55	60	65
	Bron [°C]	K	303	308	313	318	323	328	333	338
Bron =0°C	-	273	8,4	7,5	6,8	6,2	5,8	5,4	5,0	4,8
Bron =5°C	5	278	9,8	8,6	7,6	6,9	6,3	5,9	5,5	5,1
Bron =10°C	10	283	11,7	9,9	8,7	7,8	7,0	6,4	5,9	5,5
Bron =15°C	15	288	14,4	11,8	10,1	8,8	7,9	7,1	6,5	6,0
Bron =20°C	20	293	18,9	14,7	12,0	10,3	9,0	8,0	7,2	6,6
Bron =25°C	25	298	27,5	19,3	14,9	12,2	10,4	9,1	8,1	7,3
Bron =30°C	30	303		28,0	19,6	15,1	12,4	10,6	9,3	8,2
Bron =35°C	35	308			28,5	19,9	15,4	12,6	10,7	9,4
Bron =40°C	40	313				28,9	20,2	15,6	12,8	10,9

Tabel 12: COP bij 45% van  $COP_{Carnot}$ , voor verschillende temperatuursprongen

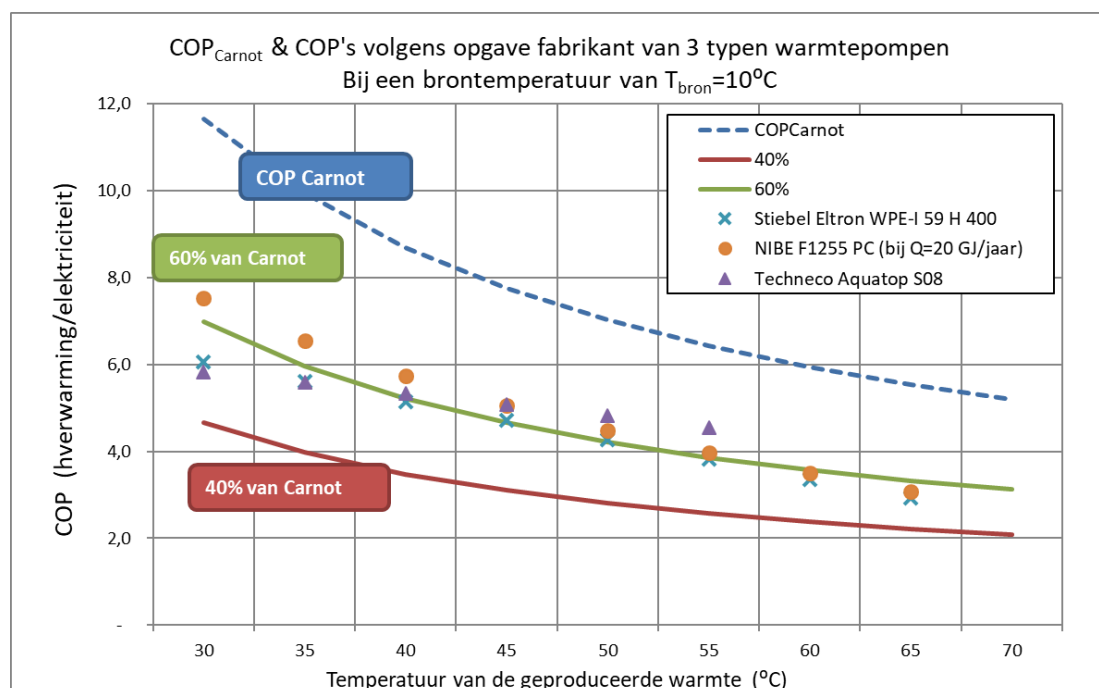
45% van $COP_{Carnot}$										
	45%	Afgifte [°C]	30	35	40	45	50	55	60	65
	Bron [°C]	K	303	308	313	318	323	328	333	338
Bron =0°C	0	273	3,8	3,4	3,1	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1
Bron =5°C	5	278	4,4	3,9	3,4	3,1	2,9	2,6	2,5	2,3
Bron =10°C	10	283	5,2	4,5	3,9	3,5	3,2	2,9	2,7	2,5
Bron =15°C	15	288	6,5	5,3	4,5	4,0	3,5	3,2	2,9	2,7
Bron =20°C	20	293	8,5	6,6	5,4	4,6	4,0	3,6	3,3	3,0
Bron =25°C	25	298	12,4	8,7	6,7	5,5	4,7	4,1	3,7	3,3
Bron =30°C	30	303		12,6	8,8	6,8	5,6	4,8	4,2	3,7
Bron =35°C	35	308			12,8	8,9	6,9	5,7	4,8	4,2
Bron =40°C	40	313				13,0	9,1	7,0	5,8	4,9
Deze zeer hoge COP's zijn in de praktijk nauwelijks haalbaar.										
Hiervoor zouden heel grote warmtewisselaars nodig zijn.										

Tabel 13: COP bij 60% van  $COP_{Carnot}$ , voor verschillende temperatuursprongen

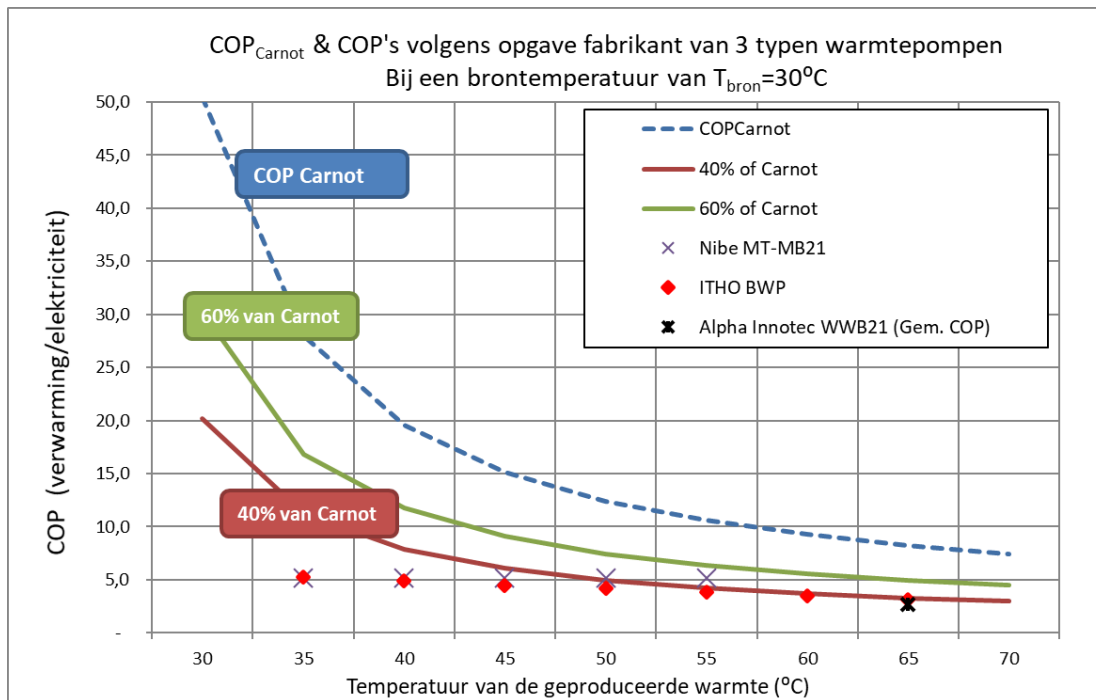
60% van $COP_{Carnot}$										
	60%	Afgifte [°C]	30	35	40	45	50	55	60	65
	Bron [°C]	K	303	308	313	318	323	328	333	338
Bron =0°C	0	273	5,1	4,5	4,1	3,7	3,5	3,2	3,0	2,9
Bron =5°C	5	278	5,9	5,1	4,6	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1
Bron =10°C	10	283	7,0	6,0	5,2	4,7	4,2	3,9	3,6	3,3
Bron =15°C	15	288	8,7	7,1	6,1	5,3	4,7	4,3	3,9	3,6
Bron =20°C	20	293	11,4	8,8	7,2	6,2	5,4	4,8	4,3	4,0
Bron =25°C	25	298	16,5	11,6	8,9	7,3	6,3	5,5	4,9	4,4
Bron =30°C	30	303		16,8	11,7	9,1	7,5	6,3	5,6	4,9
Bron =35°C	35	308			17,1	11,9	9,2	7,6	6,4	5,6
Bron =40°C	40	313				17,3	12,1	9,4	7,7	6,5
			Deze zeer hoge COP's zijn in de praktijk nauwelijks haalbaar.							
			Hiervoor zouden heel grote warmtewisselaars nodig zijn.							

### Vergelijking met COP's van in de markt beschikbare Warmtepompen

De volgens de theorie bepaalde COP's zijn vergeleken met de COP's van enkele in de markt verkrijgbare warmtepompen, volgens technische documentatie van deze warmtepompen. Dit is gedaan voor verschillende brontemperaturen. Enkele voorbeelden zijn hier onder weergegeven:



Figuur 50: COP's bij een brontemperatuur van  $10^{\circ}C$



Figuur 51: COP's bij een brontemperatuur van 30°C

Zoals te zien is liggen de COP's van werkelijke warmtepompen in elk geval (ver) onder de  $COP_{Carnot}$ , en redelijk rondom de range van 40-60% van Carnot. Wat ook opvalt is dat de COP bij een kleine temperatuursprong in veel gevallen lager is dan te verwachten zou op basis van een verwacht % van Carnot. **Hieruit blijkt dat het belangrijk is de juiste warmtepomp te kiezen bij de temperatuursprong die naar verwachting het meest voor zal komen.** Zoals ook aangegeven door Gasser, L et al. (2017), is het vooral bij warmtepompen met een kleine temperatuursprong ('low temperature lift heat pumps') van groot belang hier bij het ontwerp of de keuze van de warmtepomp rekening mee te houden. Gasser et al.: 'the consistent use of a low external temperature lift in heating and cooling can save valuable primary energy [...] A mandatory requirement for doing so is that the heat pump or chiller used must be specifically designed for these operating conditions and thus enable a high Carnot efficiency in connection with low temperature lifts.'

#### 5.4.3 Vereenvoudigde inschatting leidingdiameters

De leidingdiameters kunnen worden bepaald met speciale modellen. Hiervoor zijn dynamische/iteratieve calculatieprogramma's nodig zoals EPA-net, waarbij op basis van de individuele vraag, gekozen leidingdiameter en drukknoppunten de flow per leiding weerstandsafhankelijk wordt berekend.

Op een (zeer) vereenvoudigde wijze kunnen de leidingdiameters worden ingeschat op basis van benodigd vermogen, temperatuurverschil tussen aanvoer en retour, en maximale stroomsnelheid.

Stap 1 is het bepalen van het benodigde debiet op basis van het benodigde vermogen en het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour, als volgt:

$$\text{debiet} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c \cdot (T_{aanvoer} - T_{retour})}$$

Waarbij geldt:

- $\dot{Q}$  = totaal benodigd thermisch vermogen (kW)
- $\rho$  = dichtheid (kg/m<sup>3</sup>); voor water geldt 1000 kg/m<sup>3</sup> bij 0°C, of 965 kg/m<sup>3</sup> bij 90°C.
- $c$  = soortelijke warmte (kJ/(kgK)); voor water geldt 4,2 kJ/(kgK)

Stap 2 is het inschatten van de leidingdiameter op basis van het benodigde debiet en de maximale stroomsnelheid. Voor een vereenvoudigde berekening kunnen de volgende waarden voor de maximale stroomsnelheid worden gehanteerd, grofweg gebaseerd op ISSO publicatie 7:

- kleine leidingen (woningaansluitingen, tot ca DN80) → 0,8 m/s
- leidingen buurt distributie: ca 1,2 m/s
- grotere leidingen (> DN200): 2 m/s

$$\text{Benodigde binnendiameter} = \sqrt{\frac{\text{debiet}}{\text{snelheid}} \cdot \frac{4}{\pi}}$$

Voorbeeld 1: Voor een vermogen van 5 MW en een 18-11 warmtenet:

$$\text{debiet} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{5.000}{1000 \cdot 4,2 \cdot (18 - 11)} = 0,17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Benodigde diameter} = \sqrt{\frac{0,17}{0,8} \cdot \frac{4}{\pi}} = 0,330 \text{ m}$$

Voorbeeld 2: Voor een vermogen van 6 kW woningaansluiting en een 18-11 warmtenet:

$$\text{debiet} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{6}{1000 \cdot 4,2 \cdot (18 - 11)} = 0,0002 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Benodigde diameter} = \sqrt{\frac{0,0002}{0,8} \cdot \frac{4}{\pi}} = 0,018 \text{ m}$$

Bij de ingeschatte benodigde diameter kan een bepaald type leiding worden gekozen, meestal van de eerstvolgende diameter groter dan de benodigde diameter. Let op: de in de praktijk kleinste toegepaste leidingdiameter is DN25 (25 mm). Op basis van gekozen leidingtypes en bijbehorende isoaltiewaarden kunnen de warmteverliezen bepaald worden, zoals uitgelegd in de volgende paragraaf.

#### 5.4.4 [Distributieverliezen warmtenetten](#)

Als de leidingdiameters bekend zijn kunnen de distributieverliezen worden berekend volgens NEN 7125, p 35, zoals hier onder weergegeven.

##### 7.2.3 Rekenregels warmteweerstand leidingen

Bepaal voor grondgedekte leidingen de specifieke warmteweerstand volgens:

$$R_{\text{HD,dis};j} = f_{x;j} \times \left( \sum_i \left[ \frac{1}{2\pi \times \lambda_{k;jj}} \times \ln \left( \frac{D_{u;jj}}{d_{u;jj}} \right) \right] + \frac{1}{2\pi \times \lambda_{g;j}} \times \ln \left( \frac{4 \times h_j}{D_{u;j}} \right) \right) \quad (7.12)$$

Bepaal voor geïsoleerde leidingen in lucht de specifieke warmteweerstand volgens:

$$R_{\text{HD,dis};j} = f_{x;j} \times \left( \sum_i \left[ \frac{1}{2\pi \times \lambda_{k;jj}} \times \ln \left( \frac{D_{u;jj}}{d_{u;jj}} \right) \right] + \frac{1}{\pi \times h_{a;j} \times D_{u;j}} \right) \quad (7.13)$$

waarin:

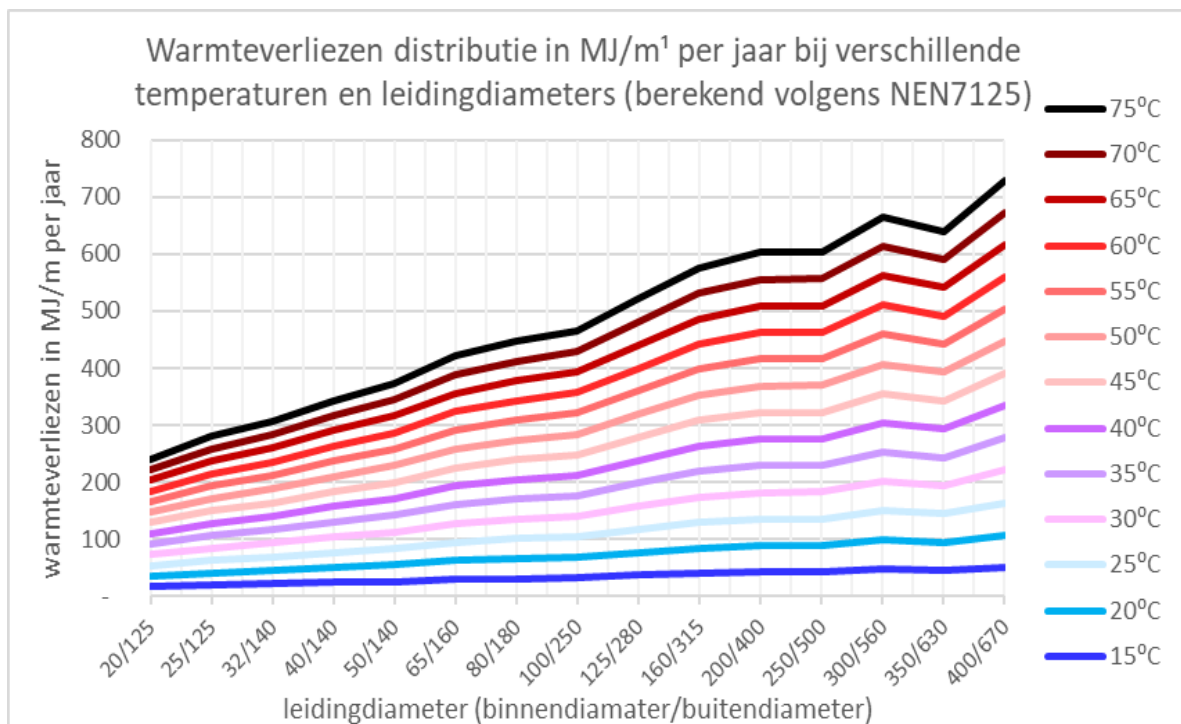
- $R_{HD,dis;j}$  is de specifieke warmteweerstand van leidingdeel  $j$ , in K·m/W;
- $f_{x;j}$  is de dimensieloze correctiefactor voor extra warmteverlies als gevolg van de beugeling en/of onvolkomen afwerking van de isolatie en voor minder warmteverlies doordat twee leidingen in één sleuf in de grond zijn aangebracht van leidingdeel  $j$ , bepaald volgens tabel 3;
- $\lambda_{k;j}$  is de warmtegeleidingcoëfficiënt van laag  $i$  van leidingdeel  $j$ , bepaald volgens NEN-EN-ISO 8497, naar boven afgerond in stappen van 0,001, in W/(m·K);

Traditionele hoge temperatuur warmtenetten hebben hoge warmteverliezen. De warmteverliezen van het Warmtenet van WPW (Amsterdam) zijn bijvoorbeeld 28% van de geproduceerde warmte ofwel 39% van de geleverde warmte (Wim Mans, 2018).

Lage en zeer lage temperatuur warmtenetten hebben aanzienlijk lagere verliezen, maar deze zijn niet verwaarloosbaar.

### Verliezen per m<sup>1</sup> leiding

Voor een goed geïsoleerd leidingtype en meerdere diameters en temperaturniveaus zijn de warmteverliezen berekend conform de methode zoals beschreven in NEN7125 (NEN 2017). De verliezen per m<sup>1</sup> voor verschillende diameters zijn weergegeven in Figuur 52. De voor deze grafiek gebruikte leidingtypen en getalswaarde zijn opgesomd in Tabel 14.



Figuur 52: warmteverliezen per m<sup>1</sup> voor verschillende diameters, die zijn weergegeven op de x-as, waarbij het eerste getal de binnendiameter en het tweede getal de buitendiameter betreft.



Tabel 14: Voorbeeld van enkele leidingdiameters van Prinspipe type 3, met binnen- en buitendiameter en isolatiewaarde, inclusief 800 mm gronddekking.

Type leiding	DN	du	Du,1	toelichting	Isolatiewaarde
Prinspipe_type3		mm	mm	zoals gebruikt in Figuur 39	[K.m/W]
DN20 (type 3)	20	27	125	20/125	8,44
DN25 (type 3)	25	34	125	25/125	7,25
DN32 (type 3)	32	42	140	32/140	6,62
DN40 (type 3)	40	48	140	40/140	5,93
DN50 (type 2)	50	60	140	50/140	4,75
DN65 (type 2)	65	76	160	65/160	4,21
DN80 (type 2)	80	89	180	80/180	4,00
DN100 (type 3)	100	114	250	100/250	4,38
DN125 (type 3)	125	140	280	125/280	3,91
DN150 (type 3)	150	168	315	160/315	3,54
DN200 (type 3)	200	219	400	200/400	3,38
DN250 (type 3)	250	273	500	250/500	3,38
DN300 (type 3)	300	324	560	300/560	3,06
DN350 (type 3)	350	356	630	350/630	3,18
DN400 (type 3)	400	406	670	400/670	2,79

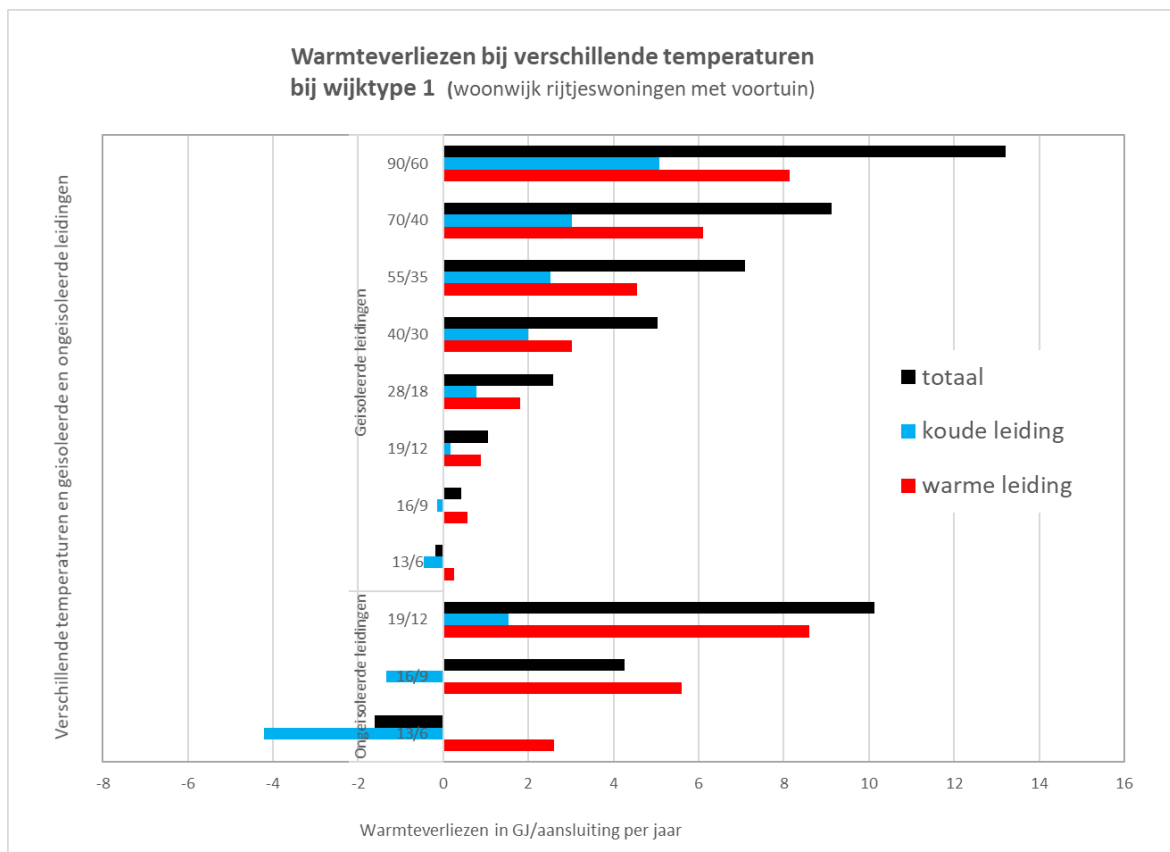
#### Verliezen per woningaansluiting voor twee voorbeeldwijken

In combinatie met de leidinglengtes zoals bepaald in stap 5 (paragraaf 3.6) kan het warmteverlies eenvoudig worden ingeschat. Voor twee wijktypen (wijk 1: wijk met rijtjeswoningen met voortuin; wijk 2: wijk met rijtjeswoningen zonder voortuin) zijn de warmteverliezen voor verschillende temperatuurniveaus bepaald en omgerekend naar warmteverlies per aansluiting. De leidinglengtes zijn hierbij gebaseerd op het schetsontwerp in *Figuur 34*. De voor deze berekening gehanteerde leidingtypen en lengtes zijn weergegeven in Tabel 15; de warmteverliezen per aansluiting zijn weergegeven in *Figuur 53* en *Figuur 54*, voor verschillende temperaturen.

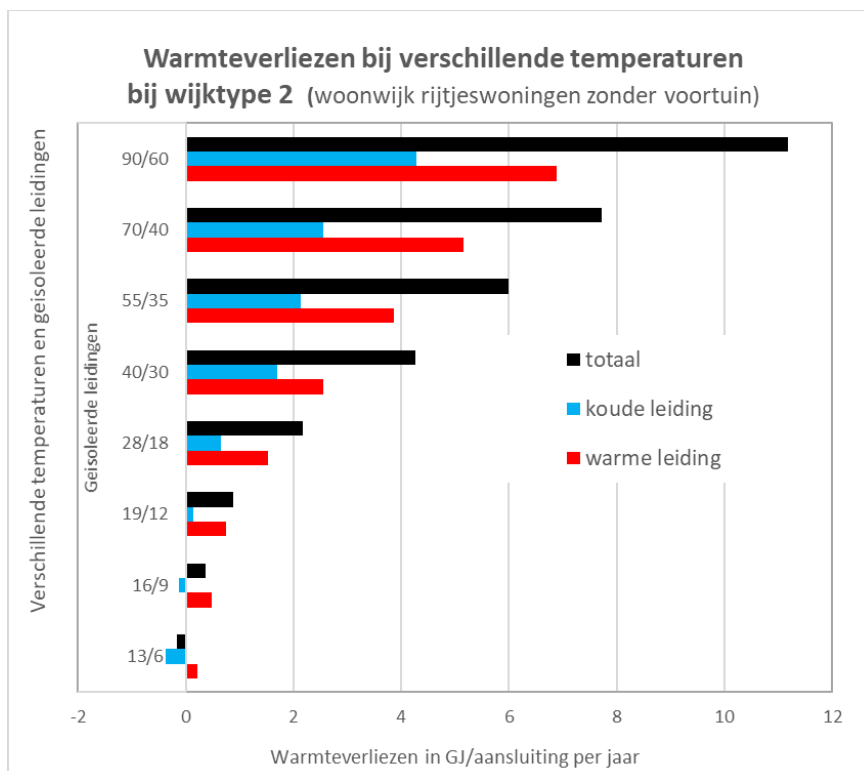
Tabel 15: Leidingtype en leidinglengtes voor 2 voorbeeldwijktypen, per aansluiting

Type leiding	Type leiding	DN	Isolatiewaarde	Wijktype 1 Lengte (tracé)*	Wijktype 2 Lengte (tracé)*
		[mm]	[K.m/W]	[m]	[m]
Prinspipe type 3	DN25 (type 3)	25,0	7,25	13,58	overige diameters gelijk aan wijktype 1
	DN40 (type 3)	40,0	5,93	0,38	
	DN50 (type 3)	50,0	5,45	0,52	
	DN65 (type 3)	65,0	4,83	0,87	
	DN80 (type 3)	80,0	4,55	0,57	
	DN100 (type 3)	100,0	4,38	0,69	
	DN125 (type 3)	125,0	3,91	1,33	
Coolmand	SDR11 180/280	180,0	2,40	0,22	
	SDR11 200/315	200,0	2,46	0,06	
	SDR11 225/315	225,0	1,83	0,15	
	SDR11 250/355	250,0	1,89	0,03	
Totaal:				19 m	13 m

\*NB: de gegeven leidinglengtes zijn voor het tracé: aanvoer en retour betekent 2 x het tracé.



Figuur 53: warmteverliezen voor een wijktype met rijtjeswoningen met voortuinen, afhankelijk van het temperatuur niveau in de leidingen. De getallen op de ij-as geven de temperaturen van warme- en koude leiding aan.



Figuur 54: warmteverliezen voor een wijktype met rijtjeswoningen zonder voortuinen, afhankelijk van het temperatuur niveau in de leidingen. De getallen op de ij-as geven de temperaturen van warme- en koude leiding aan.

Let op:

- 1) De verliezen zijn berekend voor enkele leidingen en zonder rekening te houden met een stooklijn. Wanneer DUO leidingen worden toegepast, gaan de verliezen met ca 35% omlaag. Ook kan het toepassen van een stooklijn (bijvoorbeeld lagere temperaturen in de zomer) leiden tot lagere warmteverliezen. In dat geval kan een getal tussen het temperatuurtraject in de winter en de zomer worden gebruikt als inschatting voor de warmteverliezen.
- 2) Het is belangrijk op te merken dat ook bij relatief lage temperaturen de warmteverliezen bij ongeïsoleerde leidingen al snel oplopen. Anders dan bij een WKO net is het dus bijna altijd raadzaam om KoWaNet warmtenetten geïsoleerd aan te leggen, of in elk geval de warme leiding te isoleren.

Voor meer detail achtergronden over isolatie van leidingnetten en de temperatuurdaling in het leidingnet t,g,v, deze verliezen, zie het [Technical Design Framework](#).

#### 5.4.5 Stilstandsverliezen boilers

De stilstandsverliezen (Qst) van boilervaten zijn afhankelijk van het volume en de isolatiegraad en de temperatuur in het boilervat en de omgeving. In onderstaande tabellen zijn de maximale verliezen per labelcategorie en per volume weergegeven, in kWh/jaar. Deze getallen zijn van toepassing op boilervaten t.b.v. tapwater.

Tabel 16: warmteverliezen boilervaten (S=stilstandverliezen in W, Qst = stilstandsverliezen in kWh/dag en Qst,jr =stilstandsverliezen per jaar)

LABEL A + opslagvaten   verlies kleiner dan:					LABEL A opslagvaten   verlies kleiner dan:				
	inhoud	S	Qst	Qst,jr		inhoud	S	Qst	Qst,jr
	l	W	kWh/dag	kWh/jr		l	W	kWh/dag	kWh/jr
	5	11,52	0,28	101		5	16,59	0,40	145
	10	13,44	0,32	118		10	19,18	0,46	168
	90	24,62	0,59	216		90	34,21	0,82	300
	120	26,95	0,65	236		120	37,34	0,90	327
	180	30,72	0,74	269		180	42,42	1,02	372
	200	31,81	0,76	279		200	43,88	1,05	384
	300	36,44	0,87	319		300	50,11	1,20	439
	500	43,46	1,04	381		500	59,55	1,43	522
	1000	55,58	1,33	487		1000	75,86	1,82	665
LABEL B opslagvaten   verlies kleiner dan:					LABEL C opslagvaten   verlies kleiner dan:				
	inhoud	S	Qst	Qst,jr		inhoud	S	Qst	Qst,jr
	l	W	kWh/dag	kWh/jr		l	W	kWh/dag	kWh/jr
	5	23,29	0,56	204		5	32,52	0,78	285
	10	26,90	0,65	236		10	37,58	0,90	329
	90	47,87	1,15	419		90	67,05	1,61	587
	120	52,25	1,25	458		120	73,20	1,76	641
	180	59,33	1,42	520		180	83,15	2,00	728
	200	61,37	1,47	538		200	86,01	2,06	753
	300	70,06	1,68	614		300	98,22	2,36	860
	500	83,23	2,00	729		500	116,71	2,80	1.022
	1000	105,98	2,54	928		1000	148,68	3,57	1.302

### 5.4.6 Pompenergie

Het rondpompen van water kost elektriciteit voor de pompen. Hoe meer volume rondgepompt moet worden, hoe meer energie hier voor nodig is. Een leidingnet met een klein temperatuurverschil tussen warme en koude leiding heeft dus meer pompenergie nodig om dezelfde hoeveelheid energie te verplaatsen.

De pompenergie kan op een vereenvoudigde manier als volgt worden ingeschat:

- Pompenergie [kWh(e)]=0,2\*V [m<sup>3</sup>]

Het volume kan worden bepaald op basis van de benodigde warmtelevering en de  $\Delta T$  tussen warme en koude leiding. Door de warmtelevering op jaarbasis om te rekenen naar het benodigde volume, kan de pompenergie in kWh(e) per jaar worden ingeschat.

In de KoWaNet 'SysteemEnergiePrestatie' Excel is voor verschillende  $\Delta T$ 's de pompenergie ingeschat. Door deze te delen door de geleverde warmte, kan ook een soort COP voor de pomp worden bepaald. Dit is een algemene factor die ook voor andere waardes van warmtelevering kan worden gebruikt.

In de Excelsheet kan ook een eigen  $\Delta T$  worden ingevuld.

Inschatting benodigde pompenergie voor het wijkwarmtenet					
Vereenvoudigde berekening: pompenergie [kWh(e)]=0,2*V [m <sup>3</sup> ]					
	kWh/jr	MJ/jr			
geleverde warmte/woning	1.000	3.600			
aantal woningen	1				
totale warmtevraag	1.000	3.600			
Benodigde Q		3.600.000 kJ			
cp	4,2	kJ/kgK			
rho	1000	kg/m <sup>3</sup>			
Benodigde massa (m) en bijbehorend volume voor transporteren van de benodigde Q:					
<i>afhankelijk van de DT tussen warme en koude leiding:</i>				Q=m*cp*DT	
DT	m	V	Berekende pompenergie [kWh] = 0,2*V	pompenergie in kWh elektriciteit per kWh warmte	COP pomp (kWh geleverde warmte/kWh elektriciteit)
K	kg (totaal/jaar)	m <sup>3</sup> /jr	kWh/jr	kWh_e/kWh_th	kWh_th/kWh_e
4	214.286	214	43	0,04	23
6	142.857	143	29	0,03	35
8	107.143	107	21	0,02	47
10	85.714	86	17	0,02	58
12	71.429	71	14	0,01	70
20	42.857	43	9	0,01	117
30	28.571	29	6	0,01	175
Eigen DT invullen:					
7	122.449	122	24	0,02	41

Figuur 55: schermafbeelding van de inschatting pompenergie in de KoWaNet 'SysteemEnergiePrestatie' Excel tool.

## 5.5 Overige bijlagen

### 5.5.1 Indeling temperatuurniveaus warmtenetten volgens ECW

Hier onder is de indeling temperatuurniveaus warmtenetten weergegeven zoals gehanteerd door het ECW:

## Lage Temperatuur Verwarming (LTV)

Naast de conventionele netten zijn ook andere systemen mogelijk. Een rapport opgesteld door CE Delft voor het functioneel ontwerp van LT-warmtenetten heeft de variaties samengevat in onderstaande tabel.

Type warmtenet	Aanvoertemperatuur	Kenmerken	Geschikte warmtebronnen
<b>Hogetemperatuur warmtenet (HT-net)</b>	>75°C	Directe levering van hogetemperatuur warmte voor zowel ruimteverwarming als warm tapwater.	Geothermie, biomassaketels en restwarmte (van industrie, afvalverbranding en energiecentrales)
<b>Middentemperatuur warmtenet (MT-net)</b>	55-75°C	Directe levering van middentemperatuur warmte voor zowel ruimteverwarming als warm tapwater.	Geothermie, biomassaketels, restwarmte (van industrie, afvalverbranding en energiecentrales), zonthermie en warmtepomp (i.c.m. met (Z)LT bron).
<b>Lagetemperatuur-warmtenet (LT-net)</b>	30-55°C	Directe levering van lagetemperatuur warmte voor ruimteverwarming. Redelijke isolatie en LT afgiftesysteem nodig; warm tapwater door middel van een boosterwarmtepomp.	Ondiepe geothermie, LT restwarmte (bijvoorbeeld uit koelprocessen), zonthermie en warmtepomp (i.c.m. met ZLT bron).
<b>Zeer lagetemperatuur warmte (ZLT) of bronnet</b>	10-30°C	Geen directe warmtelevering; zeer lagetemperatuur warmte ten behoeve van een combiwarmtepomp die zowel warmte voor ruimteverwarming als voor warm tapwater maakt. Redelijke isolatie en LT afgiftesysteem nodig.	Aquathermie (uit riool- en oppervlaktewater), ZLT restwarmte en zonthermie.

Om in ruimtes een gewenste comforttemperatuur van rond de 20°C te bereiken is het ondoelmatig om een invoer temperatuur van 90°C te hanteren. In de meeste gevallen is een aanvoertemperatuur van 55°C voldoende, waardoor er veel minder energieverliezen optreden.

*Figuur 56: Indeling temperatuurniveaus warmtenetten volgens de website van het Expertise Centrum Warmte en de topsector Energie.*

*<https://www.expertisecentrumwarmte.nl/themas/technische+oplossingen/techniekfactsheets+energiebronnen/warmtenetten/default.aspx#Watishet> (<https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmtenetten>)*

## 6 Literatuur

Afman, M. (2014). *Energiegebruik Nederlandse commerciële datacenters 2014 -2017, Nieuwbouwplannen en ontwikkeling energiegebruik*. Delft (NL): CE.

Afman, M., van Grinsven, A., & de Buck, A. (2014). *Energiebesparing door best beschikbare technieken voor koeling van serverruimtes*. Delft (NL): CE.

Van den Bovenkamp, M. (2016). *Het elektrisch energieverbruik en het warmteaanbod van koelinstallaties voor een veertigtal bedrijfssectoren*. Amersfoort (NL): KWA.

Agentschap NL, 2013. Zonthermische daken.

[https://www.rvo.nl/sites/default/files/Brochure%20zonthermische%20daken\\_0.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/Brochure%20zonthermische%20daken_0.pdf)

BZK (2016). *Cijfers over wonen en bouwen 2016*, Den Haag: Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.

Drift, B. van der. (2019). *De prestatie van verschillende renovatie scenario's. Hoe presteren verschillende renovatie scenario's voor portiekwoningen in corporatiebezit, m.b.t. de kosten, de energie prestatie, de mogelijkheid voor lage temperatuur verwarming en het implementatie gemak*. Afstudeerscriptie TU Delft faculteit Bouwkunde. (beschikbaar via: <https://repository.tudelft.nl/islandora/search/?collection=education> )

RVO. (2019). *Uniforme Maatlat Gebouwde Omgeving UMGO versie 4.3.2*.

<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/verduurzaming-warmtevoorziening/uniforme-maatlat-gebouwde-omgeving>.

DGMR, *Variantberekeningen voor eisen aan BENG*. (2015). Beschikbaar via

<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-544081.pdf>

Dupeyrat, P., Menezo, C., & Fortuin, S. (2014). *Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system*. Energy and Buildings, 68(PART C), 751–755. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.032>

Gasser, L et al. (2017). *High efficiency heat pumps for low temperature lift applications*. 12<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.

Geyer, R., Hangartner, D. Lindahl, M. Pedersen, S.V. 2019. *Annex 47 Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems. Final Report*. Oktober 2019

ISSO-publicatie 7. *Grondleidingen voor warmte- en koudetransport*. Publicatiedatum: 01-08-2012. ISBN: 978-90-5044-232-9

Jansen, S.C. and Woudstra, N. (2010). *Understanding the exergy of cold: theory and practical examples*. International Journal of Exergy 7(6): 693-713

Jansen, S.C. (2013). *Exergy in the built environment. The added value of exergy in the assessment and development of energy systems for the built environment*. Proefschrift TU Delft. (beschikbaar via [www.repository.tudelft.nl](http://www.repository.tudelft.nl)).

Keizer, C. de, Bottse, J., & Jong, M.de. 2017 (Update 2018). *PVT Benchmark. An overview of PVT modules on the European market and the barriers and opportunities for the Dutch Market*. SEAC, TNO.

Majcen, D. (2016). *Predicting energy consumption and savings in the housing stock : a performance gap analysis in the Netherlands*. Delft: Proefschrift TU Delft.

Mans, Wim. 2018. *Efficiëntie Warmtenet Amsterdam*.

NEN 7125 (2017). *Energieprestatienorm voor maatregelen op gebiedsniveau (EMG) – Bepalingsmethode.*

Schmidt et al. 2019. *LowEx communities - Optimised performance of energy supply systems with exergy principles (Annex 64) Final Report.* Fraunhofer Verlag.

<http://www.iea->

[ebc.org/Data/publications/EBC Annex 64 Final Report September 2019.pdf](http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_64_Final_Report_September_2019.pdf)

Sipma, J.M. & Rietkerk, M.D.A. 2016. *Ontwikkeling energiekentallen utiliteitsgebouwen. Een analyse van 24 gebouwtypen in de dienstensector en 12 industriële sectoren.* Januari 2016 ECN-E--15-068

VEWIN, 2016. *Drinking water fact sheet 2016*, The Hague: Association of Dutch Water companies.

